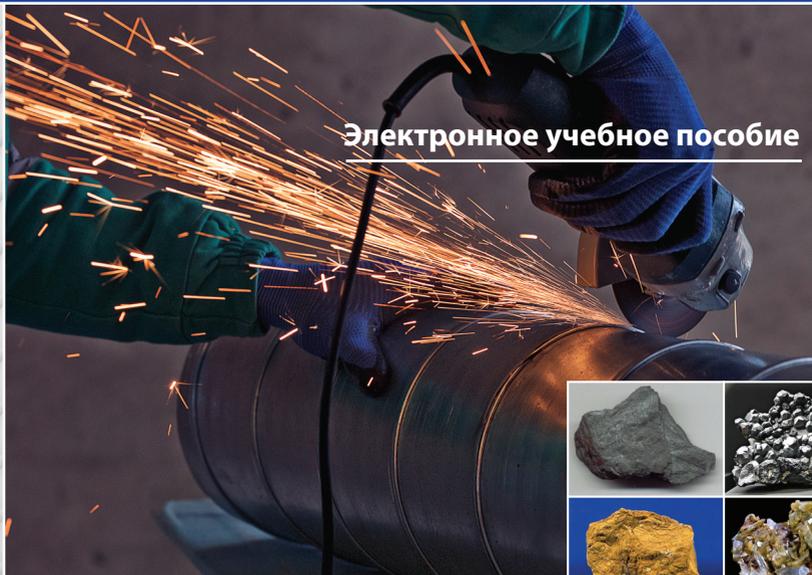


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Г.В. Мураткин, М.Н. Тюрков

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



Электронное учебное пособие

© Мураткин Г.В., Тюрков М.Н., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

ISBN 978-5-8259-1621-7

УДК 621.7(075.8)+669.01/09(075.8)
ББК 34.6я73+34.22я73

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник центра перспективных функциональных материалов и лазерных коммуникационных систем Университета ИТМО *М.В. Дорогов*;
д-р физ.-мат. наук, доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика» Тольяттинского государственного университета *Н.Н. Грызунова*.

Мураткин, Г.В. Технология конструкционных материалов : электронное учебное пособие / Г.В. Мураткин, М.Н. Тюрков. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2024. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1621-7.

В учебном пособии рассматриваются современные технологии получения материалов, их обработки и переработки, а также тенденции развития технологического оснащения и обеспечения производства.

Предназначено для студентов, обучающихся по техническим направлениям подготовки очной, заочной (в том числе с использованием дистанционной образовательной технологии) форм обучения.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Мураткин Г.В., Тюрков М.Н., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

Учебное издание

Мураткин Геннадий Викторович
Тюрьков Максим Николаевич

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Редактор *О.П. Корабельникова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использованы изображения
от freepik и BalashMirzabey на сайте ru.freepik.com

Дата подписания к использованию 26.04.2024.

Объем издания 21,8 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск,
первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-23-22.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	7
1. РЕЦИКЛИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	8
1.1. Жизненный цикл транспортно-технологических машин и комплексов	8
1.2. Понятие «рециклинг машин» и его виды	11
Выводы	25
Вопросы для самоконтроля	25
2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ	26
2.1. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей путем управления несущей способностью поверхностного слоя	26
2.2. Точность деталей	31
2.3. Волнистость поверхности деталей	36
2.4. Шероховатость поверхности деталей	38
2.5. Основные параметры качества материала деталей	42
Выводы	55
Вопросы для самоконтроля	55
3. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО	56
3.1. Материалы в металлургическом производстве	56
3.2. Подготовка шихты к доменному производству	63
3.3. Доменный процесс выплавки чугуна	66
3.4. Металлургия стали	76
3.5. Металлургия меди и алюминия	109
3.6. Порошковая металлургия	116
Выводы	124
Вопросы для самоконтроля	125
4. КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ	126
4.1. Стали	126
4.2. Чугуны	145
4.3. Твердые сплавы	148
4.4. Режущая керамика	151
4.5. Сверхтвердые инструментальные материалы	152
4.6. Медь и сплавы на основе меди	153
4.7. Алюминий и сплавы на основе алюминия	158
4.8. Магний и сплавы на основе магния	161
4.9. Титан и сплавы на основе титана	162

4.10. Баббиты	163
4.11. Керамические материалы	164
4.12. Композиционные материалы	165
4.13. Наноструктурные материалы	171
Выводы	176
Вопросы для самоконтроля	176
5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	177
5.1. Литейная форма	177
5.2. Брак литья и его причины	190
5.3. Специальные методы получения литых заготовок	192
Выводы	201
Вопросы для самоконтроля	201
6. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	202
6.1. Прокатка металлов	204
6.2. Прессование материалов	214
6.3. Волочение металлов	215
6.4. Свободная ковка	217
6.5. Объемная штамповка	221
6.6. Листовая штамповка	224
Выводы	226
Вопросы для самоконтроля	227
7. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ	228
7.1. Общее понятие о проектировании технологических процессов изготовления деталей	228
7.2. Токарная обработка в процессах изготовления деталей ...	237
7.3. Шлифование в процессах изготовления деталей	256
7.4. Развитие процессов механической обработки	261
7.5. Фрезерование в процессах изготовления деталей	265
7.6. Стругание в процессах изготовления деталей	267
7.7. Протягивание в процессах изготовления деталей	270
7.8. Осевая обработка в процессах изготовления деталей	272
Выводы	278
Вопросы для самоконтроля	278
8. ОТДЕЛОЧНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ	279
8.1. Полирование абразивными и алмазными лентами	279
8.2. Магнито-абразивная обработка	281
8.3. Суперфиниширование	282
8.4. Притирка.....	283
8.5. Хонингование	284

8.6. Отделочно-упрочняющая обработка	287
8.7. Выглаживание и обкатывание поверхностей	288
8.8. Обработка дробью	290
8.9. Вибрационное поверхностное деформирование	292
8.10. Электромеханическая обработка	294
8.11. Ультразвуковая безабразивная обработка	296
8.12. Технологический процесс изготовления детали	297
Выводы	301
Вопросы для самоконтроля	301
9. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ	302
9.1. Клепка материалов	303
9.2. Склеивание материалов	305
9.3. Резьбовые соединения материалов	306
9.4. Сварка плавлением	308
9.5. Сварка давлением	333
9.6. Газовая сварка	350
9.7. Газовая кислородная резка	352
9.8. Пайка металлов	353
Выводы	358
Вопросы для самоконтроля	358
10. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	359
10.1. Электрофизические методы обработки	360
10.2. Электрохимические методы обработки	362
Выводы	367
Вопросы для самоконтроля	367
11. УСКОРЕННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ПРОТОТИПОВ	369
11.1. Некоторые способы материализации 3D-моделей	373
11.2. Технология вакуумного литья	378
Выводы	380
Вопросы для самоконтроля	380
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	381
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	382
ГЛОССАРИЙ	386

ВВЕДЕНИЕ

Назревшая необходимость изменения сложившихся производственно-экономических отношений выдвинула на передний план проблему переоснащения конструкторско-технологического обеспечения промышленного производства, основанного на традиционных аналоговых технологиях. Дальнейшее развитие машиностроительного производства на базе компьютерно-интегрированной автоматизации связано с совершенствованием и качественным преобразованием существующих аналоговых технологий. Причем все новые инновационные разработки технологической направленности в соответствии с современными тенденциями должны проводиться в контексте технико-экономической и экологической целесообразности.

Целью изучения дисциплины «Технология конструкционных материалов» является знание современных технологий получения материалов, их обработки и переработки, а также тенденций развития технологического оснащения и обеспечения производства, которые направлены на получение высоких эксплуатационных свойств деталей, обеспечивающих высокую надежность и долговечность производимых транспортно-технологических машин и комплексов различного назначения (машины, объекты). Таким образом, предметом изучения дисциплины «Технология конструкционных материалов» являются все вопросы, касающиеся производственной деятельности в области машиностроения и связанных с ней отраслей переработки различных объектов.

Учебное пособие «Технология конструкционных материалов» предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», 15.03.01 «Машиностроение», 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 20.03.01 «Техносферная безопасность», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» очной, заочной (в том числе с использованием дистанционной образовательной технологии) форм обучения.

1. РЕЦИКЛИНГ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

1.1. Жизненный цикл транспортно-технологических машин и комплексов

Современное общество все больше сталкивается с экономическими кризисами, возникающими в том числе из-за деградации современной технической цивилизации. Признаками деградации являются прогрессирующие проблемы разрушения окружающей среды, истощение природных ресурсов, растущие социальные издержки неограниченного индустриального роста, все более очевидное несоответствие между уровнем научно-технического развития и удовлетворением потребностей человека. В рамках всего комплекса накопившихся проблем специалисты пытаются решить задачу рачительного использования материальных ресурсов путем управления жизненным циклом машин.

Жизненный цикл машины — это промежуток времени от начала разработки конструкции, проведения научно-исследовательских работ и обоснования технико-экономических показателей машины (стадия конструирования машины) до ее утилизации. Кроме того, жизненный цикл включает все стадии производства и эксплуатации машины до полного исчерпания ее рабочего ресурса. Исчерпание ресурса обусловлено наступлением предельного технического состояния машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация по назначению технически невозможна. Признаком предельного состояния машины является снижение технико-экономических характеристик: ухудшается качество работы, снижаются производительность, мощность и КПД, повышаются энергозатраты и др. Это состояние требует капитального ремонта, который проводится с целью восстановления работоспособности и ресурса машины. Однако он возможен лишь при наличии у большинства деталей остаточных ресурсов. В случае отсутствия остаточных ресурсов деталей из-за произошедших вследствие процессов старения необратимых изменений в структуре и свойствах большинства материалов восстановление машины до исправного работоспособно-

го состояния технически весьма затруднительно и экономически нецелесообразно, так как затраты на поддержание в работоспособном состоянии такой отремонтированной машины будут выше прибыли от её эксплуатации. Кроме того, нецелесообразность восстановления работоспособности отслужившей свой срок машины определяется мерами технической и экологической безопасности.

При своевременном проведении технического обслуживания машин в процессе эксплуатации поломки возникают сравнительно редко. Наряду с техническим обслуживанием выполняются все виды ремонтов (текущий, средний и капитальный), которые устраняют внезапные и постепенно возникающие в результате изнашивания отказы.

Текущий ремонт производится для восстановления работоспособности объекта путем замены изношенных деталей и узлов на новые.

Средний ремонт производится для восстановления исправности и частичного восстановления ресурса машины путем замены и восстановления деталей, узлов и агрегатов ограниченной номенклатуры.

Капитальный ремонт производится с целью устранения неисправностей и восстановления ресурса машины путем полной разборки машины и замены изношенных деталей, узлов и агрегатов на восстановленные комплектующие, включая базовые детали.

Главной задачей технического обслуживания и ремонта является экономически эффективное поддержание работоспособности машин в процессе эксплуатации. Так, периодическая регулировка технических систем, замена недолговечных деталей и узлов направлены на поддержание надежности в предписанных пределах.

Своевременное и качественное проведение технического обслуживания и ремонта позволяет в полной мере использовать конструктивно заложенный ресурс машины. Стадия эксплуатации является важнейшей составляющей жизненного цикла машины. Обычно она делится на циклы эксплуатации моментом проведения капитального ремонта (рис. 1). Стадия эксплуатации включает минимум два цикла и, следовательно, один капитальный ремонт.

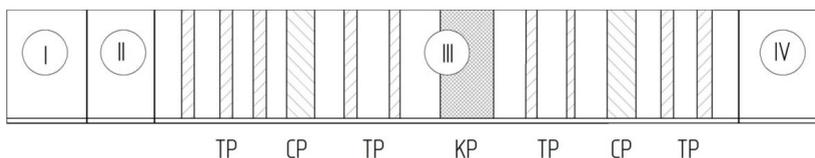


Рис. 1. Структурная диаграмма жизненного цикла машин:
 I – стадия конструирования; II – стадия производства; III – стадия эксплуатации; IV – стадия утилизации; ТР – текущий ремонт; СР – средний ремонт; КР – капитальный ремонт

Проведение капитального ремонта увеличивает продолжительность эксплуатации в предписанных условиях до выработки рабочего ресурса и обеспечивает гарантированную работу машины до следующего капитального ремонта. Обеспечение показателя надежности машин после капитального ремонта на уровне, близком к новому, зависит от уровня технологического обеспечения основного производства машин, определяющего качество продукции, и от степени совершенства технологий ремонта и организации работ в рамках ремонтного производства. Приемлемое качество капитального ремонта машины может быть обеспечено в условиях крупных ремонтных предприятий, имеющих современное высокопроизводительное оборудование, правильную организацию труда и технического контроля, гарантирующую высокую технологическую дисциплину на всех этапах проведения ремонтных работ. Продукцией такого ремонтного предприятия является, по существу, заново изготовленная (вторично изготовленная) обзавещенным методом машина из бывших в эксплуатации, но годных деталей, восстановленных изделий и новых запасных частей.

Основным направлением развития ремонтного производства является максимальная приспособленность к различным восстанавливаемым изделиям, близким по технологическому признаку. Это может быть реализовано за счет создания гибких производственных систем. Если в основном производстве высокая гибкость достигается при больших программах выпуска продукции, то в ремонтном производстве с небольшой программой ремонта вопрос повышения гибкости должен решаться за счет высокой степени перенастраиваемости технологического оборудования. Следовательно, современ-

ное ремонтное производство должно быть оснащено оборудованием с гибкой переналадкой, которое при переходе на обработку другой группы изделий не требует дополнительных вложений и остановки производства.

1.2. Понятие «рециклинг машин» и его виды

Транспортно-технологические машины и комплексы в процессе эксплуатации утрачивают свои потребительские свойства, превращаясь в неисправные, предельно изношенные объекты, эксплуатация которых должна быть прекращена из-за неустранимого выхода исходных технико-экономических параметров за установленные пределы. Эти объекты оказывают сильнейшее экологическое давление на окружающую среду. Снизить уровень загрязнения окружающей среды от воздействия предельно изношенных объектов можно за счет повышения эффективности их использования во время и после их эксплуатации. Для решения этой задачи, а также вопросов экономии невозобновляемых сырьевых ресурсов и энергии, в промышленно развитых странах создан новый промышленный сектор экономики – рециклинг машин. Целью рециклинга является возвращение исчерпавших ресурс машин и их компонентов к новому жизненному циклу либо в обновленном (восстановленном) виде, либо в каком-то ином, преобразованном виде, с новыми потребительскими свойствами.

Рециклинг является новой идеологией современной технической цивилизации, охватывающей все сферы производства, начиная с проектирования конструкции, её изготовления, эксплуатации и заканчивая утилизацией машин. Он представляет собой комплексную систему, объединяющую все ремонтные виды деятельности, которые реализуют замкнутый цикл безотходного производства.

В настоящее время рециклинг машин может осуществляться посредством реновации, конверсии или утилизации (рис. 2). При этом направление рециклинга для каждой конкретной машины определяется по результатам технико-экономической и экологической экспертиз.



Рис. 2. Структурная схема рециклинга машин

Реновация (от лат. *renovatio* — обновление, возобновление) машин, достигших своего предельного состояния, но имеющих ещё достаточно большую остаточную долговечность, представляет собой процесс, направленный на продление рабочего ресурса машин. Она, по сути, является определяющим фактором обеспечения жизнедеятельности машин в современных условиях. Реновация включает в себя ремонт и восстановление машин.

Ремонт с давних пор считался одним из основных способов возвращения машинам работоспособности в соответствии с требованиями технической документации. Под ремонтом понимается совокупность организационно-технических и технологических мероприятий, направленных на устранение неисправностей и отказов. И в настоящее время ремонт также широко применяется для продления жизненного цикла машин. Кроме того, у ремонта появилась

новая задача: модернизация машин с ограниченными техническими и потребительскими характеристиками.

Модернизация машин, производимая путем разного уровня сложности изменений их конструкции и замены комплектующих, направлена на расширение их технических возможностей и улучшение потребительских свойств в рамках заложенного конструкторами функционального назначения. Так, путем установки контроллеров нового поколения машинам придаются новые эксплуатационные характеристики или выходные параметры, отличающиеся от первоначальных значений.

При проведении ремонта машин существуют два основных направления восстановления работоспособности: замена изношенной детали на новую или замена изношенной детали на восстановленную. Первый путь является экстенсивным и наиболее дорогостоящим. Второй путь, хоть и более ресурсосберегающий и экологически чистый, но требует дополнительных материальных и трудовых затрат, связанных с процессом восстановления. Он позволяет в значительной мере снизить нагрузку, лежащую на основном производстве, по обеспечению предприятий запасными частями, которые составляют около 30 % всей машиностроительной продукции. Более того, восстановление деталей на ремонтных предприятиях в перспективе будет практически единственным источником пополнения предприятий запасными частями.

Как показывает многолетняя мировая практика, у машин, поступающих в капитальный ремонт, только 20 % деталей подлежат выбраковке и утилизации, тогда как 20 % пригодны для дальнейшей работы без восстановления, а 60 % можно восстановить. Однако еще в советские времена у многих производителей и работников сферы государственного управления нашей страны сложилось предосудительное отношение к капитальному ремонту как к неэффективному мероприятию. Они ратовали за безремонтный принцип использования, основанный на создании равнопрочной машины, которую после регламентного срока службы можно, как одноразовую посуду, отправлять в утиль. При этом все разговоры о необходимости развития реновационного производства называли «колхозными замашками». Такое мнение основывалось

на факте, что в большинстве случаев качество и долговечность восстановленных машин было ниже качества новой техники, а стоимость ремонтных работ при этом была достаточно высокой. Происходило это из-за низкого уровня ремонтных технологий и оборудования, недостаточной культуры производства и нарушений технологической дисциплины. Противниками капитального ремонта приводился еще один довод: в промышленно развитых странах реновация машин не проводится. По этой причине ремонтным предприятиям отводилась второстепенная роль, ограниченная финансированием по остаточному принципу. Однако за рубежом вопросами обеспечения рационального сервиса производители начинают заниматься уже в период создания новой техники. Причем размер затрат на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт является одним из основных показателей ее будущей конкурентоспособности, а восстановление дорогостоящей техники считается весьма выгодным делом. Так, на специализированном ремонтном предприятии «Интернешнел Харвестер» в Чикаго (США) стоимость восстановления агрегатов составляет 20–25 % от стоимости изготовления новых изделий. Отпускная цена восстановленных агрегатов в среднем на 20 % меньше цены новых. При этом производитель гарантирует ресурс восстановленной техники не менее ресурса новой. Это стало возможным благодаря новым ремонтным технологиям, высокому уровню культуры производства и внедрению в ремонтное производство поточной линии. Опыт этой фирмы получил широкое распространение в промышленно развитых странах, так как реновация сельскохозяйственной, дорожно-строительной техники и автомобилей стала приносить значительную прибыль.

В настоящее время в реновационных отраслях развитых стран мира задействовано около 30 % технологического оборудования и рабочих, а все специализированные предприятия, на которых они работают, можно подразделить на три основных типа:

1. Сеть ремонтных предприятий, созданная специализированными службами крупных фирм – изготовителей техники у своих дилеров. Службы занимаются технологическим оснащением и организацией участков, цехов или поточных линий по ремонту и восстановлению агрегатов ограниченной номенклатуры.

2. Отдельные специализированные заводы по ремонту и восстановлению агрегатов и узлов определенной номенклатуры, которые непосредственно не связаны с каким-то одним производителем. Уровень производства на этих заводах ограничен годовой программой восстанавливаемых изделий, выпускаемых различными фирмами.

3. Небольшие фирмы, занимающиеся восстановлением узко-специализированной номенклатуры изделий (не более двух-трех наименований).

Еще одним аргументом в пользу развития реновационного производства является резолюция участников II Международного конгресса «Surface Engineering», проходившего в Великобритании в конце 80-х годов прошлого века, которые признали приоритетным направлением в области технической политики повышение долговечности и надежности изделий путем нанесения различного рода покрытий на рабочие поверхности, их упрочнение и восстановление первоначальных размеров и свойств всевозможными технологическими методами.

Восстановление деталей – это процесс возобновления исправного состояния и ресурса деталей путем возвращения им утраченной из-за изнашивания части материала и доведения до нормативного уровня свойств, изменившихся за время длительной эксплуатации машин. Восстановление изношенных деталей является основой всего процесса ремонта машин.

Для того чтобы обеспечить ресурс ремонтируемых деталей не менее ресурса новых изделий, восстановление необходимо проводить с помощью прогрессивных технологий и методов, а также с использованием материалов высокого качества. При этом, помимо обеспечения необходимых размеров и формы деталей, при восстановлении требуется уделять большое внимание повышению эксплуатационных свойств рабочих поверхностей путем формирования слоя с особыми свойствами, обладающего высокой несущей способностью. Для этого необходимо знать условия эксплуатации, механизм разрушения поверхностей и характер зависимости эксплуатационных свойств от параметров качества поверхностного слоя, таких как микрогеометрия, структура, твердость, остаточные напряжения и др. В этой связи раз-

работка эффективных технологий восстановления деталей сложной формы, изготовленных из материалов с высокими прочностными и специальными свойствами, в настоящее время является актуальной задачей для ремонтных предприятий.

Несмотря на запаздывающее развитие ремонтных технологий, они в последние годы начали оказывать большее влияние на технологии основного производства. Для примера можно отметить, что если при выпуске продукции некий размер оказывался ниже допустимого, то это являлось неисправимым браком, тогда как для реновационного производства это обычный устранимый дефект. В результате для «спасения» брака основное производство заимствовало из ремонта различные технологии наращивания размеров (например, напыление, наплавка, напекание и др.). Сейчас в основном производстве введение в технологический процесс изготовления биметаллических (двухслойных) деталей операций напыления и наплавки износостойкого, высокопрочного покрытия на низкоуглеродистые стали позволяет резко повысить качество изделий, сэкономить дорогостоящие специальные металлы и сплавы и тем самым снизить себестоимость продукции. Кроме того, технологии восстановления дают возможность принципиально изменить пути достижения точности. Так, традиционные методы достижения точности путем удаления материала поверхностного слоя заготовки (состоящей из однородного материала) механической обработкой режущими инструментами в ряде случаев заменяются новыми методами, основанными на процессах нанесения материала в виде тончайших слоев, которые позволяют буквально конструировать деталь и получать ее размеры с высокой точностью.

В настоящее время реновация машин является самым эффективным направлением рециклинга, так как затраты на восстановление изношенных объектов с помощью прогрессивных технологий и энергосберегающих методов составляют 30–50 % от первоначальной стоимости изделий. При этом реновация деталей, узлов и машин с учетом выбраковки из-за производственных ошибок испорченных деталей и технологических отходов наряду с экономией материальных, энергетических и трудовых ресурсов многократно снижает загрязнение окружающей среды. По сути, это самое эколо-

гически чистое и энергосберегающее производство, не требующее значительных инвестиций, которому на сегодня нет экологической и экономической альтернативы. Экономический эффект от реновации можно оценить разностью затрат на изготовление новой машины и на её восстановление, отнесенных к ресурсу техники.

Однако в силу морального и физического старения машин всегда будет существовать потребность в их утилизации, и, следовательно, конструкция машин должна быть к этому максимально приспособлена.

В этой связи перед конструкторами при проектировании машины стоят две взаимосвязанные и во многом противоречивые задачи. Во-первых, необходимо спроектировать работоспособную и надежную машину, т. е. машину, стабильно и качественно выполняющую заданные функции на всем максимально длительном периоде эксплуатации. Во-вторых, необходимо, чтобы в конце периода эксплуатации машина была способна прекращать выполнение своих функций и исчезать без большого материального ущерба и вредных воздействий на окружающую среду. Решение в полной мере этой дилеммы в настоящее время не представляется возможным, так как это предполагает создание такой машины, которая бы через запрограммированное время сама бесследно исчезала или преобразовывалась в массу полезных материалов для вторичного использования.

Второе направление рециклинга — *конверсия* (от лат. *conversio* — обращение, превращение) неисправных машин, представляющая собой комплекс мероприятий, направленных на техническую доработку машин и компонентов (не обладающих свойствами, позволяющими перевести их в разряд реновируемых объектов) с целью дальнейшего их использования по иному функциональному назначению. Так, незначительная конструкторская доработка авиационного двигателя позволяет использовать его для создания больших воздушных потоков при сушке зерна на промышленных элеваторах, а доработка коробки передач автомобиля позволяет использовать её в конструкциях различных стендов для испытаний узлов, агрегатов и др.

Третье направление — экономически и экологически приемлемая *утилизация*, в основе которой лежит переработка машин и вто-

ричное использование их металлов, неметаллических материалов и эксплуатационных технических жидкостей.

Следует подчеркнуть, что утилизация (от лат. *utilis* – полезный, употребление с пользой) – это не столько процесс уничтожения (захоронения) невосстанавливаемых машин (восстановление которых невозможно или нецелесообразно), сколько процесс их вторичной переработки. Она представляет собой систему, которая включает комплекс технологических, конструкторских и организационных мероприятий, направленных на сбор, транспортирование, сортировку и переработку не подлежащих ремонту и конверсии машин с целью получения вторичной продукции и энергии. Утилизация, являющаяся, по сути, ремонтным направлением, показывает, что безремонтный принцип использования равнопрочных машин на самом деле не является чисто безремонтным и подтверждает безусловную необходимость проведения ремонта.

В основном утилизация реализуется по старинке, путем пресования старых машин и перевозки лома черных металлов железнодорожным транспортом на металлургические комбинаты, которые выдают свою продукцию машиностроительным предприятиям. По существу, такую технологию вторичной переработки вряд ли можно признать экономически и экологически эффективной, ведь при прессовании машин без их предварительной разборки в брикете вместе с черными металлами оказываются легированные и цветные сплавы, там же остаются неметаллические компоненты (примерно 8 % грязи и стекла и около 12 % неметаллических сгораемых материалов). Выделить неметаллы при переплавке из общей массы скрапа, используемого в мартеновском процессе, технологически невозможно, что, безусловно, отрицательно сказывается на качестве выплавляемого металла. Поэтому далеко не все современные металлургические комбинаты принимают на переплавку старые машины. С другой стороны, в отслужившей свой срок машине содержится масса полезных материалов: сталь и сплавы, пластик, стекло, технические эксплуатационные жидкости и др. При наличии у перерабатывающих предприятий современных технологий и оборудования вторичная переработка могла бы приносить прибыль, соизмеримую с промышленным производством.

Существуют современные технологии вторичной переработки с использованием специального оборудования, например шредеров (от англ. *shread* – разрывать). В отличие от пресса шредер не брикетировать машину, а измельчает ее на мелкие фракции (рис. 3). Полученный с помощью шредерной установки лом черных металлов, называемый металлическим шротом, характеризуется высокой насыпной плотностью и отсутствием примесей. Такой лом является весьма ценным видом сырья для металлургических производств.

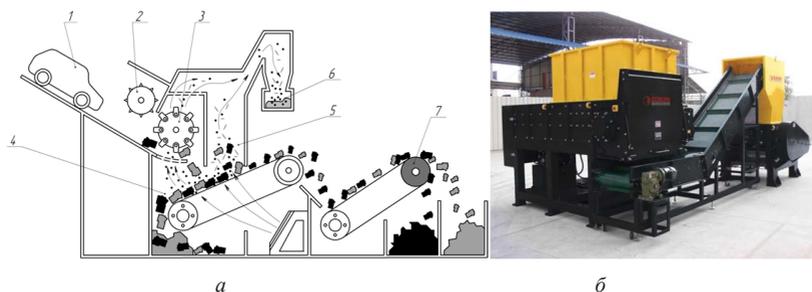


Рис. 3. Линии по переработке автомобилей:
а – схема; *б* – внешний вид; 1 – автомобиль; 2 – разрыватель;
 3 – шредер; 4 – гравиметрический сепаратор; 5 – пневматический сепаратор; 6 – пылесборник; 7 – магнитный сепаратор
 (wikipedia.org)

Зарубежный опыт показывает, что проблему переработки отслуживших свой срок машин необходимо решать прежде всего законодательно. Основная масса бюджетных средств должна направляться на организацию перерабатывающих предприятий при одновременном введении жестких санкций за загрязнение окружающей среды от неисправных машин и запрещении организации новых открытых полигонов и свалок.

Система зарубежной утилизации машин включает в себя комплексные мероприятия по приемке отработавших свой срок машин, их технико-экономической и экологической оценке, сливу всех эксплуатационных жидкостей, частичному демонтажу навесных узлов и агрегатов, переработке невозстанавливаемых объектов, реализации снятых кондиционных изделий на вторичном рынке

сбыта, переплавке металлического шрота, обезвреживанию и захоронению отходов вторичной переработки.

Нельзя не отметить, что даже в самых современных полных цепочках утилизации старых машин экономически выгодно далеко не все их звенья. Особенно это касается вопросов организации сбора, транспортирования и экологически безопасного демонтажа машин. Для устранения всех затратных операций, так называемых узких мест, на системы утилизации правительством должны выделяться необходимые финансовые средства, которые ранее были получены от производителей, дилеров и предприятий, например, путем сбора налогов.

В зависимости от технических возможностей перерабатывающие предприятия используют стационарные или мобильные шредерные установки и разного уровня сложности технологии вторичной переработки, которые основаны на различной глубине демонтажа машин. При этом следует отметить, что самые передовые технологии, позволяющие получать высокую чистоту и насыпную плотность металлургического вторсырья и тем самым обеспечивать снижение времени и повышение качества переплавки лома, требуют более глубокого демонтажа машин.

Отходы вторичной переработки (полимеры, обивка, стекло и др.), называемые шредерными остатками, составляют примерно 20–25 % от массы машины. Они, как правило, подлежат так называемой примитивной утилизации путем сжигания и захоронения, выполняемой лишь с экологической целью – не допустить попадание вредных веществ в окружающую среду.

По-видимому, создать абсолютно экологически чистую, безотходную технологию утилизации машин человечеству предстоит только в будущем.

Для достижения этой цели конструкторам машин необходимо прежде всего максимально сократить применение материалов, содержащих неперерабатываемые и токсичные вещества, которые способны нанести вред человеку и окружающей среде при их утилизации, заменив их по мере возможности современными биоразлагаемыми материалами. При этом на стадии изготовления комплектующих изделий на все применяемые материалы следует

устанавливать специальный знак, означающий пригодность к утилизации, и кодовый номер, указывающий на вид используемого материала. Кроме того, при выборе конструкционных материалов необходимо обращать внимание не только на их прочностные свойства, обрабатываемость (способность легко обрабатываться при осуществлении технологического процесса изготовления изделий) и удобство применения по назначению (например, смазочных материалов), но и учитывать их утилиепригодность, т. е. технологическую способность материалов легко и просто разбираться и отделяться друг от друга, а также безопасно перерабатываться.

Особый интерес в цикле вторичной переработки представляет утилизация бывших в употреблении автомобильных шин.

Проблема невосполнимости природного нефтяного сырья для ведущих стран мира предопределила вторичное использование изношенных автомобильных шин с максимальной эффективностью путем «полного» их рециклинга, т. е. восстановления, конверсии или переработки. Однако в России в большинстве случаев вместо вторичной переработки изношенные шины подвергаются примитивной утилизации путем сжигания. При их сгорании в атмосферу выделяется масса токсичных веществ: бензопирен, сажа, диоксин, фуран, полиароматические углеводороды, полихлорированные бифенилы, мышьяк, хром, кадмий и т. д., которые наносят серьезный ущерб окружающей среде. Очевидно, что такой способ утилизации шин является неэффективным и крайне вредным с экологической точки зрения. Вместе с тем существуют современные технологии рециклинга шин, которые позволяют получать значительную прибыль.

По данным Европейской ассоциации по вторичной переработке шин (ЕТРА), восстановлению подлежат около 15 % автомобильных шин, вышедших из строя вследствие износа протектора и при этом не имеющих существенных повреждений. Их восстановительный ремонт производят методом «наваривания» нового протектора с одновременным формированием рисунка («горячая» вулканизация) и методом «холодной» вулканизации, осуществляемым при температуре около 100 °С с использованием порошков, которые ускоряют процесс приклеивания ленты с заранее нанесенным

рисунком. Необходимо отметить, что при восстановлении предпочтение отдают шинам грузового автотранспорта вследствие высокой стоимости его новых колес. В этом случае восстановление одной изношенной шины обходится в среднем в 2–3 раза дешевле изготовления новой шины.

Конверсия изношенных шин осуществляется путем механического разрезания их на части и фрагменты, которые в дальнейшем используют в качестве строительных материалов для защиты почв от эрозии, укрепления берегов искусственных водоемов и др. Установлено, что шины имеют большую долговечность в грунте и спокойной воде, поэтому такое их вторичное использование приносит значительный экономический и экологический эффект.

Оставшуюся часть изношенных шин перерабатывают двумя основными способами – физическим и химическим.

Физический способ является одним из высокопроизводительных и наиболее распространенных способов измельчения автомобильных шин, при котором резина не претерпевает каких-либо физико-химических изменений и полностью сохраняет свою структуру.

Одной из самых простых технологий, разработанных на основе физического способа, является технология ресалтинга – механического дробления шин в экструдер-измельчителях, оснащенных сепарационной техникой. В результате механической переработки получают резиновую крошку (65 %), у которой наиболее полно сохраняются свойства каучука, металлические (25 %) и текстильные (10 %) отходы.

После утилизации шин существует широкая возможность дальнейшего использования резиновой крошки, в том числе для производства предметов широкого потребления, но это требует дополнительной обработки. Крошка может быть использована в качестве регенерата для резиновых производств, добавки при изготовлении асфальтобетона, сорбента для сбора нефти с поверхности воды, наполнителя при производстве антикоррозийной мастики, гидроизоляционных материалов, герметиков для бесшовной кровли и многого другого.

Гораздо быстрее и легче процесс измельчения шин происходит при низких температурах ($-90\text{ }^{\circ}\text{C}$), когда резина находится в псев-

дохрупком состоянии. Измельчение резины при низких температурах существенно снижает энергозатраты на дробление, улучшает отделение металла и текстиля от резины. В большинстве случаев охлаждение резины осуществляют жидким азотом, который является достаточно дорогостоящим технологическим средством, что является сдерживающим фактором для широкого применения на практике технологии низкотемпературного измельчения шин. Более экономически выгодным является процесс охлаждения шин при помощи воздушных турбоохладительных установок, которые позволяют в 3–4 раза снизить себестоимость получения полупродукта по сравнению с охлаждением жидким азотом.

Существуют и другие технологии переработки автомобильных шин, которые основаны на новейших научно-технических достижениях. Среди них широкое распространение получила бародеструкционная технология вторичной переработки шин, в которой используемое высокое давление позволяет перевести резину в вязкотекучее состояние. В этом состоянии осуществляется измельчение резины путем выдавливания псевдожидкой массы через отверстия специальной камеры. Эта технология позволяет достаточно легко отделить резину от металлического корда и бортовых колец.

Безусловно, большой интерес представляют новые технологии, такие как измельчение озоновым потоком и микробиологическая переработка бывших в употреблении автомобильных шин, которые благодаря способности озона подавлять все токсичные выбросы и избирательному воздействию микробов стали одними из самых экологически безопасных технологий утилизации шин.

На основе химического способа переработки вышедших из эксплуатации шин разработаны технологии, которые направлены в основном на получение вторичной энергии. В основе этих технологий лежат высокотемпературные процессы (сжигание, крекинг, пиролиз), которые приводят к полному разрушению структуры и свойств резины.

Высокотемпературная переработка шин проводится двумя методами: прямым методом, при котором их сжигают в струе кислорода, и косвенным методом, основанным на термическом разложении резины.

В первом случае цельные или измельченные (фракции размером 50–100 мм) шины используют в качестве высококалорийного альтернативного топлива в целлюлозно-бумажном, цементном и других производствах. Резиновая крошка, как топливный материал, применяется также в качестве горючей добавки при сжигании угля или горючих сланцев с целью повышения их теплотворной способности.

Во втором случае с помощью технологии пиролиза получают горючий газ, который используют в качестве топлива в различных производствах.

Японские специалисты, проводившие сравнительный экономический анализ различных технологий утилизации изношенных шин, пришли к выводу, что пиролиз является наиболее эффективной технологией переработки шин.

Пиролиз автомобильных шин, осуществляемый при температуре 425–650 °С в условиях пониженного давления и отсутствия кислорода, позволяет провести разложение и возгонку органических материалов без окисления металлических составляющих. Он дает возможность из 1 т перерабатываемых шин получить 450–600 л пиролизного масла, 250–320 кг пиролизной сажи, 55 кг металла и 10,2 м³ пиролизного газа. Полученные низкомолекулярные углеводороды в большинстве случаев применяют в качестве альтернативного топлива. Ароматические масла, выделяемые из газообразной фракции пиролиза, используют для приготовления резиновых смесей в производстве резинотехнических изделий. Тяжелую углеводородную фракцию пиролиза применяют в качестве добавки к битуму, который используют в производстве асфальта, а пиролизную сажу — в производстве пластификаторов и смягчителей регенерации резины.

В связи с возрастающей актуальностью экологических проблем возрастает рециклинговая направленность развития технологий и техники. Безусловно, этот сектор экономики в ближайшем будущем будет только развиваться и привлекать все большее внимание инвесторов.

Выводы

1. Рециклинг машин позволяет снизить уровень загрязнения окружающей среды от воздействия предельно изношенных объектов, решить вопросы экономии невозобновляемых сырьевых ресурсов и энергии.

2. Самым эффективным направлением рециклинга машин является реновация, позволяющая вернуть исчерпавшие ресурс объекты к новому жизненному циклу либо в обновленном виде, либо в преобразованном виде, с новыми потребительскими свойствами.

Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью проводится текущий ремонт машин?
2. С какой целью проводится капитальный ремонт машин?
3. В каких случаях целесообразно проведение капитального ремонта машин?
4. Что такое «жизненный цикл» машины?
5. В чем заключается модернизация машин?
6. В чем заключается цель рециклинга?
7. Что включает в себя рециклинг?
8. Что разделяет циклы эксплуатации машин?
9. Что такое ремонт?
10. Что такое конверсия?

2. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

2.1. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей путем управления несущей способностью поверхностного слоя

В общем случае качественная эксплуатация машины (объекта) определяется ее нормативной работоспособностью и высокой надежностью.

Работоспособность – состояние машины, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Надежность – состояние машины, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Надёжность – это комплексное свойство, которое в зависимости от назначения машины и условий ее эксплуатации может включать следующие свойства.

Безотказность – свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки (продолжительности или объёма работы машины).

Сохраняемость – свойство машины сохранять в заданных пределах обусловленные эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в технической документации.

Качественная эксплуатация машины должна продолжаться в течение регламентного (установленного) срока службы, заложенного конструктором, и ее технологическая долговечность должна соответствовать этому сроку.

Долговечность – свойство машины сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Предельным состоянием называют такое состояние машины, при котором ее дальней-

шая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого ухода заданных выходных параметров за установленные пределы.

Эффективное поддержание работоспособности машины во время эксплуатации во многом зависит от своевременного и качественного проведения различных ремонтов, а следовательно, машина к этому должна быть максимально приспособлена и должна обладать высокой ремонтпригодностью.

Ремонтпригодность — приспособляемость машины к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путём проведения технического обслуживания и ремонтов. Отказом называют такое событие, которое заключается в нарушении работоспособности машины.

Современные технические средства состоят из множеств взаимодействующих узлов, механизмов, агрегатов. Например, в современных автоматизированных прокатных комплексах насчитывается более миллиона деталей, современные системы управления ракетами имеют десятки миллионов элементов, тогда как первые простейшие механизмы и машины состояли только из десятков или сотен деталей. Отказ в работе хотя бы одного ответственного элемента сложной технической системы может привести к выходу из строя всей системы, к браку выпускаемых изделий, простоя оборудования, прекращению снабжения населения электроэнергией, газом, водой, иногда к аварии, связанной с опасностью для человеческой жизни. Поэтому повышение надежности и долговечности машин является одной из важнейших конструкторско-технологических задач. Надёжность машин в первом приближении можно оценивать двумя свойствами: безотказностью и сохраняемостью.

Совершенно очевидно, что надежность машин зависит от уровня технологического развития производства, его технологической оснащённости и др. Невозможно достигнуть высокой надежности и долговечности машин при низкой технологии изготовления комплектующих, с непрогрессивным рабочим процессом обработки, устаревшим оборудованием и несовершенной системой организации производства.

Безусловно, высокая надежность машин зависит от качества комплектующих изделий. Под качеством изделия (объекта) пони-

мают совокупность свойств и характеристик, обуславливающих его способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением.

Область техники, объединяющую количественные критерии и методы оценки качества выпускаемой продукции, называют квалиметрией. Ее основными задачами являются определение номенклатуры необходимых показателей качества изделий и их оптимальных значений, обуславливающих высокую работоспособность, надежность и долговечность машин.

Технико-экономическое понятие «качество продукции» является сложным, так как охватывает большое разнообразие показателей и свойств продукции. Понятие «качество продукции» включает эксплуатационные свойства (износостойкость, контактная жесткость и др.) и показатели качества (точность размеров, шероховатость поверхности, твердость и др.), которые обуславливают эти свойства. Причем эксплуатационных свойств, определяющих основное назначение изделия, может быть не одно, а несколько. Например, для обеспечения требуемых показателей надежности и долговечности детали, работающей в условиях трения скольжения в атмосфере агрессивной среды, необходимо придать изделию не только высокую износостойкость, но и достаточную коррозионную стойкость.

Достижение высоких эксплуатационных свойств изделий обеспечивается путем выбора соответствующего материала и проектирования такой технологии, которые позволяют получить требуемый оптимальный комплекс физико-механических свойств и параметров поверхностного слоя деталей.

Эксплуатационные свойства деталей машин зависят от состояния поверхностного слоя, оптимальных значений показателей его качества, его несущей способности. В качестве критерия несущей способности деталей следует выбирать показатель, наиболее полно характеризующий их способность выполнять заданные функции в предписанных условиях нагружения. Так, в зависимости от условий эксплуатации в качестве критерия несущей способности деталей могут быть использованы: предельная нагрузка, время и число циклов до образования дефектов, пределы прочности, ползучести, выносливости, критические деформации, твердость поверхностей

и многое другое. Например, в качестве критерия несущей способности соединений с натягом достаточно часто используют усилие распрессовки, а подвижных сопряжений – коэффициент трения.

Несомненно, несущая способность зависит от всей совокупности свойств материала, параметров качества поверхности и точности детали, полученных в процессе обработки.

Обеспечение эксплуатационных свойств путем управления несущей способностью поверхностного слоя показано на рис. 4.

Состояние поверхностного слоя в процессе эксплуатации и условия нагружения образуют сложную динамическую систему, которая должна находиться в состоянии квазистатического равновесия.

Изменение состояния поверхностного слоя при работе детали влечёт за собой изменение условий нагружения и формирование площади контакта, т. е. изменение одного фактора должно непременно компенсироваться изменением другого фактора, приводящего систему в равновесие. Так, приработка рабочих поверхностей и формирование вторичных структур приводят к снижению коэффициента трения в подвижных сопряжениях, в результате чего уменьшаются действующие нагрузки, изменяется характер их воздействия в условиях установившегося режима работы. Это увеличивает несущую способность поверхностного слоя.

Возможны такие сформированные параметры поверхностного слоя, при которых для данных условий нагружения равновесное состояние динамической системы не наступает, так как не образуются стабильные вторичные структуры. В этом случае не обеспечиваются нормальные условия контактного взаимодействия: увеличиваются рабочие нагрузки и температура в зоне трения. В результате образуются задиры и наблюдается интенсивное изнашивание рабочих поверхностей. Поэтому эксплуатационные свойства поверхностного слоя в ходе процесса изготовления, особенно на операциях окончательной обработки, должны формироваться целенаправленно, с учётом конкретных условий эксплуатации и возможного механизма разрушения.

Достижение качества и экономичности продукции является сложной задачей, которая зависит от технологического обеспечения и средств технологического оснащения производства, возмож-

ностей управления ходом технологического процесса изготовления, способов контроля и испытания готовой продукции.



Рис. 4. Схема обеспечения эксплуатационных свойств путем управления несущей способностью поверхностного слоя

2.2. Точность деталей

При изготовлении деталей технологи особое внимание обращают на один из важнейших показателей качества — точность. Под точностью детали понимают соответствие ее геометрических параметров (размеров, формы и взаимного положения исполнительных поверхностей) требованиям чертежа и технических условий.

Точность необходима не только для непосредственного выполнения изделием служебного назначения, но и является одной из предпосылок длительной его эксплуатации. Этим объясняется непрерывное повышение требований к точности изготовления деталей и машин в целом. Примечательно, что за последнее столетие точность деталей машин выросла почти в 2000 раз. Анализ проблемы точности и ее динамики роста приводит к выводу, что все параметры точности будут ужесточаться еще больше. В ряде развитых индустриальных стран уже введено понятие «нанотехнология», предусматривающее как получение, так и измерение параметров, прежде всего геометрического характера, с точностью до одной миллиардной метра. Таким образом, нанотехнология призвана сменить микротехнологию.

Достижение заданной точности даже на высокоточном оборудовании деталей сопряжено со значительными трудностями из-за возникновения технологических упругих и остаточных деформаций. Поскольку абсолютное достижение номинальных (идеальных) размеров и других геометрических показателей точности невозможно, то погрешность изготовления детали ограничивается допуском. Допуск представляет собой разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами и назначается конструктором исходя из служебного назначения детали. С уменьшением величины допуска при неизменном номинальном размере возрастает точность детали.

Величина допуска определяется двумя независимыми факторами: номинальным размером детали и её точностью, т. е. деталь любого номинального размера может иметь любую точность, и допуск может быть определён по формуле:

$$\delta = a \cdot i, \quad (1)$$

где i – масштабный коэффициент; a – коэффициент точности.

Масштабный коэффициент указывает на то, что детали одинаковой точности, но разных номинальных размеров должны иметь различные по величине допуски. Очевидно, нельзя считать имеющими одинаковые точности детали с одинаковыми допусками и разными номинальными размерами, например, 1 и 1000 мм. Деталь с большим номинальным размером при одинаковой точности должна иметь большую величину допуска, чем деталь с меньшим номинальным размером.

Опытным путём установлена зависимость масштабного коэффициента от номинального размера:

$$i = 0,00045 \sqrt[3]{D} + 10^{-6} D, \quad (2)$$

где D – номинальный размер детали.

Коэффициент точности характеризует точность детали, то есть степень приближения размера годной детали к заданному (номинальному) размеру.

Международными стандартами установлена зависимость коэффициента точности от общепринятой характеристики точности – квалитета (IT):

$$a = 10^{\frac{IT-1}{5}} \approx 1,59^{IT-1}. \quad (3)$$

Квалитет – показатель, количественно характеризующий точность, который введён вместо характеристики «класс точности». Допуски двух смежных квалитетов (при постоянном номинальном диаметре) отличаются в 1,59 раза.

Чем больше номер квалитета, тем ниже точность детали и тем больше величина допуска, а соответственно, тем грубее изготовлена деталь.

Международным стандартом предусмотрено 19 квалитетов: 01, 0, 1, 2–16, 17.

Квалитеты 12–17 предназначены для габаритных размеров, как правило, крупногабаритных, необрабатываемых деталей, например станин, картерно-блоковых изделий, размеры которых непосредственно не влияют на работу машины.

Квалитеты 5–11 предназначены для размеров деталей, составляющих сопряжения, т. е. ответственных за работу машин.

Квалитеты 1–4 предназначены для размеров особо точных (прецизионных) деталей или измерительных инструментов, например калибров.

Квалитеты 01, 0 – перспективные, предназначены для развития машиностроения.

Допуски для каждого номинального размера и качества сведены в таблицы допусков и представлены предельными отклонениями от номинального размера.

Если в процессе изготовления не была обеспечена требуемая точность, то такая деталь будет неработоспособной.

Достижение заданной точности деталей и готовых машин всегда связано с затратами средств на обработку, инструмент и др. Чем выше точность деталей (меньше квалитет), тем существеннее возрастают затраты средств на их изготовление (рис. 5, а). Но при этом значительно увеличивается рабочий ресурс машин.

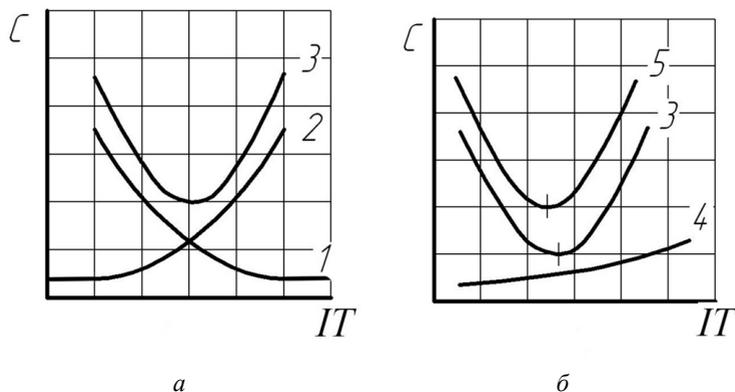


Рис. 5. Графики затрат на изготовление и сборку (а), а также эксплуатацию (б) в зависимости от точности: 1 – затраты на изготовление изделий; 2 – затраты на сборку машины; 3 – суммарные затраты на изготовление и сборку машины; 4 – затраты на эксплуатацию машины; 5 – общие затраты на изготовление и эксплуатацию машины

Проблема соотношения точности и стоимости обработки является основной при разработке технологического процесса изготовления.

Повышение точности изготовления размеров деталей сокращает затраты на сборку машин вследствие частичного или полного устранения пригоночных работ, способствует достижению взаимозаменяемости деталей узлов и агрегатов и позволяет ввести поточную сборку. При этом суммарные затраты на изготовление и сборку машины имеют некую минимальную величину (в зависимости от точности), к которой надо стремиться при достижении размеров деталей в процессе изготовления.

Точность изготовления деталей или отдельных узлов и точность изготовления агрегатов связаны между собой и определяют экономику эксплуатации машины. Во время работы машины эксплуатационные расходы снижаются с повышением точности входящих в нее изделий (рис. 5, б). Если эти затраты суммировать с затратами на изготовление и сборку машины, то результирующая кривая, характеризующая стоимость изготовления и эксплуатации машины, показывает, что минимум затрат сдвигается в сторону ужесточения допуска на обработку деталей. Это обстоятельство является решающим при технологическом анализе проблем достижения точности размеров деталей в процессе изготовления.

Детали только на чертежах изображаются правильными геометрическими фигурами (круг, цилиндр и др.), а в действительности детали ограничены реальными поверхностями, которые всегда имеют отклонения формы.

Отклонением формы называется отклонение формы действительной (реальной) поверхности или действительного профиля от формы геометрической (номинальной) поверхности или геометрического профиля. Отклонения формы подразделяются на элементарные и комплексные. Элементарные отклонения формы для цилиндрических деталей различают в поперечном и продольном сечениях. В поперечном сечении нормируют овальность и огранку (рис. 6). В продольном сечении — конусность, бочкообразность и седлообразность (рис. 7). Кроме того, в продольном сечении нормируют изогнутость (рис. 8).

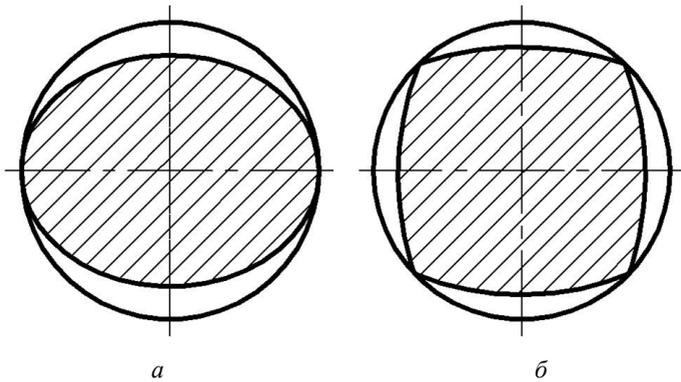


Рис. 6. Элементарные отклонения формы в поперечном сечении цилиндрических деталей: *a* – овальность; *б* – огранка

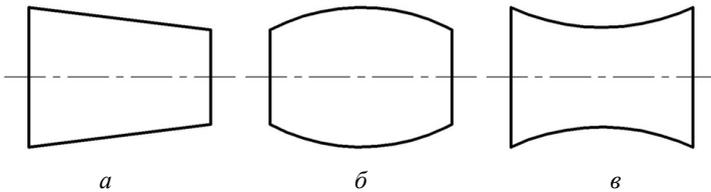


Рис. 7. Элементарные отклонения формы в продольном сечении цилиндрических деталей: *a* – конусность; *б* – бочкообразность; *в* – седлообразность

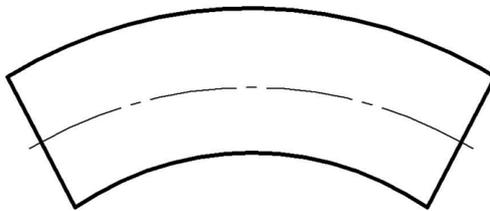


Рис. 8. Пространственная погрешность цилиндрической детали – изогнутость

Комплексные отклонения формы представляют собой совокупность любых отклонений формы поверхности или профиля. Для цилиндрических деталей в поперечном сечении нормируют некруглость, а в продольном – отклонение профиля продольного сечения цилиндрической поверхности, то есть нецилиндричность (рис. 9).

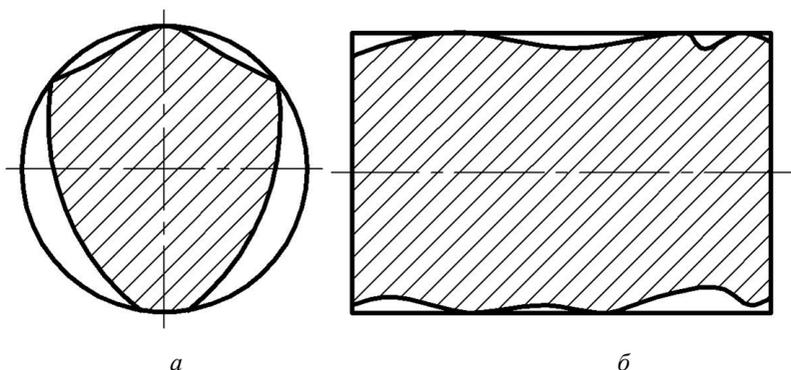


Рис. 9. Комплексные отклонения формы цилиндрических деталей:
a – некруглость; *б* – отклонение профиля продольного сечения

Отклонения формы образуются в результате упругих деформаций элементов технологической системы, в которой ведется обработка. Упругие деформации возникают непосредственно в процессе механической обработки под воздействием силы резания и вызывают изменение взаимного расположения обрабатываемой детали и инструмента.

Отклонения формы нормируются десятью степенями точности. Десятая степень точности самая грубая. Элементарные составляющие должны быть на одну степень точнее комплексного. Например, если на детали допускается некруглость шестой степени точности, то овальность этой детали может быть не грубее пятой степени точности. Это объясняется тем, что комплексное отклонение может включать различные элементарные погрешности.

2.3. Волнистость поверхности деталей

Волнистостью называется отклонение от прямолинейности или любой заданной формы поверхности, имеющее характер периодических возвышений и впадин с относительно большими шагами. Допуск на волнистость назначается на максимальную высоту волны на базовой длине измерения не менее 10 мм.

Разграничение неровностей на волнистость и шероховатость носит условный характер. Критерием разграничения является

ся отношение длины шага к высоте волны: l/H . Для волнистости $l/H = 51-1000$, а для шероховатости $l/H = 0-50$.

При обработке деталей волны на поверхности могут образовываться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этой связи различают продольную и поперечную волнистость. Возникает волнистость в результате вибраций технологической системы, в которой ведется обработка, неравномерности подачи инструмента, неправильной заправки шлифовального круга и др.

Износостойкость сопряженных деталей в значительной степени зависит от волнистости. Это, главным образом, связано с тем, что наличие волны приводит к уменьшению опорной поверхности детали (рис. 10). Износ поверхностей начинается с вершин микронеровностей на участках A (рис. 10, б), что и определяет интенсивность изнашивания.

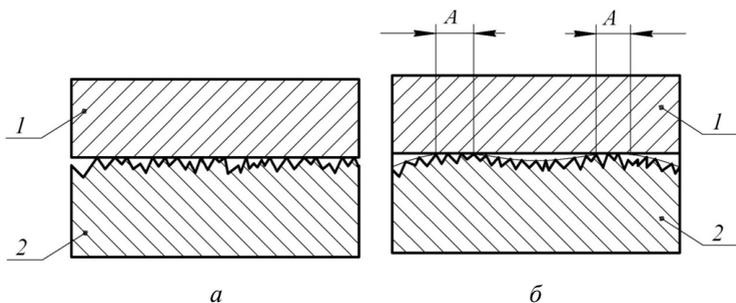


Рис. 10. Сопряжение идеальной поверхности 1 с поверхностью 2, имеющей: а – только микронеровности; б – волнистость, покрытую микронеровностями

Значительный износ изменяет расчетные значения зазоров и натягов сопряженных деталей. Это, в свою очередь, приводит к возникновению динамических нагрузок. Поэтому волнистость рабочих поверхностей предопределяет высокий уровень вибрации, например в подшипниковых узлах, и, как следствие, их малый ресурс.

Волнистость можно рассматривать как отклонение формы второго порядка, а шероховатость – как отклонение формы третьего порядка (рис. 11).

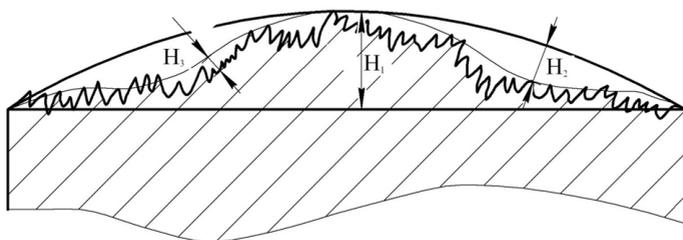


Рис. 11. Схема отклонений формы в продольном сечении детали:
 H_1 – бочкообразность; H_2 – волнистость; H_3 – шероховатость

2.4. Шероховатость поверхности деталей

Одной из важных геометрических характеристик детали, определяющих безотказность работы, является шероховатость поверхности. Шероховатостью называют совокупность неровностей на рассматриваемой поверхности с относительно малыми шагами, образующая микрорельеф поверхности. По профилю шероховатости на базовой длине l измерения оценивают ее параметры. Как отмечалось выше, отношение шага неровностей к их высоте для шероховатости не превышает 50. Большая шероховатость поверхности ухудшает качественные показатели работы деталей. В подвижных соединениях она приводит к преждевременному изнашиванию поверхностей, так как при работе деталей металлические гребешки срезаются и стираются, продукты износа смешиваются с маслом и ускоряют процесс изнашивания поверхностей. В неподвижных соединениях шероховатость ослабляет их герметичность и коррозионную стойкость.

Если в процессе изготовления не была обеспечена требуемая шероховатость, то деталь будет оставаться работоспособной, но не будет гарантии в ее надежности.

Для количественной оценки шероховатости в основном используют два высотных показателя: среднеарифметическое отклонение профиля R_a и среднюю высоту шероховатости R_z . Для их определения через кривую, описывающую профиль шероховатости, проводят прямую (рис. 12), которая делит выступы и впадины так, что сумма площадей выступов $F_{\text{выст}}$ равна сумме площадей впадин $F_{\text{вп}}$.

Такая прямая называется средней линией. Условие средней линии записывается формулой:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{выст}}} F_{\text{выст}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{вп}}} F_{\text{вп}}. \quad (4)$$

Сумма расстояний от средней линии до отдельных точек профиля y_i , делённая на их количество, называется средним арифметическим отклонением профиля R_a :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5)$$

и обозначается $\sqrt{R_a}0,32$.

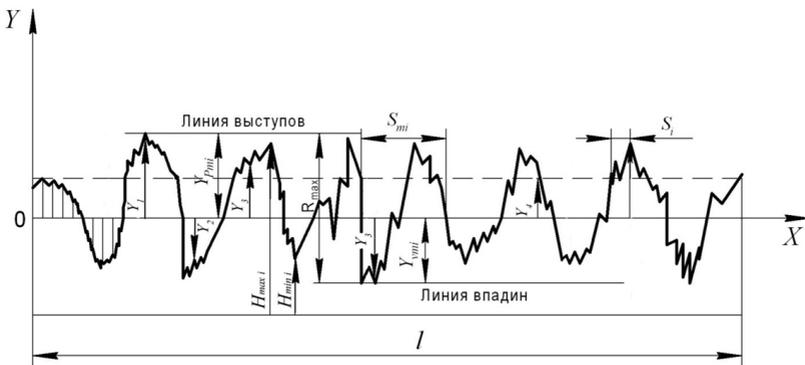


Рис. 12. Схема определения параметров шероховатости поверхности детали

Вторым высотным параметром шероховатости является средняя высота шероховатости R_z , определяемая как среднее расстояние между пятью точками выступов и пятью точками впадин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 H_{\max i} - \sum_{i=1}^5 H_{\min i} \right). \quad (6)$$

Отсчёт расстояний ведётся от линии, параллельной средней линии. Средняя высота шероховатости обозначается $\sqrt{R_z}40$.

Параметры R_a и R_z имеют размерность в микрометрах и назначаются из геометрического ряда со знаменателем 2. Высотные параметры R_a и R_z являются основными при оценке шерохова-

тости. Параметр R_z рекомендуется применять для поверхностей с большой ($R_z > 20$ мкм) и малой ($R_z < 0,08$ мкм) шероховатости, а параметр R_a — для поверхностей со средней шероховатостью ($0,08 < R_a < 20$ мкм). Это обусловлено техническими возможностями существующих методов и приборов для оценки параметров шероховатости. Однако при одинаковых высотных параметрах шероховатости изделия могут иметь совершенно разные эксплуатационные свойства.

Это может быть объяснено тем, что, помимо высоты, на эксплуатационные свойства изделий оказывает влияние и форма микронеровностей (рис. 13). Поэтому для характеристики шероховатости поверхности, помимо параметров R_a и R_z , большое распространение получили следующие показатели:

1. R_{\max} — наибольшая высота неровностей, равная расстоянию между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины. Линии выступов и впадин профиля — это линии, параллельные средней линии, проходящие через высшую или низшую точки профиля в пределах длины соответственно.

2. Средний шаг неровностей профиля S_m — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины.

3. Средний шаг местных выступов профиля S — среднее арифметическое значение шагов местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины.

Шаговые параметры S и S_m определяют взаимное расположение одноименных точек неровностей, а также форму микропрофиля. С увеличением S и S_m при неизменных высотных параметрах R_a , R_z микропрофиль становится более пологим. По мере уменьшения разницы между S и S_m профиль неровностей становится более однородным, т. е. регулярным.

4. Относительная опорная длина профиля t_p — это отношение опорной длины профиля l_p к базовой длине l (%).

Перечисленный комплекс параметров шероховатости позволяет более полно охарактеризовать микрорельеф поверхности и дать рекомендации технологам по назначению методов обработки деталей.

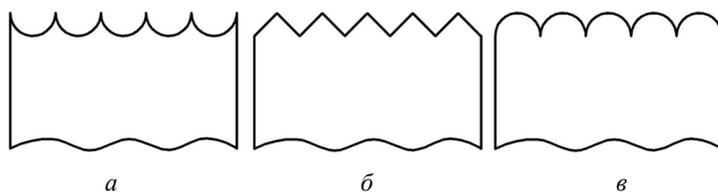


Рис. 13. Микропрофили шероховатой поверхности детали с различной формой микронеровностей: *a* — малой жесткости; *б* — средней жесткости; *в* — жесткий

На эксплуатационные свойства поверхности детали, помимо указанных высотных и шаговых параметров микропрофиля, оказывают влияние также радиусы закругления выступов r_v и впадин $r_{вп}$ неровностей, углы наклона их боковых сторон к средней линии β и расстояние от линии выступов до средней линии R_p . Эти показатели, в некоторой своей части отражаемые соотношением высотных и шаговых параметров микропрофиля, оказывают существенное влияние на характер контактного взаимодействия сопряженных поверхностей деталей. Так, износостойкость зависит от высоты и формы микронеровностей, радиуса закругления их вершин; коррозионная стойкость зависит от высоты микронеровностей, радиусов закругления впадин; контактная жёсткость зависит от относительной опорной длины микропрофиля поверхности, радиуса закругления вершин, шага неровностей профиля, угла наклона боковых сторон микронеровностей и т. д.

Оценка шероховатости поверхности может осуществляться качественными и количественными методами. Качественные методы оценки основаны на сравнении обработанной поверхности с образцами шероховатости. Контроль шероховатости путем сравнения со стандартными образцами или аттестованной деталью широко используется в единичном и ремонтном производствах. Количественные методы основаны на измерении микронеровностей специальными приборами. Наибольшее распространение для определения шероховатости поверхности получили щуповые приборы, работающие по методу ошупывания поверхности алмазной иглой. К этой группе приборов относятся профилометры, непосредственно показывающие среднее арифметическое отклонение

профиля R_a , и профилографы, записывающие профиль поверхности. Отечественной промышленностью выпускаются профилометры-профилографы моделей 201; 202; 280; 171311, а также профилометры моделей 253, 283, 170622, которые позволяют измерять параметр шероховатости R_a до 0,02–0,04 мкм.

Ориентировочно шероховатость в зависимости от точности удобно назначать по формуле

$$R_a = 0,04 \cdot 2^{IT-4} = \frac{0,01}{4} \cdot 2^{IT}, \quad (7)$$

где IT – номер квалитета.

Расчёты по этой формуле приведены в табл. 1.

Таблица 1

Шероховатость поверхности, назначаемая в зависимости от точности обработки

IT	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R_a , мкм	0,08	0,16	0,32	0,63	1,25	2,5	5	10	20	40

Параметры шероховатости оказывают влияние на все основные эксплуатационные характеристики, определяющие долговечность и надёжность деталей машин.

2.5. Основные параметры качества материала деталей

2.5.1. Механические свойства металлов

Эксплуатационные свойства детали тесно связаны между собой и во многом зависят от свойств материала заготовки. На эксплуатационные свойства влияют как физические, так и механические характеристики материала. Они могут быть кратковременными, то есть проявляющимися при кратковременном нагружении и влияющими, главным образом, на работоспособность детали. А могут быть длительными, то есть изменяющимися при нагружении во времени и влияющими в основном на надёжность изделия.

Из всего многообразия свойств металлов для специалистов важнейшими являются механические свойства. Они характеризуют

способность металлов сопротивляться без разрушения действию механических нагрузок. Механические свойства зависят от химического состава, структурного состояния металлов и технологических способов их обработки и упрочнения.

Для определения механических свойств металла изготавливаются стандартные образцы. Эти образцы подвергают испытанию на специальных машинах. К образцу могут быть приложены различные нагрузки – растягивающие, сжимающие и скручивающие. Под действием этих нагрузок в образце возникает деформация, которая вызывает изменение его размеров и формы. К основным механическим свойствам относятся прочность, твердость, пластичность, вязкость, усталость и ползучесть.

Прочность – способность металла сопротивляться разрушению под действием внешней нагрузки. Она определяется одним из способов механических испытаний, который выбирается в зависимости от вида деформирующей нагрузки: растяжением, сжатием, кручением, изгибом и срезом.

Среди статических методов испытаний наиболее широкое распространение получило испытание растяжением. В процессе испытания образец деформируется плавно возрастающей растягивающей нагрузкой до его разрушения. Для испытаний берутся образцы цилиндрической формы или плоские, имеющие форму двусторонней лопатки (рис. 14).

При испытании измеряются приложенная сила и соответствующие изменения размеров образца. На основе проведенных замеров строится диаграмма деформирования (рис. 15) и определяются механические свойства материала.

Если разделить величину нагрузки на площадь поперечного сечения образца, уменьшающуюся при растяжении, то можно определить следующие харак-

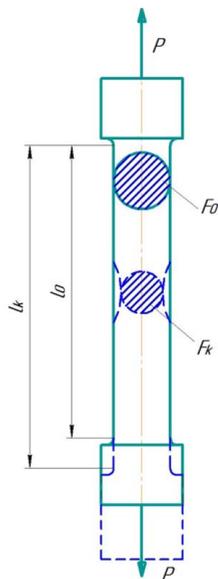


Рис. 14. Цилиндрический образец для испытания материала при растяжении

теристики прочности: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести и предел прочности. Обычно при выборе материала конструктор принимает во внимание предел текучести и предел прочности.

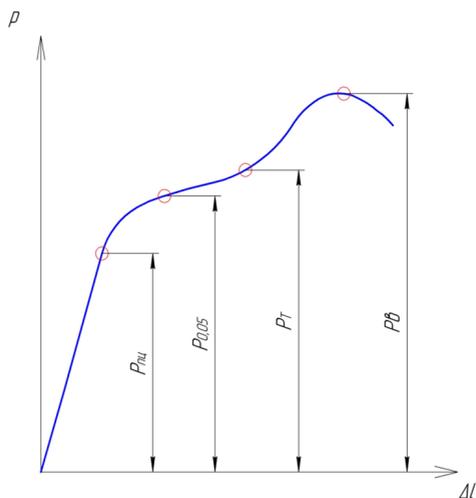


Рис. 15. Диаграмма деформирования образца при растяжении

Предел текучести — это напряжение, при котором образец пластически деформируется без заметного увеличения растягивающей силы.

Предел прочности, или временное сопротивление разрушению, — это напряжение, которое соответствует максимальной силе, не приводящей к разрушению образца.

Наилучшими эксплуатационными свойствами обладают изделия, материал которых имеет высокие показатели как прочности, так и пластичности.

При проведении механических испытаний на растяжение можно также определить две важные характеристики пластичности — относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение рассчитывается обычно как отношение приращения длины образца после разрыва к его исходной длине.

Относительное сужение определяется как отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к исходной площади.

Относительное удлинение и относительное сужение характеризуют способность металла пластически деформироваться. Это свойство чрезвычайно важно при ковке, штамповке, прокатке заготовок.

Механические свойства металлов, определенные путем медленного повышения нагрузки, во многих случаях не соответствуют действительным условиям нагружения деталей. Иногда при их работе нагрузка возрастает очень быстро. Поэтому возникает необходимость исследовать свойства металла при ударе. Поскольку в данном случае невозможно достаточно точно определить напряжение, то обычно при ударных испытаниях определяют работу, затрачиваемую на разрушение образца. Количество работы, поглощенной образцом при разрушении ударом, зависит от пластичности испытуемого материала, формы и размера образца, расстояния между опорами и формы надреза на образце.

Для испытаний на специальных маятниковых копрах применяются стандартные образцы. Под воздействием отведенного на определенный угол маятника происходит разрушение образца. Работа, затраченная на разрушение образца, принимается равной разности энергии маятника в его положениях до и после удара. По результатам испытаний определяется ударная вязкость материала как отношение работы, расходуемой на ударный излом, к площади поперечного сечения образца в месте надреза.

Существует мнение, что на эксплуатационные свойства детали оказывают влияние точность обработки, шероховатость поверхностей, марка материала, его прочность и структура. Такой подход к оценке качества и эксплуатационных свойств обработанных поверхностей является ошибочным. Практика показывает, что одинаковые по точности и высоте шероховатости детали, изготовленные из одного и того же материала, могут иметь совершенно различные эксплуатационные свойства. Это объясняется тем, что несущую способность детали обуславливают не только геометрические параметры и прочность основного материала, но и физическое состояние материала поверхностного слоя.

В ходе технологического процесса изготовления происходит не только уточнение размеров, образование необходимой формы и микрорельефа поверхности детали, но и изменение свойств материала у его поверхности.

В процессе обработки поверхностный слой подвергается сильнейшему силовому и термическому воздействию, которое приводит к сдвигу в зернах металла и изменению их размеров и формы. Кроме того, на состояние поверхностного слоя оказывают влияние структурные превращения, адгезионные и диффузионные процессы, химическое взаимодействие с окружающей средой. В результате структура и физико-механические свойства материала поверхностного слоя детали резко отличаются от материала сердцевины детали (рис. 16).

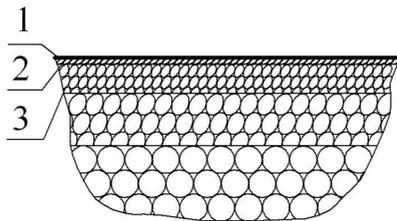


Рис. 16. Схема строения поверхностного слоя детали:

1 – вторичные структуры; 2 – слой повышенной твердости (пластически деформированные зерна); 3 – упругодеформированный слой, свойства которого отличаются от свойств исходного материала

Таким образом, на эксплуатационные свойства деталей наряду с геометрическими параметрами большое влияние оказывает физическое состояние поверхностного слоя. В первом приближении физико-механические свойства поверхностного слоя могут характеризоваться глубиной и степенью упрочнения (эпюрами микротвердости) и величиной, знаком и характером распределения остаточных напряжений (эпюрами остаточных напряжений).

2.5.2. Упрочнение материала поверхностного слоя

Для изготовления большинства деталей конструктор выбирает прочный, но в то же время пластичный материал, обладающий хорошей обрабатываемостью. Но с учетом того, что во время эксплу-

атации детали нагружению подвергается только её поверхностный слой, перед технологами ставится задача повышения его износостойкости путем дополнительного упрочнения в процессе изготовления. От решения этой задачи во многом зависит качество изделия.

Обоснованный выбор наиболее эффективного способа упрочняющей обработки проводят на основе анализа технологических возможностей известных способов в отношении обеспечения твердости и остаточных напряжений. Существуют следующие основные виды упрочняющей обработки:

- термоупрочняющая обработка;
- химико-термическая обработка;
- нанесение упрочняющих покрытий;
- поверхностное пластическое деформирование.

Упрочнение материала поверхностного слоя деталей прежде всего характеризуется глубиной упрочненного слоя h_s , отвечающего за эксплуатацию изделия, его долговечность, и приростом твердости ΔHV , т. е. $\Delta HV = HV_{\max} - HV_0$, где HV_{\max} , HV_0 – максимальная твердость и исходная твердость поверхностного слоя, измеряемые в МПа.

Твердостью называется характеристика материала, описывающая его сопротивление пластическому вдавливанию индентора. Индентор (от лат. *in* – внутрь, *dentis* – зуб) – твердое вещество (алмаз, закаленная сталь) определенной геометрической формы (конус, пирамида, шар), вдавливаемое в поверхность образца при определении твердости материала.

Определение твердости вдавливанием индентора является одним из наиболее простых и распространенных видов механических испытаний материала.

При испытании на твердость деформируется определенный объем материала. Чем меньше прилагаемая нагрузка, тем меньше деформируется объем, тем точнее выявляется распределение свойств материала.

В зависимости от величины нагрузки, действующей на индентор, различают макротвердость, определяемую при нагрузках свыше 49 Н, и микротвердость, определяемую при нагрузках от 0,049 до 4,9 Н. Между ними находится промежуточная область – твер-

дость при малых нагрузках, которой в настоящее время пользуются очень редко.

При испытании на макротвердость деформируется достаточно большой объем материала, значительно превышающий объем отдельных структурных составляющих материала, поэтому данным методом пользуются для оценки средней твердости материала.

При испытании на микротвердость размер отпечатка настолько мал, что дает возможность определять твердость отдельных структурных составляющих материала. Испытания на микротвердость применяют для контроля качества очень мелких деталей (например, деталей наручных часов), тонких полуфабрикатов (листов, лент, фольги, проволоки), хрупких неметаллических материалов (стекло, эмали, абразивов), которые растрескиваются при использовании обычных методов оценки твердости. И конечно, испытания на микротвердость широко применяются при оценке твердости различных покрытий.

Для оценки упрочнения также используют степень упрочнения (u_H), показывающую относительное (в %) повышение твердости, и градиент упрочнения ($u_{гр}$), который характеризует интенсивность упрочнения по глубине поверхностного слоя:

$$\begin{aligned} u_H &= \frac{HV_{\max} - HV_0}{HV_0} \cdot 100 \% = \frac{\Delta HV}{HV_0} \cdot 100 \% ; \\ u_{гр} &= \frac{HV_{\max} - HV_0}{h_3} \cdot 100 \% = \frac{\Delta HV}{h_3} \cdot 100 \% , \end{aligned} \quad (8)$$

где u_H — максимальная степень деформационного упрочнения, %; $u_{гр}$ — средняя интенсивность (градиент) упрочнения в упрочненном слое h_3 , МПа/мм.

Определение глубины, степени и градиента упрочнения производится на основе измерений микротвердости на поверхности косях, прямых шлифов или при послойном стравливании материала образца. По результатам измерений строят эпюры микротвердости. Для измерения микротвердости используются микротвердомеры ПМТ-3, ПМТ-5 и др. На приборах этого типа в поверхность шлифа при усилии $P = 0,5-2$ Н вдавливаются алмазная пирамида с углом при вершине 136° . По среднеарифметическому значению диагно-

нали отпечатка определяются площадь его боковой поверхности F и микротвердость, как отношение силы вдавливания индентора к площади боковой поверхности отпечатка, т. е. $HV = P/F$, МПа.

Глубина упрочненного слоя может колебаться в широких пределах: от нескольких микрометров после отделочных операций (доводка, полирование, хонингование и др.) до 2 мм после упрочняющих процессов обработки поверхностным пластическим деформированием (обкатывание роликами, дробеструйная обработка и др.).

Структурное состояние обработанных резанием поверхностей, характеризуемое большим количеством дефектов (микротрещин, надрывов, локальных измельчений зерен металла и др.), оказывает значительное влияние на износостойкость поверхности и качество изделия в целом. Упрочнение замедляет процесс истирания рабочих поверхностей деталей, а также затрудняет образование и развитие усталостных трещин. Но при этом следует иметь в виду, что эффективность упрочнения во многом зависит от условий работы детали.

Для повышения прочности материала деталей, особенно в условиях единичного производства, достаточно широко применяют методы холодного пластического деформирования. Происходящее при обработке этими методами деформационное упрочнение (наклёп) поверхностного слоя сопровождается искажениями (дефектами) кристаллического строения материала.

Необходимо отметить, что минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций, примерно соответствующей отожженному металлу (10^7 – 10^8 см⁻²). Дислокации – это линейные дефекты кристаллической решетки, характеризующейся их плотностью, под которой понимается суммарная длина дислокаций в сантиметрах, приходящаяся на 1 см³. При увеличении или уменьшении плотности дислокаций по сравнению с критическим значением возрастает сопротивляемость пластической деформации, то есть повышается прочность металла. Таким образом, существуют два принципиально разных пути повышения прочности металлов (рис. 17).

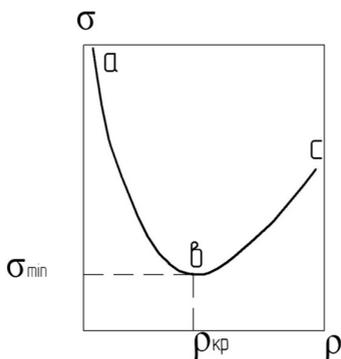


Рис. 17. Зависимость прочности металла от плотности дислокаций (диаграмма И.А. Одингга)

Первый путь широко используется на производстве и связан с получением структуры металла с большой плотностью дислокаций, то есть с большим числом дефектов кристаллического строения (участок кривой *bc*). Все традиционные методы упрочнения (термические, химико-термические, пластического деформирования и др.) основаны на искажении кристаллической решетки металлов. Однако повышение прочности этими методами ограничивается предельной локальной плотностью дислокаций (примерно 10^{14} см^{-2}), при которой происходит образование субмикроскопических трещин в отдельных объемах металла, что приводит к нарушению его сплошности.

Второй путь повышения прочности металлов основан, наоборот, на уменьшении плотности дислокаций, т. е. на получении бездефектной структуры металлов (участок кривой *ab*). В настоящее время это направление реализуется при помощи нанотехнологий, позволяющих получить бездефектную структуру материала. Так, в лабораторных условиях были приготовлены образцы в виде нитей из чистого железа толщиной 2–10 мкм, прочность которых составила 14 000 МПа.

2.5.3. Технологические остаточные напряжения

Остаточные напряжения наряду с прочностью и твердостью являются показателем физического состояния материала изделий. Из-за них происходят аварийные разрушения, казалось бы, надежных конструкций. Кроме того, остаточные напряжения приводят к возникновению трещин и короблению деталей. С увеличением жёсткости деталей вероятность образования коробления снижается, но при этом возрастает вероятность возникновения трещин. Однако до сих пор со стороны специалистов, работающих на производстве, остаточным напряжениям не уделяется должного внимания.

При расследовании причин некоторых аварий эксперты достаточно часто сталкиваются с такой ситуацией: вид и характер разрушений указывают на наличие в детали предельно допустимого уровня остаточных напряжений. При этом в документах на самопроизвольно разрушившееся изделие вообще отсутствуют какие-либо сведения о напряжениях. Выходит, что технологические процессы обработки создали в изделии значительные остаточные напряжения, о которых никто не подозревал. Такое положение можно объяснить психологией технических работников. Они, в большинстве случаев, воспринимают остаточные напряжения как нечто неочевидное, эфемерное, поскольку их нельзя «потрогать руками». Действительно, остаточные напряжения относятся к внутренним силовым факторам (внутренним силам), которые, в отличие от внешних факторов в виде различных нагрузок, не поддаются непосредственному измерению. Измерению поддаются только проявления остаточных напряжений, которые выражаются в изменении размеров и формы тела, а также физических, химических или технологических свойств металла. К тому же смутное представление многих технологов о механизмах образования остаточных напряжений при различных способах обработки деталей приводит к тому, что они играют в жизненном цикле деталей и машин больше отрицательную, чем положительную роль. Но остаточные напряжения могут быть не только вредными факторами, но и полезными факторами. Они могут быть полезными в тех случаях, когда повышают прочность материала и его способность оказывать сопротивление внешним разрушающим нагрузкам. Такое становится возможным, когда направление

остаточных напряжений противоположно направлению напряжений от внешней нагрузки. В этом случае они частично нейтрализуют действие внешней нагрузки. Кроме того, остаточные напряжения сжатия значительно повышают долговечность изделий, работающих при циклических нагрузках. Многолетний практический опыт показывает, что в большинстве случаев разрушение деталей, подвергаемых изгибу или кручению, происходит из-за остаточных напряжений растяжения и никогда не происходит из-за остаточных напряжений сжатия.

Способность управлять напряженным состоянием деталей в ходе технологических процессов обработки и умело использовать его в зависимости от условий нагружения является основой повышения качества изделий и надежности их работы.

В ряде случаев несущая способность таких изделий, как сосуды высокого давления, сильно напряженные чугунные станины и железобетонные плиты, может быть повышена почти вдвое путем создания в их материале предварительного напряженного состояния обратного знака, чем действующая эксплуатационная нагрузка.

Предварительные напряжения сжатия особенно необходимо создавать в конструкциях из материалов, плохо работающих на растяжение и изгиб. Так, повышают прочность железобетонных строительных конструкций путем заливки бетона на предварительно растянутую арматуру.

Остаточными напряжениями называются уравновешенные в объеме материала детали напряжения, которые возникают после освобождения изделия от всех связей и воздействий, то есть после обработки и раскрепления детали.

Эпюру остаточных напряжений можно разделить на активную и уравновешивающую части (рис. 18), разграничивающиеся в точке, в которой напряжения проходят через ноль. Такой характер распределения остаточных напряжений отвечает уравновешенному напряженно-деформированному состоянию детали. Здесь необходимо отметить, что именно остаточные напряжения в поверхностном слое являются активным силовым фактором, который оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства и долговечность изделий.

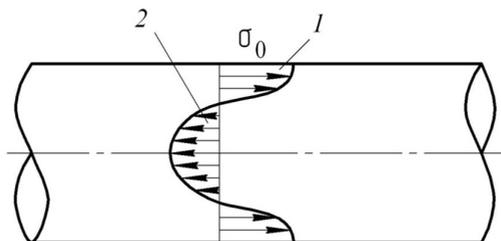


Рис. 18. Эпюра остаточных напряжений в детали:
1 – активная часть; 2 – уравнивающая часть эпюры

Практика эксплуатации изделий показывает, что там, где экономически возможно, необходимо остаточные напряжения растяжения, образованные в поверхностном слое термической или механической обработкой, подавить и сформировать остаточные напряжения сжатия.

2.5.4. Технологические остаточные деформации

Технологические остаточные деформации (или коробление деталей) образуются практически после любого вида обработки. После сварки они проявляются в пространственном отклонении взаимного положения исполнительных поверхностей элементов сварной конструкции. После механической и термической обработки деформации проявляются в виде отклонения оси детали от прямолинейности (см. рис. 18). Также они проявляются в закручивании, растяжении, сжатии детали. Технологические остаточные деформации относят к так называемой пространственной погрешности обработки, которая крайне негативно влияет на точность изделий.

Причины образования технологических остаточных деформаций изгиба:

- несимметричное распределение относительно оси детали эпюры остаточных напряжений;
- изменение упругонапряженного состояния детали, которое возникает либо перед обработкой в результате закрепления детали, либо во время обработки в результате воздействия на нее технологической оснастки.

В свою очередь, несимметричное распределение относительно оси детали остаточных напряжений обусловлено асимметричной обработкой:

- связанной со снятием неравномерного технологического припуска по контуру поперечного сечения детали (например, фрезерованием лысок и шпоночных пазов);
- не связанной с удалением материала (например, несимметричной наплавкой, сваркой, наклёпом, нанесением неравномерного по контуру поперечного сечения покрытия и правкой упругопластическим изгибом).

Процесс образования технологических остаточных деформаций в общем случае состоит из двух этапов:

1. Образование деформаций после обработки и раскрепления детали либо в процессе обработки, если закрепление заготовки допускает ее деформацию.

2. Образование и развитие деформаций, нарушающих стабильность размеров изделия, во время хранения, транспортировки и эксплуатации.

Эти этапы существенно отличаются уровнем остаточных деформаций: величина остаточных деформаций, возникающих при обработке деталей, как правило, на порядок больше величины деформаций, образующихся в процессе эксплуатации. Но достаточно часто эксплуатационные остаточные деформации изгиба изделий превышают допустимые значения. Именно развитие остаточных деформаций деталей в процессе эксплуатации является основной причиной повышения интенсивности изнашивания сопряжений и нарушения динамических характеристикдвигающихся с большой скоростью изделий. Это неизбежно приводит к снижению долговечности быстроходных машин и создает опасность возникновения аварийных ситуаций. Но даже когда остаточные деформации не приводят к серьезным последствиям, они могут значительно портить внешний вид изделий, например, панелей ответственных конструкций.

Выводы

1. Надежность машин определяется уровнем эксплуатационных свойств комплектующих изделий.
2. Эксплуатационные свойства изделий зависят от их показателей качества, определяющих способы и средства обработки.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие свойства больше всего влияют на надежность машин?
2. Что такое качество?
3. Как называется состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией?
4. Как называется свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах?
5. Чем отличаются работоспособность и безотказность?
6. Какой параметр отвечает за соответствие геометрических размеров детали требованиям чертежа и технических условий?
7. Что такое допуск?
8. Что такое R_a и R_z ? Чем они отличаются?
9. Какой параметр (R_a или R_z) целесообразно применять для поверхностей с большой и малой шероховатостью?
10. Какой параметр (R_a или R_z) целесообразно применять для поверхностей со средней шероховатостью?

3. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

3.1. Материалы в металлургическом производстве

Металлургия – наука о промышленных технологиях и способах получения металлов и сплавов.

В металлургическом производстве применяют четыре основные группы материалов, необходимых для выплавки металлов: руды, флюсы, огнеупорные материалы и металлургическое топливо.

3.1.1. Железные руды

Железными рудами называются природные соединения, содержащие железо, которое возможно извлечь экономически выгодным способом. Экономическая целесообразность лежит в основе металлургического производства металла, которое представляет собой сложный комплекс различных производств по добыче железных руд и каменных углей, обогащению руд, коксованию углей, выплавке чугуна и стали.

Железо в рудах содержится в виде окислов. Железная руда представляет собой горную породу, в которой наряду с окислами железа находятся различные соединения, главным образом кремнезем (SiO_2), глинозем (Al_2O_3), окись кальция (CaO) и окись магния (MgO). Эти соединения образуют так называемую пустую породу. Железные руды содержат также вредные примеси – серу, фосфор. Руды, содержащие свыше 30 % железа, называются богатыми, до 30 % железа – бедными. Буквально 40 лет назад богатыми называли руды, содержащие более 50 % железа.

В зависимости от вида окислов железа руды подразделяются на красный, магнитный, бурый и шпатовый железняки (рис. 19).

Красный железняк (или гематит) содержит железо в виде безводной окиси Fe_2O_3 . Пустая порода состоит главным образом из кремнезема SiO_2 и известняка CaCO_3 . Красные железняки являются основными в нашей стране железными рудами по мощности месторождений и по количеству выплавляемого из них чугуна. Они отличаются хорошей восстановимостью железа и малым содержанием вредных примесей.

Магнитный железняк (или магнетит) содержит железо в виде окисла Fe_3O_4 и обладает высокими магнитными свойствами. Он встречается как в чистом виде (в г. Магнитогорске – гора Магнитная), так и с примесями серы (железный колчедан) или фосфора (апатиты). Пустая порода состоит преимущественно из кремнезема SiO_2 .



Рис. 19. Железная руда:
а – красный железняк; *б* – магнитный железняк;
в – бурый железняк; *г* – шпатовый железняк
(wikipedia.org)

Бурый железняк (или лимонит) содержит водную окись железа $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; железа в нем около 20 %. Пустая порода имеет разнообразный состав.

Шпатовый железняк (или сидерит) содержит до 40 % железа в виде карбоната FeCO_3 . В состав пустой породы входят кремнезем SiO_2 , глинозем Al_2O_3 и окись магния MgO .

Руда, идущая для плавки в доменных печах, должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) максимальное содержание железа;
- 2) минимальное содержание вредных примесей – серы и фосфора;
- 3) легкая восстановимость;
- 4) достаточная пористость;
- 5) надлежащий химический состав пустой породы;
- 6) хорошая обогатимость.

Первое требование связано с необходимостью повышения производительности процесса плавки металла и, соответственно, со снижением его себестоимости. Очевидно, увеличение содержания железа в руде, загружаемой в доменную печь, снижает стоимость чугуна.

Второе требование обусловлено тем, что сера и фосфор отрицательно влияют на качество чугуна. Сера сообщает ему красноломкость, а фосфор – хладноломкость.

Пористость руды уменьшает расход топлива, так как при наличии каналов внутри руды соприкосновение газов происходит с большей поверхностью и, соответственно, процесс восстановления протекает значительно быстрее. Пористость таких руд, как бурый и шпатовый железняки, существенным образом повышается в результате нагрева.

Восстановимость руды определяется количеством тепла, необходимого для восстановления из нее железа. Она зависит от природы окислов железа, входящих в руду. Чем плотнее и менее пориста руда, тем она труднее восстанавливаема. Химический состав пустой породы может в сильной степени влиять на условия ее расплавления. Так, пустая порода известкового состава требует для расплавления меньше топлива, чем пустая порода кремнистого состава. При большом количестве кремнезёма в руде для получения легкоплавкого шлака требуется в шихте повысить содержание известняка. Но это приводит к повышенному выходу шлака, увеличению расхода кокса и снижению производительности печи.

3.1.2. Флюсы

Флюсы (или плавни, рис. 20) используются для оплавления пустой породы руды с образованием легкоплавкого соединения, которое называется шлаком. Плотность шлака ниже, чем металла, поэтому он будет находиться на поверхности расплавленного металла. Следовательно, основным функциональным назначением флюсов является шлакообразование, то есть превращение твердой пустой породы в жидкое состояние – шлак. Жидкий шлак легко удаляется из расплава: открывают специальную заслонку, и жидкость вытекает из плавильной печи.



Рис. 20. Некоторые металлургические флюсы:
а – боксит (wikipedia.org); *б* – известняк (karatto.ru);
в – плавиковый шпат (kamni.guru); *г* – шамот (pptk-energostroy.ru)

Шлак также выполняет защитную функцию, защищает расплавленный металл от воздействия атмосферы. При плавке в условиях высоких температур происходит интенсивное окисление металла и насыщение его азотом и водородом. Соединение металла с этими

газами приводит к образованию нежелательных химических соединений, снижающих прочностные свойства металла. Флюс также позволяет легировать металл, то есть изменять химический состав расплавленного металла путем введения в него легирующих компонентов. На границе расплавленного металла с жидким шлаком происходит диффузия легирующих компонентов флюса и расплавленного шлака в расплавленный металл, при этом устанавливается равновесный режим, определяющий нормальный ход плавки. Флюс наряду с защитной функцией выполняет задачи раскисления (то есть удаления кислорода из металла) и рафинирования (то есть очистки металла от примесей). Для раскисления металла используют кремний и марганец.

В зависимости от химического состава флюсы подразделяются:

- 1) на кислые флюсы, их основу составляют кислотные окислы (кремнезем SiO_2 и глинозем Al_2O_3);
- 2) основные флюсы, их основу составляют основные окислы (окись кальция CaO и окись магния MgO).

Отечественные железные руды содержат пустую породу преимущественно в виде кремнезема SiO_2 (кварцевый песок), поэтому для ошлаковывания пустой породы применяют сильно основные флюсы.

3.1.3. Огнеупорные материалы

Огнеупорные материалы используются в виде кирпичей для футеровки, то есть кладки, облицовки внутренних поверхностей плавильных печей. Кирпичи применяются не только в качестве строительного материала, но и в качестве восстановителя, определяющего вид процесса плавки.

Главнейшим свойством огнеупорных материалов является термохимическая стойкость – свойство противостоять не разрушаясь высокой температуре и разъедающему действию соприкасающейся с ними химически агрессивной среды материалов, главным образом шлака.

В зависимости от химического состава, огнеупорные материалы разделяются на кислые, нейтральные и основные.

Кислые огнеупоры изготавливают в виде динасового кирпича, который содержит не менее 93 % кремнезема SiO_2 . Его термостойкость составляет 1700 °С. Динасовый кирпич разъедается основными шлаками, но является весьма стойким по отношению к кислым шлакам.

Нейтральные огнеупоры изготавливают в виде шамотного кирпича, который содержит кремнезем SiO_2 и глинозем Al_2O_3 . Термостойкость шамотного кирпича составляет 1650 °С. Шамотный кирпич является одним из самых дешевых огнеупорных материалов, широко применяется в металлургии. В частности, он служит для огнеупорной внутренней кладки доменных печей.

Основные огнеупоры преимущественно изготавливают в виде магнезитового кирпича, содержащего окись магния MgO и окись кальция CaO . Их термостойкость составляет 2000 °С, но они весьма чувствительны к резким переменам температуры. Основные огнеупоры применяются также в виде порошка для наварки пода основных плавильных печей.

Необходимость применения трех видов огнеупорных материалов обусловлена тем, что кислотность этих материалов должна соответствовать атмосфере плавильной печи и применяемому флюсу. Если применяется кислый флюс, то ему должны соответствовать кислые огнеупорные материалы, в противном случае происходит разъедание и разрушение футеровки плавильной печи.

3.1.4. Металлургическое топливо

Металлургическое топливо используется для получения высоких температур в печах, а также для непосредственного участия в химических процессах восстановления железа.

Твердое топливо, употребляемое при выплавке чугуна, должно быть калорийным, кусковым и относительно дешевым. При этом топливо, по возможности, должно быть близким к чистому углероду и обладать достаточной пористостью, прочностью и сопротивлением истиранию (износостойкостью). Кусковатость топлива, зависящая от его прочности и износостойкости, определяет производительность плавильной печи. Пористость обеспечивает хорошее проникновение газов через столб плавильных материалов.

Кроме того, топливо должно содержать минимальное количество вредных примесей, особенно серы.

Основным топливом, применяемым при получении чугуна, является каменноугольный кокс (рис. 21). Он получается сухой перегонкой некоторых видов каменного угля в коксовых печах. Перегонка производится в течение 14–16 часов путем нагрева смеси коксующихся углей до температуры 1200 °С без доступа воздуха. При этом все летучие вещества удаляются, а получаемый остаток в виде спекшейся твердой пористой массы является коксом. Кокс содержит в среднем 86–90 % углерода, его калорийность примерно 8000 ккал/кг, а температура воспламенения равна примерно 700 °С. Механическая прочность и способность противостоять истиранию при движении вниз шихтовых материалов, дроблению от ударов и раздавливанию у кокса выше, чем у других видов твердого топлива. Размер кусков кокса составляет 25–60 мм.



Рис. 21. Разновидности каменного угля:
a – каменноугольный кокс; *б* – антрацит (wikipedia.org)

Зола и сера являются нежелательными примесями в коксе. Зола уменьшает содержание углерода, увеличивает количество потребляемого известняка и выход шлака, а также уменьшает прочность кокса. Присутствие серы повышает расход кокса и снижает производительность доменной печи, а также ухудшает качество выплавленного чугуна.

Древесный уголь получается в результате сухой перегонки дров. Уголь, полученный обжигом в кучах, обладает калорийностью 7300 ккал/кг и содержит до 90 % углерода. Отсутствие серы и не-

большая зольность являются весьма ценными качествами древесного угля как топлива для металлургических печей. Однако его прочность и сопротивление истиранию значительно ниже, чем у кокса. Поэтому он применяется в доменных печах небольшого объема (200–300 м³) при выплавке высококачественного чугуна из руд, содержащих незначительные примеси серы и фосфора.

Антрацит – ископаемый уголь, добываемый в Донбассе, содержит до 97 % углерода при очень малой зольности и небольшом содержании серы. Теплотворная его способность составляет 8500 ккал/кг. Отрицательным качеством антрацита является его свойство при высоких температурах расслаиваться и измельчаться. Последнее обстоятельство заставляет пользоваться антрацитом главным образом как добавкой к коксу (от 15 до 50 % от веса кокса).

Природный горючий газ (метан) обладает высокой калорийностью, низким содержанием вредных примесей и отсутствием золы. Он содержит 90–98 % углеводородов (СН₄ и С₂Н₆).

3.2. Подготовка шихты к доменному производству

Предварительная подготовка железной руды производится на горно-обогатительных комбинатах с целью повышения производительности доменных печей. Подготавливают даже наиболее богатые железом руды. Это снижает расход технологического сырья и топлива. Подсчитано, что каждый процент увеличения содержания железа в руде повышает производительность доменных печей на 2–3 % и сокращает удельный расход кокса на 2 %.

Оптимальным составом пустой породы является такой, при котором содержание основных и кислых окислов одинаково, то есть $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \approx 1$. При этом условии получается самоплавкая руда, и образование шлака происходит без каких-либо добавок к шихте. Но обычно это отношение меньше единицы, то есть пустая порода получается кислой, что требует ее усреднения, которое осуществляется путем введения в состав шихты известняка.

Предварительная подготовка включает четыре основных этапа: дробление, грохочение, обогащение и окускование.

Дробление руды производится с целью получения кусков оптимальных размеров с достаточно большой площадью соприкосновения поверхности руды с газами. Дробление – один из наиболее дорогих процессов подготовки руды. Для крупного и среднего дробления используется щековая дробилка. Также дробление осуществляют в шаровых мельницах, представляющих собой вращающиеся барабаны с чугунными шарами внутри.

Грохочение применяется для сортировки кусков руды по размерам. С этой целью руду после дробления пропускают через плоские или барабанные грохоты, которые представляют собой металлические сита с ячейками различной величины. Чем выше восстановимость руды, тем большие размеры кусков могут быть использованы в производстве. Для легковосстановимых бурых железняков оптимальные размеры кусков составляют 80–120 мм, для трудновосстановимых магнитных железняков – 30–50 мм.

Руды обогащают для повышения содержания железа в шихте. Обогащение производится путем разделения руды на концентрат и хвосты (отходы). Современные способы обогащения позволяют получать рудный концентрат с содержанием железа до 70 % и выше. Однако оптимальное содержание железа в концентратах для существующих технологий плавки чугуна должно быть 64–67 %.

Современные способы обогащения руды представляют собой промывку, гравиметрическую и магнитную сегрегацию (отделение). Промывка руды осуществляется в специальных камерах струей воды под высоким давлением с целью вымывания глинистых и песчаных примесей.

Гравиметрическое отделение пустой породы осуществляется в ваннах, которые наполняют специальными суспензиями с высоким удельным весом. Пустая порода всплывает, а концентрат остается на дне.

Магнитное отделение пустой породы осуществляется на магнитном сепараторе, который состоит из двух транспортерных лент, одна из которых имеет внутри электромагнит. Куски руды (рудный концентрат), поступающие из питателя на питающую ленту, проходя через магнитное поле, намагничиваются и пристают к снимаю-

щей ленте, а куски пустой породы (немагнитная фракция) свободно падают с ленты.

Окускование заключается в переработке рудного концентрата в кусковые материалы необходимых размеров. Его проводят двумя способами: агломерацией и окатыванием.

Агломерация нужна для того, чтобы мелкие частицы рудного концентрата (рудная мелочь) превратить в куски. Для этого 40–50 % рудного измельченного концентрата смешивают с 15 % известняка, 25 % возврата мелкого агломерата 6–12 % коксовой пыли и затем спекают при температуре 1300–1500 °С. В ходе спекания происходит выгорание серы. Полученный прочный и пористый офлюсованный продукт (агломерат) дробят на куски, при этом получают в остатке мелкие частицы агломерата, которые используют в качестве возврата.

По химическому составу агломерат близок к исходной руде, но лучше восстанавливается благодаря высокой пористости, достигающей 50 %.

Окомкование состоит в том, что увлажненный мелкоизмельченный концентрат в смеси со специальным сортом глины (бентонит) поступает во вращающийся барабан, где превращается в комки. Эти комки в другом барабане покрываются угольным порошком и поступают на обжиг при температуре 1300 °С. При обжиге окатыши растрескиваются и становятся более пористыми. Получаемые в результате этого процесса окатыши диаметром примерно 30 мм отличаются высокой прочностью и пористостью. Благодаря высокой пористости, достигающей 50 %, их восстановимость выше, чем восстановимость агломерата.

Использование агломерата и окатышей исключает отдельную подачу флюса в доменную печь, так как флюс в необходимом количестве входит в их состав. Это повышает производительность доменной печи и снижает расход кокса.

3.3. Доменный процесс выплавки чугуна

В доменную печь загружают шихту, состоящую из концентрата железной руды, флюса и кокса. Шихта — это смесь материалов, загружаемых в плавильную печь для получения металла заданного химического состава. Шихта может состоять из офлюсованного агломерата, окатышей и кокса. Она должна быть прочной, кусковой (оптимальные размеры кусков должны составлять до 120 мм). Крупные куски замедляют химические реакции, мелкие затрудняют перемещение газовой фазы.

3.3.1. Устройство доменной печи

Чугун выплавляется почти исключительно в коксовых доменных печах шахтного типа, отличающихся высокой производительностью (до 5000 т в сутки и выше).

Верхняя цилиндрическая часть, служащая для загрузки плавильных материалов и отвода газов, называется колошником. Ниже колошника расположена коническая часть печи — шахта, которая книзу расширяется для облегчения опускания материалов и лучшего распределения газов по поперечному сечению печи. Ниже шахты следует цилиндрическая часть — распар. Под ним расположена часть печи в виде усеченного конуса с меньшим нижним основанием, называемая заплечиками. Заплечики имеют такую форму из-за сокращения объема шихтовых материалов в результате образования жидких продуктов плавки. Нижняя цилиндрическая часть доменной печи называется горном. В верхней части горна происходит сжигание кокса, а внизу собираются продукты плавки — чугун и шлак. Как горн, так и заплечики оборудуются водяным охлаждением. В современных мощных доменных печах шахта также имеет водяное охлаждение. Для выпуска чугуна и шлака предназначены чугунная и шлаковая лётки. Объем доменной печи, занятый плавильными материалами и продуктами плавки, называется полезным объемом. Он у современных доменных печей составляет 2000—5000 м³. Высота от оси чугунной лётки до нижней кромки большого конуса, служащего для загрузки шихты (в его опущенном состоянии), называется полезной высотой. Она достигает 35 м.

Доменная печь «Северянка» занесена в Книгу рекордов Гиннеса как крупнейшая печь в мире на момент пуска в 1986 году и до сих пор сохраняет этот статус в России и в Европе. Высота – 102 метра, корпус печи сварен из спецстали толщиной 60 мм. «Северянка» может выдавать по 11 000 тонн чугуна в сутки (более 4 млн тонн в год). За один цикл – около 6000 тонн металла. По массе это железнодорожный состав из 100 вагонов (рис. 22).



Рис. 22. Доменная печь № 5 «Северянка»
(livejournal.com)

Вертикальное сечение рабочего пространства доменной печи (рис. 23) называется ее профилем.

Вся печь выкладывается из огнеупорного шамотного кирпича и охватывается кожухом из листовой стали. Шахтная часть печи через кольцо опирается на фундамент. Воздух в печь подается специальными машинами – воздуходувками – через фурмы. Воздуходувка обеспечивает подачу до 5000 м³ воздуха в минуту под давлением до 4,5 атм. Подача воздуха происходит через специальные каналы – фурмы, равномерно расположенные по контуру поперечного сечения печи. Количество фурм в доменных печах разное, их число зависит от мощности печей. В малых печах содержится около 8 фурм, в больших и мощных печах их количество достигает 20 штук. Для уменьшения расхода топлива и повышения производительности печи поступающий в нее воздух предварительно подогревается до 800–1200 °С.

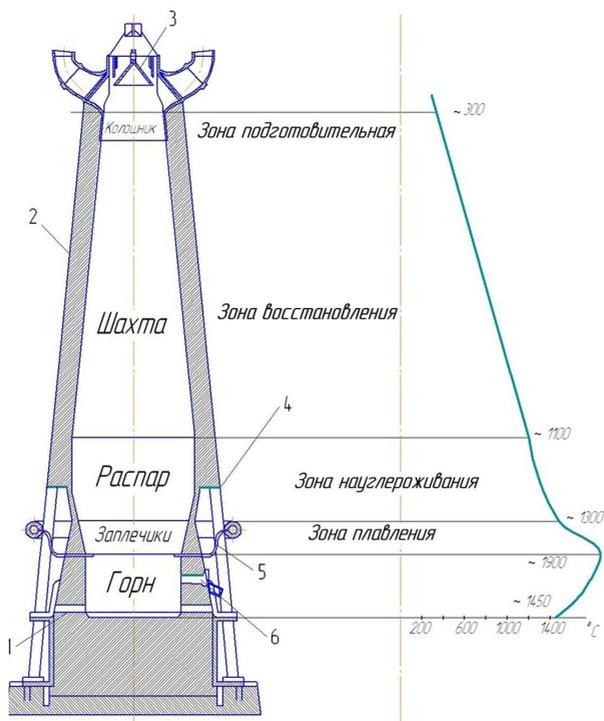


Рис. 23. Схема доменной печи и распределения температуры по высоте печи: 1 – чугунная летка; 2 – шахта; 3 – колошниковый затвор; 4 – кольцо; 5 – фурмы; 6 – шлаковая летка

3.3.2. Воздухонагреватели и загрузочные устройства

Воздухонагреватель (рис. 24) представляет собой круглую башню диаметром до 8 м и высотой до 40 м, кожух которой сварен из листовой стали толщиной 16–20 мм, а внутренняя часть выложена огнеупорным кирпичом. Он является энергоаккумулятором, сначала забирающим тепло, а потом отдающим его технологической среде – поступающему холодному воздуху, который называют дутьем.

Воздухонагреватель состоит из камеры горения и специальной кирпичной кладки (насадки) с каналами. При нагреве кирпичной кладки (режим разогрева воздухонагревателя) доменный газ подводится через специальное отверстие и сгорает в камере сгорания в струе воздуха, подводимого через другое отверстие.

Продукты сгорания при температурах 1250–1400 °С поднимаются по широкому каналу, затем опускаются по мелким, выложенным из огнеупорного кирпича каналам и выходят через нижнее отверстие в дымовую трубу. После нагрева кладки выпуск газа прекращается, а входные отверстия закрываются, и открывается отверстие для впуска воздуха. Через это отверстие начинает вдуваться холодный воздух от воздухоудвки. Проходя через каналы, воздух нагревается и, выходя через отверстие, направляется к фурмам доменной печи. Для работы доменной печи необходимо иметь три одновременно действующих воздухонагревателя. Одновременно с пропуском воздуха через прогретый воздухонагреватель прогревают второй и третий. Один из них должен быть полностью нагрет ко времени выключения первого. Мощные доменные печи имеют 4 воздухонагревателя для обеспечения нагрева дутья до 1200 °С.

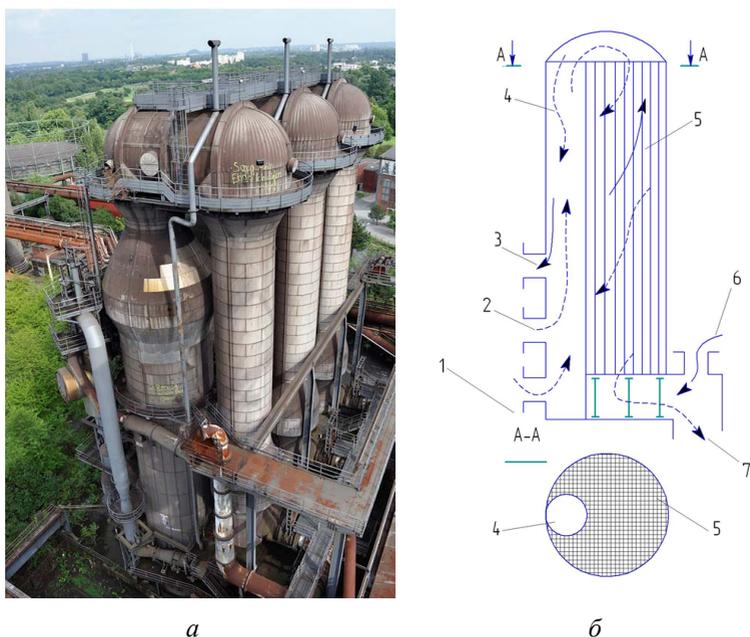


Рис. 24. Воздухонагреватель для доменной печи: *а* – внешний вид (wikipedia.org); *б* – схема устройства; 1 – окно для входа воздуха; 2 – окно для входа газа; 3 – окно выхода горячего воздуха; 4 – камера горения; 5 – насадка; 6 – окно для входа дутья; 7 – труба

Современные воздухонагреватели оборудованы автоматическими регуляторами для газовых горелок и электрическими приводами для перевода с газа на воздух и обратно. Кроме того, приборы контролируют температуру воздуха и отходящих газов, а также химический состав продуктов горения и расход газа.

Одним из важнейших условий правильной работы доменной печи является равномерное распределение загружаемых материалов по ее горизонтальному сечению. При неравномерной загрузке газы в основной массе могут устремиться по пути наименьшего сопротивления, не использовав полностью свою тепловую энергию и восстановительную способность. Для уменьшения утечки газов при загрузке применяется двойной колошниковый затвор (рис. 25), состоящий из системы конусов и воронок.

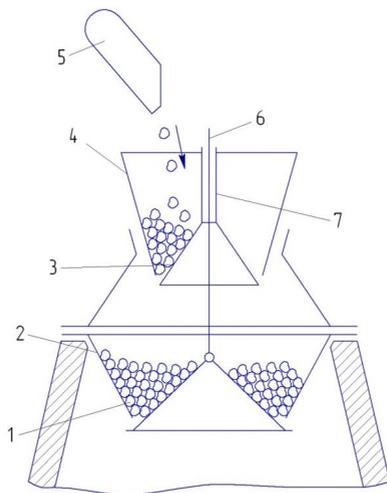


Рис. 25. Колошниковый затвор (засыпной аппарат):

1 – шихтовые материалы; 2 – нижняя воронка; 3 – верхний конус;
4 – приемная воронка; 5 – скиповый вагончик; 6 – штанга; 7 – труба

Шихтовые материалы при опрокидывании скипового вагончика засыпаются в приёмную воронку. После этого приёмная воронка и закрывающий ее конус с помощью червячной передачи поворачиваются вокруг вертикальной оси на 60° . На новое место засыпается очередная порция шихтовых материалов. Так происходит 6 раз.

При опускании верхнего конуса шихтовые материалы попадают в нижнюю воронку. Это обеспечивает более равномерное распределение шихты на поверхности нижнего конуса. После чего верхний конус поднимается и закрывает приёмную воронку, чтобы изолировать шихтовые материалы от взаимодействия с воздухом атмосферы. При опускании нижнего конуса, подвешенного на металлической штанге, шихтовые материалы попадают в печь, равномерно заполняя её горизонтальное сечение. После этого конус поднимается и разрывает связь воронки с шахтой. Цикл загрузки шихтовых материалов возобновляется.

3.3.3. Сущность доменного процесса

Сущность доменного процесса заключается в восстановлении окислов железа, содержащихся в руде, и в ошлаковании пустой породы. Восстановителем является окись углерода и твердый (сажистый) углерод. Изменения, происходящие в потоке опускающихся твердых материалов и поднимающихся газов при их взаимодействии, рассмотрим отдельно, с учетом температурных зон доменной печи (см. рис. 23).

В газах, поднимающихся снизу вверх, наблюдаются следующие процессы:

1. Горение топлива: $C + O_2 = CO_2$. Эта реакция происходит в области расположения фурм, где достигаются наиболее высокие температуры (до $1900\text{ }^\circ\text{C}$).

2. Восстановительные реакции (при $t > 1000\text{ }^\circ\text{C}$). Образовавшийся при сгорании кокса углекислый газ восстанавливается углеродом раскаленного кокса до окиси углерода: $CO_2 + C = 2CO$. Поднимающаяся из горна в верхние зоны доменной печи окись углерода является энергичным восстановителем, способным отбирать кислород из твердых окислов железа.

3. Выделение сажистого углерода (вследствие понижения температуры) при $400\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$: $2CO = CO_2 + C$ (сажистый углерод). Получающийся сажистый углерод проникает через поры и трещины внутрь кусков руды, а также оседает на их наружной поверхности и при температуре свыше $1000\text{ }^\circ\text{C}$ восстанавливает закись железа.

При этом из-за различной прочности связей атомов кислорода высший окисел железа превращается в низший окисел в следующем порядке:



В шихте, опускающейся сверху вниз, протекают следующие процессы:

1. Испарение влаги при температурах до 500 °С (а иногда и до 800 °С), потому что теплопроводность шихтовых материалов низка.
2. Разложение углекислых солей при $t = 900$ °С.
3. Удаление летучих веществ (при $t = 400$ – 900 °С).
4. Восстановление окислов железа (при $t = 500$ – 1100 °С).

В доменной печи твердые окислы железа могут восстанавливаться окисью углерода (так называемое косвенное восстановление: $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$) или твердым углеродом (прямое восстановление: $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$).

3.3.4. Шлакообразование в доменной печи

Пустая порода с флюсом начинает плавиться после расплавления железа в верхней части заплечиков при $t = 1200$ °С. Расплавленная масса пустой породы и флюсов образует шлак, который, стекая вниз, растворяет золу и, соприкасаясь с чугуном, поглощает из него серу. При правильно идущем процессе плавки окончательное расплавление пустой породы должно заканчиваться в нижней части заплечиков, в области самой высокой температуры, после того как все железо руды обогатится углеродом и расплавится.

Высокие температуры в верхних областях печи нежелательны, так как при этом расплавление руды может начаться раньше полного восстановления железа из окислов и невосстановленные окислы железа могут образовать с кремнеземистой частью руды жидкоплавкие силикаты, стекающие вниз в виде шлака. Из такого шлака очень трудно извлечь железо. Поэтому во избежание перехода железа в шлак необходимо на возможно большей части высоты печи обеспечивать умеренную температуру, а переход от умеренных температур к высоким должен происходить как можно быстрее.

Количество окислов железа, остающихся нерасплавленными к моменту начала шлакообразования, зависит от свойств руды —

ее восстановимости и степени тугоплавкости пустой породы. Наилучшими условиями будут такие, при которых руда отличается легкой восстановимостью, а пустая порода — высокой тугоплавкостью. Ясно, что в этом случае к началу шлакообразования железо успеет восстановиться и расплавиться. Наихудшие условия будут в том случае, если пустая порода будет легкоплавкой, а окислы железа — трудновосстановимыми: при нагреве кусков руды до сравнительно невысокой температуры пустая порода начнет расплавляться и образовывать шлак, в котором будут растворяться еще не восстановленные окислы железа.

Одним из основных свойств шлака является его текучесть в расплавленном состоянии, зависящая от вязкости (с увеличением вязкости текучесть уменьшается). Для нормального хода доменной плавки необходимо иметь достаточно жидкотекучий шлак в области температур 1450–1500 °С.

3.3.5. Продукты доменного производства

Основным продуктом доменного производства является чугун, побочными продуктами — шлак, доменный (колошниковый) газ, доменная пыль.

Выплавляемые чугуны в зависимости от назначения подразделяются на передельные, предназначенные для выплавки стали (передела в сталь), литейные, используемые для производства отливок, и специальные чугуны — ферросплавы, применяемые для раскисления стали.

Самой большой группой продуктов доменного производства являются передельные чугуны. Они составляют до 80 % от общего объема выплавляемого металла. Структурно в этих чугунах углерод находится в химически связанном состоянии в виде устойчивого химического соединения — цементита. Такие чугуны содержат 4,0–4,4 % углерода, 0,2–1,75 % кремния, 0,5–1,75 % марганца, не более 0,08 % серы и не более 0,07 % фосфора. Однако химический состав чугунов существенно различается в указанных пределах в зависимости от последующего способа выплавки стали.

Второй количественной группой продуктов доменного производства являются литейные чугуны (до 15 % от общего объема

продукции). В их составе имеется повышенное содержание кремния (2,75–3,25 %) и фосфора (до 1,2 %) и умеренное количество марганца (в среднем до 0,8 %) и серы (до 0,05 %). Литейные чугуны, содержащие в своем составе небольшое количество фосфора (до 0,1 %), называются гематитами.

Ферросплавов в доменных печах выплавляется сравнительно мало (до 3 %). Ферросплавы с большим содержанием кремния, марганца и других элементов используются в качестве технологических добавок в шихту для раскисления стали. К доменным ферросплавам относятся ферросилиций, содержащий до 13 % кремния, ферромарганец, содержащий в среднем 75 % марганца, и зеркальный чугун с 10–25 % марганца.

Доменные шлаки применяются для производства строительных материалов: кирпича, блоков, щебня и др.

Колошниковый газ является горючим газом, используемым после очистки в качестве топлива. Он содержит до 30 % окиси углерода CO и до 3 % водорода H₂.

Улавливаемая при помощи различных очистных сооружений доменная пыль является весьма ценным сырьем для доменного передела. Она со связующими веществами подвергается спеканию и в виде окатышей возвращается в доменное производство.

3.3.6. Разливка чугуна

Шлак и чугун выпускаются по мере накопления в горне: шлак через каждые 40–50 мин, а чугун через 4–6 ч. Чугун заливается в чугуновозный ковш (ёмкостью до 100 т). Последний представляет собой сосуд цилиндрической формы, футерованный внутри огнеупорным кирпичом и опирающийся через цапфы на раму, установленную на двух железнодорожных тележках. В ковше чугун отвозится в сталеплавильный цех или – для разливки – на разливочную машину.

Жидкий чугун, предназначенный для передела в сталь, сливается в особые ковши, называемые миксерами (рис. 26). Миксер делается из листовой стали и футеруется внутри огнеупорным материалом. Ёмкость миксера составляет 600–2000 т. В миксерах чугун остывает достаточно медленно. К тому же для поддержания его в жидком

состоянии миксеры иногда подогреваются с помощью доменного газа или газа коксовальних печей.

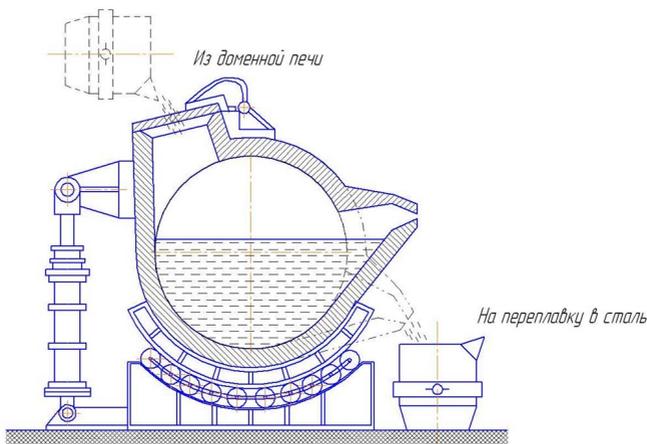


Рис. 26. Миксер

Выдержка в миксерах обеспечивает смешивание чугуна, выпускаемого в разное время или различными доменными печами, и позволяет получить чугун усредненного химического состава, что очень важно для проведения последующих процессов передела чугуна в сталь. Кроме того, при добавлении в чугун некоторого количества марганца он во время длительной выдержки в миксере теряет часть серы, что способствует улучшению его качества. Марганец, вступая в реакцию с серой, образует сернистый марганец MnS , который вследствие плохой растворимости в жидком чугуне уходит в шлак.

Если чугун предназначен для получения из него чугунных слитков (чушек), то он транспортируется в ковше к разливочной машине.

Разливочная ленточная машина состоит из двух бесконечных цепей, к которым прикреплены специальные формы для чугуна — мульты. Движение форм происходит по окружности или по прямой линии по принципу конвейера. Залитый в формы чугун охлаждается, формы опрокидываются, и чугунные чушки попадают непосредственно в вагоны. Все эти операции механизированы и автоматизированы. Порожние мульты обрызгиваются изнутри известковым молоком. Вода, испаряясь, охлаждает форму, а оставшаяся на вну-

тренней поверхности известь предохраняет ее от прилипания расплавленного чугуна.

В состав шлаков коксовых доменных печей входят: 33–40 % SiO_2 ; 42–48 % ($\text{CaO} + \text{MgO}$); 10–20 % Al_2O_3 . Шлак из доменной печи выпускают в ковш, в котором он отвозится в отвал или в бассейн с водой. При быстром охлаждении шлак превращается в мелкие зерна (гранулы). Соприкасаясь с водой, он гранулируется, затем извлекается из бассейна грейфером мостового крана и отправляется для дальнейшей переработки и производства шлаковаты, шлакоблоков, цемента и др.

3.4. Metallургия стали

В настоящее время только до 20 % выплавляемого в доменных печах чугуна идет на чугунные отливки, а до 80 % перерабатывается в сталь. Такой чугун, называемый передельным, идет на выплавку стали в твердом или жидком виде. Кроме чугуна, в качестве шихты для выплавки стали может применяться чугунный и стальной лом, отходы собственного производства, стружка, частично железная и марганцевая руда и др.

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода менее 2 %.

Процесс получения стали сводится к понижению количества входящих в состав чугуна примесей. Примеси, попавшие в чугун вследствие реакций восстановительного характера, должны быть удалены путем окислительных реакций. Например, марганец в доменной печи попадает в чугун в результате реакции: $\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO}$ с последующим растворением восстановленного марганца в железе, а его удаление происходит по реакции: $\text{Mn} + \text{FeO} = \text{MnO} + \text{Fe}$. Для осуществления подобных реакций необходимо наличие окислов железа в расплавленном металле и соответствующей (высокой) температуры в плавильном пространстве. Обеспечение этих важнейших условий в различных сталеплавильных агрегатах осуществляется по-разному.

Основными агрегатами для выплавки стали являются конверторы, мартеновские и электрические печи.

3.4.1. Выплавка стали в конвертерах

Способ выплавки стали в кислых конвертерах называется по фамилии изобретателя бессемеровским (рис. 27). Сущность способа заключается в продувании струи воздуха через расплавленный чугун. Кислород вдуваемого воздуха окисляет входящие в него примеси: углерод, марганец, кремний и частично железо, которые после окисления либо переходят в шлак в виде окислов, либо удаляются через горловину конвертера в виде газов. Окислительные реакции сопровождаются выделением значительного количества тепла, что приводит к повышению температуры чугуна от 1300 до 1750 °С.

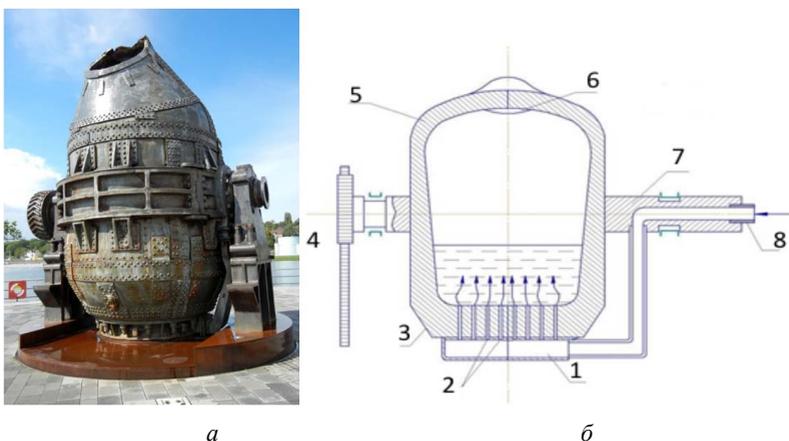


Рис. 27. Сталеплавильный конвертор:
а – внешний вид (Рихау); *б* – схема;

1 – воздушная коробка; *2* – отверстия в днище конвертера;
3 – кожух; *4* – зубчатая передача; *5* – футеровка; *6* – горловина;
7 – цапфа; *8* – воздухопровод

Чугун для бессемерования должен содержать значительное количество кремния (1–1,7 %) и марганца (0,8–1,25 %), так как металл в конвертере нагревается за счет выгорания этих примесей. При этом следует иметь в виду, что сера и фосфор при бессемеровании не удаляются, а переходят в получаемую сталь и оказывают негативное влияние на ее качество. Поэтому в бессемеровском чугуне допускается не выше 0,06 % серы и 0,07 % фосфора.

Бессемеровский конвертор представляет собой вращающийся сосуд, кожух которого изготовлен из листовой стали толщиной 10–30 мм. Внутренняя полость выложена кислой футеровкой из динасового кирпича, содержащего до 94 % кремнезема, и набита специальной кислой набойкой, содержащей 90–92 % кремнезема и глины.

В днище конвертора сделаны отверстия диаметром 10–20 мм для вдувания под давлением 1,5–2 атм сжатого воздуха. В воздушную коробку воздух подается через одну из цапф, на которые опирается и на которых поворачивается конвертор. Эта цапфа делается полой и шарнирно соединяется с воздухопроводом.

Газообразные продукты процесса удаляются через горловину, через эту же горловину вливается в конвертор чугун и выпускается сталь. Для заливки жидкого чугуна в конвертор используется зубчатая передача, которая наклоняет его так, чтобы отверстия в днище находились выше уровня залитого чугуна (рис. 28).

После пуска дутья конвертор поворачивают днищем вниз. Металл при этом занимает от $1/3$ до $1/5$ высоты цилиндрической части конвертора.

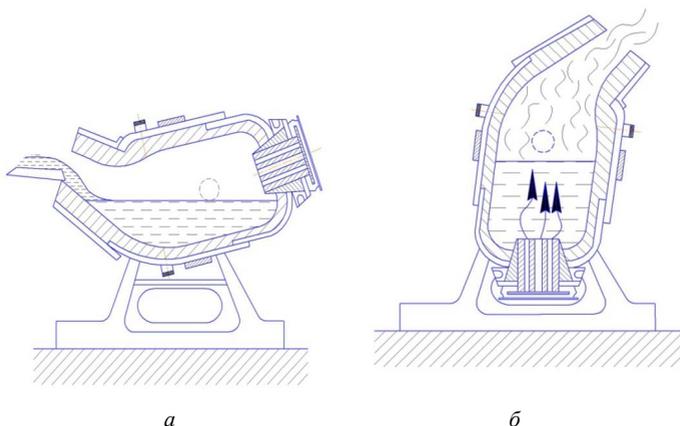


Рис. 28. Схемы заливки жидкого чугуна (*а*) и продувки воздуха (*б*) в конверторе

Процесс переработки чугуна в бессемеровском конверторе разделяется на три периода.

Период окисления кремния и марганца. В конвертере происходят реакции окисления железа, кремния и марганца кислородом ддуваемого воздуха по уравнениям:



Тепло, выделяемое при экзотермических реакциях окисления, поддерживает ванну в расплавленном состоянии, обеспечивая дальнейшее повышение температуры металла и компенсацию тепловых потерь на лучеиспускание и газы.

Одновременно происходят реакции окисления примесей чугуна растворенной в нем закисью железа:



Вторичные реакции имеют большее значение, чем первичные. Продукты окисления кремния и марганца не растворяются в металле и уходят в шлак. Поэтому первый период называют еще периодом шлакообразования.

В конце первого периода, который длится 3—4 мин, выгорание кремния и марганца замедляется, и начинает усиливаться выгорание углерода.

Период окисления углерода. Усилившееся горение углерода характеризует начало второго периода. Сгорая, углерод образует окись углерода и углекислый газ по реакциям:



Как видно из характера вторичных реакций, в этот период развиваются дальше реакции восстановления железа из его окислов. Горение углерода сопровождается вырывающимся из горловины конвертора ослепительно белым пламенем. Обе реакции протекают с поглощением тепла (изотермический процесс), поэтому во втором

периоде наблюдается незначительное снижение температуры ванны. К концу выгорания углерода температура металла составляет 1600–1650 °С. Второй период длится 9–16 мин.

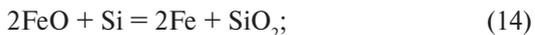
Окисление железа (период дыма). Выделение дыма свидетельствует, что входящие в состав чугуна примеси почти исчезли и что кислород проходящего через расплавленный металл воздуха соединяется с железом. С появлением бурого дыма процесс прекращают, так как выгорание железа способствует увеличению угара и большому насыщению металла закисью железа. Третий период является самым коротким и длится иногда меньше минуты.

При изготовлении углеродистой стали процесс иногда останавливают на определенном количестве углерода. Тогда третий период по существу отсутствует. Однако вследствие затруднительного обеспечения заданного количества углерода продувку чаще ведут до мягкого металла (с малым содержанием углерода), затем его раскисляют и науглероживают. Длительность всех трех периодов составляет около 20–25 мин.

По окончании процесса бессемерования в металле остается некоторое количество закиси железа FeO. Ее присутствие делает сталь красноломкой и менее прочной. Поэтому для окончательного раскисления в конвертор добавляется некоторое количество раскислителей, таких как ферромарганец или ферросилиций. Введение в расплавленную сталь ферромарганца вызывает реакцию



Полученная закись марганца MnO переходит в шлак. Такой же результат дает введение ферросилиция и алюминия:



Следует подчеркнуть, что чем лучше раскислен металл, тем выше его механические качества.

Расплавленная сталь способна поглощать достаточно большое количество газов. Наличие в металле растворенных газов окиси углерода CO, азота N₂ и водорода H₂ способствует образованию газовых пузырей. Присадкой алюминия и кремния можно значительно снизить газонасыщенность стали.

Хорошим раскислителем стали является титан, вводимый в виде сильно углеродистого ферротитана, содержащего около 15 % титана. Сталь, раскисленная титаном, обладает наилучшими механическими качествами. Алюминий и титан не только хорошо удаляют кислород из расплавленного металла, но и способствуют измельчению зерна выплавляемого металла.

Марганцевая присадка, кроме действия ее в качестве раскислителя, способствует также удалению серы: $\text{FeS} + \text{Mn} = \text{Fe} + \text{MnS}$. Как было указано выше, MnS почти не растворяется в жидком металле и уходит в шлак.

Применение кислорода в конверторном производстве. Бессемеровская сталь имеет повышенное содержание азота, которое увеличивается по мере продувки воздухом жидкого металла. Такая сталь обладает повышенной прочностью, но пониженной пластичностью. Применение в конверторном производстве вместо воздуха технически чистого кислорода обеспечивает хорошее качество стали и дает возможность использовать для переработки чугуны, содержащие меньше кремния и марганца, чем это допускается при обычном бессемеровском или томасовском процессе. Конверторный металл, выплавленный с применением кислорода, по химическому составу и механическим свойствам не уступает мартеновскому. Вредных примесей — фосфора и серы — содержится в нем даже меньше. Газонасыщенность такого металла значительно ниже. В частности, азота вдвое меньше. Конверторная сталь, полученная с помощью продувки кислородом, обладает повышенной пластичностью. Ударная вязкость у конверторной стали выше, чем у мартеновской, особенно при низких температурах.

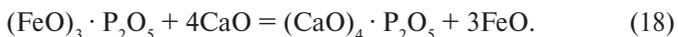
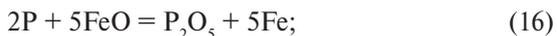
Емкость кислого конвертора — 10, 20, 30 т и выше (на кислородном дутье — до 350 т). Расход воздуха 3,25–4,25 м³/(т · мин). Стойкость приставного сменного днища — до 30 плавок, так как оно подвергается воздействию не только чугуна, но и сильных струй воздуха. Выход годного металла составляет 85–89 %.

Шлаки содержат 45–64 % кремнезема, 20–45 % окиси марганца, 6–18 % закиси железа, остальное составляют глинозем, окись магния и кальция. Они идут обычно для повторной переплавки в ка-

честве шихтовых материалов доменных печей. Количество плавов в сутки для конвертора средней ёмкости достигает 40.

Выплавка стали в основных конверторах называется томасовским процессом. При проведении бессемеровского процесса не происходит удаления фосфора из чугуна. Для удаления фосфора необходимо наличие в конверторе основного шлака (добавка извести). Однако основной шлак недопустим при бессемеровании, так как кислая футеровка вступает в химическую реакцию с известью CaO и разрушается. Для удаления фосфора делают в конверторе основную футеровку и присаживают вначале продувки известняка.

Футеровка основного конвертора делается из доломита ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), а для получения сильно основного шлака добавляется в качестве флюса известь. Толщина внутренней кладки конвертора достигает 400 мм. Основная футеровка и известь позволяют перевести окись фосфора в шлак по реакциям:



В томасовском процессе фосфор является главным элементом, при выгорании которого повышается температура металла. Поэтому передельный чугун должен содержать повышенное количество фосфора (1,8–2,25 %). В конце томасирования количество фосфора снижается до минимального значения, равного 0,04–0,05 %. Нормальный томасовский чугун содержит приблизительно 3,5 % углерода, до 0,6 % кремния, 1,5 % марганца, 2 % фосфора и до 0,08 % серы. Кремний рассматривается как вредная примесь, так как он увеличивает количество шлака, разъедает футеровку и обедняет шлак содержанием P_2O_5 . Марганец предохраняет железо от выгорания и делает шлак более легкоплавким. Температура плавления томасовского чугуна несколько ниже температуры бессемеровского и составляет 1150–1250 °С.

Перед началом процесса в конвертор забрасывается свежееобожженная известь в количестве 12–18 % от веса чугуна. После этого вливается чугун и пускается дутье. В томасовском процессе различают три периода.

Окисление кремния и марганца. Этот период сходен с аналогичным процессом, происходящим при выплавке стали бессемеровским способом, но вследствие значительно меньшего содержания кремния и меньшей начальной температуры разогрев ванны ниже, чем при бессемеровании. Длительность первого периода 5–6 мин. Шлак в основном состоит из окислов железа, кремния и марганца.

Выгорание углерода. Вследствие более низкой температуры процесса этот период сопровождается менее ярким пламенем, чем при бессемеровании. При этом температура ванны также несколько понижается. Длительность периода составляет 4–5 мин. Во втором периоде шлак меняет свой состав, в нем все больше растворяется известь.

Интенсивное окисление фосфора кислородом закиси железа. Сильное повышение температуры ванны в этот период способствует разжижению шлаков. В шлак уходит фосфор в виде $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$.

С выгоранием фосфора начинается окисление железа, поэтому полного удаления фосфора добиться нельзя, так как это вызывает повышенный угар железа.

Десульфурация в процессе основана на том, что сера из FeS , растворяющегося в чугуне, и из шлака частично переходит в CaS , который растворяется в основном шлаке и не растворяется в металле.

О готовности металла судят по результатам пробы. При нормальном содержании фосфора излом имеет серый, волокнистый вид, при повышенном содержании — блестящий, крупнозернистый.

Продувку при томасировании всегда ведут до мягкого металла с последующим науглероживанием и раскислением. Перед добавлением раскислителей сливают шлак, так как входящие в их состав углерод, марганец и кремний могут восстановить фосфор из шлака и перевести его снова в металл. Шлаки основного конвертора содержат до 25 % P_2O_5 и могут использоваться в качестве удобрения в сельском хозяйстве.

Преимущества и недостатки выплавки стали в конверторах

К *достоинствам* конвертирования относят:

- 1) высокую производительность;
- 2) незначительные эксплуатационные расходы;
- 3) отсутствие необходимости в металлургическом топливе, так как процессы протекают за счет теплоты выгорания примесей.

Недостатками конвертирования являются:

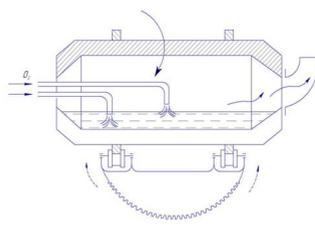
- 1) невозможность переработки стального лома (скрапа), так как работа идет на жидкой шихте;
- 2) большая скорость плавки ограничивает возможность управления этим процессом, что затрудняет получение стали точного химического состава;
- 3) ограничение состава передельного чугуна: для бессемерования применяется чугун с малым содержанием серы и фосфора, а для томасирования — лишь чугун с большим содержанием фосфора; чугуны с промежуточным содержанием фосфора ни тем, ни другим способом перерабатываться не могут;
- 4) высокая газонасыщенность стали, оказывающая отрицательное влияние на механические свойства.

3.4.2. Выплавка стали в роторной печи

Вращающаяся (роторная) печь (рис. 29) предназначена для переработки чугуна, выплавляемого из природно-легированной качканарской руды, содержащей ванадий. Для удобства скачивания шлака печи нужно придавать наклон в 40° , а для выпуска металла — наклон в 15° .



a



б

Рис. 29. Роторная печь:
a — внешний вид (wikipedia.org); *б* — схема

Печь представляет собой барабан с ванной емкостью в 20 т, футерованный изнутри асбестом, легковесным шамотом и магнетитовым кирпичом. После заливки жидкого чугуна печи задается вращение со скоростью 0,8 об/мин. В начале вращения в горловину печи вдвигают две охлаждаемые фурмы, через которые подается

кислород. Кислород, поступающий непосредственно в ванну, подается под давлением в 5 атм, а вдуваемый выше ванны — под давлением в 3 атм. Длительность плавки полупродукта 10 мин. Полный цикл плавки длится 50 мин. Примеси серы, фосфора и кремния выгорают быстрее и, главное, полнее, чем в конверторах. В такой печи может быть использовано до 25 % скрапа по отношению к массе жидкого чугуна.

3.4.3. Выплавка стали в мартеновских печах

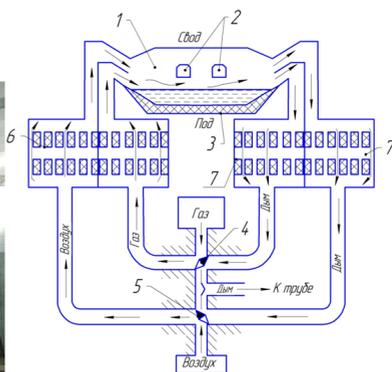
В настоящее время около 80 % стали выплавляется в мартеновских печах. Мартеновский способ позволяет использовать значительное количество стального и железного лома (скрап). Но холодное топливо (например, горючий газ) при сгорании в струе холодного воздуха развивает температуру не более 1400 °С, что недостаточно для нормального хода плавки. Для повышения температуры в плавильном пространстве применяется регенеративная печь, действие которой основано на том, что теплота отходящих продуктов горения используется для периодического нагрева специальных камер — регенераторов. В свою очередь, регенераторы нагревают проходящие через них горючий газ и воздух. При подогреве топлива и воздуха примерно до 900 °С температура пламени в печи повышается до 1800 °С, что достаточно для нормального ведения процесса плавки.

Печь (рис. 30) работает следующим образом. Газ и воздух проходят через предварительно разогретые до температуры примерно 1000 °С камеры, где нагреваются до 800–900 °С. Сгорая, они поднимают температуру рабочего пространства до 1800 °С. Забрасываемые через завалочные окна шихтовые материалы под влиянием тепла горящих газов плавятся на поду.

Продукты горения поступают в камеры, находящиеся в режиме нагрева, и разогревают их до 1000 °С. К моменту охлаждения рабочих камер, когда они не могут уже поднимать температуру технологической среды до 800 °С, происходит их автоматическое переключение. Поворотом перекидных клапанов изменяется направление газа и воздуха, поступающих в печь: они направляются через нагретые камеры, а отходящие газы (дым) — через остывшие камеры.



a



б

Рис. 30. Мартеновская печь: *a* – внешний вид (wikipedia.org);
б – схема; 1 – рабочее пространство; 2 – завалочные окна; 3 – под печи;
 4, 5 – перекидные клапаны; 6, 7 – регенераторы

Производительность мартеновских печей зависит от веса и способа плавки, вида топлива (мазут, доменный, коксовальный, генераторный газ) и т. д.

Полезная емкость современных мартеновских печей достигает 900 т. Все производственные процессы в таких печах, начиная от загрузки шихты в виде жидкого чугуна и кончая разливкой выплавленной стали, полностью механизированы и автоматизированы. Электронная аппаратура позволяет автоматически регулировать тепловой режим печи, подачу воздуха и горючих материалов, контролировать весь процесс выплавки металла.

Разновидности мартеновского процесса. В зависимости от материала, из которого изготавливается под печи, мартеновский процесс может быть основным или кислым. В основных печах под выкладывается магнезитовым кирпичом и наваривается магнезитовым или доломитовым порошком. В кислых печах под выкладывается динасовым кирпичом и наваривается слоем кварцевого песка.

В зависимости от применяемой шихты различают рудный, скрап-процесс и скрап-рудный процесс.

В рудном процессе шихта состоит из жидкого чугуна, лома и руды. Количество чугуна в шихте составляет 70–90 %. Чистая железная руда в количестве до 20 % применяется для окисления при-

месей. Обычно рудный процесс ведется в основных печах и дает основной объем всей производимой стали.

При скрап-процессе шихта состоит из значительного количества скрапа (60–85 %) и меньшего количества чугуна (15–40 %). Причем чугун загружается в печь обычно в твердом виде. Вследствие значительного окисления шихты в период плавления и небольшого количества примесей, которое нужно удалить из шихты, руда в печь подается в небольшом количестве. Скрап-процесс распространен на металлургических комбинатах, не имеющих доменных печей.

Большое распространение получил скрап-рудный процесс, который ведется на шихте, состоящей из 40–60 % скрапа и 40–60 % чугуна в жидком виде. В шихту для окисления примесей также вводится небольшое количество железной руды.

Рассмотрим разновидности мартеновских процессов.

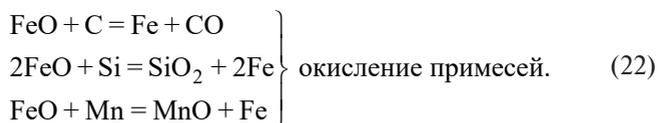
Кислый процесс. В кислых печах применяется шихта, которая содержит незначительное количество серы (до 0,03 %) и фосфора (до 0,06 %), так как они при кислом процессе не могут быть удалены в шлак. Выплавка стали в кислых печах ведется скрап-процессом, так как большое количество вводимой в шихту железной руды способствует разъеданию и разрушению кислого пода.

При расплавлении шихты выгорают кремний, марганец и частично углерод по реакциям:



Большое значение для процесса плавки имеет непрерывное окисление углерода с образованием окиси углерода CO. Выделяющаяся окись углерода образует пузыри в металле, и происходит как бы кипение металла. Во время кипения растворенная в ванне закись железа раскисляется углеродом, что способствует улучшению прочности металла. Кипение вызывает перемешивание ванны и удаление газов, растворенных в металле. Поэтому мартеновская сталь имеет меньшую газонасыщенность, чем конверторная.

В процессе плавки происходит интенсивное восстановление железа благодаря наличию в жидком металле кремния и марганца:



Образовавшиеся окислы переходят в шлак. На границе соприкосновения шлака с металлом происходит окисление составляющих шлака кислородом воздуха: выгорание железа, кремния и марганца.

Закись железа, находящаяся в шлаке, окисляется, образуя окись железа более высокого порядка (Fe_3O_4), которая вследствие большего удельного веса опускается на дно металлической ванны, где происходит следующая реакция:



Образовавшаяся закись железа растворяется в жидком металле. Таким образом, происходит непрерывное пополнение металлической ванны кислородом закиси железа. В этом процессе шлак является посредником в передаче тепла и кислорода от атмосферы к металлу.

Количество чистой железной руды или окалины, вводимой в печь для ускорения процесса окисления примесей, составляет 3–10 % от веса металлической шихты.

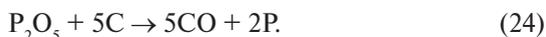
В кислых мартеновских печах в качестве топлива применяется газ из дров или торфа, так как в этом случае требуется полное отсутствие серы в топливе. В момент окончания плавки добавляют раскислители в виде ферросплавов с высоким содержанием марганца и кремния. Иногда в качестве раскислителя добавляют алюминий.

Кислым процессом изготавливают особо ответственные сорта стали: шарикоподшипниковую и сталь специального назначения. Но для массового производства стали этот процесс неприменим, так как требует очень чистых исходных продуктов. Кроме того, кислый процесс идет медленнее основного, так как реакции окисления в нем меньше развиты. В шлаках, получаемых при кислом мартеновском процессе, содержится большое количество (55–60 %) кремнезема.

Основной процесс. Чугуны, перерабатываемые основным способом, должны содержать значительное количество (до 2 %) фосфора. Но при этом большое содержание кремния в них нежелательно, так

как это затягивает процесс и требует увеличения доли известняка в шихте. Это дает возможность связать в прочные соли кремнекислоту SiO_2 и фосфорный ангидрид P_2O_5 и предохранить под печи от разъедающего действия этих кислот.

Металлическая часть шихты состоит из 75–90 % жидкого чугуна, 25–10 % стального скрапа и руды. Для ошлакования вредных примесей в печь загружается известняк в количестве до 12 % от веса металлической части шихты. Известь дает с окислами фосфора прочное соединение $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$, которое уходит в шлак и удаляется из печи. В противном случае при сильном повышении температуры печи может начаться нежелательный процесс восстановления фосфора из шлаков по реакции:



При рудном процессе интенсивное плавление шихтовых материалов начинается сразу же после заливки жидкого чугуна. В начале плавки происходит окисление углерода железной рудой:



С момента начала кипения ванны происходит взаимодействие между шлаком и металлом на границе их контакта. Железо в ванне окисляется и переходит в закись железа FeO , которая растворяется в металле и расходуется на окисление примесей.

Шлак в основном процессе не только передает кислород и тепло, но также способствует удалению серы и фосфора. При этом его активность возрастает по мере повышения температуры. Поэтому шлак должен быть нагрет свыше 1600 °С.

Процесс удаления фосфора из металла считается законченным, если после скачивания шлака в пробе находится не более 0,01–0,02 % фосфора. В основной мартеновской печи возможно также удаление серы путем ее перевода в сернистый кальций CaS , который не растворяется в металле, а уходит в шлак:



Для обеспечения этих реакций нужен избыток извести в шлаке, так как основной шлак более активен, чем кислый. Причем за-

кись железа FeO в нем находится в более свободном состоянии, так как кремнезем SiO_2 связывается известью. Поэтому в основном металле содержится повышенное количество FeO , что требует более тщательного раскисления металла. Окислы в шлаке при прохождении основного процесса в противоположность кислому процессу находятся в связанном состоянии. В результате шлак, получаемый в основной мартеновской печи, содержит большое количество (54–56 %) извести.

Несмотря на интенсивное удаление закиси железа с помощью раскислителей, при прочих равных условиях в стали, выплавляемой в основных печах, закиси железа больше, чем в кислых печах. В результате механические качества основной стали несколько ниже, чем кислой стали. С другой стороны, качество основной стали выше, чем кислой. Это происходит из-за более интенсивного окисления примесей вследствие того, что окислы железа в основном процессе не связываются кремнекислотой и более легко проникают в ванну металла.

В мартеновском основном процессе происходит более полное удаление марганца, кремния и фосфора. Это дает возможность вести передел чугуна на менее чистой шихте, чем при кислом процессе.

Принципиальное отличие результатов основного процесса от кислого состоит в том, что сталь, выплавляемая в основных печах, более окислена и требует большего расхода раскислителей.

Комбинированные процессы. Комбинированными называются процессы, в которых передел чугуна в сталь производится в двух или трех агрегатах. Например, процесс может начинаться в конверторах, а заканчиваться в мартеновских печах или производиться последовательно в двух мартеновских печах: в одной происходит начальная часть процесса, а в другой — доводка металла. Комбинированные процессы проводятся с целью сокращения времени плавки и расхода топлива, что дает возможность увеличить общую производительность печей.

Сталь также может выплавляться дуплекс-процессом. В этом способе плавку на шихте обычного состава начинают в основной печи, при этом сталь доводят до состояния, которое характеризуется малым содержанием фосфора, кремния, марганца и серы. Затем

сталь переливают в кислую печь, где получают высококачественную кислую сталь.

В комбинированных процессах требуется применение более сложного и дорогостоящего технологического оборудования, нежели в обычных способах выплавки стали.

В мартеновских печах преимущественно выплавляются качественные и высококачественные стали. В этих печах можно с большой точностью регулировать химический состав металла путем периодического контроля проб.

Мартеновский способ дает возможность перерабатывать металлический лом и получать сталь высокого качества, содержащую значительно меньшее количество азота, чем бессемеровская сталь.

Основными показателями работы мартеновских печей являются суточный съем стали в тоннах с 1 м^2 пода печи и расход топлива на 1 т стали. Для определения съема стали суточную производительность печи (в тоннах) делят на площадь зеркала ванны металла (в м^2), замеренную на уровне порога завалочных окон. Мартеновские печи большинства металлургических комбинатов работают со среднесуточным объемом стали около 12 т/м^2 .

Расход топлива зависит от ряда факторов: степени подогрева воздуха и горючего газа, вида шихтовых материалов (жидкий чугун или скрап), емкости печи, способа выплавки и др. Для обеспечения нормального хода плавки требуется расход тепла до $1,5 \cdot 10^6$ ккал на 1 т стали.

Одним из важных условий повышения производительности мартеновских печей является увеличение их тепловых нагрузок. Допускаемая температура нагрева динасового кирпича, из которого выкладывается свод, не превышает $1680\text{--}1700 \text{ }^\circ\text{C}$, что ограничивает возможность повышения тепловых нагрузок печи. Поэтому в последнее время все чаще свод выкладывают из термостойкого хромомagneзитового кирпича, выдерживающего нагрев свыше $1800 \text{ }^\circ\text{C}$. Для сохранения прочности при высоких температурах хромомagneзитовый свод делается подвесным, то есть блоки кирпичей подвешиваются на тросах к поперечным балкам свода. Это дает возможность увеличить стойкость свода с 250 до 500 плавов. При этом объем выплавляемой стали увеличивается на $8\text{--}10 \%$.

Значительные перспективы имеет широкое применение кислорода, подаваемого в факел пламени, а также непосредственно в жидкий металл, находящийся в ванне. При этом расход топлива снижается на 5–10 %, а объем выплавляемой стали увеличивается на 20–30 %. Кроме того, при сжигании топлива в воздухе, обогащенном кислородом, повышается температура горения, что способствует улучшению использования тепла в рабочем пространстве.

Проекты новых многотонных мартеновских печей предусматривают комбинированный способ использования кислорода: печи оборудуются фурмами для вдувания кислорода в металлическую ванну и горелками для ввода кислорода в факел пламени. Этот способ дает значительный производственный и экономический эффект: производительность печи увеличивается на 33 %; расход условного топлива снижается на 28 % при расходе кислорода 35 м³ на 1 т стали.

3.4.4. Выплавка стали в электрических печах

Выплавка стали в электрических печах – это наиболее совершенный способ получения высококачественной стали, содержащей такие тугоплавкие элементы, как вольфрам, ванадий, молибден, расплавление которых в других печах вызывает большие трудности. Быстрый подъем и точное регулирование температуры, высокий нагрев и возможность создания окислительной и восстановительной атмосферы в плавильном пространстве – все это позволяет выплавлять сталь точного химического состава, с особыми физическими и химическими свойствами.

Возможность получения высоких температур допускает применение сильно известковых шлаков, которые способствуют почти полному удалению из металла серы и фосфора. В атмосфере электрической печи содержится мало кислорода, что позволяет легко вести восстановительный процесс раскисления и получать сталь, свободную от вредной закиси железа. Большинство сортов сталей специального назначения выплавляется именно в электрических печах.

Электрические печи могут работать как на жидкой, так и на твердой шихте. Работа на твердой шихте (металлический лом, стружка и др.) в основных печах является наиболее распространенной. Процесс плавки включает: 1) расплавление шихты; 2) окисление при-

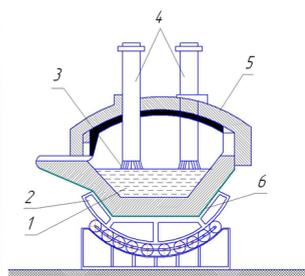
месей; 3) раскисление стали; 4) удаление серы; 5) доводку стали до требуемого химического состава.

Расплавление шихты и порядок выгорания примесей в электропечи аналогичны мартеновскому процессу. По мере расплавления металла происходит окисление железа и содержащихся в нем примесей. В качестве окислителей добавляют железную руду и окалину. После окисления примесей образуются разные химические соединения, которые переходят в шлак. В качестве шлакообразующих материалов в электрическую печь обычно вводят известь или известняк.

Электрические печи для выплавки стали можно разделить на две группы – дуговые и индукционные.



а



б

Рис. 31. Дуговая электрическая печь:

а – внешний вид (diagram.com.ua); *б* – схема;

1 – металл; *2* – механизм наклона печи; *3* – электрическая дуга;

4 – электроды; *5* – съемный свод; *б* – под

Дуговые печи в зависимости от источника питания имеют два или три электрода. В этих печах (рис. 31) теплота получается от горения электрической дуги, образующейся непосредственно между электродами. Такие печи называют печами с «независимой» дугой. Теплота может также получаться от горения электрической дуги между электродами и металлической ванной. Такие печи называют печами с «зависимой» дугой.

При вертикальном положении электродов электрическая дуга горит между каждым электродом и металлом. Металлическая часть шихты служит промежуточным проводником. Печи этого типа

получили преимущественное распространение. Такая печь состоит из металлического кожуха цилиндрической формы с плоским или сферическим дном – подиной. Внутри она футерована огнеупорными материалами. С помощью особого механизма печь можно устанавливать в наклонное положение. Угольные или графитовые электроды проходят через съемный свод. Их диаметр составляет от 200 до 600 мм, а длина – до 3 м. Графитовые электроды имеют более высокую стойкость при высоких температурах и меньшее электросопротивление, чем угольные. Поэтому их применение в электрических печах является более целесообразным. Емкость электропечей колеблется от 250 кг до 400 т. Учитывая экономичность больших электропечей, преимущество отдают печам емкостью более 200 т.

Производительность дуговой печи выше, а себестоимость выплавляемой стали ниже при работе на жидкой шихте, которая требует меньше материалов на огнеупорную футеровку.

Выплавка стали в индукционных печах (рис. 32) позволяет получать более чистый металл, чем при плавке в дуговых печах. Принцип их работы основан на выделении тепла при прохождении тока через проводник, обладающий большим электрическим сопротивлением. Таким проводником является сама металлическая шихта. Преимущественное распространение получили бессердечниковые печи, которые называются высокочастотными.

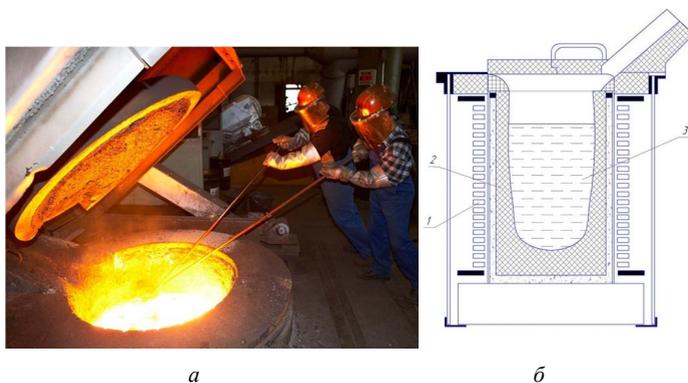


Рис. 32. Индукционная печь:
a – внешний вид (wikipedia.org); *б* – схема;
1 – индуктор; *2* – ванна; *3* – металл

Через индуктор, представляющий собой обмотку из медной трубки, охлаждаемой внутри водой, пропускается ток, возбуждающий в окружающем пространстве переменное магнитное поле. Это магнитное поле, в свою очередь, индуцирует вихревые токи в металле, заключенном в ванну. Под влиянием вихревых токов происходит нагревание металла до температуры плавления. Емкость высокочастотной печи — от 150 кг до 100 т. Печи промышленного типа питаются переменным током от генераторов, работающих на частоте 500–2500 Гц.

Индукционные печи удобны тем, что не требуют электродов, благодаря чему предотвращается опасность науглероживания металла и упрощается управление печью. Кроме того, под действием магнитного потока усиливается циркуляция металла, что очень важно для ускорения химических реакций и получения однородного металла.

В зависимости от футеровки различают кислые и основные электропечи. Собственно, все виды передела чугуна на жидкую сталь являются процессами рафинирования, заключающимися в том, что находящиеся в чугуне в качестве примесей углерод, кремний, марганец, сера и фосфор подвергаются окислению кислородом воздуха или соединениями, легко отдающими кислород. При этом получают газообразные или жидкие окислы, не растворяющиеся в металле или растворяющиеся в очень ограниченном количестве. Газообразные соединения уходят в атмосферу, а жидкие образуют шлаки, всплывающие благодаря меньшему удельному весу на поверхность металла и таким образом отделяющиеся от него.

При кислом процессе нельзя удалить серу и фосфор, поэтому требуются чистые шихтовые материалы. В основных электропечах эти элементы удаляются легко, поэтому основные печи применяются для получения высококачественных сортов стали. Кислые же печи применяются главным образом для получения литой стали, используемой в производстве фасонных отливок.

Плавка в основной электропечи начинается с расплавления загруженных шихтовых материалов (скрапа и чугуна). По ходу выгорания примесей различают несколько вариантов плавки: 1) с полным окислением; 2) с частичным окислением; 3) без окисления.

Плавка с полным окислением применяется, когда в шихте содержится значительное количество фосфора и других примесей. В этих условиях примеси не успевают выгореть за время расплавления, и для ускорения процесса окисления в ванну добавляют железную или марганцевую руду. Введение марганцевой руды предохраняет ванну от перенасыщения окислами железа. MnO_2 разлагается с образованием Mn_3O_4 , затем при соединении с углеродом дает CO по реакции:



Вследствие выделения окиси углерода ванна «кипит». Процесс получения стали распадается на несколько периодов.

В течение окислительного периода (кипа) происходит удаление из металла фосфора и значительной части газов, поглощаемых металлом во время расплавления. В процессе расплавления происходит окисление фосфора с образованием $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$. Одновременно идет окисление марганца, кремния и углерода. Продукты окисления примесей образуют шлак. После образования шлака берут пробу металла: если в пробе окажется значительное количество фосфора, то шлак «скачивают». Скачивание, называемое дефосфацией, необходимо для предупреждения перехода фосфора обратно в металл. Если после удаления «черного» шлака чистота металла окажется достаточной, то это дает основание для завершения окислительного периода плавки.

После этого начинается восстановительный период, во время которого, кроме раскисления металла, производят десульфурацию и доводят химический состав стали до заданного значения. При плавке с полным окислением окисляется значительное количество углерода, и содержание его в металле понижается. Для повышения содержания углерода до нужного значения ванну науглероживают путем засыпки на поверхность металла кусков малосернистого кокса. Одна часть углерода идет на восстановление растворенной в металле закиси железа, а другая расплавляется в металле.

При плавке в дуговой печи, в отличие от мартеновской и конверторной, раскисление ванны производится не столько за счет присадки раскислителей, сколько за счет раскислительного шлака.

Различают два вида раскислительного шлака: белый (известковый) и карбидный. Для получения белого шлака в печь на поверхность ванны забрасывают шлаковую смесь: 76 % CaO, 19 % CaF₂ и 5 % кокса.

Белый шлак обеспечивает наиболее полное удаление серы:



CaS, образуемый в ходе этих реакций, нерастворим в металле и уходит в шлак.

Доводка и окончание плавки заключаются в присадке в печь небольшого количества раскислителей — ферросилиция и алюминия. Легирующими примесями являются никель, хром, вольфрам, ванадий и молибден. Никель и молибден окисляются в меньшей степени и вводятся до полного раскисления ванны, хром и вольфрам — в уже раскисленную ванну, а ванадий — перед выпуском металла.

Плавка с полным окислением производится только для получения стали с малым содержанием углерода.

Для получения фасонного литья чаще применяют плавку с частичным окислением. Единственным источником кислорода при такой плавке служат ржавчина или окалина железного лома, а также проникающий в печь воздух. Применяется этот способ, когда содержание фосфора в шихте лишь ненамного превышает допустимое значение в готовом металле, так что для окисления фосфора достаточно тех окислов железа, которые имеются в ванне после расплавления. При частичном окислении выгорает лишь кремний, а фосфор, марганец и углерод в большей или меньшей степени остаются в металле.

Плавка без окисления производится при восстановительном режиме на чистом по сере и фосфору ломе без ржавчины и без добавления в шихту железной руды. Это, по существу, переплавка чистого скрапа, и ведется она главным образом при наличии в скрапе хрома, вольфрама и других ценных примесей для получения соответствующих сталей. Плавку проводят без спуска шлака.

Плавка в кислой дуговой электропечи протекает подобным образом, но имеет свои особенности: 1) футеровка делается из динасового кирпича; 2) сера и фосфор не удаляются, печь работает без спуска шлака, который в основном состоит из силикатов железа

и марганца; 3) назначение шлака сводится к связыванию кремнезёмом закиси железа и окиси марганца; 4) раскисление ведется присадками ферросплавов; 5) в завершение процесса проводят восстановление кремния, которое способствует раскислению ванны.

Продолжительность плавки в дуговой электропечи зависит от ее ёмкости, от вида шихты и футеровки печи, от сорта выплавляемого металла. Большие печи работают экономичнее, чем малые, так как они имеют меньший расход электроэнергии на 1 т выплавляемого металла и большую производительность одного агрегата. В кислых печах плавка идет быстрее, чем в основных. Угар металла при твердой завалке составляет 5–8 %, при жидкой – 2 %. Нормальный выход годного литья 91–92 %.

Применение кислорода позволяет в ряде случаев (например, при изготовлении нержавеющей стали в дуговых печах) увеличить производительность печи на 15–25 % и снизить удельный расход электроэнергии на 20–30 %, а расход электродов на 5–10 %.

Плавка в вакууме – один из основных способов получения особо качественных металлов и сплавов. При таком способе значительно снижается содержание в металле газовых включений и улучшается качество стали. Некоторое повышение стоимости металла окупается тем, что из него можно изготавливать более прочные конструкции меньших габаритов. Для плавки в вакууме индукционная печь размещается в герметически изолированной камере, из которой откачивается воздух.

Электрошлаковый переплав осуществляется в электропечах сопротивления (рис. 33). В обычных печах сопротивления нагревательным элементом (стержнем, спиралью) является материал, обладающий высоким электрическим сопротивлением, в результате чего элемент достаточно сильно разогревается при прохождении через него тока. Таким элементом сопротивления в печах для электрошлакового переплава (ЭШП) является ванна расплавленного шлака.

Сущность процесса электрошлакового переплава заключается в том, что плавление металла электрода, отлитого из стали недостаточного качества, происходит в расплавленном шлаке за счет теплоты электросопротивления, выделяемой при прохождении тока через шлаковую ванну.

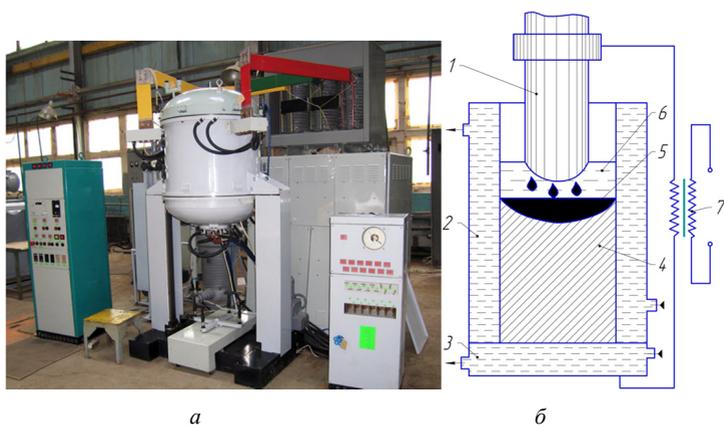


Рис. 33. Печь сопротивления: *a* – внешний вид (оооевна.ru);
б – схема; 1 – электрод из стали недостаточного качества;
 2 – кристаллизатор; 3 – поддон; 4 – слиток; 5 – жидкий металл;
 6 – шлаковая ванна; 7 – трансформатор

В начале электрошлакового переплава проводят дуговой процесс. Для этого в кристаллизатор засыпают флюс и зажигают электрическую дугу, которая расплавляет флюс, образуя шлаковую ванну. После образования шлаковой ванны достаточной глубины в неё опускают электрод, в результате чего гасится дуга и начинается бездуговой процесс переплава, при котором ток проходит через жидкий шлак и расплавляет материал электрода. Расплавленные капли металла проходят через шлак. Там происходят дегазация и очистка металла от примесей. В результате очищенный металл превращается в слиток нужной формы, охлаждаясь в нижней части кристаллизатора. Флюс для ЭШП имеет различный состав, например: CaF_2 – 65 %; Al_2O_3 – 30 %; CaO – 5 %. Способ ЭШП применяется для получения стали с особо высоким качеством.

3.4.5. Разливка стали в слитки

Основным технологическим оборудованием для разливки стали является сталеразливочный ковш (рис. 34). Он представляет собой стальной сосуд, футерованный внутри огнеупорным кирпичом. Жесткость сосуда усиливается ребрами жесткости. Среднее кольцо имеет две цапфы для захвата ковша крюками мостового крана.

Из ковша сталь вытекает через отверстие в днище, в которое вставлен стакан из огнеупорного материала. Диаметр стакана составляет 25–40 мм. Отверстие открывается и закрывается пробкой, сделанной из того же материала, что и стакан. Пробка прикрепляется к стальному стержню, защищенному от действия жидкой стали надетыми на него трубками из огнеупорного материала. Перемещая рукояткой в направляющих тягу, связанную горизонтальной траверсой со стержнем, можно открывать и закрывать пробкой выпускное отверстие в стакане.

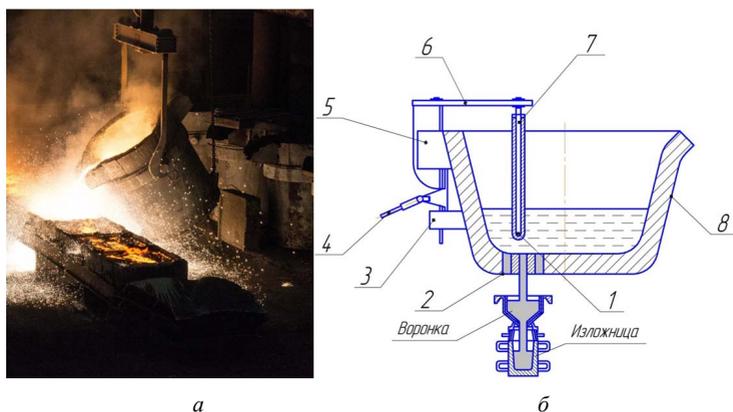


Рис. 34. Разливочный ковш: *a* – внешний вид (Рихаву); *б* – схема; 1 – пробка; 2 – стакан; 3, 5 – направляющие для тяги; 4 – рукоятка; 6 – траверса; 7 – стальной стержень; 8 – стальной кожух

Для удаления растворенных в стали газов и шлаковых включений, а также для выравнивания химического состава во всем объеме металла его выдерживают некоторое время в ковше. Для ковша емкостью 45 т выдержка составляет около 10 мин. После выдержки ковш переносят мостовым краном к разливочному участку, где установлены изложницы. Изложницы представляют собой толстостенные металлические формы, заполняемые расплавленным металлом. Их делают открытыми, как правило, сверху и снизу. В изложницы для получения слитков разливают основную массу стали, и только около 5 % ее идет для получения фасонных отливок. В этом случае сталь из ковша заливается в специальные формы.

Для слитков, подвергающихся затем прокатке, применяются изложницы квадратного или плоского сечения, а для слитков, предназначенных дляковки, – многоугольного сечения. Для прокатки труб могут применяться слитки, получаемые в изложницах круглого сечения.

Внутренние стенки изложниц выполняются с небольшой конусностью, что облегчает извлечение слитка.

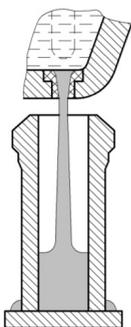
Стальные слитки могут иметь вес от 100 кг до 100 т и выше. Соответственно, вес изложниц может составлять от 1,2 до 1,7 веса слитка (чем больше вес слитка, тем меньше относительный вес изложницы). Стойкость изложницы составляет от 100 (для крупных) до 300 (для мелких) заливок.

Перед заливкой стенки изложниц очищаются металлическими щетками и скребками. Для увеличения срока службы и предохранения от прикипания стали стенки предварительно подогретой до температуры 80–100 °С изложницы покрывают смазкой из каменноугольной смолы или графита.

Существует три способа разливки стали: 1) сверху; 2) снизу; 3) непрерывная.

При разливке сверху разливочный ковш транспортируется крапом к подготовленным под заливку изложницам. Он останавливается над каждой из них. Изложницы, открытые снизу, устанавливаются перед заливкой на толстые чугунные плиты-поддоны и по периметру обмазываются огнеупорным материалом. После установки разливочного ковша над изложницей открывается стопорное устройство, и струя жидкого металла заполняет изложницу (рис. 35, а, б). Основным недостатком разливки сверху является крайне неровная поверхность слитка, требующая длительной и трудоемкой зачистки.

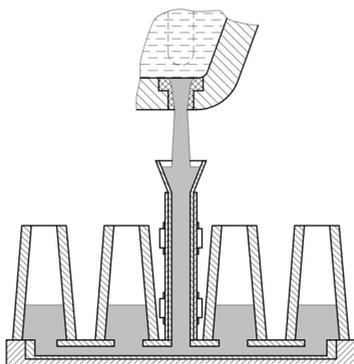
Разливка стали снизу называется сифонным способом разливки (рис. 35, в). При такой разливке изложницы устанавливаются на специальные керамические плиты, называемые сифонным кирпичом. Каналы внутри этих плит и шамотные трубы, соединяющие между собой сифонные кирпичи, образуют единую, весьма разветвленную литниковую систему. Через один общий литник можно отливать одновременно до 40 слитков. Такая схема разливки получила название «паук».



a



б



в

Рис. 35. Разливка стали:
a, б – сверху (wikipedia.org); *в* – снизу

Отсутствие брызг при заполнении изложниц снизу позволяет получить более чистую поверхность слитка, но размывание металлом огнеупоров центрального литника и каналов сифонных кирпичей приводит к образованию большего количества неметаллических включений, чем при разливке сверху. Кроме этого, при разливке снизу происходит большая потеря металла в виде литниковой системы. Сифонный припас (керамические плиты, трубы и др.) можно использовать единожды, а также требуется более трудоемкая подготовка литниковой системы к заливке. Однако экономичность сифонного способа разливки выше, чем способа разливки сверху, так как дополнительные затраты на сифонную разливку полностью окупаются уменьшением стоимости зачистки поверхности слитков.

Некоторую особенность представляет получение слитков из кипящей стали. Кипящую сталь обычно разливают сифонным способом. Её раскисление происходит в изложнице в результате взаимодействия углерода металла с растворенным в металле кислородом. Наличие закиси железа в такой стали достаточно для протекания реакции с образованием окиси углерода:



Окись углерода, выделяющаяся в виде пузырей, создает впечатление кипения металла в изложнице. Одновременно с окисью углерода из стали выделяются азот и водород, растворимость которых в жидком металле при понижении температуры уменьшается. Таким образом, получают низкоуглеродистую сталь с содержанием углерода от 0,05 до 0,25 %. Слиток кипящей стали имеет малую усадочную раковину, но значительное количество газовых раковин.

При заполнении изложницы кипящей сталью существует большая вероятность образования «шапки» из вспененного металла над поверхностью слитка. Для того чтобы не допустить образования «шапки», необходимо создать твердую корку в верхней части слитка, закрывающую выход газов. С этой целью после заполнения изложницы и некоторой выдержки на кипящую сталь накладывают чугунную плитку. Образующаяся при этом корка затвердевшей стали приводит к повышению давления внутри слитка и прекращению выделения газов. Однако возникающие при этом в объеме слитка газовые пузыри необходимо заваривать при последующей прокатке.

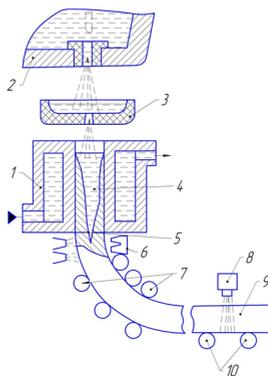
Наиболее прогрессивной является непрерывная разливка металла. Её производят в установке для непрерывной разливки стали (УНРС) радиального типа (рис. 36). После установки разливочного ковша над кристаллизатором открывается стопорное устройство, и струя жидкого металла через промежуточное разливочное устройство поступает в кристаллизатор.

Кристаллизатор представляет собой пустотелую сквозную изложницу, охлаждаемую проточной водой. Его нижнее отверстие перед заливкой закрывают затравкой – металлическим стержнем с сечением, соответствующим сечению кристаллизатора. Кристаллизатор может иметь квадратное или прямоугольное сечение задан-

ных размеров. Металл, затвердевая, схватывается с затравкой при помощи паза в виде «ласточкина хвоста». По достижении поступающим из ковша металлом определенного уровня включают тянущие валки, и затравка вместе с приварившимся к ней слитком начинает вытягиваться из кристаллизатора. Слиток, имеющий еще жидкую сердцевину, проходит зону вторичного охлаждения, где спрейеры обрызгивают его водой, в результате чего происходит затвердевание по всему сечению. Под действием тянущих валков вытягиваемый из кристаллизатора слиток изгибается, а затем продолжает перемещаться по роликам горизонтально установленного рольганга. При помощи автогенного резака от слитка отрезают заготовки необходимой длины. Далее их передают на последующую операцию прокатки или транспортируют на склад.



a



б

Рис. 36. Непрерывная разливка стали:
a – внешний вид (wikipedia.org); *б* – схема процесса

При непрерывной разливке облегчаются условия труда, уменьшается площадь участка для разливки, становится ненужным дорогостоящее оборудование для разливки. Но основным преимуществом непрерывной разливки является то, что отходы металла составляют всего лишь 3 % вместо 20 % при получении слитков разливкой сверху и снизу. Потери металла здесь возникают только при разрезании слитка.

Более совершенна разливка в вакууме. Она позволяет получить металл с минимальным содержанием кислорода, азота и водорода.

Сталь из разливочного ковша попадает в промежуточную воронку, выходное отверстие которой сообщено с камерой. Изложница устанавливается в камере. Крышка камеры герметически закрывается, и через патрубок производится отсос воздуха. Расплавленный металл, заполняющий воронку, создает своеобразный «гидравлический» затвор, изолирующий внутреннюю полость камеры от атмосферы. Он позволяет поддерживать необходимый вакуум при заполнении изложницы струей металла. В начале разливки металл накапливается в воронке, для чего в ее нижнюю часть вставляется алюминиевый лист такой толщины, чтобы за время расплавления этого листа в воронке успело накопиться необходимое количество жидкой стали. При этом способе вакуумирование стали происходит в падающей струе металла.

3.4.6. Структура стального слитка

После заполнения изложницы сталью начинается ее кристаллизация — переход из жидкого в твердое состояние. При соприкосновении жидкой стали с относительно холодными стенками изложницы происходит резкое охлаждение металла. В результате на поверхности слитка возникает твердый корковый слой, состоящий из мелких неориентированных кристаллов (рис. 37).

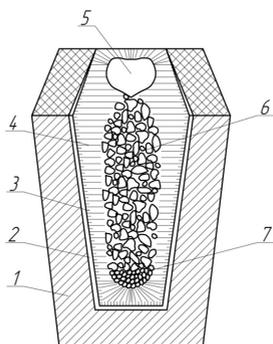


Рис. 37. Структура стального слитка: 1 — изложница; 2 — воздушная прослойка; 3 — корковый слой; 4 — зона транскристаллизации; 5 — усадочная раковина; 6 — зона неориентированных зерен; 7 — конус осаждения

Изложница, разогреваясь, расширяется, а корковый слой, охлаждаясь, уменьшается в объеме. В результате между слитком и стенками изложницы образуется воздушная прослойка, плохо проводящая тепло. Это снижает скорость охлаждения жидкого металла и способствует наступлению условий для образования второй кристаллизационной зоны, состоящей из столбчатых дендритов. Они растут по направлению отвода тепла, то есть перпендикулярно к стенкам изложницы. Это явление как бы прорастания кристаллов в толщу слитка называют транскристаллизацией.

При медленном затвердевании зоны транскристаллизации в первую очередь затвердевают кристаллы более чистого металла, содержащего меньше примесей. Остающийся между дендритами жидкий металл, называемый маточным раствором, обогащается примесями углерода, серы и фосфора, которые снижают его температуру кристаллизации. Поэтому он затвердевает позднее, чем дендриты. По мере роста дендритов отдача теплоты наружу замедляется, скорость охлаждения внутреннего объема стали становится минимальной. В этих условиях начинается рост кристаллов одновременно во всем внутреннем объеме жидкой стали. Возникает область неориентированных зерен, свободно растущих в жидком расплаве. В нижней части слитка, как правило, образуется конус осаждения, насыщенный неметаллическими включениями.

Верхняя часть слитка, затвердевающая в последнюю очередь, уменьшается в объеме примерно на 8 %. Причем позже всего кристаллизуется внутренняя зона этой части. В результате в ней образуется пустота, так называемая усадочная раковина. Эта часть слитка называется прибылью. Прибыль является дефектной частью слитка и подлежит утилизации.

Глубина усадочной раковины зависит от формы слитка, способа разлива и скорости наполнения верхней части слитка. При разливе снизу более горячий металл оказывается в нижней части слитка и застывает позднее, чем в верхней. В результате этого усадочная раковина получается более глубокой, чем при разливе сверху.

Существует несколько способов уменьшения усадочной раковины.

Одним из самых распространенных способов является использование прибыльной надставки. Надставка – это чугунная емкость, футерованная внутри шамотным кирпичом. Она перед заливкой устанавливается сверху на изложницу. Прибыльная надставка снижает скорость охлаждения стали. Сталь долгое время находится в жидком состоянии. Постоянно стекая вниз, она питает усадочную раковину. В результате усадочная раковина формируется не в слитке, а в прибыльной надставке. При этом ее размеры значительно уменьшаются.

Стальному слитку помимо усадочной раковины и конуса осаждения присущи другие дефекты, такие как усадочные рыхлоты, химическая неоднородность состава (ликвация), неметаллические включения, газовые раковины, трещины, плены и др.

Усадочные раковины и усадочные рыхлоты возникают из-за различия в объеме жидкой и затвердевшей стали.

Ликвация возникает из-за разности состава между твердой и жидкой фазами, затвердевающими в разное время. При медленном затвердевании в первую очередь затвердевают кристаллы, содержащие минимальное количество примесей, а остающаяся жидкая часть слитка обогащается примесями и кристаллизуется позднее. Такая избирательная кристаллизация и приводит к ликвации – образованию в слитке областей, неоднородных по химическому составу. Ликвация может быть микроскопической и макроскопической.

Микроскопическая ликвация – это неоднородность в пределах одного зерна, при этом затвердевающий в последнюю очередь маточный раствор располагается между растущими кристаллами. Такая дендритная и междендритная ликвация не оказывает заметного влияния на качество слитка.

Макроскопическая ликвация проявляется в том, что в различных частях слитка могут располагаться области или зоны, отличающиеся по удельному весу или химическому составу. Ликвация по удельному весу вызывает образование слоя затвердевшего металла с большим или меньшим удельным весом, расположенного в нижней или верхней части слитка соответственно.

Ликвация наиболее опасна, если ликвационная зона насыщена такими примесями, как кислород, сера и фосфор, вызывающими

значительное ухудшение механических и технологических свойств стали. Химическая неоднородность проявляется тем сильнее, чем медленнее идет охлаждение слитка и чем больше содержится в стали кислорода, серы и фосфора. Очевидно, что снижения ликвации можно добиться увеличением скорости кристаллизации слитка. Кроме того, необходимо хорошо раскислять сталь, снижая до минимума содержание серы и фосфора. Также перед заливкой стали в изложницы требуется выдержать ее в разливочном ковше для понижения температуры.

Одним из главнейших внутренних дефектов слитка являются газовые пузыри. Они образуются вследствие выделения расплавленным металлом газов, поглощенных в процессе плавки. Газы могут образовываться также и в самой изложнице при взаимодействии загрязненной поверхности ее стенок с заливаемой сталью (например, при восстановлении растворенным в стали углеродом окислов железа из ржавчины на стенках изложницы с образованием пузырьков окиси углерода, которая проникает в жидкую сталь).

Если газы успевают выделиться за время затвердевания стали в изложнице, то слиток получается плотным. Но часто они, не успев выделиться, остаются в слитке в виде пузырей, что при последующей прокатке может привести к образованию таких пороков стали, как рванины и плены.

Трещины на поверхности слитка могут быть продольными и поперечными. Продольные трещины являются следствием неравномерного остывания слитка по сечению: остывающий в первую очередь наружный слой по мере охлаждения стремится уменьшиться в объеме, а этому препятствует еще раскаленная сердцевина. При этом наружный слой как бы стягивает сердцевину, что приводит к возникновению растягивающих напряжений в наружных слоях и образованию продольных трещин. Уменьшить эти напряжения можно соответствующим подбором сечения слитка. Очевидно, что минимальными напряжения в поверхностном слое будут тогда, когда отношение его периметра к площади сечения будет наибольшим. В этом случае круглое сечение слитка является наиболее неблагоприятным.

Поперечные трещины возникают, когда создаются препятствия для продольной усадки слитка при его охлаждении. Это может про-

исходить при низкой технологической дисциплине на участке разливки (недоброкачественные стаканы и пробки в разливочных ковшах, что приводит к переливу стали через верхний край изложницы; раковины и выступы на внутренней поверхности изложницы и т. д.). В таких условиях могут возникнуть продольные растягивающие напряжения в наружном слое.

Плены – это наслоения на поверхности слитка, возникающие при разливке сверху. При такой разливке заплески металла, пристающие к стенкам изложницы, захватываются поднимающейся кверху жидкой сталью, но не свариваются с ней из-за наличия оксидной пленки на поверхности заплесков. При последующей прокатке эти окисленные включения могут быть закатаны в слиток и образовать плены.

Чтобы предупредить образование плен, нужно тщательно готовить изложницы под заливку, смазывать их внутренние стенки смолой или графитом, а также принимать меры для уменьшения силы удара падающей струи металла, применяя для этого промежуточную воронку между разливочным ковшом и изложницей.

Наружные дефекты стального слитка удаляются обрубкой при помощи пневматических зубил, обдиркой на специальных станках или зачисткой поверхности огневым способом.

3.5. Metallurgy of copper and aluminum

3.5.1. Production of copper

Медь получают из медных руд, содержащих сульфиды меди CuS , Cu_2S и сульфиды железа FeS . Такой рудой является медный колчедан. Из сульфитных руд получают 80 % меди. Содержание меди в рудах мало и составляет 1–3 %. Кроме меди, руды содержат небольшое количество цинка, свинца, никеля, свинца серебра, золота и других металлов. Пустая порода состоит из кремнезема, известняка и глины.

Сущность производства меди заключается в поэтапном повышении содержания меди в шихте. Медь чаще всего извлекается пирометаллургическим способом, который состоит из следующих

основных этапов: дробления руды, обогащения, плавки на штейн, получения черновой меди в конверторе и рафинирования.

Дробление медной руды осуществляется до порошкообразного состояния с размером фракций 0,05–0,5 мм.

Обогащение осуществляется методом флотации (рис. 38). Флотация – метод обогащения, который основан на различной смачиваемости частиц, содержащих медь, и частиц пустой породы. Частицы, содержащие медь, плохо смачиваются водой, и наоборот, частицы пустой породы хорошо смачиваются.

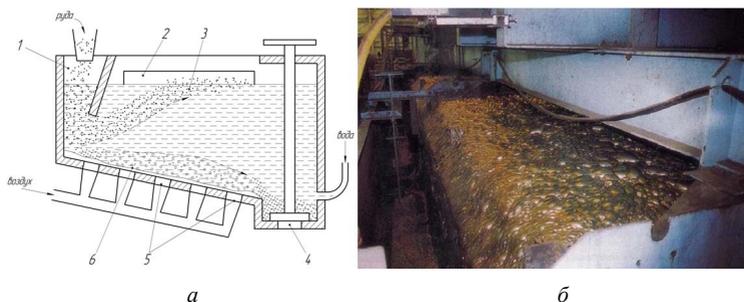


Рис. 38. Флотационная машина:

a – схема; *б* – процесс флотации меди (wikipedia.org); 1 – бункер; 2 – спуск; 3 – частицы рудного концентрата в виде пены; 4 – отверстие для удаления пустой породы; 5 – отверстия в днище бассейна; 6 – холст

Руда в порошкообразном состоянии 1 поступает через бункер в бассейн флотационной машины с водой и растворенными в ней пенообразующими веществами. Через отверстия 5 в днище через холст 6 продувают воздух. В результате образуются пузырьки, которые захватывают несмачиваемые водой частицы, богатые медью. Они всплывают на поверхность водного раствора в виде пены 3 и удаляются проточной водой через спуск 2. Оседающие на холсте смоченные водой частицы пустой породы периодически удаляются через отверстие 4.

Полученный после флотации медный концентрат, содержащий 10–35 % меди, подвергается обезвоживанию в специальных вакуум-фильтрах.

Подготовительные операции завершаются обжигом концентрата для частичного удаления серы в печах с кипящим слоем (рис. 39).

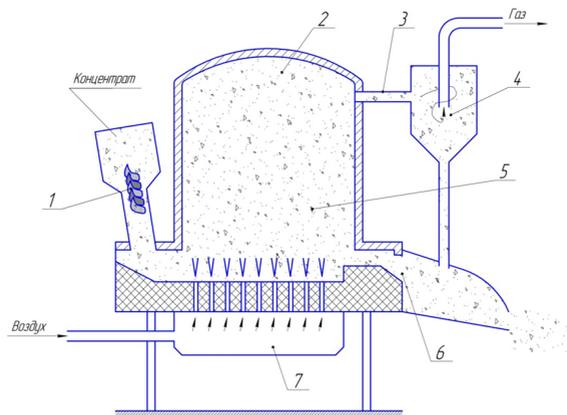


Рис. 39. Схема обжига медного концентрата в печи с кипящим слоем:
 1 – шнековый питатель; 2 – горячая камера; 3 – патрубок;
 4 – пылеуловитель; 5 – частички руды; 6 – отверстие;
 7 – отверстия в днище печи

Шихтовые материалы – концентрат, известняк и кварц – шнековым питателем 1 подаются на под печи и под воздействием струй воздуха из воздушной коробки 7 частицы руды непрерывно подбрасываются вверх. Они поддерживаются во взвешенном, псевдожидком состоянии в горячей камере 5. Складывается впечатление, что слой частиц как бы кипит. В струях воздуха каждой частице руды обеспечивается наилучший контакт с газами.

Выгорая, сера образует сернистый газ, который из горячей камеры через патрубок поступает в пылеуловитель. Там отходящий газ очищается от пыли и используется в производстве серной кислоты. За счет выгорания серы в камере поддерживается температура в пределах 600–700 °С. В результате обжига получается полупродукт, называемый огарком.

После обжига руда и медный концентрат подвергаются плавке на штейн, представляющий сплав сульфидов меди и железа $Cu_2S + FeS$. Штейн содержит 20–50 % меди, 20–40 % железа, 22–25 % серы и около 8 % примесей.

Чаще всего плавка на штейн производится в пламенных отражательных печах (рис. 40) с полезной емкостью 100 т. Печной подбывается огнеупорной глиной и наваривается слоем чистого

кварцевого песка. При сжигании в топочном устройстве 1 мазута, газа или угольной пыли в печи достигается температура 1450 °С. Через отверстия 2 в своде печи медный концентрат загружается в плавильное пространство. Продукты плавки – шлак и штейн – по мере накопления выпускают через шлаковое окно 3 и летку для штейна 5.

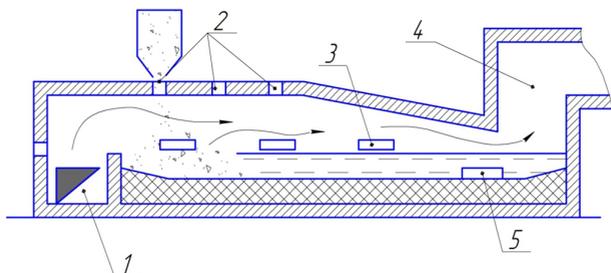


Рис. 40. Пламенная печь для выплавки штейна:

1 – топочное устройство; 2 – отверстия в своде печи; 3 – шлаковое окно;
4 – пылеуловитель; 5 – летка для штейна

Полученный штейн направляется в медеплавильный конвертор (рис. 41) для получения черновой меди.

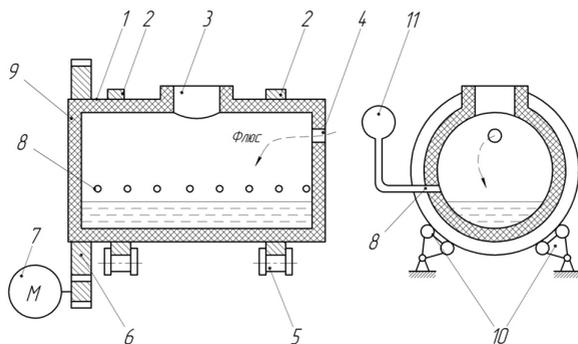
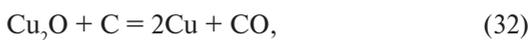


Рис. 41. Медеплавильный конвертор: 1 – кожух; 2 – обода; 3 – горловина;
4 – отверстие для флюса; 5 – ролики; 6 – зубчатая передача; 7 – мотор;
8 – фурмы; 9 – футеровка; 10 – опоры; 11 – воздухопровод

Конвертор представляет собой стальной кожух 1, имеющий магнетитовую футеровку 9. Через фурмы 8, расположенные по бокам конвертора, вдвывается воздух, поступающий из воздухопровода 11.

Воздух в отличие от сталеплавильных конверторов подается не снизу, а сбоку. Это обусловлено высокой теплопроводностью меди. Подача воздуха снизу вызвала бы быстрое охлаждение и затвердевание расплава. Корпус конвертора охватывается двумя ободами 2, которые опираются на две пары роликов 5. Они обеспечивают возможность конвертору совершать поворот на 180° при помощи зубчатой передачи 6. Заливка штейна и выпуск получаемой меди производятся через горловину 3. Кремнезем, применяемый в качестве флюса, подается через отверстие 4 в одной из торцевых стенок. Емкость такого конвертора составляет 15–100 т. Процесс окисления серы и железа, происходящий в течение 12 ч, сопровождается выделением тепла. В результате этого температура в конверторе поддерживается в пределах 1100–1200 °С. Черновая медь содержит 0,5–1,5 % примесей. Она разливается на чушки или в жидком виде поступает на рафинирование.

Рафинирование может производиться в несколько этапов. Огневое рафинирование осуществляется в плазменных отражательных печах путем продувки черновой меди воздухом. В результате продувки происходит окисление примесей, имеющих большое сродство к кислороду. Получаемые окислы переходят в шлак или удаляются в виде газов. После скачивания шлака производится восстановление меди «дразнением». Чтобы не происходило окисление меди, на ее поверхность насыпают слой древесного угля. Затем в металл вводят сырые и сухие бревна и ими перемешивают жидкую медь для того, чтобы происходило восстановление меди обугленной древесиной:



Полученную медь, содержащую не более 0,3–0,5 % примесей, разливают на слитки или анодные пластины для электролиза.

Электролитическое рафинирование (рис. 42) обеспечивает получение меди более высокой степени очистки. Процесс ведется в электролизных ваннах 1, изготавливаемых из дерева с облицовкой внутри листами свинца или пластмассы 2. В качестве электролита используют 16-процентный водный раствор медного купороса в серной кислоте. На анодную шину навешивают пластины

из черновой или рафинированной меди 7 весом до 250 кг, толщиной 40 мм, на катодную шину – тонкие (толщиной 0,6 мм) листы электролитической меди 8.

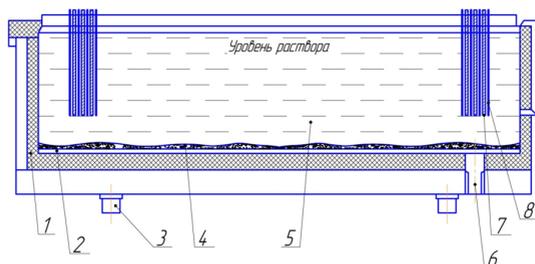


Рис. 42. Электролизная ванна для рафинирования меди:

- 1 – ванна; 2 – листы пластмассы; 3 – изолирующие подставки;
4 – шлам; 5 – электролит; 6 – отверстие для шлама; 7 – катодная шина;
8 – листы электролитической меди

При прохождении постоянного электрического тока анодные пластины растворяются, и чистая медь осаждается на катодных пластинах. За 10–12 дней на катодной пластине осаждается до 100 кг меди, которая по способу очистки называется катодной. Драгоценные металлы (золото, серебро) оседают на дно вместе со шламом 4, который в дальнейшем выпускается в отверстие 6. После специальной обработки золото, серебро извлекаются из шлама.

3.5.2. Производство алюминия

Алюминий обычно производят из бокситов, которые являются основным видом сырья для получения алюминия. Это сырьё содержит 50–60 % глинозема Al_2O_3 , 1–15 % кремнезема SiO_2 , 2–25 % окислов железа Fe_2O_3 , 2–4 % окислов титана TiO_2 и 10–30 % воды H_2O .

Получение алюминия сводится к извлечению его из глинозема путем электролиза расплава окиси алюминия в криолите. Производство алюминия включает четыре основных процесса: 1) извлечение из сырья глинозема; 2) получение криолита; 3) получение алюминия электролизом расплава, содержащего глинозем; 4) рафинирование алюминия.

Наибольшее распространение для извлечения из сырья глинозема Al_2O_3 получил щелочной способ в двух вариантах – автоклав-

ный (мокрый) способ и способ спекания (сухой). При сухом способе бокситную муку смешивают с содой и спекают при температуре 800–1000 °С для получения растворимого в воде алюмината натрия. Полученный алюминат натрия выщелачивают водой и продувают углекислотой для получения осадка гидроксида алюминия. Осадок промывают и прокаливают для получения глинозема Al_2O_3 . Однако глинозем является окислом высокой термической стойкости, у которого температура плавления равна 2050 °С. Для снижения температуры плавления его смешивают с фтористой солью – криолитом Na_3AlF_6 . Раствор глинозема в криолите плавится при значительно меньшей температуре – 940 °С.

Электролиз раствора глинозема в криолите производится в специальных ваннах – электролизерах (рис. 43). Электролизер состоит из металлического корпуса *1*, имеющего теплоизоляционную футеровку *2* из выложенных внутри угольных плит *3* и блоков *10*. Нижние блоки имеют каналы, в которых проходят катодные шины *9*. Угольные электроды *4* частично погружают в расплавленный электролит *6*, состоящий из глинозема и криолита. Выделяемое электродами тепло поддерживает электролит в жидком состоянии. По мере того, как расходуются электроды, происходит их опускание в электролит.

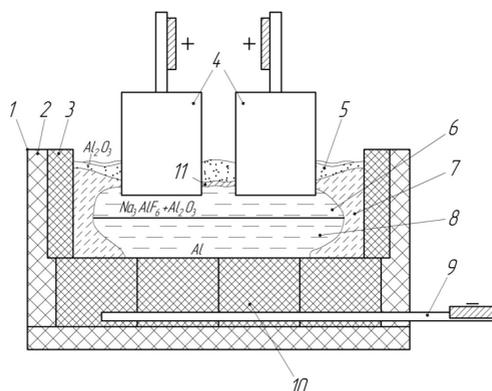


Рис. 43. Электролизер для извлечения алюминия:

- 1* – корпус; *2* – футеровка; *3* – угольные плиты; *4* – электроды;
- 5* – глинозем; *6* – электролит; *7* – гарнисаж; *8* – алюминий;
- 9* – катодные шины; *10* – угольные блоки; *11* – твердая корка

При электролизе на поду ванны (на катоде) осаждается расплавленный алюминий 8. При соприкосновении электролита с относительно холодными стенками электролизера происходит его затвердевание в виде гарнисажа 7. На поверхности ванны электролит образует твердую корку 11, на которую насыпают глинозем 5.

Осаждающийся на поду ванны алюминий периодически (раз в трое-четыре суток) извлекается вакуум-ковшом. Затем он рафинируется двумя способами – переплавкой в электропечах сопротивления с продувкой хлором или специальной электролитической очисткой.

3.6. Порошковая металлургия

Порошковая металлургия основана на использовании в качестве исходного сырья смеси порошков металлов и неметаллических материалов, которые прессуются в изделия требуемых форм, размеров и плотности. Изделия, изготовленные по технологиям порошковой металлургии, в профессиональной среде известны под названием металлокерамических. Они достаточно широко используются в машиностроении, судостроении, ядерной и ракетной технике.

3.6.1. Получение металлических порошков

Металлические порошки, применяемые в порошковой металлургии, различаются как по размерам, так и по форме и свойствам фракций.

Для получения металлических порошков используют механические и физико-химические способы.

В основе механических методов получения порошков лежат процессы измельчения материалов путем ударного, скальвающего и истирающего воздействия специальных инструментов. Измельчению также способствует движение самой размалываемой массы.

Одним из самых распространенных механических методов является метод размалывания материалов в шаровых мельницах. Этим методом целесообразно получать порошки хрупких материалов – кремния, бериллия, чугуна, ферросплавов и др. Частицы порошка, полученного в шаровых мельницах, имеют вид неправильных многогранников с размерами до 0,3 мм.

Пластичные материалы перед размолом необходимо переводить в хрупкое состояние. Это делается путем насыщения водородом, охлаждения азотом до температур повышенной хрупкости, введения специальных добавок или поверхностно-активных веществ. Достаточно часто процессы механического измельчения проводят одновременно с процессами смешивания шихтовых материалов.

Недостатком метода размалывания материалов в шаровых мельницах является загрязнение порошков продуктами истирания металлов шаров и барабана.

Метод размалывания материалов в вихревых мельницах более производительен, чем в шаровых мельницах. В этом методе размалывание происходит при помощи двух пропеллеров (рис. 44, *а*), вращающихся с большой скоростью в разных направлениях. Эти пропеллеры находятся в кожухе вихревой мельницы. Загружаемый в бункер материал в виде мелких кусочков захватывается пересекающимися воздушными потоками, дробится за счет взаимного соударения на мелкие фракции. В некоторых конструкциях вихревых мельниц пропеллеры заменяют билами (рис. 44, *б*), вращающимися в одном направлении. Частицы порошка, полученного в вихревых мельницах, имеют тарельчатую форму с размерами до 0,2 мм. В камеру вихревой мельницы иногда нагнетают инертный газ, предохраняющий частицы от окисления.

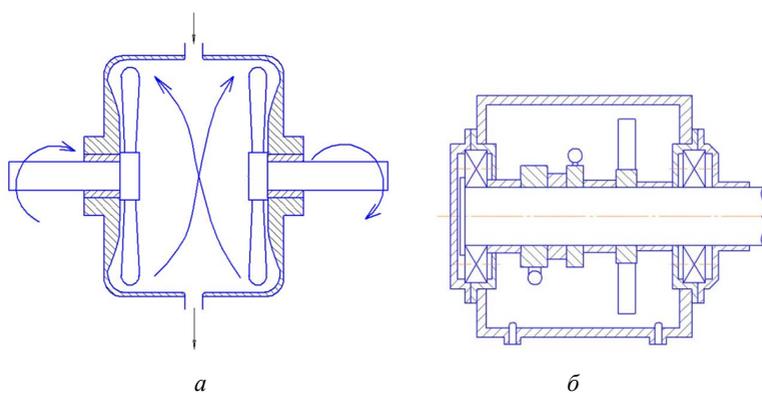


Рис. 44. Механические способы получения порошков в мельницах с пропеллерами (*а*) и билами (*б*)

Для получения тонких порошков из твердых материалов применяют метод размалывания материалов в вибрационных мельницах. Сущность метода заключается в высокочастотном воздействии на измельчаемый материал стальных шаров, которые находятся в специальном барабане. Шихта и шары заполняют барабан на 80 % его ёмкости. При этом объём шаров обычно в 8–10 раз превышает объём шихты. Интенсивность размалывания существенно повышается при добавлении в шихту воды, бензина или спирта.

Порошок также получают методом распыления жидких металлов. Его сущность заключается в том, что струя расплавленного металла распыляется с помощью воздуха, инертных газов или ударов лопаток вращающегося диска. Частицы порошка, полученного этим методом, имеют сферическую форму с размерами до 0,35 мм. В процессе распыления частицы окисляются. Поэтому они в дальнейшем подвергаются восстановительному отжигу.

Физико-химические методы получения порошков основаны на химическом или физическом воздействии на исходный измельчаемый материал. В результате такого воздействия происходит изменение химического состава исходного сырья или его агрегатного состояния.

Одним из самых распространенных физико-химических методов получения порошков железа, вольфрама и молибдена является метод химического восстановления. Восстановление осуществляется водородом, диссоциированным аммиаком, конверторными или доменными газами. Также в реакции восстановления участвует окись углерода. Качество порошка во многом зависит от восстановителя и параметров режима восстановления. Недостатком этого метода является науглероживание частиц порошка.

Для получения металлических порошков широко используют метод электролитического осаждения. Этот метод основан на осаждении порошкообразных металлов из водных растворов солей и расплавленных сред. В первом случае получают порошки олова, серебра и железа. Во втором случае получают порошки редких металлов – тантала, ниобия, тория, циркония и урана.

Частицы порошков, полученных методом электролитического осаждения, имеют вытянутую форму. При этом их размеры зависят от плотности тока.

Достоинством этого метода является возможность получать чистые порошки из загрязненных исходных материалов.

Широкое распространение в производстве тонких порошков получил карбонильный метод. Метод основан на том, что некоторые материалы (железо, никель и кобальт) при определенных условиях образуют с окисью углерода неустойчивые химические соединения. Эти соединения, называемые карбонилами, способны разлагаться с образованием тонких порошков металла и окиси углерода.

Карбонильные железные порошки обладают хорошими технологическими свойствами и используются для получения магнитомягких материалов.

Формообразованию металлокерамических изделий предшествует подготовка шихты. Это ответственное мероприятие, от которого в значительной степени зависит качество прессованных порошковых изделий. Оно включает в себя операции очистки порошков, предварительной механической обработки, классификации, смешивания, осреднения и грануляции.

Операция очистки исходного сырья производится химическим, гидромеханическим и магнитным способами.

Механическая обработка служит для дополнительного измельчения частиц порошков в шаровых мельницах до требуемых размеров. Для снятия наклепа и уменьшения окисленности частиц порошков после дополнительного измельчения производят восстановительный отжиг. При этом происходит улучшение физико-химической однородности исходных порошков.

Операция классификации, то есть сортировки, нужна для получения порошков с частицами определенного размера. Её производят с помощью специальных сит. В результате получают две или более фракций порошкового материала.

Операция смешивания проводится для получения однородной смеси порошков различных материалов. Это делается во избежание образования брака готовых изделий. Смешивание может быть сухое и мокрое. Последнее применяют для получения смесей материалов, резко отличающихся по удельному весу. В качестве жидкой среды используются спирт, бензин, глицерин и дистиллированная вода.

Операцию грануляции проводят с целью улучшения текучести и прессуемости порошков. Её сущность заключается в образовании условно устойчивых комочков, которые состоят из сравнительно большого числа весьма тонких частиц порошка. В порошок вводят различные присадки и пластификаторы, которые смачивают поверхности частиц. Это способствует их легкому скольжению друг относительно друга при прессовании.

Готовые металлокерамические изделия обычно получают прессованием. Его осуществляют в специальных пресс-формах. Порошковая смесь засыпается в матрицу и сжимается пуансоном. Уплотнение частиц под воздействием пуансона происходит крайне неравномерно вследствие их различной взаимной ориентации и сил трения о стенки матрицы. Поэтому для получения порошка необходимой плотности требуются значительные усилия со стороны пуансона. Эти усилия, зависящие от многих факторов, рассчитываются заранее. После прессования изделие извлекается из матрицы. Извлечение изделия из матрицы, которая предварительно устанавливается на подкладное кольцо, производится тем же пуансоном.

В процессе прессования частицы порошка подвергаются упругопластической деформации. После снятия нагрузки с пуансона под воздействием обратной упругой деформации изделие стремится увеличить свои размеры. Это явление необходимо учитывать при изготовлении точных изделий.

Прессование может быть односторонним и двусторонним.

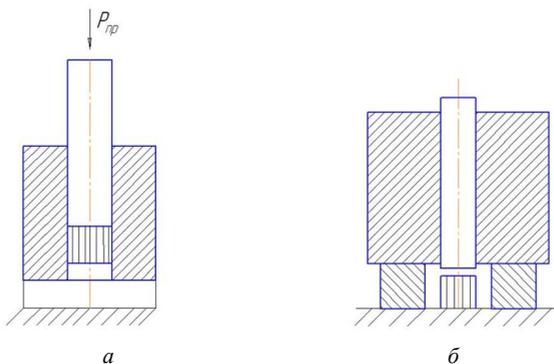


Рис. 45. Схемы одностороннего прессования (а) и выпрессовки (б) изделия

Одностороннее прессование (рис. 45) применяется при изготовлении изделий простой формы. Основным недостатком одностороннего прессования является анизотропия свойств изделий по высоте.

Двустороннее прессование (рис. 46) применяется для изделий сложной конфигурации, у которых требуется одинаковая плотность по всей высоте.

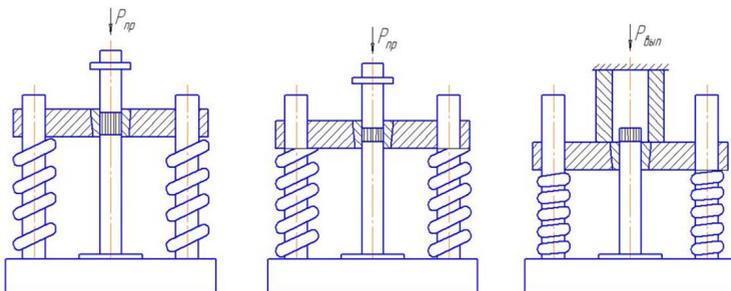


Рис. 46. Схема двустороннего прессования порошков и выпрессовки изделия

Детали пресс-форм изготавливают из высокоуглеродистых, легированных, закалённых сталей и твёрдых сплавов. Рабочие поверхности пресс-форм должны быть шлифованными или даже полированными. Пресс-формы из твёрдых сплавов более долговечные. Они могут выдержать до 500 тысяч прессовок.

Для прессования порошков используются гидравлические и механические прессы. Гидравлические прессы нашли более широкое распространение, так как обеспечивают плавное уплотнение со сравнительно малыми скоростями. Это позволяет применять более простую оснастку. Из механических прессов наибольшее применение нашли кривошипные прессы. Они имеют рабочий пуансон, осуществляющий прессование, и два боковых пуансона, которые извлекают изделие из матрицы. Для прессования применяют также кривошипно-коленные, кулачковые и карусельные прессы.

Гидростатическим прессованием получают изделия простой формы, к точности которых не предъявляются высокие требования. Порошковую шихту засыпают в эластичную оболочку и под-

вергают всестороннему гидростатическому сжатию. Гидростатическое прессование позволяет получить изделия с равномерной плотностью по всему объему.

Изготовить заготовки в виде лент, полос и проволоки позволяет прокатка металлических порошков (рис. 47). Это весьма производительный метод получения полупродукта.

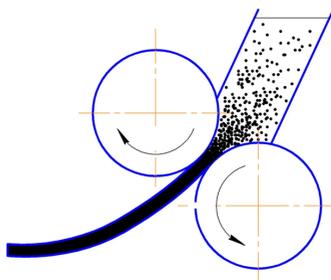


Рис. 47. Схема прокатки порошков

Прокатку порошков производят в вертикальном, горизонтальном и наклонном направлениях. Прокатка порошков ведется без смазки. Порошок непрерывно поступает из бункера в зазор между валками, где происходит его обжатие и вытяжка в ленту или полосу определенной толщины (0,02–3,0 мм). Прокаткой можно получать двухслойные ленты из различных металлокерамических материалов при наличии перегородки у бункера.

Порошки сначала прокатываются в обжимных валках большого диаметра. Затем полученная заготовка спекается и поступает на чистовую обработку в обжимных валках малого диаметра. Применение валков с ручьями различной конфигурации позволяет получать прутки любого профиля, в том числе и проволоку диаметром до нескольких миллиметров.

Наилучшими условиями подачи порошка в зону деформации обладает вертикальная прокатка. Основным недостатком этого способа является перегиб на 90° ленты, выходящей из валков. Такой перегиб совершенно недопустим при прокатке хрупких материалов или высокопористых лент.

3.6.2. Спекание металлокерамических изделий

Сущность процесса спекания заключается в нагреве и выдержке прессованных заготовок при высоких температурах, близких к температуре плавления основного компонента спекаемой композиции (рис. 48). Процесс проводится либо в восстановительной, либо в нейтральной атмосфере, а иногда в вакууме.

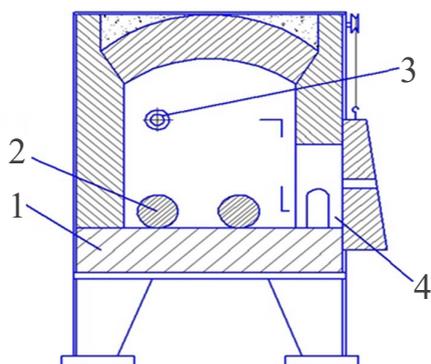


Рис. 48. Спекание металлокерамических изделий:
 1 – под печи; 2 – заготовки; 3 – горелка; 4 – окно

Применяют два метода спекания – с жидкой фазой и без жидкой фазы. В первом методе спекание осуществляется при температуре, превышающей температуру плавления одного или нескольких компонентов смеси. Во втором методе – при температуре ниже температуры плавления любого компонента смеси.

Спекание необходимо для того, чтобы получить изделия с высокими механическими свойствами. Оно обеспечивает получение металлических связей между частицами порошка и даёт высокую механическую прочность изделий. Влияние температуры спекания на свойства прессованных изделий тесно связано с давлением прессования. Прочность изделий возрастает по мере повышения температуры при относительно низком давлении прессования.

При спекании изделий из тонких порошков усадка значительно больше, чем при спекании прессованных заготовок из грубых порошков.

Горячее прессование совмещает процессы прессования и спекания. Нагрев порошковых материалов способствует более интенсивному повышению плотности, чем при обычном прессовании и спекании. В результате прессованные изделия получаются практически беспористыми. Горячим прессованием обрабатывают трудно деформируемые порошки в защитной или восстановительной атмосфере.

Плотность прессованных изделий зависит от температуры, при которой снимается нагрузка. Для получения высокой плотности

рекомендуется снимать нагрузку не сразу, а в процессе охлаждения или после него. Горячее прессование обычно проводят со смазкой. В качестве смазки могут использовать раствор коллоидного графита в спирте.

Дополнительная обработка прессованием спеченных изделий проводится с целью повышения физико-химических свойств, коррозионной стойкости, получения окончательных размеров и формы изделий.

Повторным прессованием с последующим спеканием повышают прочность и плотность изделий. Оно обычно производится в тех же пресс-формах и на тех же режимах, что и первичное прессование.

Пропитка маслом пористых изделий производится для улучшения их антифрикционных свойств. Часто в масло вводят коллоидный графит. Пропитку осуществляют путем погружения изделий в разогретую масляную ванну. Большее заполнение маслом пор изделий получается при пропитке в вакууме или в ультразвуковом поле.

Достаточно часто изделия из железного порошка подвергают науглероживанию путем нагрева и выдержки в ящике с карбюризаторами или в науглероживающей атмосфере. Это позволяет значительно повысить их износостойкость.

Металлокерамические заготовки обрабатываются режущими инструментами так же, как обычные материалы. Для обработки пористых деталей необходимо применять остро заточенный режущий инструмент, большие скорости резания и малые подачи обрабатываемого инструмента. При этом обработку рекомендуется проводить без смазочно-охлаждающей жидкости.

Выводы

1. Металлургия, состоящая из сложнейших процессов, является основополагающим фактором создания материально-технической базы страны.

2. Развитие металлургических процессов обусловлено непрерывно возрастающими требованиями к качеству металла со стороны промышленного производства.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое руда?
2. Для чего служат флюсы?
3. Как готовят железную руду к плавке?
4. Как получают чугун?
5. Что получается в результате плавки в доменной печи?
6. Какими способами получают сталь?
7. Для чего производят раскисление стали?
8. Какой способ получения стали наиболее производительный?
9. Каким способом можно получить наиболее качественную сталь?
10. Как получают медь?
11. Как получают алюминий?

4. КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА И ПРИМЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

Специалисту в его работе крайне необходимы знания в области применения материалов, поскольку на практике достаточно часто приходится решать вопросы их подбора для конкретных условий эксплуатации.

Число металлических сплавов, применяемых в технике, очень велико. При этом оно постоянно возрастает в связи с растущими требованиями промышленности. Всех их необходимо отличать друг от друга, а следовательно, каким-то образом обозначать, при этом указывать свойства и назначение сплавов, подчеркивать качество. Классифицировать металлы и сплавы по одному признаку не представляется возможным, так как их состав, свойства, назначение и способы производства слишком разнообразны. Поэтому существует несколько признаков, по которым проводят классификацию сплавов: по химическому составу, назначению, способу получения, свойствам и качеству.

4.1. Стали

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2 %.

Сталь является основной продукцией черной металлургии. В Российской Федерации приняты стандарты на стали, которые устанавливают маркировку, химический состав, способы производства и раскисления, механические свойства и правила приемки.

Основным классификационным признаком, определяющим марку стали, является ее химический состав. По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные. В углеродистых сталях помимо железа и углерода содержатся еще постоянные примеси. Эти примеси специально вводятся в состав шихты или являются элементами естественного происхождения, которые в процессе плавки невозможно полностью удалить из металла. Так, марганец, кремний вводятся в состав шихты как технологические добавки, необходимые для раскисления металла, то есть удаления

из него кислорода. Сера, фосфор, кислород, водород, азот являются элементами естественного происхождения, которые попадают в металл из руды и атмосферы. В состав стали также попадают примеси случайного происхождения, которые находятся в руде или шихте, например, хром, никель, медь и др. Содержание в стали всех примесей также зависит от способа выплавки.

Марганец и кремний повышают прочностные характеристики сталей. Марганец к тому же устраняет вредное воздействие серы на свойства стали, переводя серу в тугоплавкое соединение MnS . Сера и фосфор являются вредными примесями, оказывают негативное воздействие на сталь, попадая в неё из руды. Сера придает стали красноломкость — свойство давать трещины при горячей обработке давлением в области высоких температур (850–1150 °С). Фосфор сообщает стали хладноломкость, то есть способность охрупчиваться при пониженных температурах, что делает невозможным применение изделий из такой стали в районах с холодным климатом. Вредными примесями в стали являются кислород и водород. Кислород образует окислы, которые снижают прочностные свойства стали, а водород может образовывать трещинки-надрывы, называемые флокенами.

По способу производства различают стали конверторные, мартеновские, стали, выплавляемые в электрических печах, и стали особых методов выплавки, таких как электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-индукционная плавка (ВИП), вакуумно-диффузионная плавка (ВДП), электронно-лучевой переплав (ЭЛП), плазменно-дуговая плавка (ПДП). Применение особых методов выплавки позволяет получить более чистый и, следовательно, более качественный металл.

Следует отметить, что бессемеровская сталь по сравнению с мартеновской содержит повышенное количество растворенных азота и фосфора и при одинаковом содержании углерода имеет более высокие прочность и твердость и пониженную пластичность. Свойства стали, полученной томасовским способом, приближаются к свойствам мартеновской стали.

По назначению стали разделяются на конструкционные, инструментальные и стали специального назначения. Конструктивными называют такие стали, которые применяются для изготовле-

ния деталей машин, конструкций и сооружений. Конструкционная сталь должна обладать высокой прочностью, пластичностью и вязкостью в сочетании с хорошими технологическими свойствами: обрабатываемостью, штампуемостью, свариваемостью, то есть сталь должна легко обрабатываться резанием, давлением и хорошо свариваться. Углеродистые конструкционные стали выплавляются мартеновским и конверторным способами.

По качеству стали делятся на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные. Чем меньше вредных примесей в стали, тем выше её качество.

По способу раскисления стали делятся на три группы: спокойные, полуспокойные, кипящие.

Спокойные стали обозначаются строчными буквами «сп». Их получают полным раскислением металла, то есть кислород из стали удаляют марганцем, кремнием и алюминием, сначала в печи, а затем в ковше. Полуспокойные стали обозначаются строчными буквами «пс». Их получают раскислением металла марганцем и кремнием или марганцем и алюминием. Кипящие стали маркируются строчными буквами «кп». Их получают раскислением металла только марганцем. Чем полнее раскислен металл, тем выше у него прочностные свойства.

Все металлы и сплавы получили условные обозначения, то есть марки, состоящие из букв и цифр.

4.1.1. Конструкционные углеродистые стали обыкновенного качества общего назначения

Стали обыкновенного качества общего назначения содержат до 0,5 % углерода и выплавляются в конверторах и больших мартеновских печах. К процессу выплавки этих сталей не предъявляют высоких требований. В результате химический состав может сильно колебаться.

Стали этой группы маркируются порядковым номером от 0 до 6 после букв «Ст», обозначающих слово «сталь».

С увеличением порядкового номера в стали растет среднее содержание углерода. В этой связи чем больше порядковый номер, тем выше прочность и ниже пластичность (табл. 2). Для обозначения

ния способа раскисления после цифры добавляют индексы: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная.

Имеются три марки стали с повышенным содержанием марганца, который маркируется буквой «Г»: Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст5Гпс. То есть эти стали содержат в среднем около 1 % марганца.

В сталях этой группы ограничивается содержание вредных примесей: серы не более 0,05 % и фосфора не более 0,04 %.

Таблица 2

Механические свойства стали обыкновенного качества

Марки стали	σ_b , МПа	δ , % не менее	Марки стали	σ_b , МПа	δ , % не менее
Ст0	320	22	Ст4кп, Ст4, Ст4пс	420–520	25–23
Ст1кп, Ст1, Ст1пс	320–380	33	Ст5, Ст5пс	500–620	21–19
Ст2кп, Ст2, Ст2пс	350–400	31	Ст6, Ст6пс	600–720	16–14
Ст3кп, Ст3, Ст3пс	380–470	27–25			

Стали обыкновенного качества – наиболее дешевые из всех сталей. Они используются для изготовления металлоконструкций и деталей машин общего назначения. Из них изготавливают горячекатаный сортовой, фасонный и широкополосный листовой прокат: балки, прутки, швеллеры, уголки, листы, трубы, а также поковки, работающие при относительно невысоких нагрузках. Они широко используются для строительных, сварных, клепаных конструкций и конструкций с резьбовым креплением элементов (балки, формы конструкции подъемных кранов, корпуса сосудов и аппаратов, каркасы котлов, драги и др.), а также малоответственных деталей машин (оси, валы, шестерни, втулки, валики, болты, гайки и т. д.). Сварные конструкции изготавливают главным образом из спокойной и полуспокойной сталей.

При одной и той же марке бессемеровские стали содержат углерода меньше, чем мартеновские и конверторные, имеют повышенную прочность и пониженную пластичность вследствие большого содержания азота, серы, фосфора.

4.1.2. Качественные конструкционные углеродистые стали

Качественные конструкционные углеродистые стали выплавляют в мартеновских и электрических печах. По сравнению со сталями обыкновенного качества качественные стали выплавляются с соблюдением более строгих условий ведения плавки и разливки. К сталям этой группы предъявляются более высокие требования относительно химического состава. В них ограничены пределы содержания углерода, неметаллических включений и вредных примесей: содержание серы — не более 0,035 % и фосфора — не более 0,035 %.

Качественные углеродистые стали маркируются двузначными цифрами 05, 08, 10, 15, 20—35, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (табл. 3). Например, сталь 08 содержит 0,08 % углерода (пределы содержания углерода составляют 0,056—0,11 %). Они, в зависимости от степени раскисления, преимущественно могут быть спокойными или кипящими. При обозначении кипящей и полуспокойной стали в конце марки указывается способ раскисления: кп или пс. Например, 08кп или 20пс. В случае спокойной стали способ раскисления в марке стали не указывается.

В зависимости от содержания углерода различают низкоуглеродистые, среднеуглеродистые и высокоуглеродистые стали.

Низкоуглеродистыми называют стали, которые содержат углерод в количестве 0,03—0,25 %. Низкоуглеродистые стали 05кп, 08, 08кп, 10, 10кп обладают невысокой прочностью и высокой пластичностью. Эти стали без термической обработки применяются для малонагруженных деталей (прокладки, шайбы, капоты тракторов, змеевики и т. д.), элементов сварных конструкций, штампованных изделий и т. д. Штампуемость стали тем хуже, чем больше в ней углерода. Кремний, повышая предел текучести, снижает штампуемость, особенно способность принимать вытяжку. Поэтому для холодной штамповки предпочтительней применять холоднокатаные кипящие стали 08кп, 10кп, 15кп. Стали 15, 20, 20кп, 25 поступают

в производство в виде проката, поковок, труб, листов, ленты и проволоки и предназначаются для изготовления неотчетливых деталей и сварных конструкций, так как обладают хорошей свариваемостью. Эти стали после последующей упрочняющей химико-термической обработки (цементации и цианирования) применяются и для деталей, работающих в условиях изнашивания трением при невысоких нагрузках: кулачковых валиков, рычагов, осей, втулок, малонагруженных шестерен, шпинделей, вилок и валиков переключения передач, толкателей клапанов, пальцев рессор и др.

Таблица 3

Химический состав и механические свойства углеродистых качественных конструкционных сталей

Сталь	С	Mn	Si	Механические свойства нормализованной стали			
				Предел прочности		Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
				σ_b , МПа не менее	σ_b , кг/мм ² не менее		
05кп	0,06	0,40	0,03	—	—	—	—
08кп	0,5–0,11	0,25–0,50	0,03	294	30	35	6
10	0,07–0,14	0,35–0,65	0,17–0,37	333	34	31	55
15	0,12–0,19	0,35–0,65	0,17–0,37	373	38	27	55
20пс	0,17–0,24	0,35–0,65	0,17–0,37	142	42	25	55
25	0,22–0,30	0,50–0,80	0,17–0,37	451	46	23	50
30	0,27–0,35	0,50–0,80	0,17–0,37	490	50	21	50
35	0,32–0,40	0,50–0,80	0,17–0,37	530	54	20	45
40	0,37–0,45	0,50–0,80	0,17–0,37	569	58	19	45
45	0,42–0,50	0,50–0,80	0,17–0,37	598	61	16	40
50	0,47–0,55	0,50–0,80	0,17–0,37	628	64	14	40
55	0,52–0,60	0,50–0,80	0,17–0,37	647	66	13	35
60	0,57–0,65	0,50–0,80	0,17–0,37	677	69	12	35
65	0,62–0,70	0,50–0,80	0,17–0,37	696	71	10	30
70	0,67–0,75	0,50–0,80	0,17–0,37	716	73	9	30

Среднеуглеродистыми называют стали, которые содержат углерод в количестве 0,3–0,55 %. Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50, 55 применяются для изготовления самых разнообразных деталей во всех отраслях машиностроения (коленчатые и распределительные валы, шатуны, шестерни, шпиндели, фрикционные диски, штоки, траверсы, плунжеры и т. д.).

Высокоуглеродистыми называют стали, которые содержат углерод в количестве 0,6–0,85 %. Стали 60, 65, 70, 75, 80 и 85 обладают высокой прочностью, износостойкостью и высокими упругими свойствами. Из этих сталей изготавливают пружины и рессоры, замковые шайбы, прокатные валки, бандажи трамвайных вагонов и т. д.

Качественные стали могут содержать повышенное количество марганца, примерно 0,7–1,0 %. Марганец повышает пределы прочности и текучести, но несколько снижает пластичность и вязкость. Стали 15Г, 25Г, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г применяются в тех же случаях, что и аналогичные стали с нормальным содержанием марганца в количестве от 0,25 до 0,7 %.

4.1.3. Инструментальные углеродистые стали

Инструментальные углеродистые стали – это большая группа сталей, которые в результате термической упрочняющей обработки получают высокую твердость и износостойкость, необходимые при обработке металлов резанием и давлением. Они содержат от 0,65 до 1,35 % углерода. Эти стали подразделяются на качественные и высококачественные. Высококачественная сталь отличается от качественной пониженным содержанием вредных примесей, а также кремния, марганца. Они содержат не более 0,01 % серы и не более 0,005 % фосфора.

При практически одинаковой твердости высококачественная сталь по сравнению с качественной сталью лучше противостоит действию ударных нагрузок и при закалке дает меньше брака. Высококачественную сталь выплавляют в электрических печах, а качественную – в мартеновских.

Маркируется эта группа сталей следующим образом. Впереди ставится буква «У», что обозначает углеродистая (табл. 4). За буквой ставится цифра, которая обозначает среднее содержание углерода

в десятых долях процента. Если сталь высококачественная, то справа от цифры ставится буква «А».

Таблица 4

Химический состав (%) инструментальных углеродистых сталей (ГОСТ 1435–90)

Сталь	C	Mn	Si
У7 (У7А)	0,65–0,74	0,2–0,4	
У8 (У8А)	0,75–0,84	0,2–0,4	
У9 (У9А)	0,85–0,94	0,15–0,35	
У10 (У10А)	0,95–1,04	0,15–0,35	0,15–0,35
У11 (У11А)	1,05–1,14	0,15–0,35	
У12(У12А)	1,15–1,24	0,15–0,35	
У13(У13А)	1,25–1,35	0,15–0,35	

Следует отметить, что в высококачественных углеродистых сталях У7А – У13А содержание марганца составляет 0,15–0,30 %, кремния – 0,15–0,30 %, серы – не более 0,02 % и фосфора – не более 0,03 %.

Инструментальные углеродистые стали применяются следующим образом.

У7 и У7А предназначены для инструментов и изделий, подвергающихся ударам и требующих высокой вязкости при умеренной твердости. Такими изделиями являются зубила, молотки, штампы, клейма, масштабные линейки, инструмент по дереву, центра токарных станков и др.

У8 и У8А предназначены для инструментов и изделий, требующих повышенной твердости и достаточной вязкости. Таким инструментом являются пробойники, зубила, кернеры, пуансоны, ножи и ножницы по металлу, отвертки, столярный инструмент, буры средней твердости и др.

У9 и У9А предназначены для инструментов, требующих высокой твердости при некоторой вязкости. Такими инструментами являются штемпеля, кернеры, зубила по каменным породам, столярный инструмент и др.

У10 и У10А предназначены для инструментов, не подвергающихся сильным ударам и требующих высокой твердости при незначительной вязкости. Такими изделиями являются строгальные резцы, фрезы, метчики, развертки, плашки, буры по твердым породам, ножовочные полотна, фасонные штампы, зубила для насечки напильников, волочильные кольца, калибры, напильники и др.

У11, У11А, У12 и У12А предназначены для инструментов, требующих высокой твердости. Такими изделиями являются напильники, фрезы, сверла, пилы по металлу и др.

У13 и У13А предназначены для инструментов, которые должны иметь исключительно высокую твердость. Таким инструментом являются бритвы, шаберы, волочильный инструмент, сверла, зубила для насечки напильников, косы и др.

4.1.4. Легированные стали

Легированной называют сталь, в которой наряду с обычными примесями и технологическими добавками содержатся специально вводимые легирующие элементы. Такими элементами могут быть марганец, кремний, хром, ванадий, кобальт, вольфрам, молибден и титан, которые вводят в сталь с целью повышения её механических, технологических, физико-химических свойств. Часто легирующие элементы определяют название легированной стали. Например, хромистая, никелевая, ванадиевая, хромоникелевая, хромомарганцевая и др. Изделия из легированной стали более прочные и обладают большей долговечностью, чем изделия из углеродистой стали. По назначению легированные стали делятся на три группы: конструкционные стали, инструментальные стали и стали специального назначения с особыми физическими и химическими свойствами.

В основу обозначения марок легированных сталей положена буквенно-цифровая система. Легирующие элементы обозначаются прописными русскими буквами (табл. 5).

Обозначение легирующих элементов в сталях

Название	Химический символ	Маркировочное обозначение	Название	Химический символ	Маркировочное обозначение
Марганец	Mn	Г	Кобальт	Co	К
Кремний	Si	С	Алюминий	Al	Ю
Хром	Cr	Х	Медь	Cu	Д
Никель	Ni	Н	Бор	B	Р
Вольфрам	W	В	Ниобий	Nb	Б
Ванадий	V	Ф	Цирконий	Zr	Ц
Титан	Ti	Т	Фосфор	P	П
Молибден	Mo	М	Азот	N	А (внутри марки)

Для конструкционных сталей цифры с левой стороны букв обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, в стали 45ХВ содержится 0,45 % углерода.

Если впереди марки нет цифры, то это значит, что углерода в стали содержится около 1 %. Например, Х12.

Если содержание легирующего элемента в стали около 1 %, то после буквы цифры не ставятся. Например, ХГ. Если содержание легирующего элемента в стали больше 1 %, то после буквы указывается его среднее значение в целых процентах. Например, в стали Х18Н10Т содержится 18 % хрома, 10 % никеля и 1 % титана.

В качестве основных легирующих элементов в конструкционных сталях используются хром (Cr), никель (Ni), кремний (Si). Такие легирующие элементы, как молибден (Mo), вольфрам (W), ванадий (V) и титан (Ti), обычно используются в сталях в сочетании с хромом (Cr) и никелем (Ni) с целью дополнительного повышения их физико-механических свойств. Их количество в конструкционных сталях как правило не превышает 1 %. Общее количество легирующих элементов в конструкционных сталях обычно не превышает 7–8 %.

Поставляются конструкционные легированные стали по ГОСТ 4543—71. По содержанию углерода они делятся на две группы: малоуглеродистые цементируемые стали, содержащие до 0,2 % углерода и подвергающиеся в последующем дополнительному насыщению углеродом при химико-термической обработке, и среднеуглеродистые улучшаемые стали, содержащие 0,25—0,5 % углерода и подвергающиеся в последующем термическому упрочнению путем закалки и высокого отпуска (улучшению). Легированные стали выплавляются с малым содержанием вредных примесей (сера и фосфор менее 0,035 %) и являются качественными. Вместе с тем производятся также высококачественные стали. В этом случае, как и в углеродистой стали, в конце марки ставится буква «А», обозначающая высококачественную сталь, т. е. сталь, в которой содержится значительно меньше серы и фосфора (не более 0,025 %), например, 30ХГСА. Для пояснения расшифруем некоторые марки. Например, сталь 12Х2Н4А — хромоникелевая конструкционная высококачественная сталь с содержанием 0,12 % углерода, 2 % хрома, 4 % никеля. Сталь марки ХВ5 — хромовольфрамовая конструкционная качественная сталь с содержанием 1 % углерода, 1 % хрома, 5 % вольфрама.

В инструментальных сталях вначале как правило ставится одна цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента, например, 7ХФ, 3Х2В8Ф. Если углерода не более 1 %, то вначале цифра не ставится, например, ХГ и ХВГ. Исключение из этого правила составляют две марки инструментальной стали: 11ХФ и 13Х.

Стали специального назначения с особыми свойствами (жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие нержавеющие) маркируются точно так же, как конструкционные легированные стали, например, 08Х13, 12Х17, 12Х18Н10Т и 40Х10С2М. Только суммарная доля легирующих элементов в этих сталях в большинстве случаев значительно превышает 10 %.

Указанная система маркировки охватывает большинство легированных сталей. Исключение составляют некоторые группы сталей, которые дополнительно обозначаются буквой: Р — быстрорежущие, Е — магнитные, Ш — шарикоподшипниковые, Э — электростали.

4.1.5. Стали для отливок

В тяжелом и транспортном машиностроении эту группу сталей применяют в виде фасонных отливок для станин станков, картеров агрегатов, зубчатых колес и многого другого.

Стали для отливок дополнительно маркируются буквой «Л» в конце марки, что означает литая сталь. Перед ней ставятся цифры, указывающие среднее содержание в стали углерода в сотых долях процента. Литыми сталями могут быть углеродистые конструкционные, легированные конструкционные стали и стали специального назначения с особыми свойствами. Литые углеродистые конструкционные маркируются 15Л и 20Л. Литые легированные конструкционные стали обозначаются 40ХЛ и 35ХМЛ. Литая сталь специального назначения с особыми свойствами маркируется 10Х18Н9Л.

Литая сталь по сравнению с деформированной при одинаковом значении пределов текучести и прочности имеет меньшую вязкость и пластичность.

Для фасонного литья применяют углеродистые стали 15Л, 20Л, 40Л, 50Л, 70Л. Сталь 20Л используется для литья станин прокатных станов, траверс, зубчатых колес. Сталь 30Л — для литья маховиков, цилиндров, станин, станков. 40Л и 45Л — для литья тормозных дисков, опорных катков и др. Высокоуглеродистые стали 50Л, 55Л применяются для износостойких отливок, не испытывающих ударных нагрузок.

4.1.6. Автоматные стали

Создание сталей с повышенной обрабатываемостью резанием тесно связано с возникновением и развитием автоматизированного производства в разных отраслях машиностроения. Хорошая обрабатываемость автоматных сталей достигается повышенным содержанием серы (до 0,15–0,35 %) и фосфора (до 0,1–0,15 %). Эти химические элементы снижают прочность и повышают пластичность сталей. Это дает возможность изготавливать в условиях массового производства на автоматических линиях простые в отношении конструкции изделия: винты, болты, гайки и многое другое.

Стали этой группы маркируются буквой «А», что означает автоматная сталь (табл. 6). После буквы ставится цифра, которая указы-

вает среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, А12, А40Г. Сталь А12 применяется для изготовления винтов, болтов, гаек и различных мелких деталей сложной конфигурации на быстроходных автоматах. Стали А20, А30, А40Г используются для изготовления крепежных деталей, работающих при повышенных нагрузках.

Более высокой обрабатываемостью характеризуются свинец-содержащие и свинцовосернистые автоматные стали с содержанием свинца в пределах 0,15–0,3 %. Также добавляют в состав сталей селен и кальций в количестве до 0,007 %. Свинец в марке обозначается буквой «С», селен – буквой «Е», а кальций – буквой «Ц». Они ставятся после буквы «А». Например, АС14, АЦ20.

Свинецсодержащие автоматные стали марок АС14 и АС35Г2 позволяют существенным образом повысить стойкость режущих инструментов, проводить обработку на повышенных скоростях резания, получая при этом высокую чистоту обработанной поверхности. Однако эти стали в металлургическом и прокатном производствах выделяют в атмосферу вредные соединения свинца, а при коррозионном разрушении загрязняют окружающую среду.

Таблица 6

Химический состав и механические свойства автоматных сталей (ГОСТ 1414–94)

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства	
	С	Si	Mn	P	S	σ_b , МПа	δ , %
А12	0,08–0,16	0,15–0,35	0,60–0,90	0,08–0,15	0,08–0,15	420–800	7–22
А20	0,15–0,25	0,15–0,35	0,60–0,90	0,06	0,08–0,15	460–820	7–20
А30	0,25–0,35	0,15–0,35	0,70–1,00	0,06	0,08–0,15	520–850	6–15
А40Г	0,35–0,45	0,15–0,35	1,20–1,55	0,05	0,18–0,30	–	–

Альтернативой свинецсодержащим автоматным сталям стали более экологически чистые висмутсодержащие автоматные стали. Однако из-за высокой стоимости висмута эти стали не нашли широкого применения на практике.

Другой альтернативой свинецсодержащим сталям являются новые стали с модифицированными неметаллическими включениями, т. е. стали с улучшенной морфологией неметаллических включений, играющих ключевую роль в повышении обрабатываемости стали резанием. Примером бессвинцовой автоматной стали является сталь АМ14. Буква «М» в марке указывает на наличие в стали мелких равномерно распределенных неметаллических включений.

4.1.7. Строительные стали

Низколегированные конструкционные стали широко применяются в строительстве и машиностроении для изготовления горячекатаного проката различных профилей, предназначенных для сварных конструкций, и содержат легирующих элементов до 5 %.

Таблица 7

Классы строительных сталей

Класс прочности	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Марка стали по ГОСТ и ТУ
Обычная прочность		
C235	235	Ст3кп, Ст18кп
C245	245	Ст3пс, Ст18пс
C255	255	Ст3Гпс, Ст18пс
C275	275	Ст3пс
C285	285	Ст3сп, Ст3Гсп
Повышенная прочность		
C345	345	09Г2С, 12Г2С, 14Г2
C345Г	345	15ХСНД, Ст3псГ
C345К	345	10ХНДП
C375, C375Д	375	12Г2С, 12Г2СД
C390, C390Г	390	14Г2АФ, 10Г2С1
C390К	390	15Г2АФД
Высокая прочность		
C440	440	16Г2АФ
C590	590	12Г2СМФ
C590К	590	12Н2МФАЮ

По сравнению с углеродистыми сталями эти стали обладают повышенной прочностью, износостойкостью, пластичностью при низких температурах, коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. В соответствии с ГОСТ 277–88, в зависимости от механических свойств (не принимая во внимание химический состав) эти стали подразделяются на классы: стали обычной прочности, повышенной прочности и высокой прочности (табл. 7).

4.1.8. Стали для подшипников

Конструктивные элементы подшипников (кольца, ролики и шарики) работают в условиях высоких контактных деформаций, которые требуют от стали высокой твердости, износостойкости и сопротивляемости контактной усталости (фреттинг-стойкости). В качестве шарикоподшипниковой стали часто применяют углеродистые (с содержанием углерода в количестве 1 %), хромистые стали, а для массивных подшипников добавляют большее (до 1 %) количество марганца и кремния, получая таким образом хромомарганцевую сталь.

Стали для подшипников поставляются по ГОСТ 801–78.

Особенностью маркировки сталей для подшипников является обозначение их буквой «Ш» в начале марки (табл. 8). Далее ставится буква «Х», обозначающая основной легирующий элемент – хром. Следующая за буквой цифра показывает содержание хрома в десятых долях процента.

Таблица 8

Состав и назначение шарикоподшипниковой стали

Марка стали	Химический состав в %				Назначение	
	С	Mn	Si	Cr	Шарики	Ролики
					диаметр, мм	
ШХ6	1,05–1,15	0,2–0,4	0,17–0,37	0,4–0,7	до 13,5	до 10
ШХ9	1,0–1,1	0,2–0,4	0,17–0,37	0,9–1,2	13,5–22,5	10–15
ШХ15	0,95–1,05	0,2–0,4	0,17–0,37	1,3–1,65	более 22,5	15–30
ШХ15СГ	0,95–1,05	0,9–1,2	0,4–0,65	1,3–1,65	–	более 30

4.1.9. Быстрорежущие стали

Быстрорежущие стали применяются для изготовления режущей части многих обрабатывающих инструментов. Они, в отличие от других инструментальных сталей, обладают высокой теплостойкостью, то есть способностью сохранять свою структуру, высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах (620 °С), возникающих в процессе обработки в области режущей кромки инструмента. Теплостойкость быстрорежущей стали придает вольфрам, являющийся основным легирующим элементом.

Маркируется быстрорежущая сталь буквой «Р» (табл. 9). Цифра, стоящая за буквой «Р», показывает среднее содержание вольфрама в целых процентах. Далее ставятся буквы и цифры, указывающие среднее содержание других легирующих элементов, например, ванадия – «Ф», кобальта – «К». Все быстрорежущие стали содержат около 1 % углерода.

Таблица 9

Химический состав быстрорежущих сталей, % (ГОСТ 9373–60)

Сталь	С	Cr	W	V	Co	Mo
P18	0,7–0,8	3,8–4,4	17,5–19,0	1,0–1,4	–	0,3
P9	0,85–0,95	3,8–4,4	8,5–10,	2,0–2,6	–	0,3
P9Ф5	1,4–1,5	3,8–4,4	9,0–10,5	4,3–5,1	–	0,4
P14Ф4	1,2–1,3	4,0–4,6	13,0–15,5	3,4–4,1	–	0,4
P18Ф2	0,85–0,95	3,8–4,4	17,5–19,0	1,8–2,4	–	0,5
P9K5	0,9–1,0	3,8–4,4	9,0–10,5	2,0–2,6	5,0–6,0	0,3
P10K5Ф5	1,45–1,55	4,0–4,6	10,0–11,5	4,3–5,1	5,0–6,0	0,3
P18K5Ф2	0,85–0,95	3,8–4,4	17,6–19,0	1,8–2,4	5,0–6,0	0,5

Классическим примером быстрорежущей стали является чисто вольфрамовая сталь P9 и P18. Однако вольфрам имеет достаточно высокую стоимость. Поэтому его в стали частично заменяют более дешевым аналогом – молибденом. Например, P6M5. Для повышения износостойкости дополнительно легируют ванадием или кобальтом, например P6M5K5.

Поставляются быстрорежущие стали по ГОСТ 19265–73.

4.1.10. Магнитные стали

Магнитные стали широко применяются в электротехнике для изготовления постоянных магнитов, сердечников трансформаторов, электроизмерительных приборов, электромагнитов и др. Эти стали по резко различающимся магнитным характеристикам делятся на две группы: магнитотвердые и магнитомягкие. Эти определения не относятся к характеристике механических свойств (например, твердости) материала. Существуют механически мягкие, но магнитотвердые стали, и наоборот.

У магнитомягких сталей маленькая коэрцитивная сила и узкая петля гистерезиса. Они обладают очень высокой магнитной проницаемостью, легко намагничиваются и перемагничиваются. Из них делают сердечники трансформаторов, электроизмерительных приборов, электромагнитов и др.

Все магнитомягкие стали делятся на три группы:

- сталь электротехническая тонколистовая и сортовая нелегированная, по-другому эта сталь называется техническим железом;
- сталь электротехническая кремнистая;
- прецизионные магнитомягкие сплавы.

Для сталей первых двух групп разработана чисто цифровая система обозначения. Нелегированные стали обозначаются пятизначным числом:

- 10895, 20895, 10880, 20880, 10864, 20864;
- 11895, 21895, 11880, 21880, 11864, 21864.

Первая цифра в марке обозначает способ изготовления стали: 1 – горячекатаная, 2 – холоднокатаная. Вторая цифра «0» или «1» обозначает, что сталь не легирована и имеет нормированный или ненормированный коэффициент старения (упрочнения). Третья, четвертая и пятая цифры в марке указывают на магнитные характеристики сталей.

Сталь кремнистая электротехническая имеет четырехзначное цифровое обозначение марки. Первая цифра, обозначающая способ изготовления стали, может варьироваться от 1 до 3: 1 – горячекатаная, 2 – холоднокатаная, 3 – текстурированная.

Вторая цифра, показывающая содержание кремния в целых процентах, может варьироваться от 0 до 5. Две последние цифры указывают на магнитные характеристики сталей:

- 1211 (Si 2 %), 1312 (Si 3 %), 1413 (Si 4 %), 1514 (Si 5 %) – горячекатаная сталь;
- 2111 (Si 1 %), 2212 (Si 2 %), 2312 (Si 3 %), 2412 (Si 4 %) – холодно-тянутая сталь;
- 3411 (Si 4 %), 3412 (Si 4 %), 3413 (Si 4 %), 3415 (Si 4 %) – текстурованная сталь.

Из этой группы сталей наиболее высокие магнитные свойства имеет текстурованная сталь с крупнозернистой структурой, зерна которой расположены преимущественно вдоль листа.

Третья группа сплавов с добавками железа и кобальта содержит большое количество никеля (45–78 %). Эти сплавы называют пермаллоями и применяют в радиотехнике, вычислительной технике, то есть там, где используются слабые токи.

Магнитотвердые стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов. Такие стали обозначаются буквой «Е», которая ставится в начале марки (табл. 10). Далее идет стандартное обозначение, например, ЕХ3, ЕВ6, ЕХ5К5. Магнитотвердые стали и сплавы содержат большое количество хрома, вольфрама, молибдена и кобальта, которые улучшают магнитные свойства.

Таблица 10

Химический состав магнитных сталей (ГОСТ 6862–71)

Марка стали	Химический состав, %		
	С	Cr	Co, W, Mo
ЕХ	0,95–1,10	1,3–1,6	–
ЕХ3	0,90–1,10	2,8–3,6	–
Е7В3	0,68–0,78	0,3–0,5	5,2–6,2 W
ЕХ9К15М2	0,90–1,05	8,0–10,0	13,5–16,5 Co 1,2–1,7 Mo

Если в качестве электротехнических сталей используются безуглеродистые сплавы, то есть сплавы, содержащие ничтожное

количество углерода (не выше 0,04 %), то в качестве магнито-твердых сталей (для постоянных магнитов) используются сплавы с содержанием углерода около 1 %.

4.1.11. Стали специальных способов выплавки

Выплавка стали в обычных плавильных агрегатах (конверторах, мартеновских и электрических печах) в большинстве случаев не позволяет получить металл требуемого качества. Поэтому созданы новые технологические способы, позволяющие повысить качество металла путем снижения вредных примесей, неметаллических включений, удаления газов и выравнивания однородности структуры. Эти дополнительные способы обработки находят дополнительное отражение в написании марки стали:

1. 15ХА-СШ, 12Х2Н4МА-СШ, 35ХМФА-СШ, 35ХН3МА-СШ – стали, прошедшие дополнительную обработку синтетическими шлаками в ковше.

2. ШХ15-Ш, ШХ15СГ-Ш, 95Х18-Ш, 18Х2Н4МА-Ш – стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву.

3. 12Х18Н10Т-ВИ, 03Х18Н12Б-ВИ – стали, выплавляемые в вакуумно-индукционных печах.

4.1.12. Нестандартные легированные стали

Нестандартные стали, выплавленные на заводе «Электросталь», часто маркируют условно. Например, обозначают буквой «Э», рядом ставится буква «И», обозначающая исследовательскую сталь, или буква «П», обозначающая пробную сталь. После букв ставят порядковый номер, например, ЭИ417, ЭИ268, ЭП767 и др. Легированные стали, выпускаемые Златоустовским металлургическим комбинатом, маркируют буквами «ЗИ», например, ЗИ8.

Состав таких сталей можно найти только в специальных марочниках. В большинстве случаев после освоения металлургическими комбинатами выплавки этих сталей условное обозначение заменяют общепринятой маркировкой, которая отражает химический состав и назначение стали.

4.2. Чугуны

Чугуном называется сплав железа с углеродом, в котором содержание углерода превышает 2 %. Углерод в чугуне может находиться в двух состояниях: в химически связанном состоянии в виде цементита Fe_3C и в свободном состоянии в виде графита. В зависимости от состояния углерода чугуны подразделяются на две группы: белые, в которых весь углерод находится в химически связанном состоянии, и графитсодержащие (графитные), в которых основная масса углерода находится в виде графита. Графитные чугуны делятся на серые, высокопрочные и ковкие. Они отличаются друг от друга только формой выделения графита. В серых чугунах графит выделяется в виде пластинок; в высокопрочных — в виде шаров; в ковких — в виде хлопьев. От формы графитных включений зависит уровень механических свойств чугунов.

К настоящему времени в промышленности применяется более 300 марок чугунов. Они отличаются по химическому составу, свойствам, структуре и технологии получения, но обладают одним общим признаком — все они построены на базе известной системы «железо — углерод — кремний». Использование этой системы обусловлено традиционной технологией переработки железной руды в доменных печах, где основной продукт доменного производства — чугун — всегда содержит углерод и кремний, которые являются основными составляющими химического состава.

Серые чугуны маркируют буквами СЧ и двухзначным числом, которое показывает предел прочности при растяжении (табл. 11). Например, марка СЧ20 показывает, что чугун имеет $\sigma_b = 200$ МПа. Серые чугуны имеют самую низкую прочность среди всех графитных чугунов, так как пластинчатая форма графита, по существу, является своеобразной трещиной внутри металла, ослабляющей его механические свойства. Но при этом серый чугун обладает высокими литейными свойствами, хорошо обрабатывается резанием, менее хрупок, чем белый чугун, ему присущи хорошие антифрикционные свойства. Благодаря этим характеристикам и своей относительно низкой себестоимости он нашел широкое применение в машиностроении для производства отливок и поэтому называется литейным.

Таблица 11

Механические свойства серого чугуна (ГОСТ 1412–85)

Марка чугуна	Предел прочности σ_b , МПа	Твердость НВ, МПа
СЧ10	100	1900
СЧ15	150	2100
СЧ18	180	2200
СЧ20	200	2300

Высокопрочные чугуны маркируют буквами ВЧ и двухзначным числом, которое показывает предел прочности при растяжении (табл. 12).

Благодаря высоким механическим свойствам высокопрочный чугун применяют вместо стали или ковкого чугуна для изготовления деталей большого сечения и особо нагруженных изделий, например, коленчатых и распределительных валов, различных кулачковых валиков и др.

Таблица 12

Механические свойства высокопрочного чугуна (ГОСТ 7293–85)

Марка чугуна	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_r , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ, МПа
ВЧ35	350	220	22	1550
ВЧ40	400	250	15	1700
ВЧ45	450	310	10	1800
ВЧ60	600	370	5,0	2350
ВЧ100	1000	700	10,0	3100

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и двумя числами: первое число показывает предел прочности при растяжении, второе – относительное удлинение (табл. 13). Например, марка КЧ 55-4 означает, что чугун имеет предел прочности $\sigma_b = 540\text{--}550$ МПа и относительное удлинение $\delta = 4\%$.

Таблица 13

Механические свойства ковкого чугуна (ГОСТ 1215–79)

Марка чугуна	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ (не более)
Ферритный			
КЧ 30-6	300	6	1630
КЧ 33-8	330	8	1630
КЧ 35-10	350	10	1630
КЧ 37-12	370	12	1630
Феррито-перлитный			
КЧ 45-7	450	7	2070
КЧ 50-5	500	5	2300
КЧ 60-3	600	3	2600
КЧ 70-2	700	2	2850
КЧ 80-1,5	785	1,5	3200

Ковкий чугун применяют при изготовлении тонкостенных деталей небольшого сечения, работающих в условиях ударных и вибрационных нагрузок.

Более высокими свойствами по сравнению с традиционными чугунами обладают так называемые алюминиевые чугуны, созданные на принципиально новой системе «железо – углерод – алюминий». Вермикулярная форма графита в чугуне может обеспечить ему прочность более 600 МПа наряду с высокими технологическими свойствами. Вермикулярный графит имеет форму взаимосвязанных графитовых лепестков, подобно пластинчатому графиту. Однако эти лепестки отличаются меньшей степенью неравноосности, меньшими размерами и округлой формой кромок.

По одним характеристикам чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) близок к серому чугуну, а по другим – к чугуну с шаровидным графитом. Специфическое сочетание физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств достигается в чугуне с вермикулярным графитом только при условии, что содержание

вермикулярного графита в структуре составляет не менее 80–90 % при наличии 20–10 % шаровидного графита.

Чугун с вермикулярным графитом используется во многих областях промышленности, все больше заменяя изделия из литой стали, а также высокопрочного и ковкого серого чугуна.

4.3. Твердые сплавы

Порошковыми твердыми сплавами называют материалы, изготовленные из металлических порошков или их смесей с неметаллическими порошками по технологиям получения керамики. Твердые сплавы делят на металлокерамические и безвольфрамовые. Металлокерамическими называются композиционные материалы, получаемые главным образом спеканием тугоплавких компонентов (карбидов вольфрама, титана, тантала) на кобальтовой связке. Исходные компоненты формуют прессованием в специальных пресс-формах и далее спекают при температурах, обеспечивающих схватывание в монолитное металлокерамическое изделие без полного расплавления композиции. По сравнению с исходными компонентами металлокерамические сплавы обладают лучшими свойствами (высокой твердостью, теплостойкостью и износостойкостью).

Металлокерамические сплавы по ГОСТу 3882–74 делятся на 3 группы: вольфрамокобальтовые (или вольфрамовые), обозначаемые буквами «ВК», титановольфрамокобальтовые (или титановые), обозначаемые буквами «ТК», и титанотанталовольфрамокобальтовые (или титанотанталовые), обозначаемые буквами «ТТК» (табл. 14).

Маркируются металлокерамические сплавы следующим образом: группа ВК – вольфрамокобальтовые сплавы, цифра после буквы указывает содержание в сплаве кобальта. Например, сплав ВК2 содержит 2 % кобальта и 98 % карбидов вольфрама WC. Иногда после цифры справа ставят буквы М, ОМ или В. Буква «М» означает, что сплав имеет мелкозернистую структуру (размер зерен 1,3–1,5 мкм), «ОМ» – особомелкозернистую структуру (размер зерен до 1 мкм), буква «В» – крупнозернистую структуру (размер зерен 3–5 мкм). Нормальный размер зерен твердых сплавов составляет 2–3 мкм.

Группа ТК – титановольфрамокобальтовые сплавы. Цифры после буквы «Т» указывают содержание карбидов титана, цифра после буквы «К» – содержание кобальта, остальное составляют карбиды вольфрама. Например, сплав Т5К10 содержит 5 % титана Ti, 10 % кобальта Co и 85 % карбидов вольфрама WC.

Группа ТТК – титанотанталовольфрамокобальтовые сплавы. Цифра после букв «ТТ» показывает суммарное содержание карбидов титана и тантала, а после буквы «К» – количество кобальта. Например, ТТ7К12 содержит 7 % карбидов титана и тантала (TiC + TaC), 12 % кобальта Co и 8 % карбидов вольфрама WC.

Таблица 14

Химический состав (%) и твердость металлокерамических твердых сплавов (ГОСТ 3882–74)

Сплав	Карбид вольфрама	Карбид титана	Карбид тантала	Кобальт	Твердость <i>HRA</i>
ВК3	97	–	–	3	89,5
ВК3М	97	–	–	3	91,0
ВК6	94	–	–	6	88,5
ВК6М	94	–	–	6	90,0
ВК6В	94	–	–	6	87,5
ВК15	85	–	–	15	86,0
ВК25	75	–	–	25	83,0
Т30К4	66	30	–	4	92,0
Т15К6	79	15	–	6	90,0
Т14К8	78	14	–	8	89,5
Т6К10	85	6	–	9	88,5
ТТ7К12	81	4	3	12	87,0
ТТ10К8	82	3	7	8	89,0

Черновую токарную обработку твердого металла проводят резцами с режущей частью из твердых сплавов Т15К6, Т5К10 и ВК6, ВК8. Чистовую токарную обработку, которая характеризуется высокими скоростями резания и температурами в зоне обработки, проводят резцами с твердым сплавом ВК6М с мелкозернистой

структурой или твердым сплавом ВК60М с особомелкозернистой структурой, которая обеспечивает высокую стойкость инструмента при высоких температурах.

Безвольфрамовые металлокерамические твердые сплавы были созданы вследствие необходимости замены дорогостоящего вольфрама. В них вместо карбидов вольфрама используют карбиды, нитриды, карбонитриды титана, окислы тугоплавких металлов на никелевой и молибденовой связке.

Наибольшее распространение получили твердые сплавы на никель-молибденовой связке с составом твердой фазы карбидов титана TiC или карбидов и нитридов титана $TiC + TiN$, так называемых монитикаров: ТН20, ТНМ25, КТНМ-20А, МНТ-А2, МНТ-А3, МНТ-Б2, и другие имеющие твердость 88–91 НРА.

В ГОСТ 26530 включено только два безвольфрамовых металлокерамических твердых сплава ТН20 и КТН16. Цифра после букв «ТН», обозначающих титано-никелевую группу сплавов, показывает суммарное содержание никеля (15 %) и молибдена (5 %), остальное — карбиды титана TiC . Стандарт предусматривает использование сплава ТН20 для чистового и получистового точения при непрерывном резании углеродистых низколегированных конструкционных сталей.

Металлокерамические сплавы могут использоваться как антифрикционные подшипниковые и как фрикционные тормозные материалы. Металлокерамические вкладыши в узлах трения применяют в условиях, когда невозможно обеспечить обильную смазку. Металлокерамические фрикционные материалы, наносимые на стальные диски или колодки, существенным образом повышают эффективность тормозной системы различных машин.

Большое количество металлокерамического твердого сплава выпускают в виде многогранных неперетачиваемых пластинок различной формы, которыми оснащают режущие инструменты. Необходимые геометрические параметры режущей части пластинок получают в процессе прессования и в дальнейшем не подвергаются механической обработке. Это способствует экономии твердых сплавов, так как их переточка в большинстве случаев вызывает микротрещины и приводит к преждевременному выходу из строя

инструмента. С целью повышения эксплуатационных свойств твердосплавных пластин на них дополнительно наносят однослойные и многослойные (до 4 слоев) покрытия толщиной от 2 до 12 мкм. Наиболее широко применяются покрытия на основе карбидов титана TiC, нитридов титана TiN, карбонитридов титана TiCN и оксидов алюминия Al₂O₃.

4.4. Режущая керамика

Высокая стоимость компонентов металлокерамических твердых сплавов предопределила создание материалов с режущими свойствами не хуже, чем у них, но значительно дешевле. По сравнению с твердыми сплавами режущая керамика (минералокерамика) имеет большую твердость (до 95 HRA), повышенную теплостойкость (до 1500 °С) и пониженную склонность к схватыванию с обрабатываемыми материалами. Они могут работать в условиях высоких скоростей резания (до 600 м/мин) при тонком, чистовом и получистовом точении. Однако режущую керамику вследствие ее низкой ударной вязкости нельзя применять при прерывистом точении и в условиях циклического изменения тепловой нагрузки.

Оксидную керамику создают на основе оксидов алюминия Al₂O₃ с добавлением до 0,6 % оксида магния MgO или оксида хрома Cr₂O₃. Оксидная керамика ВО-13, ВО-100 (ЦМ-332), ВШ-75 с мелкозернистой структурой (размер зерна составляет 0,5 мкм) обладает высокой прочностью ($\sigma_b = 550$ МПа, HRC > 92) и износостойкостью.

Оксидно-карбидная керамика по своим качествам занимает промежуточное место между оксидной керамикой и твердыми сплавами. Изготавливают оксидно-карбидную керамику из смеси оксидной керамики и 20–40 % карбидов вольфрама WC, молибдена Mo₂C или системы карбидов молибдена и титана Mo₂C + TiC. Оксидно-карбидная керамика В-3, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71, ВОК-95 имеет высокие прочность ($\sigma_b = 860$ МПа), твердость (HRA = 93–95) и теплостойкость (до 1400 °С).

Нитридная керамика, по другому силинит-Р, изготавливается на основе нитридов кремния SiN₄ с добавлением оксидов алюминия Al₂O₃ и нитридов титана TiN. Она характеризуется невысокой

стоимостью, высокой стабильностью свойств и стойкостью при больших температурах. Ее прочность составляет $\sigma_B = 700$ МПа, твердость равна 94–96 HRA.

4.5. Сверхтвердые инструментальные материалы

Сверхтвердые инструментальные материалы получают при больших давлениях и высоких температурах, главным образом на основе алмаза и нитрида бора. Синтетические алмазы и нитриды бора обладают очень высокими эксплуатационными свойствами и по способу получения делятся на 2 группы:

- порошкообразные материалы, предназначенные для изготовления абразивного инструмента;
- поликристаллические материалы, предназначенные для изготовления лезвийного инструмента.

Поликристаллические материалы, или поликристаллы, на основе алмаза могут производиться двумя способами. В первом способе поликристаллы получают в результате фазового перехода графита в алмаз. Такие синтетические алмазы – карбонадо АСПК и баллас АСБ – получают при давлении 105 МПа и температуре около 2500 °С. Их используют в качестве режущего элемента резцов для твёрдого точения. Алмазный режущий инструмент, имеющий коэффициент линейного расширения в 8 раз меньше, чем у инструмента из других материалов, позволяет проводить более точную и производительную обработку изделий. Однако при нагреве алмаза свыше 700 °С его стойкость резко падает из-за возникающей графитизации.

Во втором способе поликристаллы получают путем спекания алмазных зерен. Их тоже применяют для режущего инструмента. Они обладают высокими микротвердостью (70–100 МПа) и прочностью на сжатие (4500–5000 МПа).

Сверхтвердые материалы также получают спеканием исходных компонентов при больших давлениях и температурах. Они получили название эльбор. Название «эльбор» происходит от буквы «л», которая обозначает город Ленинград, где, собственно, и был разработан этот материал, и от слова «бор», которое обозначает абразивный материал. Этот материал изготовлен на основе кубическо-

го нитрида бора на керамической связке. Его получают спеканием 56 % нитрида бора и 43 % азота в специальных камерах под давлением до 100 МПа и при температуре 1000 °С. По твердости эльбор близок к алмазу (до 100 HRA), но выдерживает более высокие температуры. К тому же он, в отличие от алмаза, не имеет химического сродства с черными металлами.

На базе эльбора выпускают сверхтвердые синтетические материалы. Сверхтвердые материалы производят в виде поликристаллов диаметром 4–8 мм и высотой 3,5 мм. Наиболее распространенными марками сверхтвердых материалов являются эльбор-Р, гексанит-Р, белбор, исмит-1 и исмит-2. Эти материалы по прочности в 1,5–2 раза превосходят эльбор. Ещё более высокую прочность имеет синтетический материал фуллерит, созданный на основе молекул фуллерена. Из них изготавливают различного назначения токарные резцы и торцевые фрезы.

Инструменты, оснащенные эльбором-Р и гексанитом-Р, повышают точность размеров и качество обработанной поверхности изделия. Они обладают высокой стойкостью при больших скоростях резания и способны обрабатывать материалы высокой твердости (до 65 HRC). Причем гексанит-Р, в отличие от других материалов, способен выдерживать ударную нагрузку.

4.6. Медь и сплавы на основе меди

Чистая медь по своим свойствам близка к благородным металлам – серебру и золоту, которые не окисляются на воздухе. Медь окисляется слабо и поэтому считается полублагородным металлом. Медь и её сплавы широко применяют в ювелирном деле, в частности при отливке скульптур. Но особенно ценными являются её технические свойства – электропроводность и теплопроводность. Высокая электропроводность обуславливает её преимущественное применение в электротехнике в качестве полупроводникового металла. Но примеси и наклеп снижают электропроводность меди. В этой связи для изготовления проводов во многих случаях применяют отожженную медь. Однако для изготовления подвесных проводов, где требуется повышенная прочность, применяют нагартованную

медь или медь с волокнистыми и слоистыми наполнителями. Высокие теплопроводные свойства меди используются при изготовлении нагревательных индукторов, кристаллизаторов и др.

В зависимости от химического состава, в соответствии с ГОСТ 859–78 (2001), техническая медь маркируется прописной русской буквой «М» (табл. 15). После этой буквы ставятся другие буквы или цифры, которые показывают степень очистки.

Таблица 15

Степень чистоты и обозначение меди

Марка	Содержание меди, %	Содержание примесей, %
МВЧк	99,993	0,007
М00к, М00б	99,99	0,01
М0к, М0б	99,95	0,05
М1, М1к, М1р	99,90	0,10
М2, М2р	99,70	0,30
М3, М3р	99,50	0,50

Так, прописные буквы «ВЧ» обозначают высокую чистоту меди. Поскольку степень очистки зависит от способа, то в конце марки иногда ставятся буквы, которые обозначают способ ее рафинирования: «к» – катодная, «б» – бескислородная, «р» – раскисленная. Например, марка МВЧк означает: медь техническая, высокой степени очистки, с содержанием меди 99,993 %, рафинированная электрохимическим способом, т. е. катодная.

Положительным качеством меди также является её способность сплавляться со многими химическими элементами, приобретая благоприятные свойства. Медь может содержать в своем составе до 12 химических элементов. Поэтому медь является основой для многих сплавов. Наиболее распространенными и известными сплавами меди являются латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы (мельхиор, монель, нейзильбер, константан и др.).

4.6.1. Латунь

Латунями называется группа сплавов меди с цинком. Латунь широко применяется в приборостроении, в химическом машиностроении. Латунь обозначается буквой «Л» и цифрами после буквы, которые указывают средний процент меди в сплаве. Нормировано 8 марок простых латуней: Л96, Л90, Л85, Л80, Л70, Л68, Л63 и Л60. Латунь более сложного состава, имеющие несколько компонентов, в обозначении после буквы «Л» имеют другую букву, а цифры, размещенные после буквы, указывают процент добавки в последовательности написания этих цифр. Например, ЛС-59-1 означает: свинцовая латунь, содержащая от 57 до 60 % меди и от 0,8 до 1,9 свинца; ЛМцА-57-3-1 – латунь марганцевоалюминиевая, содержащая 57 % меди, 3 % марганца и 1 % алюминия. Эти латуни называются сложными или специальными (табл. 16).

Таблица 16

Химический состав (%) и назначение специальных латуней
ГОСТ 15527–70 (2004)

Латунь	Марка латуни	Cu	Другие легирующие элементы	Zn	Примерное назначение
Алюминиевая	ЛА77-2	76–79	1,75–2,5 Al	Остальное	Трубы конденсаторные
Никелевая	ЛН65-5	64–67	5–6,5 Ni		Трубы манометрические, проволока, листы
Марганцовистая	ЛМц58-2	57–60	1–2 Mn		Полосы, прутки, проволока, листы
Оловянистая	ЛО70-1	69–71	1–1,5 Sn		Трубы
Кремнистая	ЛК80-3	78–81	3–4,5 Si		Поковки и штамповки
Алюминиево-железисто-марганцовистая	ЛАЖМц66-6-3-2	64–68	1,5–2,5 Mn 5–7 Al 2–4 Fe		Гайки, червячные винты
Кремнисто-свинцовистая	ЛКС80-3-3	79–81	2,5–4,5 Si 2–4 Pb		Подшипники, втулки

Все добавляемые в латуни вещества обозначаются начальными прописными буквами от названия химического элемента: О – олово, С – свинец, А – алюминий, Ж – железо, Н – никель, К – кремний, Мц – марганец, Мш – мышьяк, Ц – цинк.

Латуни подразделяются на деформируемые и литейные. Если сплав предназначен для получения отливок, то в конце ставится буква «Л». Например, ЛАЖ 60-1-1Л, ЛК 80-3Л, ЛС 59-1Л.

4.6.2. Бронзы

Классическим примером бронзы является сплав меди с оловом. Но вследствие того, что олово является дефицитным элементом, нашли широкое распространение сплавы меди с алюминием, кремнием, марганцем, бериллием и др. Это обстоятельство позволяет получить сплавы с особыми свойствами. Бронза маркируется русскими буквами «Бр», после которых ставятся буквы, обозначающие добавки, а затем цифры, указывающие среднее содержание добавок (табл. 17). Цифры, обозначающие процентное содержание меди в бронзах, в марке не пишутся. Например, БрОЦ4-3 обозначает, что в бронзе в среднем 4 % олова, 3 % цинка, остальное – медь.

Таблица 17

Химический состав, механические свойства и назначение некоторых марок бронз ГОСТ 5017–74, ГОСТ 18175–78

Марка	Химический состав	$\sigma_{в}$, МПа	δ , %	Твердость, НВ	Назначение
БрОФ 6,5-0,15	6–7 Sn 0,1–0,25 P	350–450	60–70	700–900	Ленты, полосы, прутки, проволока для пружин, подшипниковые детали
БрОЦ 4-3	8,5–4,0 Sn 2,7–3,3 Zn	350	40	600–1600	Ленты, полосы, прутки, проволока для пружин и аппаратуры
БрОЦСНЗ 7-5-1	2,5–4,0 Sn 6,0–9,5 Zn 3,0–6,0 Pb 0,5–2,0 Ni	180–210	8–5	600–1100	Аппаратура, работающая в морской и пресной воде, маслах и других слабокоррозионных средах, а также в парах под давлением, антифрикционные детали

Марка	Химический состав	σ_v , МПа	δ , %	Твердость, НВ	Назначение
БрОЦС 5-5-6	4,0–6,0 Sn 4,0–6,0 Zn 4,0–6,0 Pb	150–180	6–4	600	Антифрикционные детали
Бр А7	6–8 Al	580–800	5–10	1800–2300	Ленты, полосы
БрАМц 9-2Л	8–10 Al 1,5–2,5 Mn	400	20	800	Фасонное литье
БрАЖ9-1Л	8–10 Al 2–4 Fe	400	10	1000	Поковки и фасонное литье
БрБ 2	1,9–2,2 Be	1300	1	370	Ленты, полосы, прутки, проволока

Фосфор и бериллий встречаются только в составе бронз. Фосфор вводится в состав оловянистых бронз как раскислитель, устраняющий хрупкие включения окиси олова (SnO), бериллий в количестве 2 % создает оригинальную упрочняемую бронзу БрБ2.

Бронзы по способу получения или обработки подразделяются на деформируемые и литейные. Литейные бронзы маркируются буквой «Л» в конце обозначения, например, БрАЖН10-4-4Л.

4.6.3. Медно-никелевые сплавы

Медно-никелевые сплавы характеризуются большим удельным электрическим сопротивлением, высокой коррозионной стойкостью, а некоторые – высокими механическими свойствами и жаростойкостью. Они применяются в промышленности для изготовления термпар и нагревательных элементов, реостатов и измерительных приборов, а также для изготовления деталей ответственного назначения в химическом машиностроении. Медно-никелевые сплавы маркируются следующим образом. Первая буква «Н» указывает на принадлежность сплава к медно-никелевым сплавам. Последующие буквы обозначают содержащиеся в сплаве элементы: М – медь, Мц – марганец, Ц – цинк, Ж – железо. Содержание этих элементов в процентах указывают следующие за буквой цифры. Например, сплав НММц 85-12 содержит около 85 % меди, 12 % марганца,

остальное никель. Сплав монель НМЖМц 28-2,5-1,5 содержит около 28 % меди, 2,5 % железа, 1,5 % марганца, остальное никель.

4.7. Алюминий и сплавы на основе алюминия

Алюминий относится к легким металлам, он почти в 3 раза легче железа. Низкая плотность, невысокая стоимость, большой объем производства (второе место после железа) обусловили его широкое применение в авиационной промышленности. Алюминий также используют для производства фольги, порошка, пудры и кабельных изделий, посуды для варки пищи, а также для изготовления химической аппаратуры. Высокая электропроводность (65 % от меди) позволяет использовать для проводников электрического тока, электротехнических конденсаторов и др.

Алюминий — химически активный металл, но тугоплавкая пленка окиси на поверхностях изделий защищает металл от коррозии. Высокая пластичность позволяет изготавливать из алюминия различной формы профили.

Алюминиевые сплавы имеют буквенно-цифровую систему обозначения. Буквы обозначают соответствующую группу, а цифры указывают номер сплава или содержание основного легирующего элемента (в %).

По степени чистоты алюминий подразделяют на три группы: особой, высокой и технической чистоты (табл. 18).

Применять чистый алюминий в качестве конструкционного материала в промышленности нецелесообразно из-за низкой прочности, которая в среднем составляет $\sigma_b = 60$ МПа. Существенно повысить прочностные свойства можно путем сплавления алюминия с кремнием, магнием, марганцем, медью, цинком, причем два последних элемента позволяют повысить прочностные свойства алюминиевых сплавов до $\sigma_b = 700$ МПа.

Технические алюминиевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные (табл. 19). Сочетание букв АМг или АМц означает сплавы алюминия с магнием и марганцем, относящиеся к деформируемым неупрочняемым термической обработкой сплавам. У сплавов системы Al — Mg цифра после букв указывает среднее содержание

магния в процентах. Так, сплавы АМг 3, АМг 5 и АМг 6 содержат соответственно 3, 5 и 6 % магния Mg, остальное – алюминий.

Таблица 18

Химический состав алюминия (ГОСТ 11069–74)

Чистота	Марка алюминия	Химический состав, %	
		Al, не менее	Примеси Fe, Si, Cu, Zn, Ti
Особая	A999	99,999	0,001
Высокая	A995	99,995	0,005
	A99	99,99	0,010
	A97	99,97	0,03
	A95	99,95	0,05
	Техническая	A85	99,85
	A8	99,80	0,20
	A7	99,70	0,30
	A6	99,60	0,40
	A5	99,50	0,50
	A0	99,00	1,00

Таблица 19

Химический состав и основное назначение некоторых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784–74 (97))

Марка сплава	Медь	Магний	Кремний	Марганец	Основное назначение сплава
АМц	–	–	–	1,06–1,6	Листы, ленты
АМг3	–	3,2–3,8	0,5–0,8	0,3–0,6	Уголки и другие прокатные профили
Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	не более 0,7	0,4–0,8	
Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	0,5	0,3–0,9	
АК6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,7–1,2	0,4–0,8	Сплавы для поковок и штамповок
АК8	3,0–4,8	0,4–0,8	0,6–1,2	0,4–1,0	
АЛ 2	–	–	10,0–13,0	–	Литейные сплавы
АЛ 5	1,0–1,5	0,35–0,6	4,5–5,5	–	
В 95	2,0–2,6	2,3–3,0	–	0,3–0,5	Сплав для заклепок

Сплавы деформируемые, то есть упрочняемые термической обработкой, обозначаются русскими буквами «Д», что означает дюралюминий, или «В», что означает высокопрочный.

В марках высокопрочных алюминиевых сплавов, которые содержат цинк и магний, за буквой «В» ставится первая цифра 9, вторая цифра указывает номер сплава. Например, сплав В95 является высокопрочным алюминиевым сплавом с порядковым номером 5.

Деформируемые алюминиевые сплавы, содержащие медь и магний, маркируются буквой «Д» и цифрой, которая показывает номер сплава. Например, сплав Д1 является дюралюминием с порядковым номером 1.

Маркировка «АК» означает группу алюминиевых ковочных сплавов. Они обладают наряду с высокой прочностью хорошей пластичностью в горячем состоянии. Это позволяет их использовать для получения заготовок ковкой или штамповкой. У алюминиевого ковочного сплава цифра, стоящая после букв, показывает номер сплава. Например, сплав АК4 является ковочным алюминиевым сплавом с порядковым номером 4. После цифры может ставиться буква «М», которая указывает, что сплав был модифицирован с целью улучшения структурного состояния. Вид термической обработки указывается цифрой от 1 до 8 после буквы «М». Например, АК4М4, АК6М7, АК8М3, АК7М2.

Для фасонного литья разработаны 3 вида литейных алюминиевых сплавов. Литейные алюминиевые сплавы обозначают сочетанием букв «АЛ» и цифрой, показывающей условный номер сплава. Например, АЛ2, АЛ4, АЛ5, АЛ6, АЛ7, АЛ8, АЛ11, АЛ12.

Самыми распространенными алюминиевыми сплавами являются силумины – сплавы алюминия с кремнием. Нормальный силумин содержит 10–13 % кремния, другие силумины содержат пониженное (8–10 %) и низкое (4–6 %) количество кремния. Вторая группа литейных сплавов по составу близка к дюралам и содержит систему Cu – Mg – Mn. Последние сплавы называются магналиями, так как содержат 9,5–11,5 % магния.

4.8. Магний и сплавы на основе магния

Магниевые сплавы обладают наименьшей плотностью ($1,7 \text{ г/см}^3$), что определило их использование в авиационной промышленности.

Магний первичный (ГОСТ 804–72) выпускается трех марок в зависимости от степени очистки: Мг96 (содержит 99,96 % магния), Мг95 (содержит 99,95 % магния) и Мг90 (содержит 99,90 % магния).

Магниевые сплавы делятся на две группы: деформируемые сплавы, поступающие в виде листов, полос, профилей, прутков и проволок, и литейные сплавы, предназначенные для изготовления деталей методом фасонного литья. Деформируемые магниевые сплавы обозначаются сочетанием букв «МА», литейные магниевые сплавы – «МЛ». Стоящая после букв цифра указывает порядковый номер сплава (табл. 20).

Таблица 20

Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

Марка	Химический состав в %				Механические свойства		
	Al	Zn	Mn	Другие элементы	$\sigma_{в'}$, МПа	$\sigma_{02'}$, МПа	δ , %
Сплавы невысокой прочности							
МА1	–	–	1,3–2,5	До 0,02 Ве	210	120	8
Сплавы средней прочности							
МА8	–	–	1,3–3,2	0,45–0,35	260	150	7
МА9	0,4–0,8	–	1,0–1,8	0,08–0,3 Са	270	240	10
Высокопрочные сплавы							
МА2	3,8–5,0	0,8–1,5	0,4–0,8	–	260	180	12
МА5	7,8–9,2	0,2–0,8	0,15–0,5	–	320	220	14
Жаропрочные сплавы							
МА11	–	–	1,5–2,5	2,5–4,0	28	14	10
Литейные сплавы							
МЛ3	2,5–3,5	0,5–1,5	0,15–0,5	–	18	5,5	8
МЛ5	7,5–9	0,2–0,8	0,45–0,5	–	24	12	3
МЛ10	–	0,1–0,7	–	2,2–2,8	24	12	5

Группа магниево-литиевых деформируемых сплавов имеет плотность (1,4–1,65 г/см³) и относится к сверхлегким сплавам. Таких сплавов 3, они содержат от 5 до 18 % лития: ИМВ1, ИМВ2, ИМВ3.

4.9. Титан и сплавы на основе титана

Титан является весьма тугоплавким металлом. Его температура плавления почти в три раза выше, чем у алюминия и магния и на 200 °С выше, чем у железа. Он обладает высокой прочностью, пластичностью и низкой плотностью (почти в 2 раза ниже, чем у железа). По коррозионной стойкости титан превосходит нержавеющую сталь. Поэтому титан широко используется в авиационной, ракетной и космической технике. Из титана изготавливают обшивку фюзеляжа и крыльев сверхзвуковых самолетов, лопатки и диски компрессоров и многое другое.

Монолитный титан и его сплавы подразделяются на деформируемые и литейные. Согласно ГОСТ 19807–74 (91), титан изготавливают следующих марок: ВТ1-00 (99,53 % Ti), ВТ1-0 (99,48 % Ti). Прочность чистого титана находится в пределах 300–380 МПа при высокой пластичности $\delta = 20\text{--}30\%$.

В соответствии с технологией изготовления, титан поставляется в виде губчатого титана, иначе – титановой губки. Маркируется губчатый титан буквами «ТГ» и цифрой, обозначающей твердость по Бринеллю. Например, губчатый титан ТГ-90 имеет твердость по Бринеллю 900 МПа. Чем выше твердость, тем больше у титана примесей.

Титановые сплавы имеют 14 марок, которые обозначаются буквами «ВТ», «ОТ» или «ПТ» и цифрой, которая обозначает порядковый номер (табл. 21). Буквы «В», «О» и «П» указывают на организацию – разработчика этих сплавов. Например, сплав ВТ5 имеет порядковый номер 5. Если после порядкового номера стоит буква «С» или через тире цифра 0 или 1, то это указывает на модификацию сплава. Состав титановых сплавов достаточно сложен. Он содержит до 10 легирующих элементов. Но основными легирующими элементами являются алюминий, молибден и ванадий. В меньших количествах в сплавы вводятся хром, цирконий и марганец.

Химический состав и механические свойства некоторых
титановых сплавов

Марка	Нормальный химический состав в %	Механические свойства		Вид полуфабриката
		σ_b , МПа	δ , %	
BT5	5 Al	790–950	10	Литье
BT5-1	5 Al, 2,5 Sn	750–950	10	Листы
OT4	4 Al, 1,5 Mn	700–900	12	Листы
BT3-1	5,5 Al, 2 Cr, 2 Mo, 1 Fe, 0,25 Si	1000–1200		Поковки
BT6	8 Al, 4 V	950–1100	8	Поковки
PT-7M	2,0 Al, 2,5 Zr	1050–1250	9	Поковки

Литейные титановые сплавы применяются для производства отливок. Маркируются литейные титановые сплавы буквами «BT» и цифрой, обозначающей порядковый номер, после которой ставится буква «Л». Разработано 8 марок литейных титановых сплавов: BT1Л, BT5Л, BT6Л, BT14Л, BT20Л, BT3-1Л, BT9Л, BT21Л.

4.10. Баббиты

Баббитами называются антифрикционные сплавы на основе олова или свинца. Баббиты обозначают буквой «Б», справа от которой ставится цифра, показывающая процент олова, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав (табл. 22). Например, Б83, Б16, Б6 означают, что в эти баббиты входит 83, 16 и 6 % олова соответственно. БН означает, что сплав содержит никель, БТ – теллур и т. д. Обозначение баббитов носит условный характер, не показывает полностью состав сплава.

Химический состав и применение баббитов

Марка	Sb	Cu	Cd	Pb	Sn	Другие элементы	Назначение
Б83	10–12	5,5–6,5	–	–	Остальное	–	Для заливки подшипников особо нагруженных машин
Б89	7,25–8,25	2,5–3,5	–	–		–	
БН	13–15	1,5–2,0	1,25–1,75	Остальное	9–11	0,75–1,25	Для заливки подшипников машин средней нагруженности
БТ	14–16	0,7–1,1	–		9–11	0,05–0,20	Для подшипников автомобильных двигателей
Б16	15–17	1,5–2,0	–		15–17	–	Для заливки подшипников машин средней нагруженности
Б6	14–16	2,5–3,0	1,75–2,25		5–6	0,6–1,0	Для подшипников машин, мало нагруженных

4.11. Керамические материалы

Керамические материалы, или керамика, обладают высокой прочностью, износостойкостью, высокой огнеупорностью и другими специальными свойствами. Изделия высокой огнеупорности изготавливаются из чистых окислов. Они выдерживают длительный нагрев выше температуры 1800 °С.

Наибольшее распространение получила окись алюминия. Керамические изделия из окиси алюминия используют в производстве пирометрической аппаратуры, вакуумного оборудования и высокотемпературных печей.

Производят следующие керамические материалы: высокочастотная керамика, конденсаторная керамика, вакуумная керамика, пьезоэлектрическая керамика, ферромагнитная керамика.

Высокочастотную керамику изготавливают из высокоглиноземистого и магнезильного материалов, которые обладают высокими

диэлектрическими характеристиками. Высокочастотная глиноземистая керамика применяется в радиотехнике для изготовления ответственных установочных изделий.

Конденсаторная керамика имеет хорошую диэлектрическую проницаемость. Такую керамику изготавливают из двуокиси титана и небольшого количества двуокиси циркония. Она используется в производстве конденсаторов высокого и низкого напряжения.

Вакуумная керамика обладает низкими диэлектрическими потерями и высокими термомеханическими характеристиками. Она используется в производстве вакуумного оборудования.

Пьезоэлектрическая керамика характеризуется высокой диэлектрической проницаемостью. Она обладает пьезоэлектрическим эффектом. Сущность этого эффекта заключается в преобразовании электрической энергии в механическую энергию и наоборот. При сжатии такой керамики на поверхности тела возникает разность потенциалов, которая подлежит измерению. Это явление используют в различных датчиках. Пьезоэлектрическая керамика применяется в электронике и радиотехнике для изготовления различных модуляторов и усилителей.

Ферромагнитная керамика изготавливается из окиси железа и одновалентных металлов. Она имеет хорошую магнитную проницаемость и высокие диэлектрические характеристики. Ферромагнитная керамика используется в производстве контурных катушек, магнитных экранов и других разнообразных изделий.

4.12. Композиционные материалы

Мы уже говорили о сложно составленных материалах – композитах. Их высокий потенциал развития во многих отраслях промышленности обусловлен постоянно возрастающими требованиями снижения массы изделий при одновременном повышении их прочности и жесткости. Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Большинство современных конструкционных материалов представляют собой композиции, например, железобетонные конструкции и пластмассы.

Композиционными, или композитами, называют материалы, искусственно полученные путем соединения двух и более различных компонентов, отличающихся по своим свойствам. Каждый из компонентов имеет свое конкретное функциональное назначение применительно к готовому изделию. Один компонент, который обладает непрерывностью по всему объему, является матрицей. Второй компонент, разделенный в объеме композиции, является арматурой или наполнителем. Матричными материалами могут быть и сплавы металлов, полимеры и керамика. Армирующими компонентами чаще всего являются порошкообразные частицы, нитеобразные или волокнистые материалы. Обычно в качестве наполнителя применяют более прочное вещество, а в качестве матрицы – более пластичный и вязкий материал.

Наполнитель должен быть равномерно распределен в объеме матрицы. Матрица связывает отдельные элементы наполнителя в единое монолитное изделие с сохранением индивидуальности каждого отдельного компонента.

Механическая нагрузка, приложенная к композиционному материалу, воспринимается матрицей и через нее равномерно передается на все элементы наполнителя. Механические характеристики композиционного материала как правило значительно выше, чем характеристики исходных компонентов. Именно этим композиционные материалы отличаются от наполненных систем, в которых роль наполнителя сводится к удешевлению цены конечного продукта. Но при этом введение наполнителя в материал может приводить к ухудшению его механических характеристик.

Композиционные материалы различают по типу матрицы или по типу наполнителя.

По типу матриц композиционные материалы можно классифицировать. Выделяют материалы с полимерной, углеродной и металлической матрицами.

Композиты с полимерной матрицей в качестве матрицы используют терморезистивные и термопластичные материалы. У терморезистивных материалов их первоначальные свойства после затвердевания вновь не восстанавливаются, а у термопластичных материалов – восстанавливаются. Достоинствами композиционных мате-

риалов с полимерной матрицей являются высокие прочностные и упругие свойства, высокая стойкость к агрессивным средам, низкая теплопроводность и электропроводность.

К недостаткам композитов с полимерной матрицей относятся их низкие прочность и жесткость при сжатии и сдвиге, низкая тепловая и радиационная стойкость и гигроскопичность. Кроме того, они подвержены изменению физико-механических характеристик при старении и под действием климатических условий эксплуатации.

Существенно повысить уровень эксплуатационных свойств изделий позволяют углерод-углеродные композиционные материалы. Они представляют систему «углеродное волокно – углеродная матрица». Такая композиция позволяет наиболее полно реализовать в изделии универсальные свойства углеродного волокна.

Достоинствами углерод-углеродных материалов являются высокая теплостойкость и стойкость к термическому удару, низкие значения температурного коэффициента расширения, теплопроводности и высокая стойкость к агрессивной среде. Все это делает их незаменимыми в химическом машиностроении и атомной энергетике.

В композиционных материалах с металлической матрицей сочетаются достоинства конструкционных металлов с достоинствами наполнителей. В качестве матрицы чаще всего используются алюминий, титан и их сплавы. Их достоинствами являются высокие прочностные, пластические и упругие свойства. Эти материалы сохраняют стабильность своих свойств в более широких температурных интервалах, чем композиционные материалы с полимерными матрицами.

На свойства композиционных материалов большое влияние оказывают процентное содержание наполнителя, его размеры и форма, а также схема армирования.

Наполнитель композиционного материала по своей геометрии может быть нульмерным (порошок), одномерным (нить), двумерным (полотно).

В зависимости от вида наполнителя композиционные материалы могут быть разделены на две основные группы: дисперсно-упрочнённые и волокнистые.

Дисперсно-упрочнённые композиционные материалы представляют собой композиции матричного вещества, в котором

равномерно распределены мелкодисперсные частицы второго вещества. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица.

У волокнистых композитов пластичная матрица армирована высокопрочными волокнами, проволокой, нитевидными кристаллами. Идея создания волокнисто-армированных структур состоит не в том, чтобы исключить пластическое деформирование матричного материала, а в том, чтобы при его деформировании обеспечивалось полное нагружение высокопрочных волокон. Работоспособность волокнистой композиционной структуры зависит от равномерного распределения высокопрочных, высокомодульных волокон в пластичной матрице.

Процентное содержание наполнителя в композитах может изменяться в достаточно широком интервале: от 1 % до нескольких десятков процентов. В одном композите может содержаться несколько типов наполнителей. Такие композиты называются гибридными. В некоторых композиционных материалах с увеличением содержания наполнителя до более 50 % прочность снижается. Это объясняется снижением способности матрицы равномерно распределять механическую нагрузку между волокнами.

В зависимости от схемы армирования различают композиционные материалы с одноосным, двусосным и объемным армированием (рис. 49).

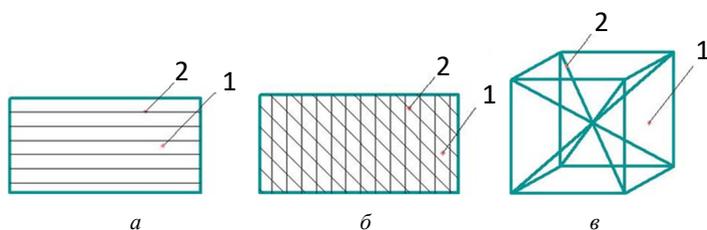


Рис. 49. Схемы армирования композиционных материалов:
a – одноосное; *б* – двусосное; *в* – объемное;
1 – матрица; *2* – наполнитель

Вследствие значительного различия в свойствах волокон и матрицы в композиционных материалах с одноосным армированием имеет место высокая анизотропия механических свойств. Ани-

зотропия значительно уменьшается при двухосном армировании с взаимно перпендикулярным расположением волокон. Однако при этом прочность композита снижается примерно вдвое по сравнению с одноосным армированием. Кроме того, недостатком многослойных композиционных материалов является низкая прочность между слоями.

Значительное влияние на свойства композиционных материалов оказывает прочность связи матрицы и наполнителя. Для композитов с полимерной матрицей характерна адгезионная связь компонентов. Прочность материала зависит от площади контактной поверхности на границе раздела наполнителя и матрицы. Чем больше площадь контактной поверхности, тем прочнее сам материал.

Помимо высоких механических характеристик, композиционные материалы обладают еще рядом полезных возможностей:

- возможностью сочетания в материале веществ, плохо сочетаемых в обычных сплавах;
- возможностью локального упрочнения наиболее нагруженных участков изделий за счет изменения объема и типа наполнения;
- возможностью повышения работоспособности конструкции за счет расположения элементов наполнителя по отношению к направлению действующих нагрузок;
- возможностью обеспечения высокой коррозионной и химической стойкости материалов, что снижает затраты на защиту конструкции от коррозионного разрушения.

Для изготовления армирующих волокон, которые применяются в качестве наполнителя в композиционных материалах с полимерной матрицей, используются различные методы.

Одним из самых распространенных методов является механический метод. Его сущность заключается в вытягивании тонкой проволоки, разрезании на полоски фольги и вытягивание нити из расплавленной капли.

Вторым по популярности является химический метод. Его сущность заключается в выращивании нитевидных кристаллов, таких как окислы алюминия, нитраты и карбиды кремния, волокна бора и углерода.

Из большого количества композиционных материалов можно особо выделить две группы: армированные пластики и дисперсно-армированные пластмассы.

Из первой группы материалов широкое распространение при изготовлении кузовных деталей нашли стеклопластики.

Стеклопластики — это композиционные материалы, состоящие из связующей смолы и стекловолокнистого наполнителя. Также в их состав входят следующие компоненты: отвердители, ускорители отверждения, красители, стабилизаторы и пластификаторы.

Стабилизаторы применяют для замедления старения, а пластификаторы — для уменьшения хрупкости материала.

Из стеклопластиков особо следует выделить препреги. Препреги представляют собой рулонные или листовые полуфабрикаты, предварительно пропитанные смолой и защищенные с обеих сторон пленкой (рис. 50). Их используют в качестве элементов сборных многослойных заготовок, которые затем подвергаются процессам формообразования, раскроя, сварки, механической обработки.

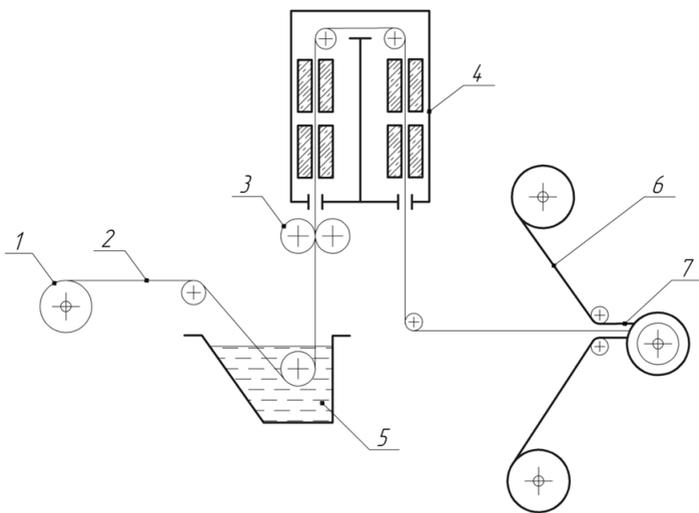


Рис. 50. Схема установки для изготовления препрега:
1 — бухта; 2 — ткань; 3 — валки; 4 — сушка; 5 — пропитка;
6 — пленка; 7 — препрег

Широкое применение в автомобильной промышленности также нашли пластмассы. Пластмассами называют дисперсно-армированные полимерные композиции, наполнителями в которых являются материалы в виде порошков.

Технология получения композиционных материалов достаточно сложна и требует специальных вакуумных установок. Она выглядит следующим образом:

1. Получение нитей. Для этого смолу растворяют в серной кислоте. Удаляют из неё примеси и пузырьки воздуха. Затем, пропуская через фильеру смолу, получают нити. Далее полученные нити подвергают термической обработке.
2. Получение из нитей тканей различного переплетения.
3. Изготовление препрегов. Для этого ткани пропитывают наполнителями и связующими.
4. Изготовление заготовок. Препрег раскраивают и помещают в технологическую оснастку – стапели.
5. Изготовление деталей. Стапели с заготовками помещают в вакуумную установку, где в течение определенного времени выдерживают при заданных значениях температуры и давления.

В настоящее время безусловным трендом в развитии новых материалов являются нанотехнологии.

4.13. Наноструктурные материалы

В настоящее время со стороны науки и промышленности наблюдается постоянно возрастающий интерес к наноструктурным материалам. Эти материалы содержат в своем составе такие структурные элементы, как наночастицы, нановолокна, нанотрубки и др. Структурные элементы с геометрическими размерами менее 100 нм образуют материалы, которые обладают качественно новыми свойствами. Новые свойства материалов позволяют придать изделиям более высокие функциональные и эксплуатационные характеристики. Имеющийся у промышленности интерес к наноматериалам обусловлен стремлением получить преимущественные возможности для развития бизнеса и повышения его конкурентоспособности.

Принципиально новые свойства наноматериалов, кардинально отличающиеся от свойств микроструктурных материалов, возникают при снижении размеров зерен вещества менее 100 нм, при так называемом размерном эффекте. Значительное повышение магнитных свойств происходит при уменьшении размера зерна до величины однодоменного кристалла, повышение механической прочности происходит при уменьшении размера зерна до величины бездефектного кристалла, повышение электрической проводимости — до длины свободного пробега электронов.

Наноматериалы делят на свободные и связанные. Свободные наноматериалы в зависимости от размерности делят на ультрадисперсные (1–50 нм), высокодисперсные (50–500 нм) и грубодисперсные (500–10 000 нм). Первые две категории соответствуют коллоидному состоянию вещества, третья категория состоит из отдельных частиц и агломератов. К ним относятся различные порошки металлов и их оксидов, полимеров и др. В отличие от них другие наноматериалы в значительной мере взаимодействуют с вмещающей или контактирующей средой (абразивные пасты и суспензии, бинарные оксидные каталитические системы, металлополимеры, нанокерамика и др.), поэтому получили наименование связанных.

Наноматериалы с уникальным сочетанием прочностных и триботехнических свойств могут быть получены путем создания нанокристаллических слоев и пленок. Это делается при помощи нанотехнологий, которые основаны на принципах самосборки и самоорганизации.

Под нанотехнологией понимают совокупность методов и приемов, которые обеспечивают возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие структурные элементы с размерами менее 100 нм. Эти объекты имеют принципиально новые качества и способны осуществлять интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

В последние годы разработка объемных наноструктурных металлических материалов становится одним из наиболее актуальных направлений современной науки. Наибольшего успеха в области разработки нанотехнологий достигли японские ученые, создавшие микроскопический «подшипник», в котором потери на тре-

ние близки к нулю. Эти потери настолько незначительны, что даже самые точные приборы не способны их зарегистрировать.

Авиа- и автопромышленность, космическое строение и медицина крайне заинтересованы в развитии нанотехнологий. Создание наноструктур в металлах и сплавах открывает путь для получения необычных свойств, весьма привлекательных для инновационных применений.

Существует несколько принципиально отличающихся подходов к созданию наноматериалов:

- компактирование порошков;
- контролируемая кристаллизация аморфных сплавов;
- интенсивная пластическая деформация объемных образцов;
- выращивание на подложке из паровой или жидкой фазы;
- пленочные технологии;
- интенсивное облучение потоком высокоэнергетичных частиц;
- управляемая полимеризация.

Особое внимание при создании наноструктур уделяется методам интенсивной пластической деформации, таким как способ равноканального углового прессования. Этот способ дает возможность получить высокопрочные объемные наноструктурные материалы из различных металлов и сплавов. Характерной особенностью микроструктуры материалов после интенсивной пластической деформации является наличие пористости, оказывающей существенное влияние на функциональные характеристики материала.

Объемные наноструктурные материалы по назначению можно подразделить на три класса: строительные, конструкционные и функциональные. Однако многие материалы можно отнести сразу к нескольким классам. Так, различные виды нанокерамики можно использовать одновременно как строительные, конструкционные и функциональные материалы.

Несмотря на то, что нанокристаллические материалы достаточно сильно неупорядочены, существует и другая их классификация, учитывающая форму структурных составляющих, состав и распределение наноэлементов. Так, по форме структурных составляющих наноматериалы подразделяются на три группы: с пластинчатой формой, столбчатой формой и равноосной формой (рис. 51).

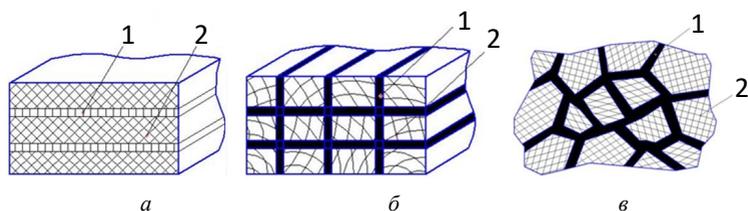


Рис. 51. Схемы наноматериалов с пластинчатой (*а*), со столбчатой (*б*) и с равноосной формой (*в*) структурных составляющих: 1 – наполнитель; 2 – матрица

По составу наноматериалы бывают однофазные и многофазные.

Нанофазная керамика является уникальным сверхпластичным керамическим материалом, получаемым спеканием наноразмерных порошков различных оксидных, карбидных или нитридных соединений, традиционно применяемых в обычной керамике. Нанофазная керамика, обладающая всеми достоинствами этого класса материалов по сравнению с обычной керамикой, одновременно с высокой твердостью имеет значительно большую пластичность. Она при гораздо более низких температурах может подвергаться горячей прокатке, растяжению и формованию в изделия любой конфигурации. В качестве примера таких соединений можно привести нанофазные керамики на основе высокочистых оксидов титана, циркония и др. Существуют нанофазные керамики на нитридной и карбидной основе, например карбиды и нитриды кремния и нитриды бора.

В настоящее время наиболее перспективным направлением в области конструкционных материалов является создание композиционных материалов с керамической матрицей (волоконистых керамокомпозиатов) и интерметаллидных соединений титана. Эти материалы могут применяться в виде покрытий при изготовлении теплонагруженных узлов и для тепловой защиты корпусных конструкций.

Наноструктурным интерметаллидам свойственны высокая прочность в сочетании с высокой пластичностью при работе в условиях экстремальных знакопеременных температурных нагрузок. Оптимальным чередованием слоев титана и алюминия толщиной до 5–10 нм, осаждаемых парофазным методом на нагретую под-

ложку, создается функциональное покрытие толщиной около 2 мм. После спекания такого покрытия образуется однородная интерметаллидная фаза с наноразмерной зернистостью, обладающая уникальными функциональными свойствами.

В энергетическом машиностроении широкое применение нашли наноструктурные керамокомпозиционные материалы: стекло-керамические композиты типа «стекларм», керамокомпозицы типа «геларм», «карбокс» и др. Они обладают высокой прочностью, ударной вязкостью и окислительной стойкостью при высоких температурах и могут использоваться в качестве покрытий на деталях теплонагруженных узлов двигательных установок.

Функциональные металлополимеры получают путем внедрения наноразмерных частиц различных металлов в полимерную основу. Металлополимерные материалы хорошо прессуются в виде таблеток, стержней и изделий разнообразной формы.

Одним из многочисленных примеров применения наноматериалов являются тонкоплёночные покрытия из гидрофобных материалов, изготовленных при помощи нанотехнологий.

Эти покрытия используют для защиты от коррозии ответственных изделий, которые эксплуатируются в сложных климатических условиях.

Наноразмерные частицы диоксида кремния SiO_2 благодаря высокой поверхностной энергии приобретают способность плотно присоединяться к различным поверхностям, делая их гидрофобными. При попадании влаги на такие покрытия образуется тонкая воздушная прослойка между покрытием и жидкостью. Воздушная прослойка не позволяет влаге проникнуть к металлу и способствует стеканию жидкой среды с поверхности изделия. Кроме того, покрытия не позволяют образовываться конденсату на поверхности металлов. Это замечательное свойство наночастиц диоксида кремния с успехом было использовано для создания водоотталкивающих составов, которые получили широкое распространение в виде средств автомобильной химии.

В ближайшем будущем на смену углеводородной технической цивилизации придет более экологически чистая техническая цивилизация, у которой основным энергоносителем будет являть-

ся водород. Водородная парадигма потребует разработки новых специальных материалов, способных решить проблемы хрупкости и деградации металлов под воздействием водорода.

Выводы

1. Классификация конструкционных материалов позволяет точно выбирать из множества тот единственный материал, который будет эффективно работать в определенных условиях эксплуатации.

2. Конструкционные материалы классифицируются по химическому составу, назначению, качеству, способу производства и раскислению.

Вопросы для самоконтроля

1. Сколько процентов углерода содержит сплав P18?
2. Что означает буква «А» в конце марки стали?
3. Как обозначают инструментальную углеродистую сталь?
4. Как обозначают легированные стали?
5. Как обозначают чугуны?
6. Что означают цифры в марке сплава ВЧ35?
7. Как обозначают медные сплавы?
8. Как называется сплав меди с цинком?
9. Как называется сплав меди с оловом?
10. Как обозначают алюминиевые сплавы?
11. Как обозначают магниевые сплавы?
12. Как обозначают титановые сплавы?
13. Как обозначают металлокерамические твердые сплавы?

5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сущность традиционного процесса изготовления изделий заключается в получении заготовки с конфигурацией, близкой к конструктивной форме детали, которая в последующем подвергается механической обработке.

Заготовка — это предмет производства, из которого путём изменения формы, размеров и физико-механических свойств получают готовое изделие.

Литейным производством называется технологический процесс изготовления металлических заготовок (отливок) путем заливки жидкого металла в специально приготовленные формы. Наружные очертания отливки определяются полостью формы, а внутренние образуются специальными фасонными вставками, которые называют стержнями.

5.1. Литейная форма

После затвердевания отливки ее извлекают из формы, освобождают от литниковой системы, очищают и направляют на механическую обработку. В ряде случаев отливки предварительно проходят термическую обработку.

Технология производства отливок складывается из следующих основных операций:

- изготовление моделей и стержневых ящиков;
- приготовление формовочной и стержневой смеси;
- изготовление форм и стержней;
- сушка форм и стержней;
- расплавление металла и заливка формы;
- выбивка отливок из форм и стержней из отливок;
- термическая обработка отливки с целью получения необходимой структуры металла;
- очистка поверхности отливки путем вырубания поверхностных дефектов пневматическими зубилами и выжигания ацетиленокислородным пламенем.

Основной технологической операцией литейного производства является изготовление литейной формы и стержня.

Литейной формой называется полость, образованная в формовочной смеси при помощи модели.

Литейные формы изготавливаются из различных материалов и в зависимости от свойств последних могут использоваться только один раз или многократно. Формы, используемые для получения одной отливки, называются разовыми. Эти формы разрушаются при извлечении из них отливки. Литейные формы, используемые для получения сотен и тысяч отливок, называются постоянными. Они обычно выполняются металлическими и называются кокилями. Некоторое применение находят полупостоянные формы, изготавливаемые из высокоогнеупорных материалов и используемые несколько десятков раз.

Разовые формы изготавливаются из песчано-глинистых, песчано-смоляных и песчано-керамических смесей. Такие формы могут выполняться объемными или оболочковыми, у которых небольшая толщина. Как правило, формы из песчано-глинистых смесей делаются объемными, а из песчано-смоляных и песчано-керамических – оболочковыми. Литье в песчано-глинистые формы является наиболее распространенным.

Для изготовления песчаной литейной формы необходимо иметь модельный комплект, состоящий из модели, стержневых ящиков, моделей элементов литниковой системы, прибылей, подмодельных плит. Он изготавливается в модельном цехе. Все другие работы выполняют в литейном цехе. Процесс изготовления литейной модели и стержневых ящиков должен учитывать технологию формовки и литейные свойства металла, из которого делается отливка.

Изготовление форм по модели производится с помощью специальных рамок, называемых опоками.

Опоки изготавливаются из чугуна, стали и алюминиевых сплавов. В стенках опок располагаются вентиляционные отверстия различной формы. Увеличение жесткости конструкции опок обеспечивается внутренними ребрами, которые называют крестовинами. Перемещаются опоки при помощи ручек или цапф. Точность центрирования опок при их сборке обеспечивается обычно специальными втулками – штырями, которые устанавливаются в отверстиях ушек.

Верхняя и нижняя опоки являются своеобразным остовом формы, предохраняющим ее от разрушения при изготовлении, сборке и заливке. Каждая половина разъемной модели формируется в отдельной опоке (рис. 52). После извлечения моделей в стержневые гнезда устанавливаются стержни и на нижнюю опоку – верхняя опока.

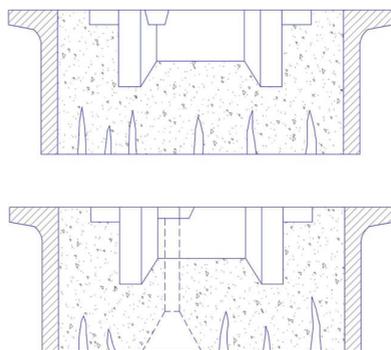


Рис. 52. Схема формирования разъемной модели в двух опоках

Подмодельная плита, изготавливаемая из металла, предназначена для закрепления на ней одной или нескольких моделей с литниковой системой и размещения штифтов для установки опок. Пользование плитой уменьшает время на установку моделей и прорезку каналов литниковой системы. Кроме того, повышает производительность и облегчает труд формовщика.

Подмодельные плиты могут быть односторонними и двусторонними. При формовке на односторонней модельной плите одна половина модели располагается на одной плите, а другая – на другой. Во время формовки необходимо пользоваться обеими плитами. При формовке на двусторонней подмодельной плите на одной стороне ее прикрепляется одна половина модели, а на другой – другая. Поэтому формовка нижней и верхней опок обеспечивается одной подмодельной плитой.

Литейная форма заполняется металлом через систему каналов, которую называют литниковой системой. Она также не дает возможность попадать неметаллическим включениям в тело отливки.

Литниковая система состоит из литниковой чаши, стояка, шлакоуловителя и питателя или питателей (рис. 53). Литниковая чаша –

сосуд, в который расплавленный металл поступает из разливочного ковша. Она служит для предотвращения разбрызгивания и смягчения удара струи металла. Стояк – вертикальный канал в верхней полуформе, соединяющий литниковую чашу со шлакоуловителем. Шлакоуловитель – горизонтальный, трапецевидного сечения канал, обычно выполняемый в верхней полуформе. Питатель – канал, служащий для непосредственного подвода металла к полости формы.

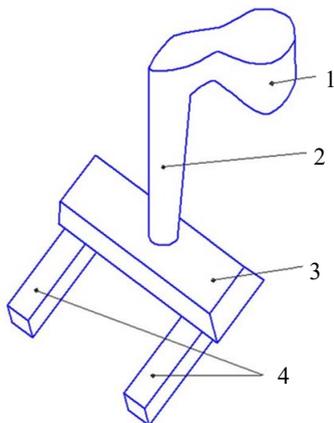


Рис. 53. Схема литниковой системы:
1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель;
4 – питатели

Он служит для задержания шлака и неметаллических включений. Питатель – канал, служащий для непосредственного подвода металла к полости формы.

Модель представляет собой видоизмененную копию отливки, которая отличается от будущей детали размерами, формой и наличием стержневых знаков. Стержневые знаки – это выступы на модели, образующие углубления в форме. В эти углубления устанавливаются стержни. Модель является инструментальной оснасткой, которая предназначена для получения полостей литейной формы, соответствующих наружной конфигурации отливки.

Конструкция модели должна обеспечить легкость её выемки из формы. Поверхность модели должна быть прочной и не изменяться в размерах. К тому же она должна противостоять влиянию влаги из формовочной смеси.

Модели изготавливают из материалов, которые достаточно легко обрабатываются. Например, их делают из дерева, цемента, гипса, пластмасс, полистирола, парафина и стеарина. Для изготовления металлических моделей и стержневых ящиков чаще всего используются алюминиевые сплавы, так как они отличаются малым весом, удобством в транспортировке и хорошей обрабатываемостью.

При изготовлении модели вначале по чертежу детали делают чертеж отливки, размеры которой увеличивают по отношению к размерам детали на величину припусков для механической обработки. По чертежу отливки делают чертеж модели, размеры которой превышают размеры отливки на величину припуска на усадку металла. Затем проектируют форму модели, которая отличается от формы изделия наличием специальных закруглений и формовочных уклонов. Специальные закругления между стенками отливки, перпендикулярными или имеющими некоторый угол между собой, называются галтелями. Их необходимость вызвана тем, что при охлаждении металла в форме возникают значительные остаточные напряжения в местах сопряжения. Это может вызвать образование трещин. Кроме того, галтели предотвращают образование усадочных раковин. Формовочные уклоны служат для того, чтобы легче можно было извлекать модель из формы.

Модели окрашивают: для чугунных отливок — в красный цвет, для стальных отливок — в серый или синий цвет, для отливок из цветных сплавов — в желтый цвет. Стержневые знаки, то есть места, обозначающие стержни, на модели окрашивают в черный цвет.

Модели бывают неразъемными, разъемными и с отъемными частями. Неразъемные модели служат для производства несложных отливок, формовку которых можно осуществлять в одной опоке. Разъемные модели, состоящие из двух и более частей, применяют при производстве отливок более сложной конфигурации (рис. 54). Соединение половин разъемной модели производят с помощью шипов.

Для удержания стержня в нужном положении во время заливки формы металлом его вставляют в специальные углубления формы. Сами углубления образуются выступами на модели, которые называются стержневыми знаками.

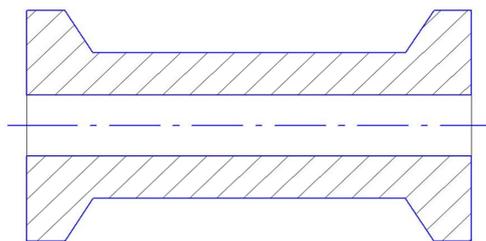


Рис. 54. Принципиальная схема конструкции разъемной модели

Стержни как правило изготавливаются сухими, должны быть достаточно прочными и не разрушаться при их транспортировке и заливке металла в форму.

Формы и стержни изготавливаются из специальных смесей, называемых формовочными и стержневыми соответственно. Их основой служат кварцевые пески, повышающие газопроницаемость смесей. Кроме того, в них входят глина и специальные добавки.

Для повышения прочности, увеличения пластичности и термохимической стойкости формовочных смесей в их состав вводится глина. Формовочные глины представляют собой горные породы, которые состоят в основном из тонкодисперсных частиц водных алюмосиликатов. Алюмосиликаты обладают связующей способностью, то есть свойством обеспечивать связь между частицами песка в их влажном или сухом состоянии. Глины, применяемые для изготовления формовочных материалов, в зависимости от минералогического состава и определяемого им характера набухания в воде подразделяются на два вида:

1. Формовочная обыкновенная глина при увлажнении присоединяет воду по наружным поверхностям кристаллов породообразующего минерала, то есть не имеет внутрикристаллического набухания.

2. Формовочная бентонитовая глина, или бентонит, при увлажнении присоединяет воду как по наружным, так и по внутренним поверхностям кристаллов породообразующего минерала. Она имеет внутрикристаллическое набухание.

Внутрикристаллическое набухание бентонитовой глины позволяет заменять ее в смесях обыкновенную глину по соотношению: 1:2 или даже 1:3. При сушке бентонит теряет свои связующие свойства, поэтому его применяют только для сырой формовки.

Специальные добавки вводятся в состав смесей для повышения их противопопригарности или предотвращения прилипания. В качестве противопопригарных добавок применяются молотый каменный уголь, мазут, битум и угольная пыль. Так, угольный порошок при соприкосновении с расплавленным металлом подвергается сухой перегонке. Образующиеся при этом газы предохраняют материал формы от перегрева и оплавления.

В состав как формовочных смесей, так и стержневых, кроме исходных свежих материалов, вводится горелая, т. е. бывшая в употреблении, формовочная смесь. Горелую смесь по-другому называют оборотной.

Соотношение компонентов в смесях должно соответствовать характеру и типу отливок и способу формовки.

Для получения доброкачественных отливок формовочные и стержневые смеси должны обладать рядом специфических свойств:

- *влажность* — способностью смеси содержать свободную и гигроскопическую влагу;
- *газопроницаемость* — способностью смеси пропускать через себя газы;
- *прочностью* — способностью форм и стержней не разрушаться под действием внешних нагрузок;
- *податливостью* — способностью форм и стержней сжиматься при усадке остывающей отливки;
- *гигроскопичностью* — способностью смеси впитывать влагу из воздуха;
- *выбиваемостью* — способностью форм и стержней легко разрушаться после охлаждения отливки;
- *огнеупорностью* — способностью смеси выдерживать высокую температуру без оплавления;
- *текучестью* — способностью смеси перемещаться под действием внешних нагрузок или собственного веса;
- *газотворностью* — способностью смеси выделять газы при нагревании.

Безусловно, смеси должны быть максимально долговечными, то есть способными длительное время сохранять свои физико-механические свойства после повторных заливок.

Для повышения прочности смеси в неё добавляют связующие материалы, которые ещё называют крепителями. Они подразделяются на две основные группы: растворяющиеся в воде или смачиваемые водой и не растворяющиеся в воде или не смачиваемые водой.

К числу растворяющихся связующих материалов, кроме глины, относятся цемент, жидкое стекло, сульфитный шлоко, декстрин, патока, пектиновый клей.

Группу нерастворяющихся крепителей составляют смолы, канифоль, продукты переработки нефти и различные пеки. Такие крепители рекомендуются для смесей, которые идут на изготовление тонкостенных или наиболее ответственных стержней.

Отверстия и внутренние полости в литых заготовках образуются с помощью стержней, которые вставляют в стержневые гнезда формы при ее сборке. Конфигурация стержня соответствует конфигурации отверстия или полости. Стержни делают в стержневых ящиках. Стержневые ящики представляют собой инструментальную оснастку, которая предназначена для получения стержней. В стержневых ящиках также предусмотрены стержневые знаки.

Стержни изготавливают из стержневой смеси, к которой в отличие от формовочной смеси предъявляются особые требования.

Стержни во время заливки формы металлом находятся в более тяжелых условиях, чем материал формы. Они со всех сторон окружены металлом. При этом отвод газов чрезвычайно затруднен. А при затвердевании металла стержни испытывают сжимающее воздействие усадочных напряжений металла. Отсюда возникают противоречивые требования к материалу стержней: он должен быть достаточно прочным при заливке и податливым при затвердевании металла. По сравнению с материалом формы материал стержней должен обладать лучшей газопроницаемостью и податливостью. Помимо этого, он должен обладать высокой выбиваемостью и непригораемостью.

Состав и свойства стержневых смесей выбирают с учетом конфигурации и назначения стержней, а также условий, в которых они находятся в форме.

Подготовка свежих формовочных материалов предусматривает следующие мероприятия:

- сушку песка и глины;
- просеивание песка;
- приготовление пылевидного угля;
- приготовление глиняной или глино-угольной суспензии;
- подготовку жидких крепителей.

Температура сушки кварцевых песков должна быть не выше 600 °С, а природных глинистых песков — не выше 400 °С. Сушка песка и глины выполняется в горизонтальных барабанных сушилках непрерывного действия. Происходит это за счет встречного перемещения песка при непрерывном воздействии раскаленных продуктов сгорания. Высушенный песок охлаждается до температуры 30 °С и затем поступает на операцию просеивания. Просеивание песка производится при помощи различных сит. Полигональное сито представляет собой вращающийся от привода металлический корпус, к которому крепятся рамы с натянутой на них сеткой. Через ячейки этой сетки и просеиваются песчаные фракции, а различные включения остаются на сетке.

Огнеупорная глина используется для приготовления формовочной смеси в виде сухого порошка или водной суспензии. Применение суспензии исключает сушку и размалывание глины.

Для получения глиняного порошка сырую огнеупорную глину дробят в зубчатых вальцах. Затем сушат в барабанном сушилке при температуре 350–400 °С до влажности, составляющей не более 3 %, и размельчают в специальной мельнице.

Для приготовления глиняной суспензии применяются мешалки, барабаны и смешивающие бегуны. Подача суспензии к бегунам осуществляется по трубопроводу насосом.

Мокрая регенерация применяется обычно при гидравлической выбивке и очистке отливок. Её сущность состоит в перетирании и удалении мелких фракций из мокрой смеси, которая проходит через систему конических и спиральных классификаторов.

Электростатическая сепарация осуществляется в электронном сепараторе. Сначала смесь размельчается до размера комков не более 3 мм. Потом она просеивается через ячейки сит. Затем частич-

ки смеси, очищенной от металлических включений, пропускаются через электрическое поле. Получив заряд, частички отклоняются от траектории свободного падения на различные расстояния в зависимости от размеров. Таким образом они попадают в различные отсеки классификаторов. Это позволяет полностью удалить мелкие фракции и пыль, которые собираются винтовым конвейером и затем пневмотранспортом удаляются в бункер за пределы цеха.

Для достижения высокого качества смесей необходимы:

- точная дозировка исходных материалов;
- тщательное перемешивание компонентов;
- вылеживание готовых смесей в течение определенного времени.

Для дозировки исходных материалов применяются весовые и объемные дозаторы. Последние рекомендуются только для жидких компонентов — крепителей и воды.

Для смешивания используются машины трех типов: бегуны с вертикальными катками, бегуны с горизонтальными катками, шнековые смесители.

Вылеживание готовой смеси осуществляется с целью обеспечения максимальной однородности смеси путем выравнивания ее влажности по всему объему. Время вылеживания зависит от вида глины и процентного содержания компонентов в смеси. Обычно время вылеживания составляет от двух до восьми часов.

Перед набивкой формы готовая смесь должна быть дополнительно разрыхлена. Это обеспечивает более однородную плотность набивки и повышает газопроницаемость.

Формовочную смесь в литейной форме уплотняют различными способами: вручную при помощи трамбовки и машинами, производящими прессование и встряхивание, а также пескострельной машиной.

Встряхиванием смеси обычно получают высокие литейные формы, так как встряхивание улучшает перемещение и проникновение частиц смеси.

Технологический процесс изготовления литейной формы заключается в следующем.

Сначала на подмодельную плиту устанавливают одну половину модели — ту, которая не имеет шипов. К ней прикладывают модель

питателя. На подмодельную плиту устанавливают нижнюю опоку обработанной разделительной плоскостью вниз (рис 55, *а*). Далее производят заполнение рабочего пространства нижней опоки формовочной смесью (рис 55, *б*).

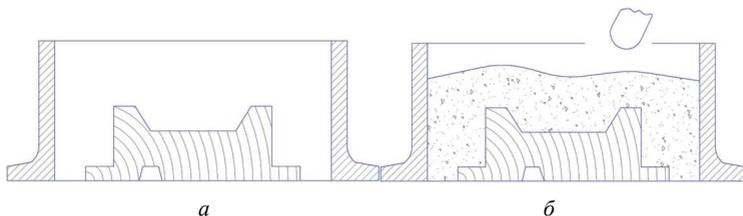


Рис. 55. Схемы установки половины разъемной модели в нижнюю опоку (а) и заполнения опоки формовочной смесью (б)

Засыпку смеси сопровождают её уплотнением при помощи трамбовки (рис 56, *а*). Лишнюю утрамбованную формовочную смесь удаляют линейкой с разделительной плоскости опоки (рис 56, *б*). Это делается для обеспечения ровной поверхности утрамбованной смеси и предотвращения её разрушения при последующей трамбовке. Для удаления газов из литейной формы в формовочной смеси продельывают вентиляционные каналы. После этого нижнюю опоку снимают с подмодельной плиты, поворачивают на 180°.

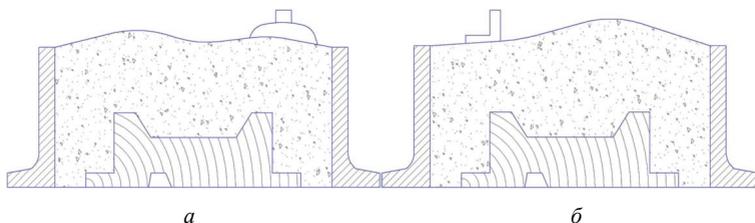


Рис. 56. Схемы трамбовки формовочной смеси (а) и удаления лишней смеси (б)

Плоскость разъёма формы засыпают сухим разделительным песком. Далее устанавливают верхнюю опоку на нижнюю опоку и производят их закрепление при помощи центрирующих штырей. Накладывают вторую половину модели на первую половину, проводя их центрирование по шипам. Затем устанавливают модели шла-

коуловителя и стояка. Повторяют операции засыпки и уплотнения формовочной смеси в рабочем пространстве верхней опоки. После этого проводят операции удаления модели стояка и изготовления литниковой чаши. Далее снимают с подмодельной плиты и поворачивают на 180° верхнюю опоку. Для предотвращения разрушения формовочной смеси смачивают водой края моделей при помощи кисточки. Извлекают из формовочной смеси модели отливки, питателя и шлакоуловителя (рис. 57).

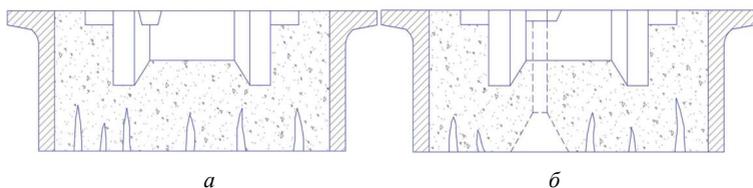


Рис. 57. Схема извлечения модели:
а – из нижней опоки; *б* – из верхней опоки

При необходимости производят устранение дефектов, которые образовались при извлечении моделей. Для предотвращения пригорания формовочной смеси поверхности формы присыпают графитом. Устанавливают стержень в полученные стержневые гнезда.

В завершение устанавливают верхнюю опоку на нижнюю опоку и производят их закрепление при помощи центрирующих штырей (рис. 58).

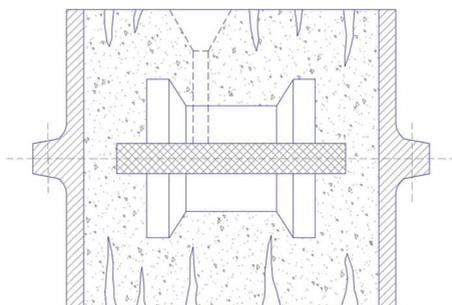


Рис. 58. Схема подготовки литейной формы к заливке металла

Для получения литой заготовки в полученную литейную форму заливают металл.

Отливку выбивают из разовой песчаной формы после охлаждения металла. При этом форму разрушают. Чаще всего отливки выбивают на выбивных вибрационных решетках.

Стержни выбивают из отливок пневматическими и вибрационными установками или струей воды под давлением.

Отливка с песчаным стержнем зажимается в пневматических тисках вибрационной машины. Затем включается вибратор. В результате вибраций имеющиеся в отливке стержни разрушаются и высыпаются.

Струей воды высокого давления стержни выбивают из отливок сложного, среднего и крупного литья. Эту операцию выполняют в особых камерах, в которых отливки помещаются на вращающемся столе. Воду подают тонкой струей из сопла диаметром 4–8 мм под давлением 25–220 атм.

Литники чугунных отливок отбивают ударом молотка или кувалды. Для отделения литников от отливок из вязких металлов применяют дисковые пилы. Для отделения литников от остальных отливок, особенно от отливок из цветных металлов и сплавов, используют ленточные пилы.

После выбивки отливок из формы на их поверхности остаются пригоревшая формовочная смесь и заусенцы, которые очищают в обрубном отделении цеха.

Очистку отливок производят следующими способами:

- дробеструйной или дробеметной обрубкой;
- ударным действием гидравлической или пескогидравлической струи;
- электроконтактным способом, который основан на воздействиях теплового эффекта электрического тока на отливку;
- в ваннах с расплавленной или растворенной солью;
- в очистных барабанах;
- абразивным инструментом;
- на станках с непрерывно движущейся абразивной лентой.

5.2. Брак литья и его причины

Бракованной, то есть непригодной к эксплуатации, называют такую отливку, которая имеет хотя бы один недопустимый по техническим условиям дефект. Основные причины брака возникают при несоблюдении технологии получения отливок, из-за ошибок, которые возникают при конструировании детали и при проектировании технологического процесса изготовления отливки.

Имеют место следующие основные виды брака отливок.

Коробление — изменение размеров и контуров под влиянием усадочных напряжений.

Причинами этого вида брака являются остаточные напряжения, которые возникают:

- вследствие нерациональности конструкции отливки, например, разностенности;
- неправильного подвода металла, ухудшающего равномерность его остывания;
- неправильного состава или температуры заливаемого металла, вызывающих чрезмерную усадку;
- неправильного режима охлаждения отливки;
- недостаточной податливости формы и стержней.

Газовые раковины — пустоты, расположенные на поверхности или внутри отливки. Форма раковины бывает сферической или округленной, а поверхность — гладкой и блестящей.

Газовые раковины появляются в том случае, когда в металле содержится большое количество газов. Это происходит из-за плохого качества исходных материалов или неправильного режима плавки. Образованию газовых раковин также способствует пониженная газопроницаемость и повышенная влажность формовочных и стержневых смесей, а также низкая температура заливаемого сплава.

Песчаные раковины — закрытые или открытые раковины, полностью или частично заполненные формовочным материалом.

Причинами такого брака бывают:

- местное разрушение или засорение форм при сборке;
- недостаточная прочность формовочной и стержневой смесей или красок;

- применение неисправных моделей;
- неправильное крепление отъемных частей модели;
- слабая или неравномерная набивка формы и стержней;
- обвал формы при установке груза.

Усадочные раковины – открытые или закрытые пустоты в теле отливки, имеющие шероховатую поверхность с грубокристаллическим строением.

Причинами такого брака бывают:

- неправильная конструкция отливки, не обеспечивающая равномерность ее охлаждения;
- недостаточное питание отливки жидким металлом в процессе затвердевания вследствие неправильного расположения прибылей и литников;
- чрезмерно высокая температура заливки.

Горячие и холодные трещины – это разрывы или надрывы в стенках отливки.

Трещины обнаруживают простукиванием, гидропробкой или магнитной дефектоскопией.

Причинами появления горячих и холодных трещин могут быть:

- неправильная конструкция отливки с резким переходом от толстых к тонким сечениям;
- острые углы в отливках;
- высокое сопротивление форм и стержней нормальной усадке металла, возникающее из-за чрезмерной плотности набивки смесей;
- неправильный химический состав заливаемого металла, например, повышенное содержание элементов, увеличивающих усадку;
- неправильный режим заливки металла.

Недолив характеризуется тем, что при заливке конфигурация и размеры отливки остаются частично невыполненными из-за недостаточного заполнения формы металлом.

Спай – сквозные или поверхностные с закругленными краями потёки преждевременно застывшего металла.

Причинами такого брака являются:

- недостаточное количество металла в ковше;
- низкая температура сплава при заливке;
- недостаточная жидкотекучесть металла;

- уход металла из формы;
- недостаточная вентиляция формы и стержня, вызывающая повышенное давление газов в форме.

5.3. Специальные методы получения литых заготовок

Получать более точные и с более чистой поверхностью отливки позволяют специальные методы литья. Изготовленные этими методами отливки также имеют меньшие припуски на механическую обработку. Это дает возможность снизить затраты на дальнейшую обработку и получать качественные изделия.

5.3.1. Литье в оболочковые формы

Литье в оболочковые формы применяется для изготовления сложных тонкостенных отливок из черных и цветных сплавов. Оболочковые формы и стержни представляют собой сухие тонкостенные оболочки толщиной до 15 мм. Они изготавливаются из термореактивных смесей, состоящих из мелкого кварцевого песка и крепителя. Крепителями служат различные термореактивные смолы, которые затвердевают под воздействием тепла нагретых металлических моделей и стержневых ящиков. Эта особенность термореактивных смол используется для получения оболочковых форм. Наибольшее распространение получил пульвербакелит.

В технологический процесс изготовления оболочковых форм входят следующие операции.

1. *Приготовление смеси.* Смесь готовится путем перемешивания песка и порошка пульвербакелита в количестве до 7 %. Чтобы смесь была однородной и не расслаивалась при формовке, в смеситель вводят 1 % фурфурола. Фурфурол растворяет бакелит, вследствие чего последний обволакивает зерна песка. В результате получается плакированная смесь, которая не расслаивается при работе.

2. *Подготовка модельной плиты.* Модельные плиты выполняют из чугуна. Подготовка заключается в нагреве плиты до температуры 250 °С и нанесении разделительного слоя. Этот слой необходим для предотвращения прилипания смеси к моделям. Наилучшими разделительными смазками являются силиконовые эмульсии.

3. *Формирование оболочки.* Применяются два способа получения оболочки: способ свободной засыпки и пескодувный способ. Машина для изготовления оболочек свободной засыпкой имеет бункер с термореактивной смесью (рис. 59). Бункер может поворачиваться на 180° . На него сверху накладывается и закрепляется разогретая модельная плита. После этого бункер поворачивается на 180° .

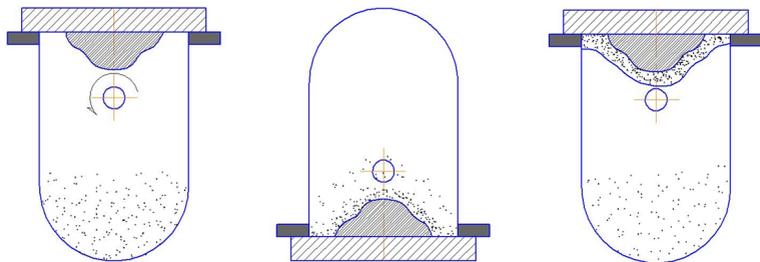


Рис. 59. Схема процесса получения оболочковой формы

Вся смесь падает на горячую модельную плиту и нагревается от нее. При этом бакелит плавится и склеивает зерна песка. Прогретый слой смеси обладает высокой подвижностью и под давлением лежащего выше слоя дает четкий отпечаток всех контуров модели. Толщина оболочки зависит от времени выдержки. Обычно оно составляет 10–20 с.

После переворачивания бункера в первоначальное положение образовавшаяся оболочка остается на модели, а оставшаяся смесь сыпается на дно. Модельная плита с оболочкой помещается в обжигательную печь. Там она в течение 2 мин выдерживается при температуре 400°C для окончательного отверждения. Готовая оболочка снимается толкателями с модельной плиты и направляется на сборку формы.

При получении оболочки пескодувным способом смесь подается на модель или в стержневой ящик под давлением воздуха.

4. *Сборка формы.* Литейная форма собирается из двух оболочек. Половины центрируются по специальным фиксаторам и скрепляются специальными приспособлениями.

5. *Заливка формы.* При заливке мелких форм не требуется обычно специальных мер. Средние формы с емкостью свыше 10 кг для

заливки устанавливают в специальные опоки и засыпают опорным материалом, чаще чугунной дробью. Это позволяет предотвратить их разрушение во время заливки.

5.3.2. Литье в металлические формы – кокиль

Литье в металлические формы применяется для изготовления отливок из различных металлов (рис. 60). Однако предпочтение отдается изготовлению отливок из цветных сплавов. Они обладают меньшей температурой плавления и меньшей склонностью к образованию трещин. Стойкость металлических форм при заливке алюминиевых сплавов доходит до 300 тысяч заливок, а при отливке чугуна – до 300 заливок.

Каждый из этих типов может быть с одним или несколькими разъемами.

Выбор типа конструкции металлической формы в основном зависит от технических условий получения качественной отливки, ее конфигурации, веса и точности размеров. При этом следует учитывать возможность механизации, удобство и безопасность обслуживания форм, себестоимость отливок.

Формы без разъема имеют большую жесткость, меньше деформируются и обычно применяются для изготовления отливок простой конфигурации. Верхняя часть формы обычно перекрывается знаком стержня. После охлаждения отливки форма на цапфах поворачивается на 180° и отливка выбивается.

В формах с горизонтальной плоскостью разъема одна половина обычно крепится неподвижно, а другая закрывает и открывает ее. Литниковая система в таких формах обычно изготавливается в песчаном стержне. После заливки и остывания верхняя половина формы поднимается и отливка выбивается. В таких формах проще и более точно можно поставить и закрепить песчаные стержни. Но затруднена выбивка отливок.

Формы с вертикальной плоскостью разъема применяются для простых и средней сложности отливок. В плоскости формы распо-

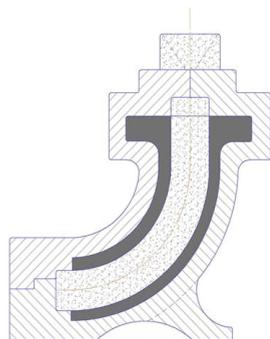


Рис. 60. Схема заливки расплавленного металла в кокиль

лагаются полости для отливок и литниковая система. После заливки форма раскрывается и отливка выбивается.

Чаще всего в металлических формах применяют прямолинейный разъем. Криволинейный и ломаный разъемы применяют в тех случаях, когда невозможно по-другому получить качественную отливку.

Отливки сложной конфигурации и большого габарита отливаются в формы с несколькими разъемами. В форме можно расположить гнезда одновременно для нескольких отливок. В формах с вертикальной плоскостью разъема небольшие отливки можно располагать в несколько ярусов.

Для металлических форм применяются металлические и песчаные стержни. При литье из цветных сплавов используют металлические стержни сложной конфигурации, а для чугунного литья — стержни простой конфигурации с большими уклонами.

Для получения сложных по конфигурации полостей используются одновременно металлические и песчаные стержни. В песчаных стержнях предусматривается отвод газа.

Для соблюдения нормального теплового режима металлические формы перед заливкой должны быть нагреты до рабочей температуры. В промежутке между заливками формы охлаждаются путем обдувки холодным воздухом.

При необходимости очень быстрого охлаждения применяется опрыскивание водой или проточно-водяная система внутри стенок формы. При получении тонкостенных отливок формы в промежутке между заливками могут терять тепла больше, чем получают при заливке в них металла. В этих случаях для поддержания рабочей температуры формы необходимо подогревать с помощью газовых горелок или системы электронагревателей.

При необходимости медленного охлаждения тонкого места отливки применяются песчаные вставки или местные электронагреватели. Рабочая температура формы зависит от заливаемого сплава и находится в пределах от 100 до 300 °С.

Для предохранения рабочей поверхности кокиля от воздействия жидкого металла применяются облицовки, изготавливаемые из талька, молотого шамота и магнезита. Применяются также облицовки из огнеупорной глины, мела и различных связующих матери-

алов, таких как жидкое стекло и патока. Формы покрываются облицовочным слоем до 2 мм с периодичностью один-два раза в смену. Перед заливкой кокили покрываются графитной смазкой.

В массовом и серийном производстве применяют специальные машины для литья в металлические формы. На машинах производятся операции по открыванию и закрыванию форм, выемке отливок, установке и выемке стержней.

Литьё в металлические формы отличается высокой производительностью труда и механизацией процесса. Отливки, полученные литьём в металлические формы, имеют более мелкозернистую структуру металла, лучшие механические свойства и большую точность размеров.

5.3.3. Литье под давлением

Литьем под давлением называется процесс машинного литья металла в металлические формы, при котором заполнение формы и кристаллизация металла производятся под принудительным избыточным давлением. Этот способ применяется в массовом производстве для изготовления тонкостенных фасонных отливок преимущественно из цветных сплавов. Литьем под давлением получают корпуса и картеры различных приборов, электрических машин, карбюраторов, а также алюминиевые блоки цилиндров и сантехническую арматуру.

Сущность процесса заключается в том, что в камере прессования, соединенной с оформляющей полостью формы, на расплав давит поршень. В результате жидкий металл устремляется в полость формы и быстро заполняет ее. После кристаллизации металла происходит раскрытие пресс-формы. Отливка удаляется с помощью толкателей.

При литье под давлением пресс-формы и стержни делаются стальными. Применение песчаных стержней исключается, так как заполняющий форму жидкий металл под высоким давлением может их разрушить.

Литье под давлением производится на специальных машинах (рис. 61).

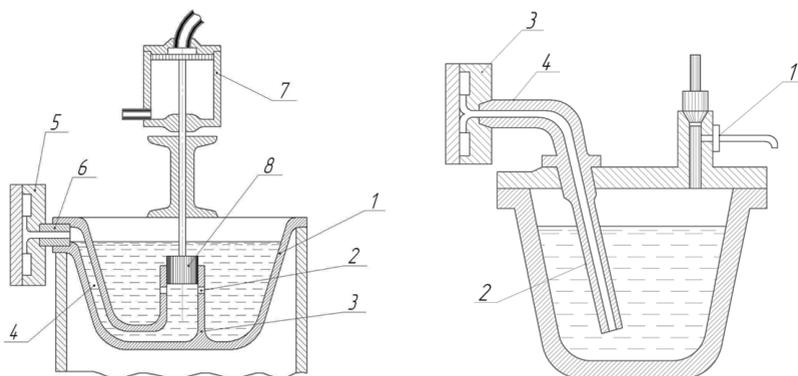


Рис. 61. Машины для литья под давлением:

1 — тигель с расплавом металла; 2 — канал для забора расплава металла;

3 — камера прессования; 4 — металлопровод; 5 — неподвижная часть пресс-формы; 6 — выталкиватель; 7 — цилиндр механизма прессования;

8 — прессующий поршень

Машины поршневого действия с горячей камерой сжатия применяются для оловянных, цинковых и свинцовых сплавов, которые имеют температуру плавления до 450 °С. Машины бывают ручные, полуавтоматического и автоматического действия. В чугунную подогреваемую ванну заливают металл, который через отверстия заполняет полость цилиндра и подводящий канал. При повороте пусковой рукоятки обе половины пресс-формы закрываются. Одновременно конец мундштука прижимается к устью канала пресс-формы.

Далее включается пневматический цилиндр, под действием которого поршень вытесняет расплавленный металл в пресс-форму. После кристаллизации металла поршень поднимается, а пресс-форма раскрывается. Затем отливка извлекается из пресс-формы.

Машины поршневого действия с камерой сжатия работают по принципу впрессовывания порции жидкого металла, предварительно залитого в поршневую камеру. Металл заливают дозировочным ковшом в загрузочный цилиндр. После этого пуансоном впрессовывают металл в пресс-форму. По окончании кристаллизации металла пресс-форму раскрывают, а отливку удаляют.

Достоинствами литья под давлением является высокая производительность, точность размеров и хорошее качество поверхности отливок. Такие отливки не требуют дальнейшей механической об-

работки. По сравнению с литьем в песчаные формы литье под давлением обладает значительно меньшей трудоемкостью процесса.

При литье под давлением в отливках возникает газоусадочная пористость, что недопустимо для ответственных изделий.

5.3.4. Центробежное литье

Центробежным литьем называется процесс получения отливок, при котором жидкий металл заливается во вращающуюся форму (рис. 62). Формирование поверхности отливки и процесс кристаллизации металла протекают под действием центробежных сил. Наиболее широко центробежное литье применяется для получения отливок, имеющих форму тел вращения. Такими отливками являются заготовки для различного рода колес, втулок, гильз и труб.

Для центробежного литья применяются машины с горизонтальной, вертикальной и реже с наклонной осью вращения. Металл заливается во вращающиеся металлические изложницы, которые могут иметь вставные формы из шамота, стержни, а также земляные облицовки. К центробежному литью относится также способ центрифугирования.

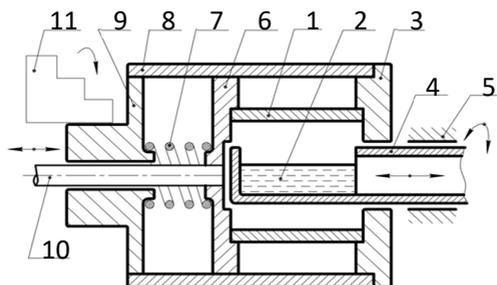


Рис. 62. Схема центробежного литья: 1 – форма; 2 – металл; 3 – диск; 4 – трубка; 5 – направляющие; 6 – нажимной диск; 7 – пружина; 8 – кожух; 9 – корпус; 10 – шток; 11 – кулачки

Сущность способа состоит в том, что во вращающуюся форму, имеющую нижнюю и верхнюю половины, равномерно заливается металл из дозатора. При вращении металл кристаллизуется под действием центробежных сил.

Центробежное литье имеет ряд преимуществ:

- отсутствует необходимость применения стержней для получения внутренней полости цилиндрических отливок;
- резко снижается расход металла на литниковую систему;
- металл отливки получается с мелкозернистой структурой;
- резко снижается себестоимость литья.

К недостаткам центробежного литья относятся:

- невозможность получения точных отверстий в отливке;
- получение отбеленного слоя на чугунных отливках, вследствие чего отливки необходимо отжигать.

5.3.5. Литье по выплавляемым моделям

Литье по выплавляемым моделям – это процесс получения отливок в неразъемных разовых огнеупорных формах, изготавливаемых с помощью легкоплавких моделей. Легкоплавкие модели обладают способностью выжигаться или выплавляться, образуя при этом в форме полости, соответствующие контурам будущей отливки.

Литьем по выплавляемым моделям можно получать отливки любой сложности с различной толщиной стенок, весом от нескольких граммов до сотен килограммов из любых литейных сплавов.

Недостатком этого способа является высокая себестоимость отливок. Поэтому в условиях массового производства его следует применять для таких деталей, заготовки которых невозможно получить другими методами литья. Такими деталями являются мелкие тонкостенные детали со сложной конфигурацией, изготавливаемые из труднообрабатываемых сплавов.

Материалом для изготовления легкоплавких моделей может служить смесь парафина и стеарина в соотношении один к одному. Эта смесь готовится в специальных установках, где происходит расплавление составляющих, очистка и перемешивание их до жидкотекучего состояния при температуре 43 °С. Кроме того, применяются и другие составляющие модельных составов, такие как буроугольный воск, церезин, торфяной воск и др.

Легкоплавкие модели получают методом запрессовки модельного состава в металлические пресс-формы. Изготовленные модели собирают на общем стояке в так называемую «елку». Модели

в «елку» собирают припаиванием электропаяльником с наконечником в виде лезвия ножа. Чтобы упростить сборку, модели изготавливают в многогнездных пресс-формах звеньями (рис. 63).

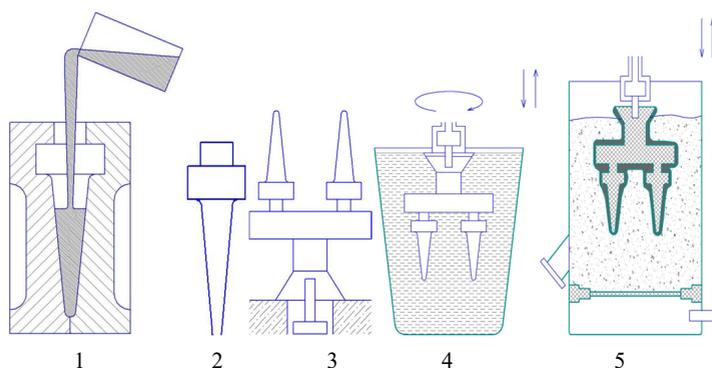


Рис. 63. Оснастка для литья по выплавляемым моделям:
 1 – пресс-форма; 2 – модель; 3 – модельно-литниковый блок;
 4 – суспензия; 5 – слой зернистого огнеупорного материала

Огнеупорное покрытие наносится методом окунания «елки» в ванну с обмазкой. Обмазка представляет собой смесь маршалита – тонкомолотого кварцевого песка с гидролизованным раствором этилсиликата. После окунания мокрая «елка» обсыпается сухим кварцевым песком. Покрытие состоит из трех-четырех слоев. После нанесения каждого слоя «елка» сушится в течение двух часов на воздухе.

Модели выплавляют при температуре 85 °С горячим воздухом, горячей водой или паром в специальных камерах.

Для получения высокой чистоты поверхности отливок формы обжигаются. Обжиг «елки» производят в специальных печах при температуре 950 °С. При этой же температуре форма заливается металлом (рис. 64). Для предотвращения деформаций и разрушения тонкой оболочковой формы последняя перед обжигом засыпается песком или другим наполнителем. Заливка форм производится сразу же после обжига. Выбивка форм заключается в высыпании из опок песка вместе с «елкой», для чего используются поворотные выбивные устройства.

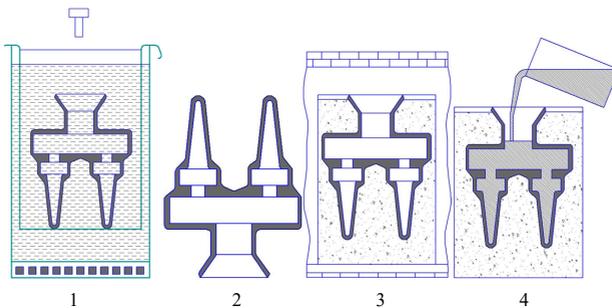


Рис. 64. Литье по выплавляемым моделям:
 1 – расплав модельной массы; 2 – оболочковая форма;
 3 – наполнитель в печи; 4 – заливка ковшем формы

Обрубка и очистка литья производится на специальных обрезных прессах или виброустановках. Под действием вибрации отливки отваливаются от стояка. Затем их зачищают на наждаках, а остатки огнеупорного покрытия удаляются путем выщелачивания в специальных ваннах.

Выводы

1. Литье – один из наиболее простых и эффективных способов получения сложно-профильных заготовок и готовых изделий.
2. Необходимость получения бездефектных и точных отливок стимулирует разработку новых специальных способов литья.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое литейная форма?
2. Для чего нужна модель?
3. Для чего служат стержни?
4. Чем отличаются размеры модели и отливки?
5. По каким свойствам оценивается формовочная смесь?
6. Какие виды брака встречаются в отливках?
7. Достоинства и недостатки литья в кокиль.
8. Достоинства и недостатки центробежного литья.
9. Достоинства и недостатки литья по выплавляемым моделям.
10. Достоинства и недостатки литья под давлением.

6. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В современной металлообрабатывающей промышленности обработке давлением подвергается около 90 % всей отливаемой стали. При этом продукцией являются заготовки, нуждающиеся в дальнейшей механической обработке, и готовые изделия, которые не требуют механической обработки. Так, в автомобилестроении используются до 80 % штампованных деталей, половина из которых не подвергаются никаким другим видам обработки (кроме покраски).

Все процессы обработки металлов давлением основаны на использовании их пластических свойств, то есть способности при определенных условиях нагружения изменять размеры и форму без разрушения. В результате пластического течения материала под действием приложенных внешних сил происходит изменение размеров и формы заготовки с одновременным изменением структуры и механических свойств (повышением прочностных характеристик) материала.

При определении условий, в которых должна проводиться обработка металлов давлением, и, в частности, для расчета усилий деформирования, а также для разработки конструкции приспособлений необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- пластическая деформация, приводящая к необратимому изменению размеров и формы заготовки, может наступить только в том случае, если напряжения от действия внешней силы превышают предел текучести материала;
- деформация материала представляет собой сумму двух ее составляющих: упругой и пластической деформаций. После снятия нагрузки происходит обратная упругая деформация материала, приводящая к частичному восстановлению размеров и формы заготовки. Поэтому величину упругой деформации необходимо учитывать при повышенных требованиях к размерам обрабатываемой давлением детали;
- объем материала до пластической деформации равен объему материала после его деформации;
- химический состав металлов и сплавов во многом обуславливает их пластические свойства и, как следствие, интенсивность пла-

стической деформации. Пластические свойства чистых металлов выше, чем многофазных сплавов;

- нагрев металлов способствует повышению их пластических свойств и, следовательно, снижает сопротивление пластической деформации;
- под воздействием пластической деформации каждая точка деформируемого тела перемещается в направлении наименьшего сопротивления. Поэтому для того, чтобы переместить металл в требуемом направлении, необходимо ограничить его пластическое течение в других направлениях;
- после обработки металлов давлением они приобретают ярко выраженную анизотропию свойств (неодинаковость свойств в разных направлениях), обусловленную вытянутостью зерен, волокнистостью и строчечностью.

Существуют две разновидности обработки металлов давлением: холодная и горячая обработки.

Деформирование металлов в холодном состоянии, то есть при температуре ниже температуры рекристаллизации, приводит к возникновению наклёпа (деформационное упрочнение), которое характеризуется изменением структуры и повышением механических свойств. Основным недостатком холодной обработки давлением является высокое сопротивление металлов пластическому деформированию.

Для того чтобы снизить усилия деформирования и создать в пластически деформированном металле структуру с равноосными зёрнами и свободную от наклёпа, проводят горячую обработку давлением.

Нагрев металлов и проведение горячей обработки давлением приводит к снижению в 8–10 раз сопротивления металлов пластическому деформированию. Температура нагрева должна быть выше температуры рекристаллизации, но незначительно. В противном случае рост температуры приведет к перегреву и пережогу. Пережог является неустранимым дефектом металлов, возникающим в результате проникновения кислорода внутрь металлов, где он окисляет границы зерен. – Металлы становятся хрупкими и разрушаются при ударе. Особенно опасно обрабатывать металлы давлением в об-

ласти температур 300–500 °С, так как в этом интервале сталь резко снижает пластичность, металл становится хрупким и легко дает трещины. Этот диапазон температур называется температурным интервалом хрупкости. В профессиональной сфере принято употреблять аббревиатуру ТИХ.

Преимуществами обработки металлов давлением являются:

- высокий коэффициент использования материала;
- высокая безотходность;
- высокая производительность;
- высокая точность размеров и чистота поверхности.

Основными процессами обработки металлов давлением являются: прокатка, волочение, прессование, свободная ковка, объемная и листовая штамповка. Эти процессы характеризуются простотой, высокой производительностью и безотходностью, а продукция – высоким качеством.

6.1. Прокатка металлов

Прокатка – процесс обжатия заготовки между вращающимися валками с целью придания ей требуемой формы и размеров. Различают три способа прокатки: продольную, поперечную и поперечно-винтовую (косую) (рис. 65).

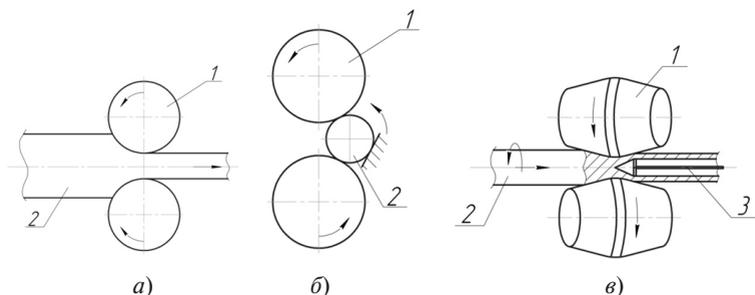


Рис. 65. Основные виды прокатки:
а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая;
1 – валки; 2 – заготовка; 3 – дорн

Основным способом, при помощи которого производится до 90 % всего проката в стране, является продольная прокатка,

в процессе которой металл подвергается обжатию между вращающимися навстречу друг другу параллельными валками. При этом уменьшается высота сечения, увеличивается длина и в некоторой степени ширина прокатываемой полосы.

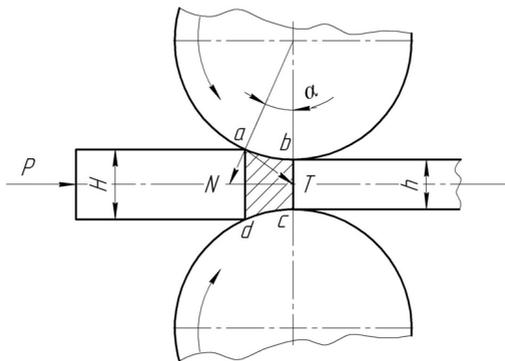


Рис. 66. Условие осуществления прокатки

Процесс прокатки осуществляется следующим образом. Полоса высотой H силами трения, возникающими между ее поверхностью и поверхностями валков, втягивается в зазор между валками, величина которого меньше начальной высоты полосы, и обжимается до требуемого размера. Разность между начальным H и конечным h размерами полосы называется абсолютным обжатием (рис. 66). В процессе прокатки перемещение заготовки между валками обеспечивается наличием контактного трения между обрабатываемой заготовкой и валками. При этом прокатка возможна только в том случае, если угол α , называемый углом захвата, не превышает некоторой величины, определяемой коэффициентом трения f между металлом и валками.

Для захвата и перемещения заготовки необходима определенная величина силы трения T :

$$T > N, \quad (34)$$

где N – нормальная сила.

Условия прокатки опереляются горизонтальными составляющими этих сил:

$$T \cos \alpha > N \sin \alpha, \quad (35)$$

Учитывая, что $T = fN$, получим

$$f > \operatorname{tg} \alpha. \quad (36)$$

С целью увеличения разового обжатия, а следовательно, производительности прокатного стана, прокатку желательнее вести с максимальными углами захвата. При горячей прокатке угол захвата составляет $15\text{--}24^\circ$, а при холодной прокатке — $5\text{--}8^\circ$.

Контакт металла с валками происходит по дуге ab , называемой *дугой захвата* (см. рис. 66). Металл деформируется в зоне, ограниченной плоскостями входа ad и выхода bc и дугами захвата. Этот объем металла называется *очагом* или *зоной деформации*.

Одновременно с уменьшением сечения полосы и увеличением ее длины наблюдается некоторое увеличение ее поперечных размеров, называемое *уширением*. Величина уширения зависит от величины обжатия, диаметра валков, коэффициента трения и др. Уширение влияет на точность и качество прокатываемых профилей. При малой величине уширения не будет происходить в достаточной мере заполнения калибра, и возникает большая вероятность образования не полностью оформленного профиля изделия. Если же уширение будет значительно больше расчетного, то будет происходить образование излишка металла по ширине заготовки. Он будет выдавливаться в зазор между валками и образовывать заусенцы.

Прокатка характеризуется непрерывностью воздействия инструмента на металл и, как следствие, отличается весьма высокой производительностью. Во многих случаях она позволяет получать заготовки, приближающиеся по форме и размерам к готовым изделиям, а для таких отраслей экономики, как строительство и транспорт, прокаткой получают готовые элементы конструкций. Современное прокатное производство не только дает продукцию в виде заготовок большой длины и разнообразного профиля изделия, но и позволяет получать штучные заготовки с минимальными припусками на механическую обработку.

Прокат характеризуется профилем — формой поперечного сечения проката. Совокупность форм и профилей изделий, полученных прокаткой, называется сортаментом.

Сортамент стального проката можно разделить на следующие основные группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубы и профиль специального назначения.

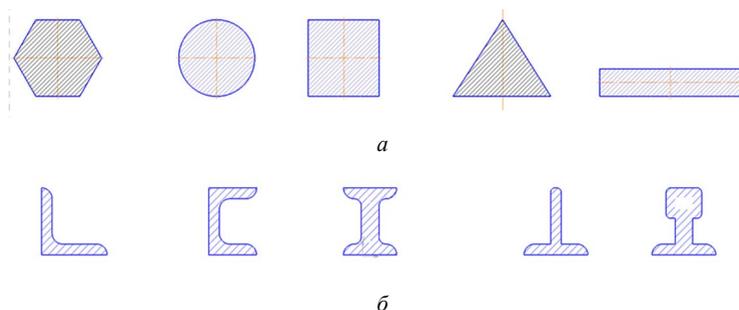


Рис. 67. Форма поперечного сечения сортового проката:
a – группа простого сортового проката; *б* – группа фасонного сортового проката

Наиболее обширной является группа сортового проката. Она подразделяется на две подгруппы: простой и фасонный профиль. Форма поперечного сечения простого проката может быть круглой, квадратной, шестигранной и полосовой (рис. 67, *a*). Типичными представителями фасонного профиля являются угловая сталь, швеллеры, двутавры и рельсы (рис. 67, *б*).

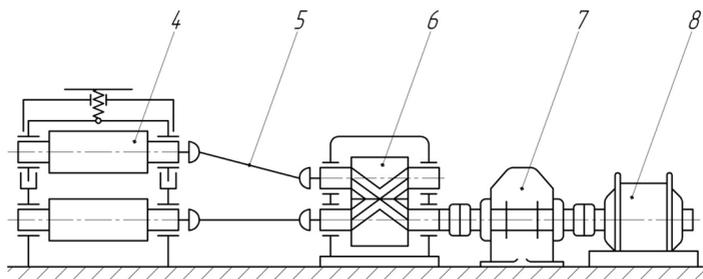
Листовой прокат делится на тонколистовую и толстолистовую сталь. Тонколистовая сталь имеет толщину менее 4 мм, а толстолистовая сталь – более 4 мм.

Для массового производства изготавливаются специальные виды проката: профили транспортного и сельскохозяйственного назначения, бандажи, колеса, периодические профили и др.

Оборудованием для прокатки являются прокатные станы (рис. 68). Прокатный стан – совокупность рабочих клеток, обеспечивающих необходимые размеры и форму проката. Прокатный стан состоит из следующих основных узлов и механизмов: одной или нескольких рабочих клеток с валками, электродвигателя, моторной муфты, редуктора, коренной муфты, шестеренной клетки и шпинделей. Эти механизмы являются элементами главной линии прокатного стана.



a



б

Рис. 68. Прокатный стан:
a – внешний вид (wikipedia.org); *б* – схема

Рабочей клетью называется комплект валков со станиной и специальным механизмом, регулирующим зазор между валками. Она является основной частью прокатного стана, предназначенной для деформирования металла. Рабочая клеть состоит из двух станин, устанавливаемых на фундаменте. Станины скрепляются между собой стяжными болтами и поперечиной. В рабочей клетке располагаются прокатные валки, подушки с подшипниками для валков и вспомогательные механизмы для подъема и установки валков.

Прокатные валки, являющиеся деформирующим инструментом для прокатки, предназначены для обжатия заготовки и придания ей требуемой формы. В зависимости от назначения они могут изготавливаться из отбеленного чугуна, литой или ковanej стали.

Валки состоят из рабочей части, называемой бочкой, и шеек, которые служат опорой для подшипников, а также трещов, которые предназначены для соединения со шпинделями (рис. 69). Они могут быть цилиндрическими гладкими, тогда прокат получается в виде полос и листов. Они также могут быть с фигурными вырезами различной формы, тогда получается профильный прокат – квадрат, круг, шестигранник или рельс. Фигурные вырезы на валках называются ручьями. Ручьи на верхнем и нижнем валках образуют калибры, которые могут быть открытыми и закрытыми.

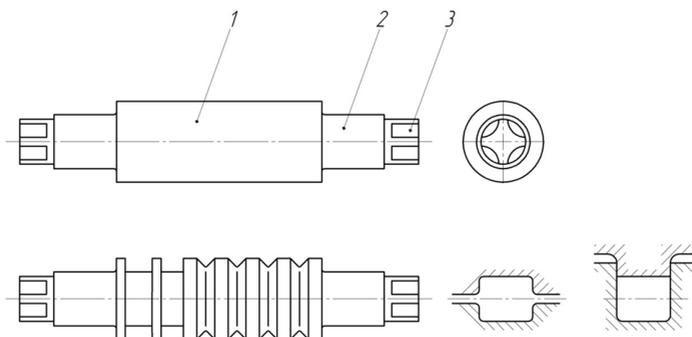


Рис. 69. Инструмент для прокатки – гладкий и ручьевого валки:
1 – рабочая часть – бочка; 2 – шейки; 3 – трещы

Шестеренная клетка служит для разделения крутящего момента по отдельным валкам, если привод осуществляется от одного общего двигателя.

Помимо перечисленных механизмов, входящих в главную линию прокатного стана, имеется ряд вспомогательных механизмов, предназначенных для транспортировки исходного материала к рабочей клетке, кантовки, уборки после прокатки, резки, правки, сворачивания в рулон и т. п.

Прокатные станы разделяются по количеству и расположению валков в рабочей клетке, по назначению и расположению рабочих

клетей. По первому признаку различают клетки дуо, имеющие два горизонтальных валка, клетки трио, имеющие три валка, клетки кварто, имеющие два опорных валка и два рабочих валка меньшего диаметра, клетки многовалковые, имеющие два рабочих валка небольшого диаметра и большое количество опорных валков, и клетки универсальные, в которых одновременно имеются и горизонтальные, и вертикальные валки.

Клетки дуо могут быть нереверсивными и реверсивными, то есть с меняющимся направлением вращения валков после каждого пропускания между ними металла. Нереверсивные клетки используются при прокатке тонких листов и лент, а реверсивные — при прокатке профилей крупных размеров.

В клетки трио прокатка производится в обе стороны без реверсирования валков. В одну сторону прокатка идет между нижним и средним валками, в другую — между средним и верхним. Эти клетки требуют установки дорогостоящих подъемных столов.

Клетки кварто широко применяются для горячей прокатки толстых и тонких листов, а также для холодной прокатки тонких листов и лент (рис. 70). Они позволяют получить большую точность по толщине листа.



a

б

Рис. 70. Прокатка:
a — холодная (it-stal.ru); *б* — горячая (Pixabay)

Многовалковые клетки применяются для холодной прокатки тончайшей ленты.

По назначению прокатные станы разделяются на два основных типа:

- станы для прокатки полупродукта, который является исходной заготовкой для сортового проката и для кузнечного производства;
- станы для выпуска готовых изделий.

К первому типу относятся блюминги и слябинги с диаметром валков 800–1400 мм, предназначенные для прокатки слитков весом от 2 до 25 т в заготовку крупного сечения. На блюмингах получают блюмы – крупносортной прокат квадратного сечения, который является заготовкой для производства сортового проката. Блюмы имеют сечения 200 × 200, 350 × 350 мм и т. д. На слябингах получают слябы – крупносортной прокат прямоугольного сечения, который является заготовкой для производства листового проката. Слябы имеют толщину 65–300 мм и ширину 600–1600 мм.

Ко второму типу относятся:

- рельсобалочные станы, предназначенные для производства рельсов и тяжелых балок;
- проволочные станы для прокатки проволоки;
- листовые и трубные станы, станы для специальных видов проката.

Станы одного и того же назначения могут различаться как по конструкции, так и по расположению рабочих клетей. Они могут быть одноклетевыми и многоклетевыми. В последнем случае клетки могут располагаться в одну или в несколько линий, а также последовательно. Наиболее совершенными станами подобного типа являются непрерывные, длина которых меньше длины прокатываемой полосы, поэтому прокатка может выполняться в нескольких или во всех клетях одновременно.

Трубы могут выпускаться двух видов: горячекатаные и холоднокатаные бесшовные и шовные, то есть сварные. Кроме круглых труб, могут производиться шестигранные, квадратные и другой формы сечения трубы.

При производстве бесшовных труб основной операцией является прошивка слитка с образованием гильзы. Прошивка выполняется на прошивных станах с косо расположенными валками. Стальной слиток подается во вращающиеся валки, которые расположены

под углом 10° друг к другу. При такой схеме нагружения в заготовке создаются радиальные растягивающие напряжения. Они ослабляют металл и облегчают прошивку отверстия оправкой. Далее прошитая гильза поступает либо на непрерывный трубопрокатный стан, либо на стан пилигримовой прокатки.

Сварные трубы изготавливаются электроконтактной, газовой и электрической сваркой из формованной заготовки. При электро-сварке заготовку формуют в трубу без нагрева на формовочных непрерывных дуостанах. Заготовкой для формовки является мерная полоса – штрипс. Длина штрипса равна длине трубы, а ширина – длине окружности трубы с припуском на сварку. Формованную в трубу заготовку (рис. 71) сваривают в трубосварочном стане, где кромки заготовки сближаются и сжимаются. Ток, подводимый к заготовке, нагревает стык до температуры плавления металла.

При производстве толстостенных труб среднего и большого диаметров преимущественно применяют электродуговую сварку под слоем флюса.

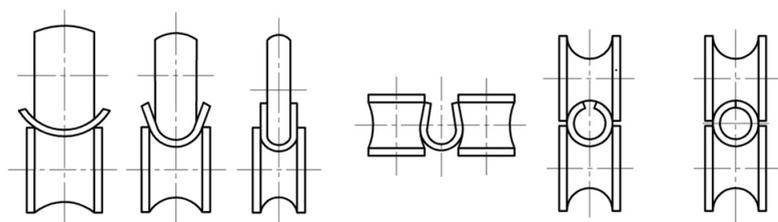


Рис. 71. Последовательность процесса формования полосы в трубу в шести клетях непрерывного стана

Технологический процесс прокатного производства содержит следующие обязательные операции: подготовка слитка, его нагрев, прокатка и отделка.

Стальные слитки, поступающие в прокатный цех, проходят операцию зачистки поверхности. В процессе зачистки происходит удаление поверхностных дефектов (плен, трещин, волосовин) путем вырубания пневматическими зубилами, выжигания ацетиленокислородным пламенем и зачистки абразивным кругом.

Нагрев многих слитков производится в колодце, а блюмов и слябов — в методических печах (рис. 72). При этом контроль режима нагрева осуществляется при помощи датчиков электронной системы слежения.

В процессе прокатки проводится автоматический контроль размеров и формы получаемого профиля. При этом особое внимание уделяется удалению окалины. В противном случае она может вдавиться в поверхность прокатываемого изделия и ухудшить его качество. Наиболее распространенным способом является гидродинамическая очистка. Для её осуществления на рабочих клетях устанавливаются форсунки для подачи воды под давлением до 100 атм.

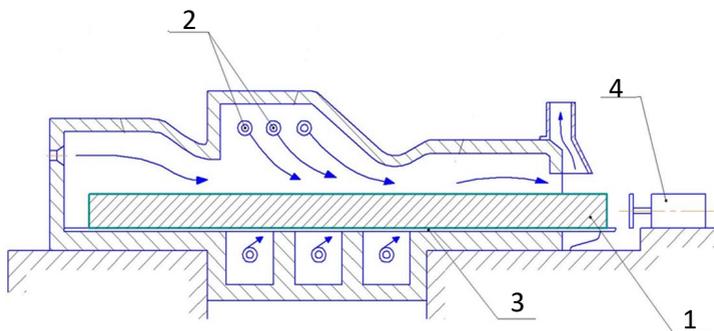


Рис. 72. Схема нагрева заготовки в методической печи:
1 — заготовка; 2 — горелки; 3 — под; 4 — толкатель

После прокатки и контроля полученные изделия режутся на мерные заготовки. При необходимости эти заготовки подвергают нормализации и отжигу для формирования необходимой структуры металла и снятия наклёпа, а также травлению для удаления окалины. Отожженный и протравленный прокат называется декапированным. Далее декапированный мерный прокат в виде заготовок направляется в машиностроительное производство, а также в виде готовых элементов конструкций на транспорт и строительство.

6.2. Прессование материалов

Прессование – это прогрессивный технологический процесс, который применяется для получения изделий сложной конфигурации из пластичных материалов путем их выдавливания из контейнера.

Прессованные изделия отличаются высокой точностью и качеством поверхности, а сам процесс – высокой производительностью.

Сущность прессования заключается в том, что металл помещают в замкнутый объем – контейнер и подвергают высокому давлению. В результате выдавливаемый через отверстие металл принимает его форму (рис. 73).

Существует два метода прессования – прямой и обратный.

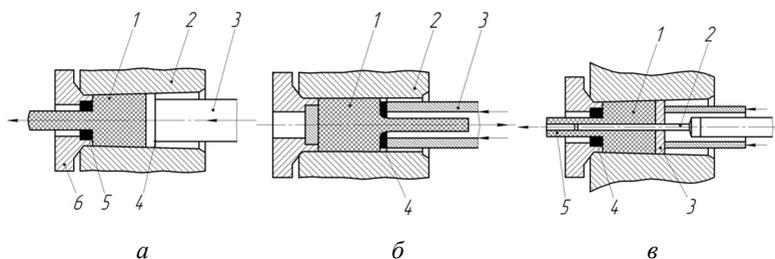


Рис. 73. Схема процесса прессования материалов:

а – прямое прессование; *б* – обратное прессование; *в* – прессование труб;
1 – пластичный металл; 2 – контейнер; 3 – шплинтон; 4 – пресс-шайба;
5 – матрица; 6 – матрицедержатель

При прямом прессовании заготовка, нагретая до определенной температуры, помещается в контейнер. С одной стороны контейнера закреплена матрица при помощи матрицедержателя. С другой стороны на заготовку давит пресс-шайба, связанная со шплинтоном. Шплинтон получает необходимое давление от плунжера пресса. Под действием этого давления металл выдавливается через отверстие матрицы. В конце процесса в контейнере остается часть металла – пресс-остаток. Этот остаток идет в отход. При обратном прессовании металла в контейнер входит не пресс-шайба, а полый пуансон с матрицей на конце. Матрица давит на заготовку и металл течет в отверстие матрицы навстречу движению пуансона. При обратном методе снижаются отходы металла на пресс-остаток, но усложняется конструкция шплинтонна.

При прессовании труб пресс-шайба выдавливает металл в зазор между матрицей и иглой. Внутренний диаметр трубы равен диаметру иглы, наружный – диаметру отверстия в матрице.

Прессование выполняется на гидравлических прессах – вертикальных и горизонтальных. Вертикальные прессы строятся усилием до 1000 т, горизонтальные – до 20 000 т. Последние рассчитаны на производство крупных профилей и труб большого диаметра. Весь процесс производства профилей и труб полностью автоматизирован и механизирован.

6.3. Волочение металлов

Волочение – процесс протягивания заготовки через постепенно сужающееся отверстие в специальном инструменте – волоке (рис. 74). Этим способом получают тончайшую проволоку диаметром от 0,005 до 0,1 мм, калибруют прутки диаметром до 100 мм и трубы диаметром 0,5–400 мм. Волочение в основном производится без предварительного нагрева металла.

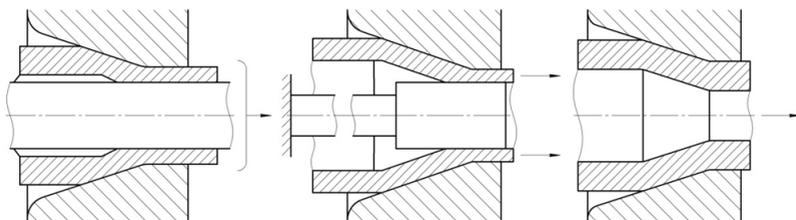


Рис. 74. Схема процесса волочения труб

При волочении поперечные размеры заготовки уменьшаются, а длина увеличивается. Размеры сечения получаются точными, а качество поверхности высоким. Отсутствуют потери металла в виде стружки. Волочением обрабатываются стали всех марок, цветные металлы и их сплавы.

Процесс волочения состоит из следующих операций:

1. Предварительная термическая обработка заготовки с целью снятия наклепа и получения необходимой структуры металла (например, отжиг при температуре 450–500 °С).

2. Заострение концов заготовки, чтобы можно было протянуть ее через отверстие волоки и захватить клещами волочильного стана.

3. Очистка от окалины механическим, химическим или электрохимическим способом. Наибольшее распространение получил химический метод, заключающийся в травлении заготовок в растворах серной, соляной кислот или в растворах смесей этих кислот. Протравленные заготовки тщательно промываются водой: сначала горячей, а затем холодной.

4. Нанесение подмазочного слоя путем желтения, меднения, фосфатирования, известкования. Подмазочный слой должен хорошо удерживать смазку и препятствовать налипанию металла на инструмент. При желтении поверхность заготовки покрывается тонким слоем гидрата окиси железа (желтого цвета). При меднении поверхность заготовки покрывается тонким слоем меди при погружении ее в раствор медного купороса. Фосфатирование представляет собой процесс получения пленки фосфата на поверхности заготовки. Полученная пленка обладает высокой пористостью, хорошо удерживающей смазку. Известкование представляет собой процесс осаждения тонкого слоя извести на поверхности заготовки при погружении ее в кипящий известковый раствор.

5. В зависимости от необходимой величины обжатия заготовки волочение проводят в один или несколько проходов.

6. Межоперационная и, если необходимо, послеоперационная термические обработки для снятия наклепа. Если проводят межоперационную термообработку, то после ее проведения повторно выполняют подготовительные операции — травление, промывку, сушку, нанесение подмазочного слоя.

7. Отделка готовой продукции: отрезание заостренных концов, разрезание на мерные изделия.

Продукция волочения может не подвергаться механической обработке, а сразу же идти к потребителю.

Волочение производится через волоки — сплошные, составные, роликовые. Волока представляет собой кольцо, которое изготавливается из инструментальной стали (для прутков и труб больших диаметров), из твердых сплавов (для профилей мелких и средних размеров) и из алмазов (для тончайшей стальной проволоки). Для увеличения прочности волока запрессовывается в стальную обойму.

При волочении ряда профилей (квадрат, шестигранник и др.) применяются составные волокни, которые значительно проще в изготовлении и отличаются универсальностью.

Волочение труб с утонением стенок выполняется на коротких неподвижных и длинных подвижных оправках, а также без оправок для уменьшения наружного диаметра труб. В последние годы получили распространение новые методы волочения: с противонатягом, с наложением вибраций, с применением ультразвука и др.

Машины для волочения называются волочильными станами. Станы подразделяются на цепные и барабанные. У первых обрабатываемый металл имеет прямолинейное движение, у вторых наматывается на барабан.

Цепные станы имеют станину, бесконечную волочильную цепь, тележку с захватами, стойку для крепления волокни, двигатель и редуктор. Вращение от электродвигателя через редуктор и звездочку передается цепи. Заостренный конец протягиваемого прутка пропускается через волоку, установленную в стойке, и захватывается захватами волочильной тележки. Тележка имеет крюк, которым она сцепляется с волочильной цепью и движется вместе с ней, протягивая заготовку через волоку.

Длина протягиваемых прутков ограничивается размерами станины и не превышает обычно 15 м. Волочение обычно проводится в автоматическом режиме на станах, обладающих тяговым усилием от 0,5 до 150 т, со скоростью 1,5–2 м/с.

6.4. Свободнаяковка

Свободнойковкой называется процесс, при котором необходимое изменение формы заготовки достигается путем ударов или нажимов бойками пресса или молота. Этот процесс применяется при производстве крупных поковок в индивидуальном и мелкосерийном производствах и в ремонтном деле. Свободнойковкой обрабатываются заготовки весом от 0,1–0,2 кг до 300 т. Исходной заготовкой для крупных и средних поковок являются слитки, а для поковок весом до 1 т – обычный сортовой прокат или прессованный металл.

Свободной ковкой достигается не только изменение формы заготовки, но и улучшение механических свойств. Наиболее значительное повышение механических свойств достигается при ковке литой заготовки (слитка), структура которой весьма неоднородна. При этом происходит заварка газовых пузырей и изменение структуры и свойств материала. Изменение структуры и механических свойств материала слитка зависит от интенсивности деформации, которая при ковке вытяжкой характеризуется степенью уковки или уковкой, равной отношению площади поперечного сечения слитка F_0 к площади сечения поковки F_1 :

$$y = \frac{F_0}{F_1}. \quad (37)$$

Величина уковки зависит от формы и назначения поволоков. Так, для получения волокнистой структуры по всему сечению слитка необходима уковка порядка 10. В то время как средняя часть слитка приобретает волокнистую структуру после уковки 3–3,5, столбчатые кристаллы при уковке 4–6 поворачиваются на угол 45° от первоначального направления.

С одной стороны, повышение степени уковки ведет к измельчению зерна, а с другой стороны – к анизотропии механических свойств, так как при увеличении степени уковки до 4–5 ударная вязкость и относительное удлинение, характеризующие пластичность металлов, в продольном направлении увеличиваются, а в поперечном уменьшаются. Для поволоков из слитков углеродистой и среднелегированной стали достаточной уковкой считается 2,5–3, для поволоков из стали карбидного класса, при ковке которых требуются размельчение карбидов и их равномерное распределение в объеме материала, требуется уковка в пределах 8–12.

При ковке заготовки из проката нет необходимости давать значительные степени уковки, так как металл уже получил значительные степени деформации. И поэтому уковка, равная 1,3–1,5, полностью обеспечивает измельчение зерна, рост которого вызван нагревом.

Таким образом, при разработке технологических процессов всегда следует учитывать изменения механических свойств, происходящие в процессековки.

Основные операции технологического процесса свободнойковки весьма разнообразны, но все они представляют собой сочетание основных кузнечных процессов. Поэтому выбор операций и определение их взаимной последовательности являются главными задачами для технолога.

Биллетирование — подготовка слитка к последующей ковке. Оно предусматривает оттяжку конца слитка для удержания заготовки в клещах манипулятора, обкатку граней для получения круглого сечения, обрубку дефектного слоя донной части слитка и устранение наружных видимых дефектов.

Обкатка граней для получения круглого сечения с параллельными образующими во избежание трещин производится при малых степенях деформации.

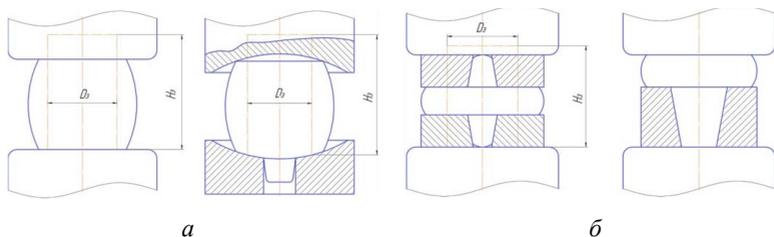


Рис. 75. Схемы осадки (а) и высадки (б) слитка

Осадка — увеличение поперечного сечения за счет уменьшения высоты слитка. Осадка, осуществляемая на части заготовки, называется высадкой. Высадка конца заготовки называется концевой, средней части заготовки — срединной. Осадка цилиндрической заготовки из слитка без хвостовика производится гладкими бойками пресса или молота (рис. 75). Для осадки заготовок с хвостовиком применяются сферические подкладные плиты (подкладные кольца), нижняя из которых имеет отверстие. Перед осадкой слиток должен быть обкатан с целью снижения гранности и конусности, равномерно прогрет до максимальной ковочной температуры.

Вытяжка предназначена для увеличения длины или ширины заготовки за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 76). Например, вытяжкой увеличивают длину поковок с удлиненной осью, таких как заготовки для шатунов.

Процесс вытяжки осуществляется путем последовательных нажатий инструмента перемещаемой вдоль оси заготовки. Инструментом для вытяжки являются плоские, закруглённые и вырезные бойки, а также обжимки, раскатки и пережимки.

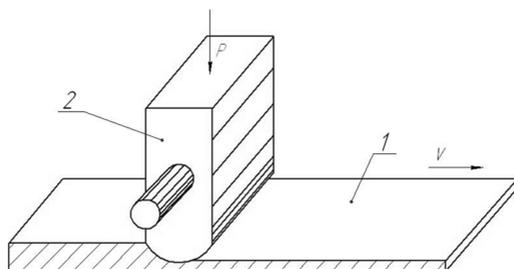


Рис. 76. Схема вытяжки заготовки:
1 – деталь; 2 – инструмент

Изготовленные вытяжкой детали имеют ярко выраженную волокнистость вдоль продольной оси, что способствует повышению прочностных характеристик изделий.

Раскатка – увеличение внутреннего и наружного диаметров прошивой заготовки за счет уменьшения её толщины (рис. 77). Заготовка, нагретая до температуры 790–820 °С, помещается на опорный ролик и деформируется нажимным роликом при их вращательном движении.

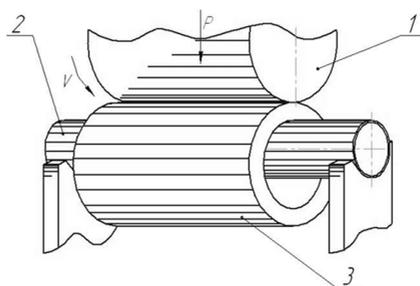


Рис. 77. Схема раскатки заготовки:
1 – нажимной ролик; 2 – опорный ролик; 3 – заготовка

Прошивка – это процесс получения сквозных и глухих отверстий и углублений в заготовке (рис. 78). Она проводится на прошивных

прессах сквозным или пустотелым металлическим инструментом – прошивнем. Сущность процесса заключается в проталкивании инструмента через обрабатываемое отверстие.

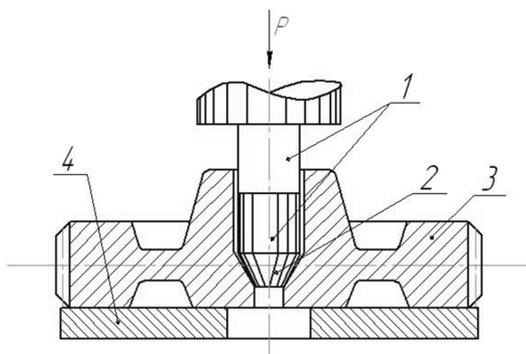


Рис. 78. Схема прошивки отверстия ступицы зубчатого колеса на гидравлическом прессе: 1 – прошивень; 2 – надставки; 3 – зубчатое колесо; 4 – подкладное кольцо

Закручивание – поворот одной части заготовки относительно другой под определенным углом вокруг общей оси. Закручивание применяется при производстве поковок специальной формы – коленчатых валов и др. Инструментом для закрутки служат вилки и воротки.

6.5. Объемная штамповка

Объемная штамповка (горячая и холодная) – метод обработки, при котором принудительное перераспределение металла заготовки производится в полости инструмента, называемого штампом (рис. 79). Это производительный и дешевый процесс, который позволяет получать поковки сложной формы и высокого качества. Они после термической обработки обладают самыми высокими механическими свойствами, которые можно придать металлу данного химического состава.

Существует много разновидностей этого процесса, позволяющих получить поковки весом от десятков граммов до нескольких тонн.

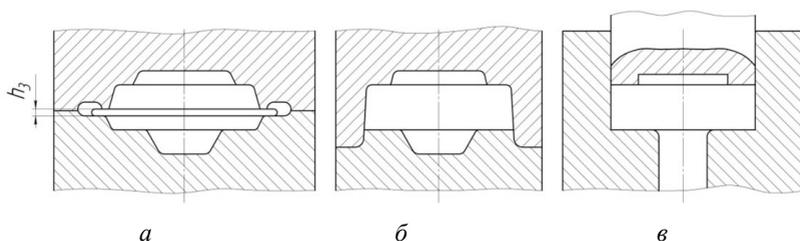


Рис. 79. Схемы горячей объемной штамповки:
а – в открытых штампах; *б, в* – в закрытых штампах

Горячая объемная штамповка значительно превосходит по производительности свободную ковку, обеспечивает получение поковок более точных размеров с минимальными припусками по обрабатываемым поверхностям и более чистой поверхностью и, таким образом, дает значительную экономию металла и снижение трудоемкости обработки.

Наиболее широко штамповка распространена в машиностроительной промышленности, где производство носит крупносерийный и массовый характер. С ростом техники кузнечно-штамповочного производства кузнечные цехи начинают не только поставлять заготовки для окончательной обработки, но также выпускать готовые детали и выполнять завершающие операции после механической обработки (наката резьбы, шлицев и т. д.).

Существует два основных метода объемной штамповки: штамповка в открытых штампах и штамповка в закрытых штампах.

Штамповка в открытых штампах предусматривает выход части металла заготовки в заусенечную канавку. Толщина заусенца в процессе штамповки уменьшается и при достижении определенных размеров способствует заполнению трудно заполняемых частей штампа. При штамповке в открытых штампах из заготовки с размерами малой точности получают поковки высокой точности за счет различного объема заусенца. Заусенец подлежит обрезке в обрезных штампах.

Штамповка в закрытых штампах не предусматривает образования заусенца. Образующийся вследствие затекания металла в зазор по месту разъема заусенец имеет незначительные размеры и посто-

янную толщину. Для штамповки в закрытых штампах требуются заготовки вполне определенного объема. Она применяется для поковок простой формы, в основном имеющих форму тел вращения.

В зависимости от типа производства, наличия оборудования и инструментальной базы различают следующие способы штамповки.

Штамповка в подкладных штампах осуществляется на ковочном оборудовании (пневматический, паровоздушный молот). Штамп состоит из двух частей, перемещающихся друг относительно друга по направляющим штырям; ручей соответствует фигуре поковки с заусенцем. Откованную свободной ковкой заготовку укладывают в штамп, который устанавливают на нижний боек молота и ударами по верхнему штампу производят штамповку. При этом методе окалина из-за невозможности ее удаления наштамповывается в поковку и способствует быстрому изнашиванию бойков молота или пресса.

Одноручьевая штамповка ковальной заготовки производится в одном окончательном ручье. Штамп не имеет направляющих, верхняя часть его крепится в бабе молота, нижняя — в подштамповой плите. Совпадение обеих половин штампа обеспечивается направляющими молота. Окалина сбивается при ударах и выдувается сжатым воздухом.

Многоручьевая штамповка — это процесс превращения заготовки в готовую поковку в одном многоручьевом штампе на паровоздушных штамповочных молотах, механических ковочных прессах (МКП), горизонтально-ковочных машинах (ГКМ).

Штамповка наиболее широко распространена в машиностроительной промышленности, где производство носит крупносерийный и массовый характер. Рост техники кузнечно-штамповочного производства позволяет наряду с заготовками выпускать готовые детали и выполнять после механической обработки завершающие операции, такие как накатка резьбы или шлицев.

6.6. Листовая штамповка

Холодная листовая штамповка — это процесс изготовления плоских и объемных тонкостенных изделий из листов, полос или лент с помощью штампов на прессах или без их применения. Толщина стенки изделий составляет в среднем 3 мм. Штамповка характеризуется высокой производительностью, стабильностью качества и точности изделий. Она характеризуется также большой безотходностью металла и низкой себестоимостью изготавливаемых изделий. Процесс листовой штамповки обычно полностью автоматизирован.

Основными процессами листовой штамповки являются разделительные и формоизменяющие операции. В результате разделительных операций одна часть заготовки отделяется от другой по заданному контуру.

К разделительным операциям относятся отрезка, вырубка и пробивка.

Отрезка — это процесс отделения одной части заготовки от другой по незамкнутому контуру. Вырубка — это процесс отделения одной части заготовки относительно другой по замкнутому внешнему контуру. Пробивка — это процесс образования в заготовке сквозных отверстий.

В результате формоизменяющих операций заготовка изменяет свои форму и размеры. К формоизменяющим операциям относятся гибка, вытяжка, правка и отбортовка.

Гибка — это процесс превращения плоской заготовки в изогнутое профильное изделие. Вытяжка — это процесс превращения плоской заготовки в полые изделия. Правка — это процесс выравнивания неровной поверхности изделия между равными и фасонными поверхностями верхней и нижней частей штампов. Отбортовка — это процесс образования борта по внутреннему или наружному контуру листовой заготовки.

Листовой материал для холодной штамповки поставляется и используется в виде полос, листов и лент. В настоящее время при холодной штамповке существует тенденция к преимущественному использованию ленты из рулонной низкоуглеродистой стали. Это позволяет за счет снижения концевых отходов повысить

коэффициент использования металла. Это также облегчает механизацию и автоматизацию штамповочных операций. Кроме этого, использование рулонного металла повышает производительность штамповки.

Разделительным и формоизменяющим операциям предшествует раскрой материала (рис. 80).

Под раскроем материала следует понимать определение размеров заготовки в виде полосы, листа или ленты, а также взаимного расположения на ней штампуемых изделий.

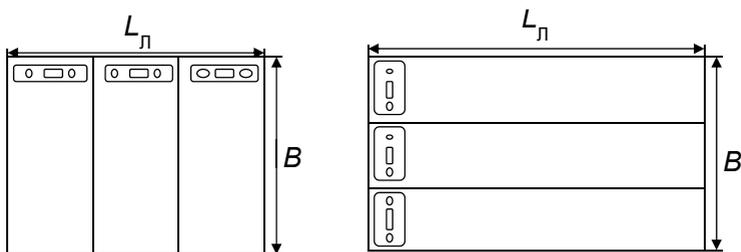


Рис. 80. Схема взаимного расположения штампуемых изделий на листе: $L_{\text{л}}$ — длина листа; B — ширина листа

Под рациональным раскроем подразумевается такой раскрой, который при данных условиях производства позволяет получить заготовку с минимально возможным расходом материала.

При раскрое листа на полосы следует руководствоваться следующими основными правилами:

1. При равных коэффициентах использования материала целесообразней производить продольный раскрой, так как при этом сокращается число резцов.

2. Желательно детали располагать большей стороной поперек полосы. Это сокращает число резцов, уменьшает величину подачи при штамповке, а также снижает потери на концевые отходы.

После раскроя листа производится вырубка заготовок. Технологическая операция вырубки заготовки по контуру детали с одновременной пробивкой отверстий основана на отделении одной части материала от другой. Усилие вырубки зависит от толщины материала и его сопротивления срезу. Далее производится гибка заготовки. Гибка листового материала представляет собой процесс упругопла-

стической деформации, которая является разнонаправленной для разных волокон изгибаемой заготовки (рис. 81).

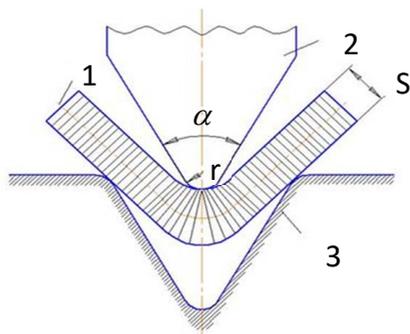


Рис. 81. Схема процесса гибки листовой заготовки:
1 – нейтральный слой; 2 – пуансон; 3 – матрица

С внутренней стороны зоны сгиба волокна заготовки претерпевают сжатие, а с наружной – растяжение. Усилие гибки определяется из равенства изгибающих моментов и внутренних сил в изгибаемой заготовке. При гибке в штампах происходит изменение кривизны заготовки сразу на нескольких поверхностях. При этом некоторые поверхности остаются прямолинейными.

Выводы

1. Обработка давлением, в основе которой лежит пластическая деформация металлов, позволяет получать готовые изделия, которые не требуют механической обработки.

2. Разнообразие процессов обработки металлов давлением обусловлено широкой номенклатурой изделий из разнообразных конструкционных материалов.

3. Процессы обработки металлов давлением характеризуются простотой, высокой производительностью и безотходностью, а продукция – высоким качеством.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое прокатка?
2. Для чего используется ковка?
3. Какой вид обработки давлением применяется для изготовления проволоки?
4. Какие операции холодной листовой штамповки относятся к формоизменяющим?
5. Какой технологический процесс применяется для получения изделий сложной конфигурации из пластичных металлов путем их выдавливания из контейнера?
6. Как называется процесс превращения плоской заготовки в полые изделия?
7. Что такое волочение?
8. Чем отличается холодная обработка давлением от горячей?
9. Что такое прессование?
10. Какая характеристика заготовки не изменяется при обработке давлением?

7. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

7.1. Общее понятие о проектировании технологических процессов изготовления деталей

Технологический процесс изготовления деталей – это совокупность технологических операций, направленных на превращение исходной заготовки в готовое изделие, которое должно соответствовать по качеству и точности техническим требованиям.

Технологический процесс изготовления деталей является частью производственного процесса, представляющего совокупность всех этапов, которые проходят полупродукты (заготовки) на пути их превращения в изделия. Он включает в себя подготовительные и сопутствующие процессы: материально-техническое снабжение, сборку узлов и др.

Для осуществления технологического процесса необходимо применение средств технологического оснащения, которые включают технологическое оборудование, технологическую оснастку и режущий инструмент.

Технологическое оборудование – это средства производства, необходимые для выполнения операций по обработке заготовок (металлорежущие станки, прессы, термические печи и т. п.).

Технологическая оснастка – это вспомогательные устройства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенных операций (приспособления для закрепления заготовки и режущего инструмента, контрольные приспособления и т. п.).

Режущий инструмент – это орудия производства, используемые для осуществления процесса резания материала заготовок на станках (резцы, фрезы, сверла и т. п.).

Режущие инструменты имеют много разновидностей, которые определяются разными признаками. Их характеристики определены государственными стандартами.

По способу обработки различают следующие лезвийные режущие инструменты:

Резец – однолезвийный инструмент, предназначенный для обработки заготовок точением.

Фреза – многолезвийный инструмент, предназначенный для обработки фрезерованием плоских поверхностей, уступов, пазов и др.

Сверло – многолезвийный инструмент, предназначенный для получения отверстий осевой обработкой.

Метчик и *плашка* – многолезвийный инструмент, предназначенный для нарезания внутренней и внешней резьбы.

Протяжка – многолезвийный инструмент, предназначенный для обработки преимущественно отверстий с разнообразной формой поперечного сечения и реже для обработки плоских поверхностей.

В зависимости от назначения различают следующие виды технологических процессов:

Единый технологический процесс – технологический процесс изготовления изделия одного наименования, типоразмера и исполнения, независимо от типа производства.

Типовой технологический процесс – технологический процесс изготовления группы изделий с общими конструктивными и технологическими признаками. Он имеет единство содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов.

Групповой технологический процесс – технологический процесс изготовления группы изделий с разными конструктивными, но общими технологическими признаками.

Технологической операцией называется часть технологического процесса, которая выполняется на одном рабочем месте.

Технологическим переходом называется законченная часть технологической операции, которая характеризуется постоянством режима обработки, применяемых средств технологического оснащения и обрабатываемых поверхностей заготовки. В результате каждого перехода с обрабатываемой поверхности снимается определенный припуск при однократном перемещении режущего инструмента относительно заготовки.

К технологической операции относится понятие «установ». Установ (установка) – это часть технологической операции, которая выполняется при неизменном положении обрабатываемой заготовки.

Целью проектирования технологических процессов изготовления деталей является выбор наиболее рациональной технологической цепочки операций, которая обеспечивает получение качественных изделий при наименьшей себестоимости.

Все большее распространение получает система автоматизированного проектирования технологических процессов. Переход от традиционных методов разработки технологических процессов к автоматизированным методам проектирования позволяет повысить качество, сократить сроки проектирования и повысить производительность труда инженеров-технологов, которые заняты разработкой технологических процессов.

Исходными данными для разработки технологического процесса изготовления является базовая, руководящая и справочная информация.

В состав базовой информации входят размер и срок выполнения программного задания, комплект технической документации на сборочные единицы, рабочие чертежи и технические требования на исходную заготовку.

Рабочие чертежи и технические требования на исходную заготовку должны содержать сведения о размерах детали, требования к точности ее обработки, а также сведения о марке материала и состоянии поверхностного слоя, его твердости и требуемой шероховатости поверхности. Совокупность этих данных позволяет правильно назначить способы изготовления и последовательность механической обработки.

Руководящая информация включает документы, регламентирующие правила разработки технологических процессов изготовления, действующие в отрасли и на предприятии. Например, отраслевые стандарты, документация на типовые технологические процессы и другие нормативные документы.

В состав справочной информации входят данные, необходимые для проектирования технологического процесса. Например, каталоги деталей и сборочных единиц, справочники прогрессивных видов обработки, способов изготовления и упрочнения и других прогрессивных средств технологического оснащения, альбомы планировок производственных участков.

В настоящее время существуют следующие виды обработки:

1. Обработка резанием — это обработка, связанная с удалением слоя материала с исходной заготовки режущим инструментом. Обработка резанием в зависимости от применяемого инструмента подразделяется на лезвийную и абразивную обработку. К лезвийной обработке относятся точение, фрезерование, зубонарезание, сверление и др. К абразивной обработке относятся шлифование, суперфиниширование, хонингование и др.

2. Обработка давлением — это обработка, не связанная с удалением материала с исходной заготовки. В ее основе лежит пластическая деформация металлов, обладающих достаточной пластичностью. Эта деформация приводит к требуемому изменению размеров и формы изделий при одновременном упрочнении металла.

3. Термическая и химико-термическая обработка — это обработка, связанная с формированием необходимой структуры и физико-механических свойств материала изделия. Эти виды обработки в процессах изготовления деталей представляют собой совокупность операций нагрева с заданной скоростью, требуемой выдержки и последующего охлаждения с регламентированной скоростью.

4. Электрофизическая и электрохимическая обработка — это виды обработки, которые основаны на действии электрического тока. Они преимущественно применяются для труднообрабатываемых материалов.

5. Лучевая обработка — это обработка, основанная на использовании излучения от концентрированных источников энергии.

Проектирование технологических процессов изготовления деталей можно разбить на три взаимосвязанных этапа:

1. Собственно процедура проектирования технологических процессов изготовления деталей.

2. Изготовление опытной партии деталей, их подконтрольная эксплуатация, испытание и оценка надежности изделий.

3. Совершенствование технологий и организации технологических процессов по результатам подконтрольной эксплуатации деталей опытной партии с целью повышения долговечности, если ресурс их недостаточен.

Критериями при оценке разработанного технологического процесса являются стоимость и получаемое качество детали. Качество детали в общем случае может быть оценено прогнозируемым ресурсом.

На технологический процесс изготовления деталей разрабатывают технологическую документацию. Она представляет собой совокупность документов, необходимых для выполнения технологических процессов изготовления отдельных деталей и сборочных единиц.

Технологический процесс изготовления деталей может быть описан в разной степени детализации. Описание осуществляется в следующих документах: маршрутная карта (при кратком описании), операционная карта (при более полном описании), технологическая карта процесса (при подробном описании).

Маршрутная карта — сокращенное описание маршрутов движения заготовки в определенной последовательности от одной технологической операции к другой с целью получения требуемых параметров точности размеров и качества поверхностного слоя изделия. В карте устанавливается перечень и последовательность технологических операций, тип оборудования, на котором производится обработка, применяемая оснастка, укрупненная норма времени без указания технологических переходов и параметров режима обработки.

Операционная карта — более детальное описание технологического процесса с указанием перечня технологических переходов, средств технологического оснащения и применяемых режимов обработки.

Технологическая карта — документ, в котором технологический процесс описан с высокой степенью детализации.

Отличительной особенностью современного машиностроения является существенное ужесточение точностных характеристик деталей и повышение качества поверхностного слоя. Это вынуждает технологов эффективнее решать технологические задачи, применяя инновационные разработки. Поэтому при проектировании технологических процессов изготовления деталей необходимо учитывать современные тенденции в развитии технологий.

Построение эффективного технологического процесса изготовления изделий невозможно без современных технологий. Технологии предусматривают закономерности построения технологических процессов, которые обеспечивают заданную точность и качество обработки изделий при наименьшей их себестоимости. В этой связи они должны базироваться на обобщенном опыте получения материалов, металлообработки и на новейших достижениях науки и техники. Применение в процессе изготовления того или иного технологического способа обработки обеспечивает новое состояние заготовки, приближая ее параметры качества к некоторым их оптимальным значениям, соответствующим условиям эксплуатации. При этом количество используемых технологических способов применительно к конкретной обрабатываемой поверхности определяется по принципу необходимости и достаточности с точки зрения достижения требуемой совокупности показателей качества.

Технология машиностроения — это совокупность приемов и способов механической, термической и другой обработки заготовок и сборки изделий.

В современном машиностроении технологии подразделяют на высокие и низкие. Высокие технологии (от англ. *high technology, high tech*) — достаточно сложные технологии, часто включающие электронные системы, используемые для управления разнообразными процессами. Низкие технологии (от англ. *low technology, low tech*) — простые технологии, применяемые на протяжении длительного времени для производства предметов первой необходимости.

Переход к использованию высоких технологий и соответствующей им техники является важнейшим звеном научно-технического прогресса на современном этапе развития производства. К категории высоких технологий относят новые, прогрессивные и наукоёмкие технологии, преимущественно используемые в области техники и промышленности. К этой категории также относят технологии, реализующие технологический процесс на предприятиях без участия человека или при минимальном его участии. Причем чем меньше участие человека в технологическом процессе, тем выше технология.

Проектирование технологических процессов изготовления деталей осуществляют в определенной последовательности.

Вначале анализируют исходную информацию для разработки технологического процесса изготовления. Для этого знакомятся с назначением и конструкцией изделия, определяют принцип его работы. Далее исследуют условия нагружения изделия во время эксплуатации и определяют возможный вид и характер изнашивания. Изучают технические требования к обработке и эксплуатации изделия.

На этом этапе большое внимание уделяют анализу технологичности конструкции детали. При этом анализируют рабочий чертеж детали для определения:

- достаточности графической информации о детали (видов, разрезов, сечений и т. д.);
- достаточности и правильности простановки размеров, величин шероховатостей, погрешностей формы и взаимного расположения поверхностей и т. д.;
- наличия сведений о материале детали, покрытиях, ее массе, термообработке и др.

Далее оценивают возможность упрощения конструкции детали. При этом определяют соответствие стандарту конструктивных элементов детали (фасок, канавок и др.). Устанавливают возможность применения высокопроизводительных методов обработки.

Предварительное ознакомление осуществляют с учетом сведений о программе выпуска изделий. В результате анализа составляют перечень справочной информации, которая потребуется для разработки технологического процесса изготовления.

Следующим этапом является выбор типового технологического процесса изготовления. Перед тем как приступить к разработке технологического процесса изготовления детали, необходимо изучить и проанализировать накопленный опыт. Он может быть представлен в виде существующих типовых технологических процессов изготовления подобных деталей. В случае технологического или конструктивного подобия детали тем, на которые существуют типовые технологические процессы изготовления, необходимость в полной разработке технологического процесса отпадает. Следует только

доработать типовые процессы по определенным размерам обрабатываемых поверхностей конкретного изделия. Типовой процесс определяет полную структуру операций, которые направлены на изготовление конкретной совокупности деталей. Он включает перечень и последовательность операций, структуру каждой операции, логические зависимости вхождения операций в маршрут обработки.

В общем виде типовой технологический процесс следует рассматривать как унифицированный технологический процесс, который может быть использован применительно к конкретной детали как одной из совокупности подобных изделий. Таким образом, определение принадлежности детали к определенной классификационной группе является первым этапом рационального выбора базовых способов и технологии изготовления.

После этого идет этап разработки исходной заготовки и выбора метода ее получения.

Вначале разрабатывают рабочий чертеж заготовки по чертежу изделия. Определяют технические требования к точности заготовки и качеству её поверхности и поверхностного слоя. Выбирают метод получения заготовки, исходя из сформулированных технических требований.

Далее составляют технологический маршрут изготовления.

Описанию технологического процесса изготовления предшествует мероприятие по определению последовательности технологических операций. Последовательность операций можно уточнить по типовому технологическому процессу. После этого разрабатывают технологический маршрут изготовления.

Основная задача составления технологического маршрута — определить правильность выбранных способов механической и термической обработки исходной заготовки. При этом также определяют состав технологического оборудования и выявляют технологическую оснащенность данного предприятия, его способность реализовать разработанный вариант технологического процесса изготовления.

На базе принятого технологического маршрута изготовления производят проектирование технологического процесса. Оно предполагает подробную разработку состава операций и последовательности переходов, выбор технологического оборудования для каждой

операции, а также определение потребности и в случае необходимости заказ технологической оснастки, приспособлений и инструмента. Результатом проведенной работы является составление технологических карт процесса изготовления изделий.

Затем производят нормирование технологического процесса изготовления. В процессе нормирования технологического процесса решают две основные задачи: устанавливают нормы времени и нормы расхода материалов на выполнение технологических операций. Сначала определяют исходные данные, необходимые для расчета этих норм. Далее производят расчет и нормирование затрат труда на выполнение технологического процесса. А также расчет норм расхода материалов, необходимых для реализации процесса. Определяют уровень сложности выполняемых работ и осуществляют обоснование квалификации исполнителей работ по каждой технологической операции.

Важным этапом является определение требований техники безопасности.

Целью этого этапа является разработка требований техники безопасности и производственной санитарии применительно к конкретному производству. При этом принимаются во внимание уровень вибраций, шума, загазованности, наличие опасных и вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Разрабатывают мероприятия и средства обеспечения устойчивости экологической среды. Разработку требований техники безопасности производят на основании системы стандартов безопасности труда, инструкций по технике безопасности и производственной санитарии.

Для вновь поступающих на предприятие рабочих разрабатываются инструкции по технике безопасности. Инструктаж проводится с целью ознакомления с устройством оборудования, организацией рабочего места, безопасными приемами работы, устройством и применением защитных приспособлений.

Участки, на которых производится сварка деталей, должны быть оборудованы с соблюдением правил по технике безопасности: стены должны быть построены из огнеупорных материалов или окрашены огнестойкой краской. Сварочные посты должны располагаться в отдельных кабинах и иметь местную вытяжку.

Следующим этапом является экономическое обоснование эффективности технологического процесса изготовления деталей. Расчет экономической эффективности предоставляет возможность выбрать требующий минимальных затрат для его реализации вариант технологического процесса изготовления деталей. Необходимо отметить, что существенное влияние на экономические показатели технологии изготовления деталей оказывает программа выпуска деталей. При этом все расходы на выполнение технологического процесса изготовления целесообразно подразделять на переменные, зависящие от программы выпуска, и постоянные, не зависящие от программы выпуска деталей. Расчет экономической эффективности делают на основании существующих методик, принятых в отрасли или на предприятии.

В завершение разработанную технологическую документацию подвергают нормоконтролю. Основной его целью является повышение уровня типизации технологических процессов изготовления, унификации технологических документов.

7.2. Токарная обработка в процессах изготовления деталей

Технология механической обработки заготовок включает выбор способов, оборудования, инструмента, режимов и условий обработки. Разработка технологии механической обработки является сложной задачей, от решения которой зависит качество изготовленных изделий. В свою очередь, качество обработки во многом зависит от важного свойства металлов – обрабатываемости. Под обрабатываемостью понимают технологическое свойство материала, которое определяет его способность подвергаться резанию.

Механической обработке посадочных поверхностей деталей уделяется особое внимание, так как от точности их обработки во многом зависит качество сборки узлов и, соответственно, долговечность машин. Диаметральные размеры посадочных шеек деталей обычно изготавливают по 6–7 качеству, при этом шероховатость обработанной поверхности находится в пределах $R_a = 0,16–0,63$ мкм. Допуск на погрешности формы посадочных поверхностей, то есть

на отклонение от круглости, цилиндричности, прямолинейности, назначают в долях допуска на диаметральный размер:

$$\delta = \beta \cdot T_i, \quad (38)$$

где δ — допуск на погрешности формы; β — доля допуска на диаметральный размер; T_i — допуск на диаметральный размер.

Для точных цилиндрических деталей доля допуска на диаметральный размер β в большинстве случаев не превышает 0,3. Допустимые радиальные биения посадочных поверхностей относительно технологической базы и соосность поверхностей не должны превышать 0,01–0,03 мм.

Исходя из технических требований, предъявляемых к чистоте поверхности и точности размеров детали, назначают тот или иной способ обработки резанием. Обработку резанием можно проводить точением, шлифованием, фрезерованием и др.

Точность и качество изготовленной детали во многом зависят от состояния технологических баз.

Технологическая база — это поверхности, линии, точки, принадлежащие детали, которые позволяют однозначно определить ее положение относительно выбранной системы координат. Например, относительно обрабатывающего инструмента. Технологические базы обрабатываются с высокой точностью по 5–6 качеству и чистотой поверхности $R_a = 0,32$ мкм.

На каждом предприятии существуют свои освоенные способы получения технологических баз, зависящие, главным образом, от наличия технологического оборудования и оснастки.

Установочные поверхности центровых отверстий можно получать на токарных, сверлильных и расточных станках. В крупносерийном производстве для их получения используют фрезерно-центровальные станки, которые позволяют одновременно подрезать торцы заготовки и проводить сверление центровых отверстий. В мелкосерийном производстве изготовление технологических баз в виде центровых отверстий цилиндрических деталей преимущественно осуществляют на токарных станках обработкой за два установка. В этом случае исходную заготовку устанавливают и закрепляют по черновой технологической базе в трехкулачковом патроне и неподвижном люнете (рис. 82).

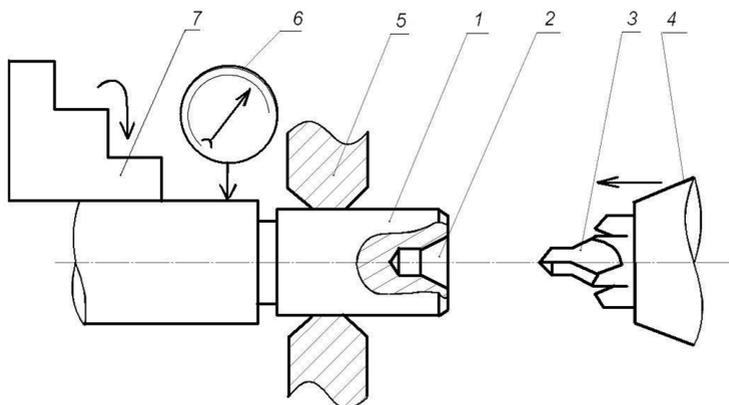


Рис. 82. Схема изготовления центрального отверстия вала:
 1 – заготовка; 2 – центровое отверстие; 3 – центровое сверло;
 4 – цанговый патрон; 5 – кулачки люнета; 6 – индикатор часового типа;
 7 – кулачки патрона токарного станка

Сверлят центровое отверстие на одной торцевой поверхности заготовки. После этого заготовку переворачивают, закрепляют и повторяют переход. В качестве черновой технологической базы обычно используют наружную поверхность. Причем черновую базу применяют только один раз и при последующей обработке ее заменяют вновь образованной чистой технологической базой.

Размеры центровых отверстий, которые используются в качестве технологических баз для основных операций, как правило унифицированы. Их получают при помощи центровочных сверл.

Для того чтобы обеспечить минимальное смещение центрального отверстия и высокую точность зацентровки, исходную заготовку выставляют относительно центровочного сверла при помощи люнета и индикатора часового типа.

Точение используют в тех случаях, когда обработке подлежат материалы с твердостью ниже среднего значения (HRC 30). При этом припуск на обработку превышает 0,25 мм на сторону. Обычно токарная обработка является одной из основных технологических операций для заготовок типа тел вращения. Шлифование как правило применяют при повышенной твердости материала исходной заготовки и малых припусках на обработку.

Припуск — это слой материала, который удаляется с поверхности заготовки с целью достижения заданных параметров качества обрабатываемой поверхности.

Припуск на токарную обработку зависит от качества поверхности исходной заготовки, толщины дефектного слоя, погрешностей формы и пространственных отклонений заготовки, то есть способа получения заготовки.

Заготовки, получаемые литьем в песчаные формы, имеют самый большой припуск, так как поверхность отливок имеет большой дефектный слой и твердую поверхностную корку. У штамповок припуск несколько меньше, чем у поковок. Однако на их поверхности образуется окалина, ускоряющая размерный износ режущего инструмента в процессе обработки. Самый маленький припуск у заготовок из проката.

Критерием выбора способа получения заготовки могут быть: материал заготовки (чугун — литье; сталь — литье, штамповка или прокат; цветные сплавы — литье под давлением и т. д.); минимальная себестоимость получения заготовки и минимальная себестоимость изготовления детали.

Величина припуска обычно дается «на сторону», то есть указывается толщина слоя, снимаемого на данной поверхности. Иногда для цилиндрических деталей припуск дается «на диаметр», то есть указывается двойная толщина снимаемого слоя, что должно быть оговорено в технических условиях на механическую обработку. Величина припуска должна быть достаточной для изготовления качественного изделия, удовлетворяющего установленным требованиям в отношении чистоты поверхности, точности размеров детали при наименьшем расходе материала и наименьшей себестоимости выполняемых технологических операций.

Чем выше требования, предъявляемые к качеству изделия, тем большей должна быть величина припуска и большее количество проходов. При этом необходимо учитывать, что в процессе термической обработки деталь получает некоторую остаточную деформацию и на ее последующую механическую обработку следует оставлять дополнительный припуск, необходимый для её устранения.

Общий технологический припуск перераспределяют между черновой и чистовой обработками. Рекомендуется на черновую обработку оставлять до 60 % суммарного припуска, а на чистовую – до 40 %, или же предусматривают 45 % на черновую обработку, 30 % – на получистовую и 25 % – на чистовую обработку.

Черновая обработка позволяет устранить существенные погрешности формы и пространственные отклонения исходной заготовки. Получистовая обработка обеспечивает изготовление детали с размерами, близкими к номинальным размерам. Чистовой обработкой получают необходимую точность и шероховатость поверхностей изделия.

Для того чтобы произвести обработку поверхности, необходимо заготовке и режущему инструменту задать формообразующие движения. Главным движением при токарной обработке резцом является вращение заготовки, движением подачи является поступательное перемещение резца (рис. 83).

Токарная обработка по корке исходной заготовки сильно увеличивает размерный износ режущего инструмента. Поэтому для снижения износа и обеспечения нормальной работы режущего инструмента необходимо, чтобы глубина резания была больше толщины корки. Исходя из этого требования, на токарную обработку по корке традиционно назначают припуск величиной 1,5–3 мм.

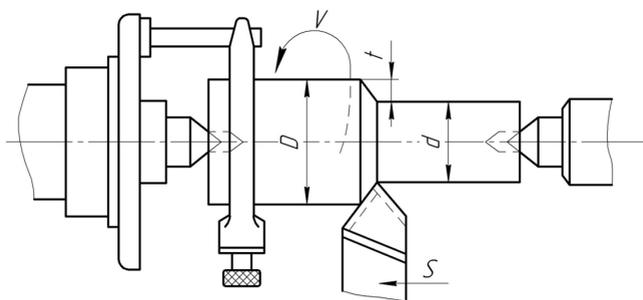


Рис. 83. Схема токарной обработки цилиндрической поверхности:
 V – скорость резания; S – подача; t – глубина резания;
 D – диаметр заготовки; d – диаметр детали

Черновую токарную обработку проводят резцами с режущей частью из твердых сплавов Т15К6, Т5К10 и ВК6, ВК8. С повышением

твердости материала заготовки стойкость таких резцов значительно снижается. Этим фактом в значительной степени обусловлено применение шлифования для обработки закаленных заготовок, которое в некоторых случаях по производительности уступает точению.

Для точения заготовки, имеющей твердую корку, или при прерывистом точении рекомендуется применять резцы с твердыми сплавами ВК6 и ВК8, так как они лучше выдерживают неравномерные, ударные нагрузки и обеспечивают наибольшую стойкость резцов. Однако при устойчивом черновом точении (без ударов) предпочтительнее применять резцы с твердыми сплавами Т15К6 и Т5К10. Чистовую токарную обработку, которая характеризуется высокими скоростями резания и температурами в зоне обработки, проводят резцами с твердым сплавом ВК6М с мелкозернистой структурой или твердым сплавом ВК6ОМ с особомелкозернистой структурой. Они сохраняют повышенную твердость и износостойкость при нагреве до температур 400–900 °С. Чистовую обработку точением также проводят резцами с режущей частью из поликристаллических материалов, таких как Эльбор-Р, Гексанит-Р. Эти сверхтвердые синтетические материалы обладают высокой стойкостью при больших температурах в зоне резания и применяются для обработки закаленных металлов. С увеличением твердости заготовки преимущество резцов с режущей частью из сверхтвердых синтетических материалов проявляется более существенно. Их стойкость при точении закаленных заготовок в 5–20 раз выше резцов с твердым сплавом или минералокерамикой.

Многообразие видов поверхностей, обрабатываемых на станках токарной группы, привело к созданию большого числа токарных резцов, которые классифицируют по различным признакам.

По технологическому назначению резцы делят на проходные, применяемые для наружного точения цилиндрических и конических поверхностей (рис. 84); подрезные, используемые для точения плоских торцевых поверхностей (рис. 85); отрезные, применяемые для отделения одной части заготовки от другой; фасонные, предназначенные для обтачивания поверхностей сложной конфигурации; канавочные, используемые для прорезания канавок; резьбовые, используемые для нарезания резьбы; расточные, предназначен-

ные для внутреннего растачивания глухих и сквозных отверстий (рис. 86); галтельные, предназначенные для получения закругленных переходов между ступенями валов, и др.

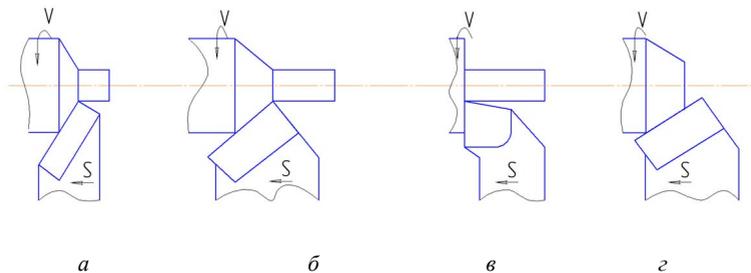


Рис. 84. Резцы для наружного точения цилиндрических поверхностей: *a* – проходной прямой; *б* – проходной отогнутый; *в* – проходной упорный; *г* – проходной отогнутый

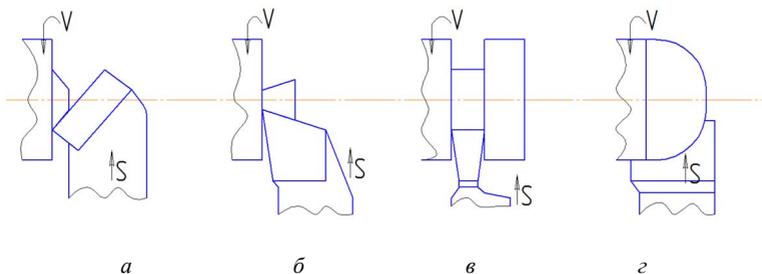


Рис. 85. Резцы для точения плоских торцевых поверхностей: *a* – проходной; *б* – подрезной; *в* – отрезной; *г* – фасонный

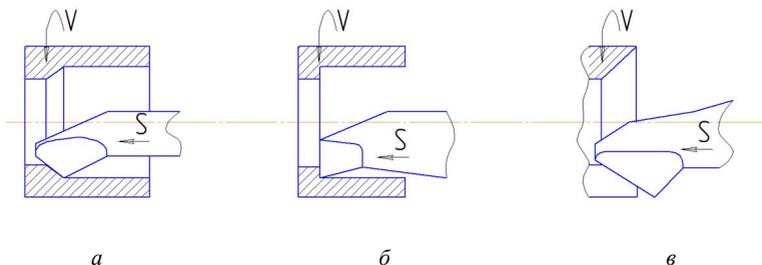


Рис. 86. Резцы для внутреннего растачивания цилиндрических поверхностей: *a* – расточной проходной; *б* – расточной упорный; *в* – расточной изогнутый

По виду обработки резцы делят на черновые, получистовые и чистовые. По форме рабочей части различают резцы прямые, отогнутые, оттянутые и изогнутые. По способу изготовления различают резцы цельные, с приваренной или припаянной твердосплавной пластиной, с механическим креплением сменных многогранных пластин.

Резцы со сменными многогранными пластинами являются современным токарным инструментом, который нашел наибольшее применение в производстве. В отличие от резцов, которые выпускаются в цельном варианте, здесь можно быстро сменить режущую пластину в случае ее износа или для того, чтобы произвести другие виды работ.

Режущие многогранные пластины различных конфигураций изготавливаются из металлокерамического твердого сплава, оксидной или оксидно-карбидной керамики. Их рабочая поверхность во многих случаях напыляется износостойким покрытием, например, карбидом или нитридом титана. Эти пластины в случае затупления режущих кромок не перетачиваются, а переустанавливаются в державке резца в новое положение, при котором будет работать очередное лезвие.

По направлению подачи резцы подразделяются на правые и левые (рис. 87). Если при наложении руки на резец большой палец правой руки направлен на главную режущую кромку, то такой резец называется правым. Если на главную режущую кромку направлен большой палец левой руки, то это будет левый резец.

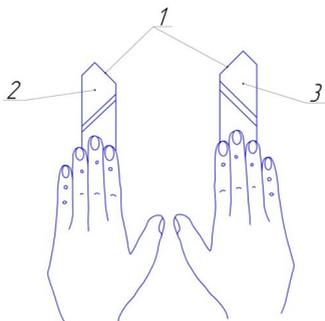


Рис. 87. Классификация резцов по направлению подачи:
1 – главная режущая кромка; 2 – левый резец; 3 – правый резец

На токарных станках преимущественно работают правыми резцами, проводя точение справа налево.

Конструкция резцов для серийного производства в основном унифицирована на основе общепринятых в мировой практике положений. В соответствии с этими положениями сложилась система форм державок и геометрии режущей части резцов.

Геометрией режущей части резцов называется совокупность всех конструктивных элементов. К ним относятся углы резания, режущие кромки, передние и задние поверхности и другие элементы, которые обеспечивают процесс резания материалов.

Для определения параметров резца различают следующие координатные плоскости (рис. 88):

- плоскость резания – плоскость, касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку резца;
- основная плоскость – плоскость, которая параллельна продольной и поперечной подачам;
- главная секущая плоскость – плоскость, перпендикулярная к проекции главной режущей кромки резца на основную плоскость.

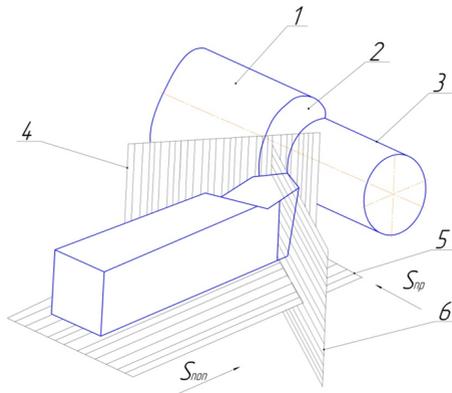


Рис. 88. Поверхности заготовки и координатные плоскости геометрии резца: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – поверхность резания; 3 – обработанная поверхность; 4 – плоскость резания; 5 – основная плоскость; 6 – главная секущая плоскость

При обработке различают следующие поверхности заготовки (см. рис. 88):

- обрабатываемая поверхность – поверхность заготовки, с которой снимается слой металла, оставленный как припуск на механическую обработку;
- поверхность резания – поверхность заготовки, образуемая непосредственно главной режущей кромкой резца;
- обработанная поверхность – поверхность детали, образованная процессом резания, после снятия припуска.

Основными конструктивными элементами проходного резца (рис. 89) являются:

- передняя поверхность – поверхность резца, по которой сходит стружка;
- главная задняя поверхность – поверхность резца, обращенная к обрабатываемой поверхности заготовки;
- вспомогательная задняя поверхность – поверхность резца, обращенная к обработанной поверхности детали;
- главная режущая кромка – линия пересечения передней и главной задней поверхностями резца;
- вспомогательная режущая кромка – линия пересечения передней и вспомогательной задней поверхностями резца;
- вершина резца – точка пересечения главной и вспомогательной режущих кромок резца.

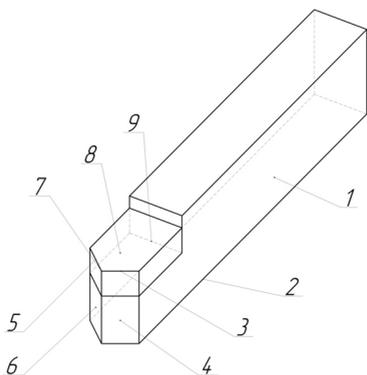


Рис. 89. Конструктивные элементы токарного проходного резца:

- 1 – тело; 2 – рабочая часть; 3 – главная режущая кромка;
- 4 – главная задняя поверхность; 5 – вспомогательная режущая кромка;
- 6 – вспомогательная задняя поверхность; 7 – вершина резца;
- 8 – передняя поверхность; 9 – пластина

К геометрическим параметрам проходного резца относятся углы в главной секущей и основной плоскостях.

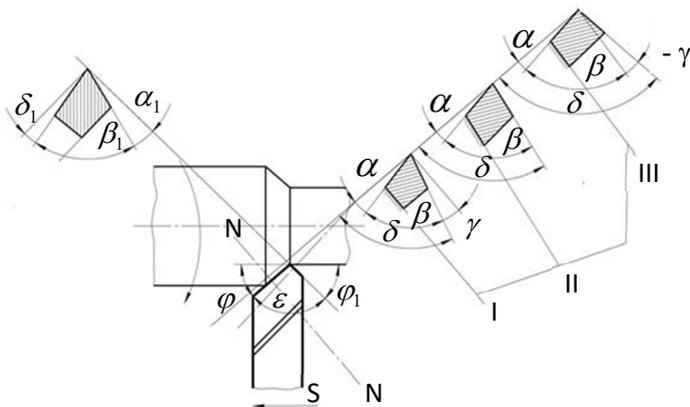


Рис. 90. Углы резца в главной секущей и основной плоскостях

Углы в главной секущей плоскости показаны на рис. 90.

α – задний угол – угол между главной задней поверхностью резца и плоскостью резания.

β – угол заострения – угол между передней и задней поверхностями резца.

γ – передний угол – угол между передней поверхностью и основной плоскостью.

δ – угол резания – угол между передней поверхностью резца и плоскостью резания.

Сумма переднего, заднего углов и угла резания составляет 90° .

φ – главный угол в плане – угол между главной режущей кромкой резца и направлением продольной подачи.

φ_1 – вспомогательный угол в плане – угол между вспомогательной режущей кромкой резца и направлением продольной подачи.

ε – угол при вершине – угол между главной и вспомогательной режущими кромками резца.

Сумма главного, вспомогательного углов в плане и угла при вершине составляет 180° .

При токарной обработке твердого поверхностного слоя заготовки является необходимым применять резцы с отрицательными

передними углами. Они обеспечивают повышенную прочность режущего клина резца при силовом точении. Однако при этом увеличивается шероховатость обработанной поверхности и упругие деформации элементов технологической системы. Большие упругие деформации приводят к возникновению погрешностей размеров и формы изделий. Поэтому применение резцов с отрицательными передними углами приемлемо только для обработки достаточно жестких и массивных деталей.

Для снижения упругих деформаций, особенно при обработке нежестких деталей, следует применять проходные упорные резцы с главным углом в плане, равным 90° . В этом случае достигается высокая точность обработки, так как радиальная составляющая силы резания, вызывающая изгиб детали, имеет наименьшее значение.

Угол наклона главной режущей кромки λ — угол между главной режущей кромкой и линией, проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости. Угол наклона главной режущей кромки может быть положительным, отрицательным или равным нулю (рис. 91).

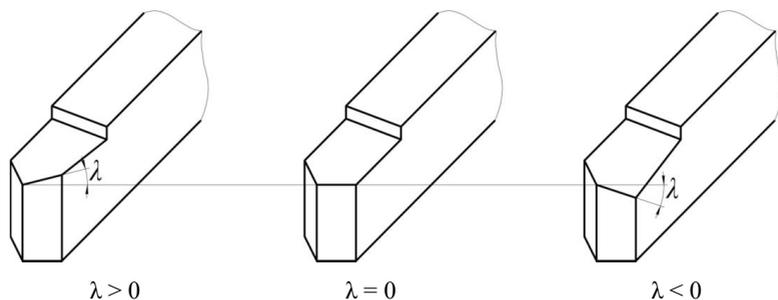


Рис. 91. Углы наклона главной режущей кромки

От угла наклона режущей кромки во многом зависит качество обработанной поверхности. Он определяет направление схода стружки по передней поверхности в процессе резания. При положительном и нулевом значениях угла наклона главной режущей кромки резца стружка сходит в направлении, обратном подаче. В этом случае она будет наматываться на деталь и царапать обработанную поверхность, снижая её качество. При отрицательном зна-

чении угла стружка сходит в направлении обрабатываемой поверхности заготовки.

Точение металлов с различными пластическими свойствами сопровождается образованием разной стружки. Различают три основных вида стружки: сливная, скалывания и надлома (рис. 92).

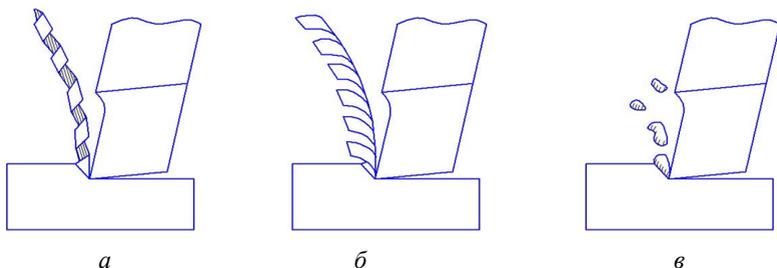


Рис. 92. Основные виды стружки:
а – сливная; *б* – скалывания; *в* – надлома

Сливная стружка образуется при токарной обработке пластичных металлов. Она представляет сплошную ленту с зазубринами, которая сворачивается в спираль.

Стружка скалывания возникает при точении металлов средней пластичности. Она состоит из соединенных в единое целое отдельных фрагментов с достаточно большими зазубринами.

Стружка надлома образуется при обработке резанием металлов с низкой пластичностью. Она состоит из отдельных фрагментов, которые не связаны друг с другом.

Вид стружки также определяет ряд факторов: режим резания, смазочно-охлаждающая жидкость и геометрия рабочей части режущего инструмента. От вида стружки в значительной мере зависят условия резания и отвод стружки из зоны резания. Наиболее проблематичной в этом отношении является сливная стружка.

Микропрофиль, то есть шероховатость обработанной поверхности, представляет собой след режущих кромок инструмента. При обработке проходным резцом теоретическая высота неровностей определяется в виде гребешка не удаленного с поверхности металла (рис. 93). Гребешок образован двумя соседними следами инструмента, который переместился за один оборот заготовки на величину подачи.

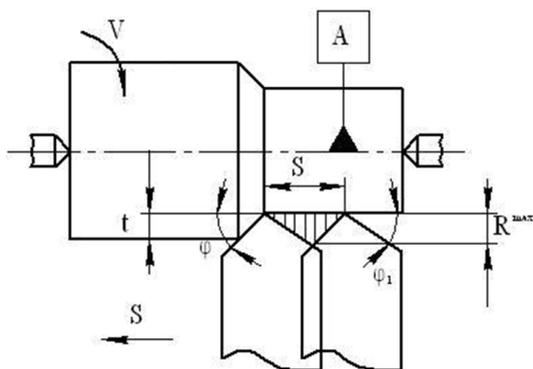


Рис. 93. Схема образования шероховатости при токарной обработке

Высоту микронеровностей, помимо подачи, во многом определяет геометрия резца: главный и вспомогательный углы в плане.

Очевидно, что высота микронеровностей будет снижаться с уменьшением подачи, главного и вспомогательного углов в плане. Однако уменьшение углов в плане приводит к увеличению радиальной составляющей силы резания и, как следствие, снижению точности обработки. Снижение шероховатости также происходит при увеличении скорости резания. Это обусловлено ростом температуры в зоне резания, приводящей к уменьшению наростообразования (налипания металла на поверхности резца) вследствие снижения трения задней поверхности инструмента о заготовку и пластической деформации обрабатываемого материала.

Для снижения трения, пластической деформации и облегчения стружкообразования применяют смазывающе-охлаждающие технологические среды, к которым относят жидкости, газы и твердые вещества.

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) представляют собой водные растворы минеральных электролитов, мыльные растворы, эмульсии с добавками поверхностно-активных веществ, минеральные и растительные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы), масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ (графит, парафин и др.).

Следует отметить существующие закономерности изменения технологических параметров режима механической обработки при достижении необходимых показателей точности и шероховатости поверхностей деталей. Так, от черновой к чистовой обработке скорость резания неизменно должна возрастать, а подача и глубина резания – уменьшаться.

Повысить производительность токарной обработки при обеспечении необходимой чистоты обработанной поверхности можно за счет применения специальных резцов для больших подач. Одним из таких резцов для проведения силового резания является резец Колесова (рис. 94). Особенностью его конструкции является наличие двух переходных кромок между главной и вспомогательной режущими кромками. Такая конструкция резца позволяет увеличить подачу в 2 раза при неизменной шероховатости.

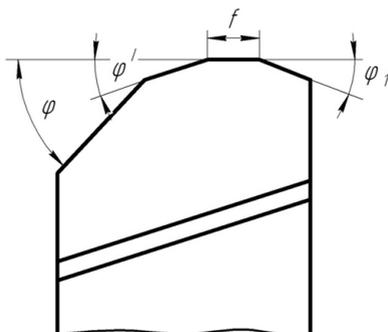


Рис. 94. Схема резца В.А. Колесова для силового резания

В настоящее время в машиностроительном производстве широкое применение нашли «зачистные» пластины с подобной геометрией режущей части для точения при больших подачах, которые массово выпускаются шведской фирмой «Сандвик».

Стойкость режущего инструмента снижается по мере увеличения глубины резания и твердости обрабатываемого материала. Стойкость – это продолжительность работы инструмента до допустимой величины износа его режущей кромки, которая не приводит к браку обрабатываемых деталей.

Качество обработанной поверхности зависит от оптимальности режима токарной обработки. Основными параметрами режи-

ма обработки являются глубина резания t , продольная подача S и скорость резания V . Их определяют в определенной последовательности. Сначала устанавливают глубину резания, затем определяют допустимую подачу, после чего рассчитывают скорость резания.

Глубиной резания называется расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностью.

Глубину резания и продольную подачу независимо от вида режущего инструмента стараются выбрать из условия обеспечения максимальной производительности процесса обработки. Очевидно, что экономически выгоднее работать с возможно меньшим числом проходов и наибольшей подачей. Поэтому стремятся припуск на черновую обработку снять за один проход с максимальной подачей. Однако для проведения такого силового резания необходима соответствующая мощность станка и жесткость технологической системы. Для установления возможности проведения силового резания проводят предварительный расчет глубины резания t и подачи S по формулам:

$$t = c \cdot \sqrt[3]{D}; \quad (39)$$

$$S = 0,17\sqrt[3]{D} + 0,15(t - 2), \quad (40)$$

где c – коэффициент, зависящий от материала заготовки и для большинства сталей составляющий 0,7; D – номинальный размер детали.

Глубина резания и подача определяют толщину (сечение) среза и, следовательно, силу резания P_z , необходимую для снятия припуска:

$$P_z = c \cdot t \cdot S^{0,75}. \quad (41)$$

Сила резания, в свою очередь, определяет мощность резания $N_{\text{рез}}$:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}. \quad (42)$$

Рассчитанный таким образом режим резания корректируется по мощности станка. Чтобы на станке можно было производить процесс резания (особенно силового резания), необходимо, чтобы мощность $N_{\text{рез}}$, затрачиваемая на резание, не превышала мощности станка N .

Увеличение глубины резания и подачи приводит к увеличению толщины среза (рис. 95) и, следовательно, силы резания. Из форму-

лы (41) видно, что степень влияния глубины резания на силу резания выше, чем степень влияния подачи. При увеличении глубины резания в 2 раза сила резания возрастает вдвое, а при увеличении подачи в 2 раза сила резания возрастает только в 1,68 раза. Это обстоятельство является предпосылкой для повышения производительности обработки за счет увеличения подачи при сохранении неизменной эффективной мощности резания:

$$t_1 \cdot S_1^{0,75} = t_2 \cdot S_2^{0,75}. \quad (43)$$

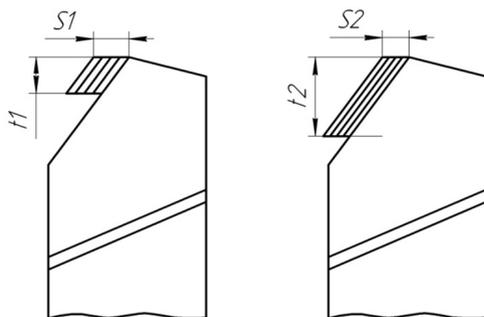


Рис. 95. Влияние глубины резания t и подачи S на толщину среза при токарной обработке

При черновой обработке подачу выбирают по соответствующим нормативам. При этом учитывается, что увеличение подачи приводит к увеличению высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности. Так, при черновой обработке точением литой заготовки подачу S назначают свыше 1,0 мм/об при скорости резания $V = 20\text{--}30$ м/мин и глубине резания $t = 2,0\text{--}3,5$ мм.

Черновое точение позволяет обеспечить точность обработки детали по 14 квалитету, при этом достигается шероховатость $R_a = 6,3\text{--}50$ мкм. Полуцистовое точение дает возможность получить точность обработки в диапазоне от 11 до 13 квалитета и чистоту поверхности $R_a = 1,6\text{--}25$ мкм. Чистовое точение позволяет получить точность размеров детали по 8–10 квалитету и шероховатость $R_a = 0,4\text{--}6,3$ мкм. При высоких требованиях к точности и чистоте поверхности детали проводят тонкое точение, которое обеспечивает точность обработки по 7–8 квалитету и шероховатость R_a в пределах 0,32–1,25 мкм. Максимальная точность (IT 5) и минимальная

шероховатость ($R_a = 0,125-0,25$ мкм) достигаются при тонком точении закаленных сталей (HRC 64–68) сверхтвердыми синтетическими материалами.

Для достижения заданной точности разработаны разнообразные технологические методы и средства управления точностью, которые широко используются на практике. При этом наибольшей эффективностью в условиях мелкосерийного и единичного производства обладает метод пробных проходов и промеров.

Сущность метода заключается в получении заданной точности обработки на коротком участке детали путем последовательного проведения пробных проходов и промеров (рис. 96).

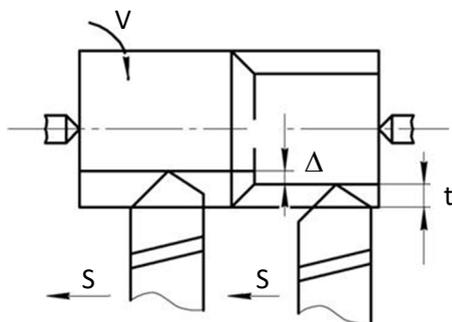


Рис. 96. Схема получения заданной точности детали методом пробных проходов и промеров

Метод реализуется следующим образом. Коснувшись вершиной резца поверхности вращающейся заготовки, отводят инструмент вправо от места касания за торец заготовки. При помощи нониуса поперечного перемещения суппорта устанавливают глубину резания. Далее включают продольную подачу резца и обрабатывают короткий участок заготовки. Очевидно, что в результате упругих деформаций технологической системы диаметр обработанного участка будет несколько отличаться от номинального размера. После остановки станка при помощи измерительных средств делается пробный замер полученного диаметра обработанного участка. Определяется величина его отклонения от номинального значения и вносится поправка в относительное положение инструмента и детали. После чего делается второй проход. Вновь промеряется

полученный диаметр обработанного участка заготовки и определяется степень приближения этого размера к размеру годной детали. При необходимости вносится новая поправка в относительное положение инструмента. Такая процедура обработки и измерения продолжается до тех пор, пока не установится правильное положение инструмента относительно детали, при котором обеспечивается требуемый размер детали. После этого производится обработка по всей поверхности заготовки. При обработке следующей заготовки вся процедура настройки инструмента повторяется снова.

Метод пробных проходов и промеров имеет следующие достоинства:

- при высокой квалификации рабочего можно получить высокую точность на неточном оборудовании;
- при обработке метод позволяет исключить появление брака из-за износа режущего инструмента;
- при неточной заготовке метод позволяет правильно распределить припуск на обработку и тем самым не допустить появления брака;
- метод освобождает от необходимости изготовления и применения сложных приспособлений типа копиров, кондукторов, поворотных и делительных головок.

Безусловным достоинством метода, особенно в условиях единичного производства, является возможность «спасения» брака заготовки, который возникает при неточной объёмной штамповке. В этом случае неполноценную заготовку размечают специальным инструментом — чертилкой (рис. 97). Чертилкой наносят на поверхности заготовки тонкие линии, которые показывают контур будущей детали. При последующей механической обработке рабочий стремится совместить траекторию перемещения режущего лезвия инструмента с линией разметки заготовки, обеспечивая этим получение требуемых формы и размеров обрабатываемой заготовки. Таким образом, удается «выкроить» контур обрабатываемой детали и получить годное изделие.

Перечисленные недостатки ограничивают технологические возможности метода и область его применения.

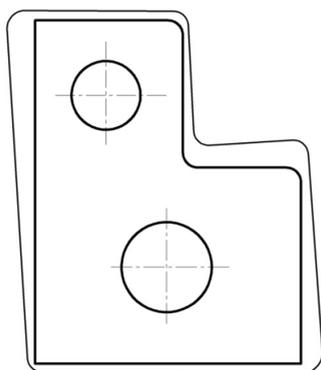


Рис. 97. Схема получения изделия заданной точности из бракованной заготовки методом пробных проходов и промеров

7.3. Шлифование в процессах изготовления деталей

Механическая обработка с более высокой точностью проводится способом шлифования (рис. 98). Качество и производительность шлифования в основном зависят от правильного выбора характеристик абразивного инструмента и режимов обработки.

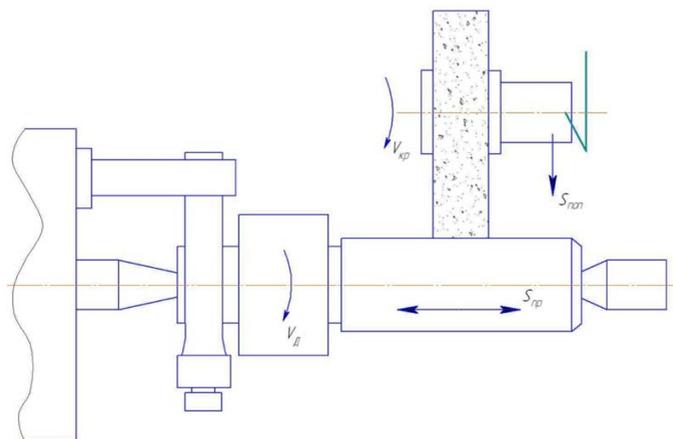


Рис. 98. Схема круглого шлифования цилиндрической поверхности

В большинстве случаев при шлифовании деталей применяют электрокорундовые абразивные круги с определенным содержанием связующих компонентов. Нормальный электрокорунд марок 13А, 14А, 15А с керамической связкой используют главным образом для шлифования незакаленных сталей, а белый электрокорунд марок 22А, 23А, 24А — для закаленных углеродистых и легированных сталей.

Абразивные круги обладают способностью частично или полностью самозатачиваться. Процесс самозатачивания заключается в выкрашивании изношенных абразивных зерен и обнажении следующего ряда новых зерен абразива.

Абразивные круги в силу особенностей своего строения легко могут быть пропитаны жидкостью, которая проникает в поры под действием капиллярных сил. После сушки кругов смазочно-активные компоненты, входящие в жидкость, в результате действия адгезионных сил надежно удерживаются в порах, превращая круги в самосмазывающиеся инструменты.

При шлифовании деталей пропитанными кругами происходят физико-механические взаимодействия между активными компонентами вещества пропитки и обрабатываемым металлом, которые приводят к созданию на режущих зернах пассивирующих пленок и способствуют уменьшению трения в зоне обработки.

Твердость шлифовального круга во многом определяет качество обработанных поверхностей. Следует понимать, что твердость шлифовального круга характеризует не твердость абразивных зерен, а прочность связки. Если твердость шлифовального круга больше твердости обрабатываемого материала, то поры шлифовального круга забиваются пластичным материалом, и он перестает резать. В этом случае говорят, что круг засалился. Поэтому твердость круга, определяемая как сопротивление связки выкрашиванию зерен абразива под действием сил резания, должна назначаться в зависимости от твердости обрабатываемого материала. Для шлифования применяются абразивные инструменты различной степени твердости (табл. 23).

Твердость абразивного инструмента

№ п/п	Степень твердости	Обозначение
1	Весьма мягкая	ВМ1, ВМ2
2	Мягкая	М1, М2
3	Среднемягкая	СМ1, СМ2
4	Средняя	С1, С2
5	Среднетвердая	СТ1, СТ2, СТ3
6	Твердая	Т1, Т2
7	Весьма твердая	ВТ1, ВТ2
8	Чрезвычайно твердая	ЧТ1, ЧТ2

Зернистость абразивного круга выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала и технических требований к параметрам (точности и шероховатости) поверхности. При обработке вязких материалов применяют круги с более крупным зерном, чем при обработке твердых и хрупких материалов. Это делается во избежание процесса засаливания абразивных кругов.

При шлифовании крупнозернистыми кругами достигается высокая производительность, но при этом формируется достаточно большая по высоте шероховатость обработанной поверхности. Для уменьшения высоты микронеровностей требуется обработка мелкозернистыми кругами. Но для этого прежде всего необходимо повысить твердость обрабатываемого материала.

Основными факторами, влияющими на выбор режимов обработки, являются: материал, форма и размеры обрабатываемой заготовки, жесткость технологической системы, материал режущей части инструмента, точность установки и надежность закрепления заготовки на станке, а также мощность станка.

Шлифование выполняют с окружной скоростью круга $V_k = 20-30$ м/с, скоростью вращения детали $V_d = 0,2-0,3$ м/с и продольной подачей, которая назначается в долях ширины B шлифовального круга, $S = 0,5-0,7$ В мм/об (табл. 24). При этом расход смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) должен составлять не менее 0,3 л/мин.

Продольные подачи круга на один оборот детали
в долях ширины круга

Обрабатываемый материал	Диаметр обрабатываемой детали, мм	Продольная подача в долях ширины круга
Чугун	До 20	0,3–0,5
Сталь незакаленная	Свыше 20	0,85
	До 20	0,3–0,5
Сталь закаленная	Свыше 20	0,75
	До 20	0,03–0,5

Следует отметить, что СОЖ облегчает процесс стружкообразования, снижает температуру в зоне обработки, уменьшает трение и интенсивность пластической деформации обрабатываемого материала, что способствует получению менее шероховатой поверхности.

Стойкость абразивных кругов и качество поверхности при шлифовании можно повысить за счет снижения удельных нагрузок и температуры в зоне обработки.

Шлифование наружных цилиндрических поверхностей производят на круглошлифовальных станках методом продольного шлифования, для которого характерно равномерное изнашивание круга в процессе работы, минимальное тепловыделение и высокое качество поверхности.

Посадочные поверхности детали как правило обрабатывают дважды – черновым и чистовым продольным шлифованием.

Черновое шлифование позволяет получить точность размера по 8–9 качеству, при этом достигается шероховатость R_a в диапазоне 0,4–6,3 мкм. Чистовое шлифование дает возможность получить точность обработки в диапазоне от 6 до 7 качества и чистоту поверхности $R_a = 0,3–3,2$ мкм.

При назначении операций шлифования и точения необходимо учитывать их себестоимость в зависимости от требуемой точности изделий (рис. 99).

Чистовая обработка резцами менее эффективна, чем обработка шлифованием. Однако при чистовом шлифовании стойкость абра-

живных кругов резко снижается из-за высокой температуры в зоне резания.

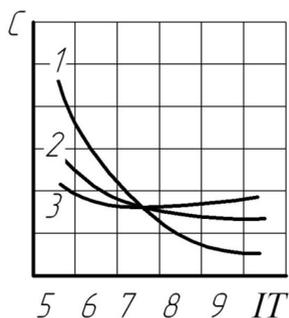


Рис. 99. График затрат на обработку в зависимости от требуемой точности деталей: 1 – точение; 2 – чистовое шлифование; 3 – тонкое шлифование

Тонкое шлифование применяют для достижения шероховатости поверхности в пределах $R_a = 0,025-0,1$ мкм и точности обработки по 5 квалитету. Процесс тонкого шлифования мелкозернистыми мягкими абразивными кругами ведут с максимальной скоростью круга (до 40 м/с), минимально допустимой подачей 0,2–0,3 ширины круга и интенсивным охлаждением смазочно-охлаждающей жидкостью.

Для проведения тонкого шлифования обязательными условиями являются тщательная балансировка круга и очистка смазочно-охлаждающей жидкости.

При тонком шлифовании также используют более дорогостоящие инструменты – алмазные круги. Эти круги производят из синтетических сверхтвердых материалов, таких как синтетический алмаз, эльбор и баразон. В основном они применяются для финишной обработки твердых материалов.

Алмазные круги имеют стойкость, которая в десять раз превышает стойкость абразивных кругов. Это позволяет обеспечить большую производительность, высокую точность обработки и чистоту поверхности изделия. Из графика (рис. 99) видно, что при необходимости обеспечения высокой точности целесообразней выбирать более тонкие методы обработки.

Достаточно часто для чистовой и окончательной отделочной обработки цилиндрических деталей из закалённых сталей применяют

алмазное шлифование торцом чашечного круга, которое позволяет обеспечить улучшение основных параметров качества и износостойкости рабочих поверхностей. Этот способ отличается простотой реализации на станках токарной группы. Его отличительной особенностью является то, что оси вращения заготовки и чашечного круга перекрещиваются под углом, близким к углу 90° . Круг, перемещаясь вдоль своей оси, поджимается одной стороной торца к поверхности заготовки, а продольная подача осуществляется перемещением суппорта станка. Вращение шпинделя шлифовальной головки с установленной на ней пружинной оправкой с чашечным кругом осуществляется от электродвигателя через клиноременную передачу. Пружинная оправка служит для регулирования прижатия круга к обрабатываемой поверхности.

7.4. Развитие процессов механической обработки

Стремительное развитие инноваций и высокая конкуренция на рынке продукции машиностроения предъявляют высокие требования к уровню технологий механической обработки. В этой связи актуальной является разработка новых методов технологической обработки резанием.

В настоящее время существуют следующие основные тенденции развития технологий механической обработки в области мирового машиностроения:

- заготовка должна быть максимально приближена по форме и размерам к изделию;
- замена дискретных методов обработки на комбинированные методы;
- повышение эффективности высокопроизводительного оборудования и максимальное использование его возможностей;
- переход от экстенсивных процессов изготовления изделий к интенсивным процессам;
- максимальное использование гибких систем;
- повышение уровня экологической безопасности технологий и оборудования;
- стремление к безотходным технологиям.

В типовых процессах изготовления деталей технологическая последовательность механической обработки обычно обусловлена чередованием процессов обработки резанием с процессами термической и химико-термической обработки. Последние процессы предназначены для формирования необходимой структуры обрабатываемого материала. При этом традиционно считается, что всю лезвийную обработку целесообразно выполнять до термической упрочняющей обработки, а абразивную после термической обработки. Безусловно, это отрицательно сказывается на производительности процесса изготовления.

Современная технология механической обработки имеет тенденцию ухода от дискретных методов, значительно растягивающих во времени процесс изготовления деталей, к комбинированным методам. Эти методы позволяют совмещать несколько операций на одном станке. При этом одновременно можно производить различные процессы формообразования деталей и процессы формирования требуемых физико-механических свойств материала. Такой станок может работать в автоматическом режиме независимо от твердости материала и конфигурации обрабатываемой заготовки. Комбинированные методы могут включать в себя разнородные, но вместе с тем технологически совместимые процессы лезвийной, абразивной, термической обработки, поверхностного пластического деформирования и др. Совмещение операций и уменьшение их общего числа приводит к сокращению производственного цикла, уменьшению брака и более низким издержкам в расчете на единицу продукции при надлежащем её качестве.

Развитие инновационных решений в области станочного технологического оборудования и новая организация производства в виде гибких производственных систем потребовали от традиционных методов механической обработки, таких как точение, новых технологических возможностей производительной и качественной обработки. Эти возможности реализованы в новых способах обработки, таких как способ лезвийной обработки закаленных материалов. Такая обработка получила в профессиональной среде название «твердое точение». Затраты на обработку твердым точением сократились до 2,5 раз по сравнению со шлифованием. Оно также может

производиться одновременно с операцией чистового шлифования (рис. 100). При этом комбинированная обработка твердым точением и шлифованием на одной единице станочного оборудования обеспечивает такие преимущества, как возможность полной чистовой обработки различных поверхностей детали за один установ.

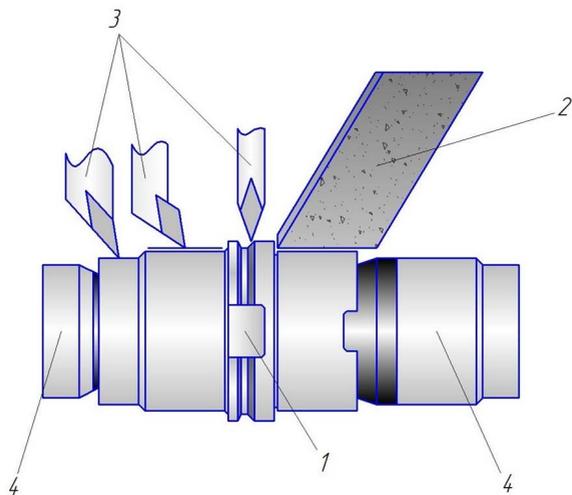


Рис. 100. Схема комбинированной обработки цилиндрических поверхностей резцами и шлифовальным кругом: 1 – заготовка; 2 – круг; 3 – резцы; 4 – центры

Технология высокоскоростного твердого точения является альтернативой абразивному шлифованию. Оно имеет следующие преимущества:

- высокая гибкость технологии, которая заключается в возможности обработки одним инструментом детали с любой конфигурацией;
- возможность обработки без применения смазочно-охлаждающей жидкости;
- высокая интенсивность удаления припуска и, как следствие, высокая производительность обработки;
- наличие стружки вместо шлама и абразивной пыли.

Однако одним из существенных недостатков технологии твердого точения является низкая стойкость режущего инструмента. Интенсивный размерный износ инструмента оказывает чрезвы-

чайно негативное влияние на точность обработки и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Выходом из сложившегося положения является разработка новых конструкций режущих инструментов, механизмов крепления сменных режущих пластин и инструментальных материалов.

Повысить стойкость режущего инструмента и качество обработанной поверхности позволяют специальные режущие пластины (рис. 101). Геометрия такой пластины с переменным радиусом закругления главной режущей кромки в направлении действия силы резания позволяет существенно снизить температуру в зоне резания и величину контактных давлений, действующих на режущую кромку режущей пластины.

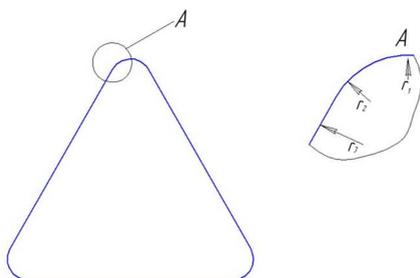


Рис. 101. Многогранная режущая пластина с криволинейной главной режущей кромкой

Применение для обработки твердых заготовок инструментальных материалов на основе поликристаллического алмаза и кубического нитрида бора дает хорошие результаты в отношении точности и шероховатости обработанной поверхности. Однако данные материалы имеют высокую стоимость, что отрицательно сказывается на себестоимости обработки. С целью снижения себестоимости лезвийной обработки вместо дорогих материалов разработаны нитридная керамика и новый металлокерамический материал, состоящий из порошков оксида алюминия, магния и вольфрама. Этот материал, не уступающий по твердости алмазу, обладает рекордно низким коэффициентом трения, что позволяет обеспечить высокую стойкость инструмента и в значительной мере улучшить процесс обработки закалённых материалов.

Твердое точение сверхтвердыми инструментальными материалами с функциональными покрытиями позволяет обработать деталь с долемикронной точностью, исключив при этом шаржирование обрабатываемой поверхности, которое характерно для абразивной обработки.

7.5. Фрезерование в процессах изготовления деталей

Фрезерование – один из высокопроизводительных и наиболее распространенных способов механической обработки резанием. Шероховатость обработанной после фрезерования поверхности достигает $R_a = 1,25–20$ мкм, а точность – 9–12 квалитета. Обработку производят фрезами, представляющими многолезвийный инструмент.

Главное движение при фрезеровании – вращение фрезы, а движение подачи – перемещение заготовки.

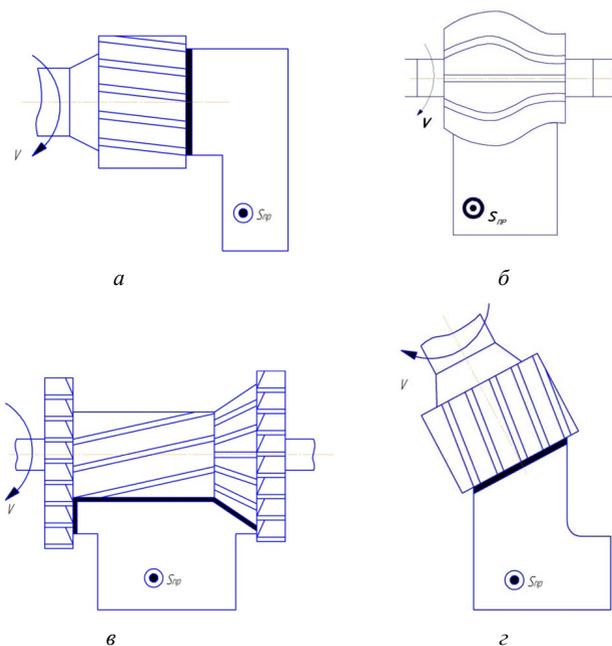


Рис. 102. Схемы обработки поверхностей на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках: *а* – обработка вертикальной поверхности; *б, в* – обработка фасонных поверхностей; *г* – обработка наклонной поверхности

Фрезерованием обрабатывают горизонтальные, вертикальные, наклонные плоскости, уступы, пазы различного профиля и фасонные поверхности (рис. 102).

Особенностью фрезерования является то, что зубья фрезы вступают в процесс резания последовательно и поочередно, при этом резать одновременно могут несколько режущих кромок.

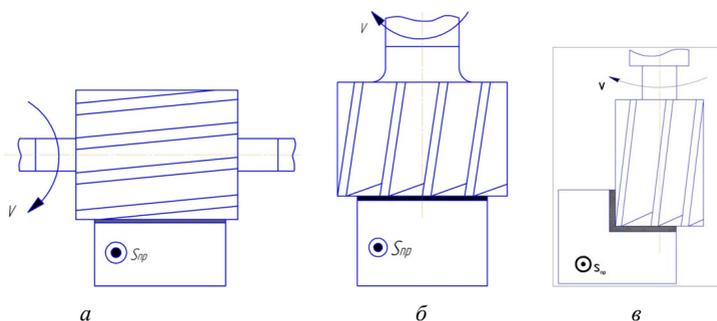


Рис. 103. Виды фрезерования: *a* – периферийное; *б* – торцевое; *в* – периферийно-торцевое

В зависимости от расположения режущих кромок различают:

- периферийное фрезерование (рис. 103, *a*) зубьями, расположенными на цилиндрической поверхности (цилиндрическими, дисковыми односторонними фрезами);
- торцевое – зубьями, расположенными на торцевой поверхности (рис. 103, *б*) (торцевыми фрезами);
- периферийно-торцевое фрезерование (рис. 103, *в*) зубьями, одновременно расположенными на цилиндрической и торцевой поверхностях (концевыми, дисковыми двусторонними фрезами).

При периферийном фрезеровании (цилиндрическими фрезами) имеют место два способа обработки в зависимости от направления главного движения и подачи заготовки (рис. 104):

- встречное фрезерование, когда направление главного движения противоположно направлению подачи;
- попутное фрезерование, когда направление главного движения совпадает с направлением подачи заготовки.

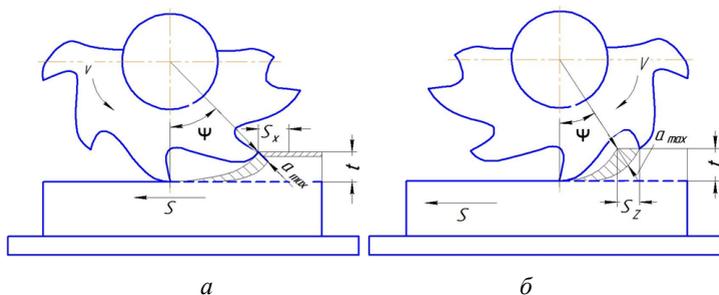


Рис. 104. Схемы встречного (а) и попутного фрезерования (б)

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб возрастает от нуля до максимального значения. При этом силы резания, действующие на заготовку, стремятся оторвать её от стола, вызывая вибрации. Кроме того, режущая кромка не сразу вступает в процесс резания, а поначалу проскальзывает, вызывая большое трение и износ фрезы по задней поверхности. Эти обстоятельства снижают точность и повышают шероховатость обработанной поверхности. Но встречное фрезерование дает хорошие результаты при обработке заготовок с твердой поверхностной коркой. Оно, производя резание из-под корки, существенным образом облегчает процесс резания.

При попутном фрезеровании зуб начинает работу с наибольшей толщины срезаемого слоя, что вызывает ударные нагрузки, однако исключает проскальзывание зуба, и тем самым уменьшает износ фрезы и шероховатость поверхности.

7.6. Стругание в процессах изготовления деталей

Стругание – процесс обработки резанием преимущественно плоских горизонтальных поверхностей (рис. 105). Режущим инструментом при строгании являются резцы. Процесс строгания характеризуется наличием двух движений. Главное движение резания – это поступательное движение резца или заготовки. Движение подачи – это дискретное движение заготовки в направлении, перпендикулярном главному движению резания.

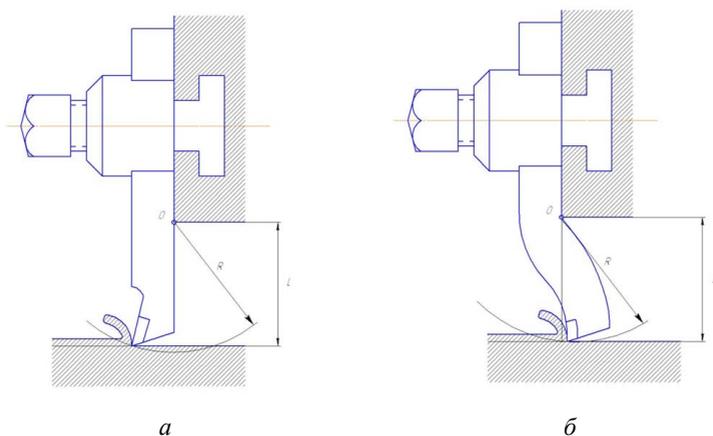


Рис. 105. Схемы строгания плоских поверхностей:
а – прямым резцом; *б* – изогнутым резцом

Строгание позволяет получать шероховатость обработанной поверхности в диапазоне $R_a = 2,5-1,25$ мкм, а точность размеров по 11–12 квалитету. Оно является весьма эффективным и производительным процессом, так как дает возможность снимать за один проход припуск до 12 мм. Поэтому в ряде случаев строганием заменяют фрезерование металлов.

Обработка резанием крупных литых заготовок с твердой поверхностной коркой характеризуется большими припусками и неравномерной нагрузкой, приводящей к ударам. В этом случае строгание дает более высокое качество обработки, чем фрезерование.

При строгании процесс резания состоит из рабочего хода, когда происходит снятие припуска, и холостого хода, когда резец возвращается в исходное положение. Процесс резания является прерывистым, так как удаление материала происходит только при рабочем ходе инструмента. Во время холостого хода резания не происходит. В это время резец охлаждается. Благодаря прерывистости резания в большинстве случаев обработки нет необходимости в применении смазочно-охлаждающих средств. В начале рабочего хода скорость движения возрастает от нуля до максимального значения и в конце рабочего хода снижается вновь до нуля.

Заготовки обрабатывают как правило на поперечно-строгальных и продольно-строгальных станках (рис. 106).

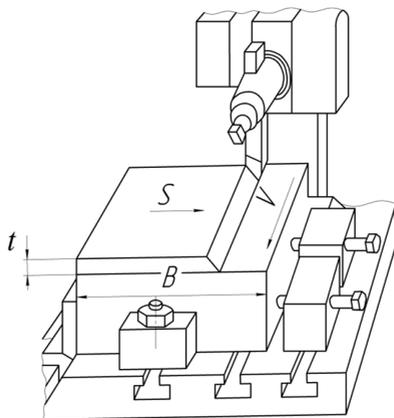


Рис. 106. Схема процесса строгания заготовки на поперечно-строгальном станке

На поперечно-строгальных станках главное движение резания и возвратное движение осуществляются резцом, а движение подачи — заготовкой.

На продольно-строгальных станках, наоборот, заготовка совершает главное движение резания и возвратное движение, а режущий инструмент совершает перемещения в перпендикулярном направлении — движение подачи.

При прерывистом резании возникают большие динамические нагрузки. В момент врезания резец при каждом рабочем ходе испытывает удар. Поэтому строгание на малых скоростях нежелательно, его рекомендуется производить на умеренных скоростях. Наличие холостого хода увеличивает время обработки и снижает производительность.

При строгании применяют специальные инструменты, похожие на токарные резцы. Только, в отличие от токарных резцов, их делают более массивными и прочными, так как они должны выдерживать большие ударные нагрузки. Стругальные резцы изготовляют нескольких типов: проходные, подрезные, отрезные и фасонные (рис. 107).

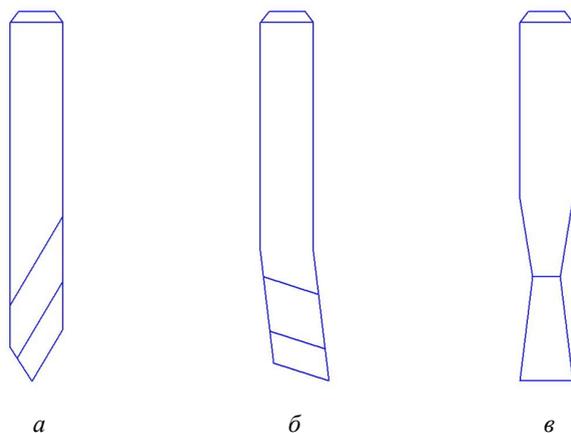


Рис. 107. Виды строгальных резцов:
a – проходные; *б* – подрезные; *в* – отрезные

Достаточно часто проходные резцы изготовляют изогнутыми. Это делается для снижения колебаний глубины резания, которые обусловлены изгибом резцов под воздействием сил резания.

Как и токарные, строгальные резцы могут быть правыми и левыми, чистовыми и черновыми, а также иметь схожие геометрические характеристики.

7.7. Протягивание в процессах изготовления деталей

Протягивание – высокопроизводительный процесс обработки резанием внутренних и наружных поверхностей. Этот процесс позволяет обеспечить высокую точность формы и размеров обработанной поверхности. При протягивании достигается шероховатость поверхности в диапазоне $R_a = 1,25-0,2$ мкм, а точность обработки по 7–9 квалитету. В связи с тем, что протягивание является высокопроизводительным процессом, который обеспечивается дорогостоящим инструментом, его применяют только в массовом и крупносерийном производствах.

При протягивании внутренних поверхностей главное движение резания совершают многолезвийные режущие инструменты – протяжки и прошивки (рис. 108). Они совершают поступательное перемещение относительно неподвижной заготовки. Причем протяжки

работают на растяжение, а прошивки – на сжатие. Поэтому длина прошивок не превышает 15 её диаметров. Наружные поверхности обрабатывают плоскими протяжками. Протягивание наружных поверхностей в 5–10 раз производительнее фрезерования, протягивание внутренних поверхностей в 10–15 раз производительнее зенкерования и развертывания.

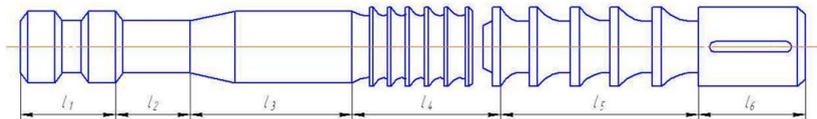


Рис. 108. Конструкция протяжки для обработки внутренних поверхностей

В некоторых случаях сложность конфигурации поверхности изделия позволяет производить обработку только протягиванием независимо от серийности производства.

Специфической особенностью протягивания является то, что оно производится большим количеством зубьев (рис. 109). Зубья протяжки имеют значительную длину режущей кромки, охватывающей обрабатываемую поверхность по всему контуру. В процессе протягивания проводится последовательная обработка всеми зубьями – черновыми, чистовыми, калибрующими и выглаживающими.

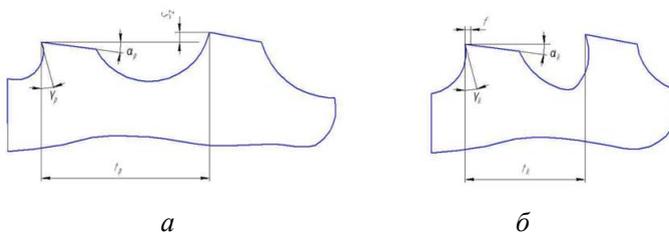


Рис. 109. Конструкция режущих (а) и калибрующих (б) зубьев рабочей части протяжки

Протяжки изготавливают в основном из быстрорежущих сталей типа Р9Ф5, Р18К10, а также из легированных сталей типа ХВГ.

Замковая часть протяжки, которая называется хвостовиком, служит для её закрепления в патроне каретки. Шейка служит для

соединения замковой части с передней направляющей частью. Передняя направляющая часть вместе с направляющим конусом необходима для центрирования заготовки в начале процесса резания. На режущей части располагают режущие зубья, которые срезают основной припуск на обработку. Высота каждого последующего зуба рабочей части протяжки больше высоты предыдущего на величину, численно равную подаче на зуб. На режущих зубьях имеются стружкоразделительные канавки для облегчения образования и удаления стружки.

Калибрующая часть состоит из калибрующих зубьев, форма и размеры которых соответствуют форме и размерам последнего режущего зуба. Они предназначены для придания обработанной поверхности окончательных размеров, необходимой точности и шероховатости поверхности.

7.8. Осевая обработка в процессах изготовления деталей

На сверлильных станках проводят следующие виды осевой обработки:

- сверление – процесс обработки сверлом, при котором получают сквозное или глухое отверстие в сплошном материале;
- рассверливание – процесс обработки сверлом, при котором увеличивают диаметр предварительно полученного отверстия;
- зацентровка – процесс обработки центровочным сверлом для получения центрального отверстия;
- зенкерование – процесс обработки зенкером с целью повышения точности диаметра и снижения шероховатости предварительно полученного отверстия;
- развертывание – процесс окончательной обработки разверткой с целью повышения точности диаметра и снижения шероховатости предварительно полученного отверстия, обычно производится после зенкерования;
- зенкование – процесс обработки зенковкой с целью получения точного конического углубления на входе в отверстие;

- цекование – процесс обработки цековкой с целью получения точного цилиндрического углубления на входе в отверстие или площадку на поверхности около отверстия, перпендикулярную ему;
- резбонарезание – процесс нарезания резьбы метчиком в заранее просверленном отверстии.

Сверление обеспечивает шероховатость обработанной поверхности $R_a = 5\text{--}20$ мкм и точность по 11–13 квалитету.

При обработке заготовку неподвижно устанавливают на столе станка, а инструмент перемещают вдоль оси шпинделя (рис. 110). Процесс резания при сверлении протекает в значительно худших условиях, чем при точении: затруднены отвод стружки и подвод охлаждающей среды; происходит значительное трение стружки о поверхности стружечных канавок инструмента и инструмента об обработанную поверхность, деформация стружки и тепловыделение. Скорость резания инструмента на режущей кромке изменяется от максимального значения на периферии до нуля в центре сверла.

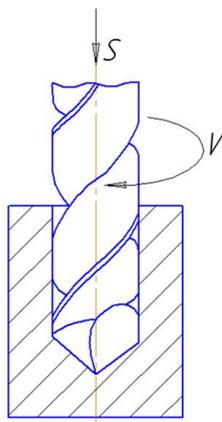


Рис. 110. Схема сверления отверстия в сплошном материале

При осевой обработке движение резания создает образующую линию, являющуюся окружностью, а движение подачи, направленное строго вдоль оси вращения, определяет контур в виде прямой линии, по которому перемещается образующая. В результате осевой обработки всегда получается внутренняя цилиндрическая поверхность.

Специфическим вариантом осевой обработки можно рассматривать сверление на токарном станке, при котором заготовку зажимают в патроне станка, а инструмент в пиноле задней бабки. В этом случае вращение сообщается заготовке, а движение подачи – инструменту.

В зависимости от назначения различают сверла спиральные, перовые, для глубокого сверления, центровочные и др. По конструкции они бывают цельные и составные, особенно сверла большого диаметра, рабочую часть которых изготавливают из инструменталь-

ного материала или с напаянной пластинкой из твердосплавного материала, а хвостовую — из конструкционной стали, с цилиндрическим и коническим хвостовиком.

Наибольшее распространение при осевой обработке нашли спиральные сверла, как самые производительные.

Спиральное сверло имеет два зуба (рис. 111), образованные двумя стружечными канавками, и состоит из рабочей и крепежной частей (шейка, хвостовик).

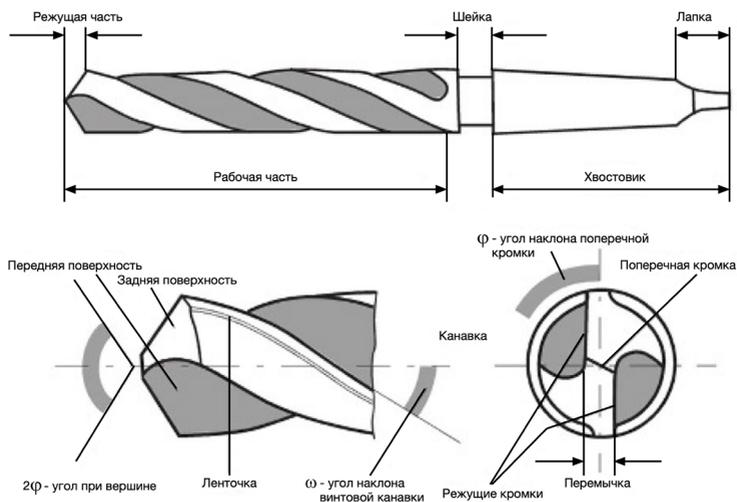


Рис. 111. Конструкция спирального сверла

Рабочая часть — часть сверла от поперечной режущей кромки до выхода стружечных канавок, на которой различают режущую часть и обратный конус. Режущая часть сверла — это участок рабочей части, который в процессе работы производит резание материала и образует стружку. На режущей части в местах пересечения передних и задних поверхностей находятся две главные режущие кромки, а в месте пересечения задних поверхностей — поперечная режущая кромка. В самом начале ленточки за главными режущими кромками находятся две вспомогательные режущие кромки, подчищающие неровности, оставляемые главными режущими кромками. Рабочую часть от режущей части до конца винтовой канавки называют обратным конусом. Обратная конусность, представляющая собой

уменьшение наружного диаметра рабочей части сверла, нужна для того, чтобы уменьшить трение сверла в отверстии.

Шейка – часть сверла с уменьшенным диаметром, соединяющая рабочую часть с хвостовиком.

Хвостовик – часть сверла, предназначенная для закрепления и передачи крутящего момента. Хвостовики бывают коническими и цилиндрическими. Поводок на хвостовике служит для привода сверла, а лапка – для крепления сверла в прорези переходной втулки и удаления сверла из шпинделя или втулки.

Геометрические параметры спирального сверла определяют в основных координатных плоскостях. Вектор скорости главного движения резания V в периферийной точке главной режущей кромки – уголке проходит касательно ее траектории в главном движении резания, а основная плоскость – перпендикулярно к нему, то есть через эту точку и ось вращения сверла.

Стандартные спиральные сверла, в соответствии с ISO, выпускаются короткой серии, длинной серии, с хвостиком «конус Морзе», с коротким цилиндрическим хвостовиком, ступенчатыми, оснащенными пластинами из твердых сплавов, диаметром от 0,1 до 80 мм и др.

Перовые сверла (рис. 112) применяют сравнительно редко ввиду малой производительности и небольшой точности получаемого отверстия. Перовые сверла применяются в основном для обработки отверстий большого диаметра. Для глубокого сверления при длине отверстия больше 10 диаметров сверла используют пушечные, ружейные, шнековые сверла. Для получения отверстий диаметром более 100 мм применяют кольцевые или многолезвийные сверла.

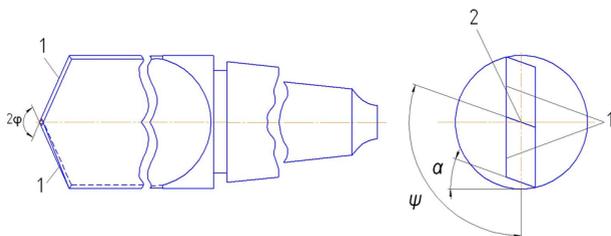


Рис. 112. Конструкция перового сверла: 1 – режущие кромки; 2 – сердцевина; 2φ – угол при вершине; ψ – угол наклона поперечной режущей кромки; α – задний угол

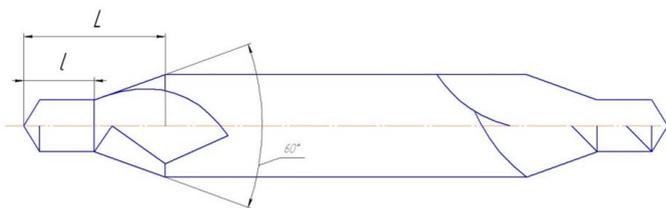


Рис. 113. Конструкция центровочного сверла

Центровочные сверла (рис. 113) применяют для получения центровых отверстий. Обычно они имеют две рабочие части (с двух сторон). Рабочая часть длиной L образует отверстие на длине l и коническую установочную поверхность с углом 60° на торце заготовки, по которой базируется центр станка. В центровом углублении свободно размещается острие центра. Сверло выполнено в комбинации с зенковкой и выполняет две операции за один рабочий ход.

Многолезвийное, или кольцевое, сверло применяют при обработке отверстий большого диаметра. В отличие от других типов сверл, оно удаляет из отверстия стружку по кольцу, оставляя внутренний стержень. Сверло является сборочной единицей и состоит из корпуса и ножей двух типов — плоского и трапециевидного, которые винтами крепят к корпусу. Применение таких типов сверл экономит металл, затраты труда и повышает производительность обработки.

Однолезвийные сверла для глубоких отверстий называют ружейными и пушечными. В отличие от двухлезвийных сверл, они обеспечивают более точное соблюдение оси отверстия. Ружейные сверла могут быть с наружным и внутренним отводом стружки. В последние годы разработаны новые конструкции сверл, значительно повышающие их стойкость и производительность.

Цельные сверла из твердых сплавов предназначены для обработки труднообрабатываемых материалов, повышения производительности обработки и стойкости инструмента. У таких сверл поперечная режущая кромка (перемычка) плавно переходит в главную режущую кромку, уменьшая основные нагрузки и обеспечивая свободный сход стружки по всей ширине резания. Мощная и активно режущая перемычка подвергает стружку вторичной деформации,

в результате чего она ломается на отдельные чешуйки. Симметричная вершина сверла обеспечивает ему хорошее центрирование и высокую точность.

Главные режущие кромки имеют фаску или округление для уменьшения нагрузки и улучшения для формирования стружки. Конструкция и геометрия сверла обеспечивают хорошее охлаждение его при сверлении отверстий длиной до трех диаметров. Для более глубоких отверстий в сверле выполняют внутреннюю винтовую канавку для подвода СОЖ. Эти сверла выпускают для получения отверстий диаметром от 1,6 до 12 мм.

Зенкеры (рис. 114) предназначены для обработки отверстий в литых и штампованных заготовках, а также предварительно просверленных отверстий. В отличие от сверл они снабжены тремя, четырьмя или пятью лезвиями и не имеют поперечной режущей кромки.

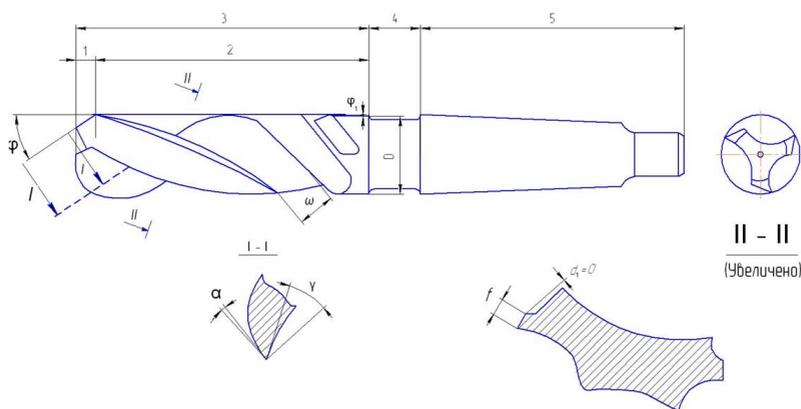


Рис. 114. Конструкция зенкера

Шероховатость после обработки зенкером достигает $R_a = 1,25-5$ мкм, а точность — 8–12 квалитета. Зенкерование может быть окончательной чистовой обработкой. Припуск на зенкерование составляет 0,5–3 мм на сторону.

Развертки (рис. 115) применяют для отделочной обработки отверстий, достигая точность по 7 квалитету и шероховатость поверхности $R_a = 0,32$ мкм. Припуск на черновое развертывание составляет 0,15–0,5 мм, а на чистовое — 0,05–0,25 мм на диаметр. Развертки бывают ручные и машинные.

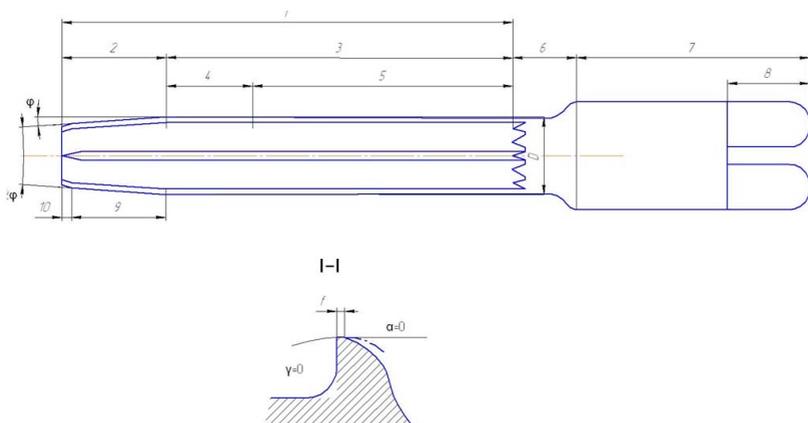


Рис. 115. Конструкция развертки

Выводы

1. Обработка резанием является основным видом обработки, обеспечивающим заданную точность и качество изделий.
2. Обработка резанием подразделяется на лезвийную и абразивную обработки, которые применяются исходя из технических требований, предъявляемых к изделиям.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое обработка резанием?
2. Что такое припуск?
3. Чем различаются чистовая и черновая обработки?
4. Какие существуют виды резцов?
5. Какие плоскости различают в геометрии резцов?
6. Какие углы различают в геометрии резцов?
7. Какие поверхности различают в геометрии резцов?
8. Что такое подача?
9. Что такое глубина резания?
10. Какой вид обработки резанием позволяет получить высокую степень чистоты поверхности и точности обработки?

8. ОТДЕЛОЧНАЯ ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Во время эксплуатации в большинстве случаев разрушение детали начинается с поверхности. Поэтому при изготовлении детали к ее поверхностному слою предъявляются более высокие требования, чем к основному металлу. Однако методы механической обработки во многих случаях обладают ограниченными технологическими возможностями в плане обеспечения показателей качества обрабатываемой поверхности. Так, традиционные методы механической обработки, такие как точение, фрезерование, шлифование и др., часто не позволяют обеспечить требуемое качество, предъявляемое к поверхностному слою по условиям эксплуатации. Одним из эффективных методов механической обработки, позволяющих значительно снизить шероховатость и волнистость поверхности, а иногда увеличить поверхностную твердость и сформировать в поверхностном слое благоприятное напряженное состояние, является отделочная обработка. Поэтому для некоторых поверхностей заключительным этапом механической обработки являются отделочная или отделочно-упрочняющая технологические операции. Последняя направлена на получение высокой чистоты поверхности, а также необходимых параметров твердости и остаточных напряжений. В качестве финишной отделочной операции могут применяться, например, полирование абразивными и алмазными лентами, хонингование, суперфиниширование и др., а в качестве отделочно-упрочняющей операции — безабразивная ультразвуковая обработка, алмазное выглаживание, обкатывание роликами и шарами и т. д.

8.1. Полирование абразивными и алмазными лентами

Полирование относится к высокопроизводительным методам финишной обработки. Обработка производится движущейся с большой скоростью эластичной лентой, покрытой абразивными или алмазными зернами и натянутой между тремя шкивами, один из которых является ведущим (рис. 116). Полирование позволяет получить наиболее рациональные характеристики шероховатости

при высоте микронеровностей $R_a = 0,1-0,3$ мкм. Однако вследствие высокой упругости лент полирование практически не исправляет погрешности формы, отклонения взаимного расположения поверхностей и не повышает точность размеров, которая была достигнута после предыдущей обработки.

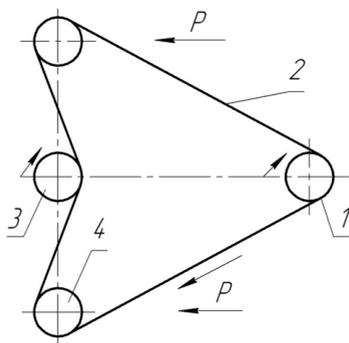


Рис. 116. Схема полирования абразивными и алмазными лентами:
 1 — шкив электродвигателя; 2 — абразивная лента;
 3 — обрабатываемая деталь

В настоящее время при финишной обработке главным образом применяется лента с абразивным покрытием. Абразивные зерна, используемые при полировании, отличаются от зерен, используемых при шлифовании, тем, что они более округлые и мягкие, и это позволяет сглаживать микровыступы обрабатываемой поверхности, не производя глубоких царапин. Зернистость ленты определяется требованием, предъявляемым условиями эксплуатации к шероховатости поверхности изделия.

При полировании, кроме абразивных, применяются алмазные эластичные ленты на каучукодержащих связках, которые наряду с улучшением характеристик шероховатости приводят к повышению микротвердости тонких поверхностных слоев детали (2–3 мкм). Тонкое алмазное ленточное полирование позволяет получить достаточно низкую шероховатость в пределах $R_a = 0,05-0,16$ мкм.

Следует отметить, что высокая эластичность и упругость лент позволяют обрабатывать сложные криволинейные поверхности. Например, такими лентами полируют шейки коленчатого вала.

Полирование шеек способствует созданию условий для жидкостного трения подшипников скольжения вала при работе двигателя. В отличие от шлифованных, полированные поверхности не создают в масляном слое дополнительные турбулентности, не способствуют разогреву масла, снижению его вязкости и гидродоъемной силы, приводящих к уменьшению толщины масляного слоя.

Полирование может производиться специальными абразивными лентами из шлифовальной шкурки или специальными абразивными пастами, натираемыми на войлочные ленты или круги.

8.2. Магнито-абразивная обработка

Магнито-абразивная обработка — это эффективный способ финишной обработки цилиндрических деталей. Сущность этого способа заключается в том, что цилиндрическую деталь помещают между двумя сердечниками электромагнитов с некоторым зазором (рис. 117).

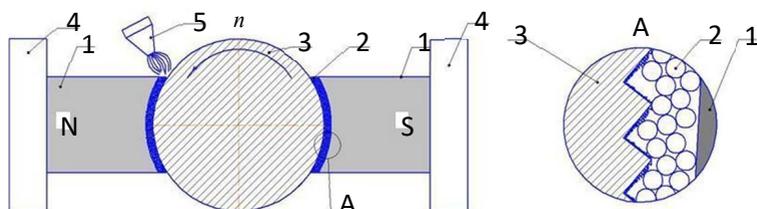


Рис. 117. Схема магнито-абразивной обработки цилиндрической поверхности: 1 – сердечники; 2 – ферромагнитный порошок; 3 – деталь; 4 – держатели; 5 – сопло для подачи рабочей жидкости

При прохождении через электромагниты пульсирующего выпрямленного тока в сердечниках наводится электромагнитный поток, который пронизывает заготовку в диаметральном направлении. В зазоры между деталью и сердечниками подается твердый ферромагнитный порошок, например ферробор. Зерна ферромагнитного порошка, удерживаемые в зазорах силами электромагнитного поля, производят микрошлифование обрабатываемой поверхности. За счет силы трения в местах контакта зерна несколько смещаются

в направлении вращения заготовки и пересекают магнитные линии. В результате возникает дополнительная электродвижущая сила, которая, в свою очередь, порождает микротоки. Эти микротоки интенсифицируют процесс съема металла и улучшают физико-механические свойства поверхностного слоя детали.

Отличительной способностью процесса магнито-абразивного микрошлифования является то, что во время обработки зерна порошка контактируют преимущественно с выступами микронеровностей поверхности, которые являются концентраторами магнитного поля. Это приводит к избирательному микрорезанию металла до тех пор, пока не удалится верхний слой, равный по высоте исходной шероховатости. В результате формируется новый микропрофиль, который дает высокое качество поверхности изделия. Магнито-абразивная обработка позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности до $R_a = 0,04$ мкм.

8.3. Суперфиниширование

Суперфиниширование, или суперфиниш, является одним из самых эффективных методов отделочной обработки наружных рабочих поверхностей. Оно применяется для отделки поверхностей таких деталей, как коленчатые и распределительные валы, поршни, поршневые пальцы и др. Суперфиниширование снижает шероховатость R_a до 0,02–0,16 мкм и повышает точность примерно на один квалитет. Припуск на обработку обычно составляет 5–20 мкм при исходной шероховатости $R_a = 0,63–1,25$ мкм шлифованных поверхностей.

Суперфиниширование, по сути, является доводкой рабочих поверхностей, осуществляемой абразивными брусками, которые совершают колебательные движения при взаимодействии с вращающейся заготовкой (рис. 118).

На производительность процесса суперфиниширования и качество обработанной поверхности влияют удельное давление на бруски, скорости колебательного и вращательного движений, высота исходной шероховатости, характеристики абразивных брусков и состав СОЖ.

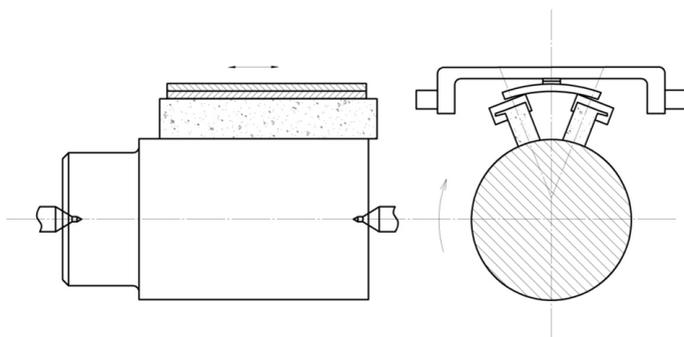


Рис. 118. Схема процесса суперфиниширования наружных поверхностей цилиндрических деталей

Суперфиниширование проводится брусками из белого электрокорунда 24А, 25А, карбида кремния зеленого 63С, 64С и алмаза синтетического АС. При обработке закаленных сталей используются все перечисленные материалы. При обработке вязких, пластичных материалов применяются бруски из карбида кремния и алмаза синтетического.

В зависимости от требований, предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности, суперфиниширование может быть одно-, двух- или трехкратным.

8.4. Притирка

Притирка — это доводка поверхностей деталей с помощью специальных инструментов — притиров. Целью притирки является обеспечение плотного контакта сопрягаемых поверхностей за счет идентичности их геометрии в зоне контакта. Материалом притира обычно является чугун. Структура чугуна способствует внедрению в поверхность притира абразивных зерен, которые срезают тонкие слои металла с поверхностей обрабатываемых деталей. Притиры изготавливают по принципу цанговых зажимов, что обеспечивает по мере необходимости изменение их размеров. Внутреннюю поверхность изделия обрабатывают притиром, вдвигаемым внутрь, а наружную — притиром, надвигаемым на поверхность. Вращение обрабатываемой заготовке задается главным приводом станка, при

этом притир получает возвратно-поступательное перемещение от рабочего. При окончательной притирке достигается высокая чистота поверхности ($R_a = 0,02$ мкм).

Разновидностью притирки является взаимная притирка двух деталей, когда одновременно и совместно обрабатываются поверхности, функционирующие в изделии в паре. На производстве таким образом притирают, например, клапаны к гнездам газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания. Обработка происходит при относительном возвратно-вращательном или поступательном движении притираемых деталей. В зону обработки подают абразивные зерна (электрокорунд, карбид кремния, алмазную пасту и т. п.) вместе с минеральным маслом или другой средой, транспортирующей абразив в зону притирки. Чтобы следы резания не налагались друг на друга, необходимо каждый последующий ход притирки начинать с нового относительного положения. О качестве притирки судят визуально по образующимся следам притирки на сопрягаемых поверхностях и по результатам испытаний на герметичность сопряжения притертых деталей.

8.5. Хонингование

Хонингование, то есть притирочное шлифование, применяют для финишной обработки высокоточных внутренних поверхностей после их предварительной обработки растачиванием или шлифованием. Для хонингования стали применяют бруски из электрокорунда, для чугуна – из карбида кремния и синтетического алмаза. Бруски изготавливаются на керамической и бакелитовой связках. Твердость брусков выбирается в зависимости от твердости обрабатываемого материала: чем выше его твердость, тем мягче должны быть бруски. Так, при обработке закаленной стали твердость брусков выбирают от М2 до СМ1, при обработке незакаленной стали и чугуна – от СМ2 до С2 и алюминия – от М3 до СМ2.

Отличительной особенностью процесса хонингования по сравнению со шлифованием является большая площадь контакта абразивных или алмазных брусков с обрабатываемой поверхностью. Поэтому новые бруски некоторое время прирабатывают на брако-

ванных поверхностях, используя при этом специальную прирабочную абразивную смесь.

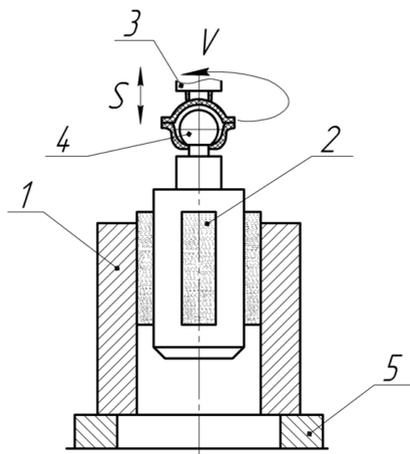


Рис. 119. Схема хонингования внутренних поверхностей цилиндрических деталей: 1 — обрабатываемая деталь; 2 — хонинговальная головка; 3 — шпиндель; 4 — шарнир; 5 — станина

Хонингование гильз цилиндров выполняют алмазными брусками на вертикально-хонинговальных станках (рис. 119). Обработку проводят по схеме плавающего хона, при которой шарнирно соединенная со шпинделем станка хонинговальная головка не требует особо точного совмещения с осью обрабатываемого отверстия. Хонингование должно сопровождаться обильным жидкостным охлаждением зоны обработки. В качестве СОЖ используют смесь керосина с машинным маслом и водно-мыльные эмульсии. Жидкости способствуют охлаждению обрабатываемой поверхности и удалению из зоны резания абразивных частиц, металлической стружки и пыли, что способствует очищению заготовки и инструмента.

В зависимости от требований, предъявляемых к точности и чистоте обработанной поверхности, хонингование может быть одно-, двух- или трехкратным. При черновом хонинговании, при котором точность обработки обеспечивается по 8–9 качеству с чистотой поверхности $R_a = 1,25–2,5$ мкм, припуск на обработку составляет 0,06–0,08 мм; при получистовом хонинговании, при котором

точность обработки обеспечивается по 7–8 качеству с чистотой поверхности $R_a = 0,63–1,25$ мкм, припуск на обработку – от 0,01 до 0,02 мм; при чистовом хонинговании, при котором точность обработки обеспечивается по 5–6 качеству с чистотой поверхности $R_a = 0,04–0,16$ мкм, припуск на обработку – от 0,006 до 0,01 мм. Машинное время при двукратном хонинговании при снятии общего припуска 0,05 мм составляет в среднем 6 мин.

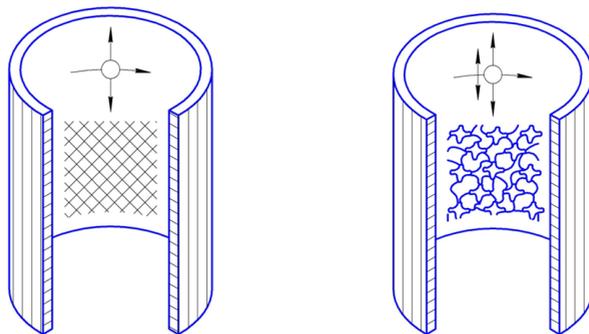


Рис. 120. Внутренние поверхности со специальным микропрофилем, образованным в результате пересечения следов резания

Для получения особого рельефа обрабатываемой поверхности, повышающего износостойкость и долговечность гильз, проводят плосковершинное хонингование, которое осуществляется в два этапа с использованием брусков разной зернистости. После такой обработки на рабочей поверхности образуется сетка от пересечения следов резания, оставленных абразивными или алмазными зернами брусков при движении в разных направлениях (рис. 120). Такая сетка повышает маслосъемность поверхности и значительно снижает силы трения в контакте сопряженных деталей.

В процессе хонингования на зеркало гильзы цилиндра могут быть нанесены прирабочные покрытия, которые практически в 2 раза могут сократить длительность приработки поверхностей деталей.

8.6. Отделочно-упрочняющая обработка

Одним из эффективных методов механической обработки, позволяющим значительно снизить шероховатость и волнистость поверхности, увеличить поверхностную твердость и сформировать в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, является отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). Благодаря этой обработке происходит значительное увеличение несущей способности деталей, работающих в условиях трения и циклического нагружения. Самыми простыми и доступными для внедрения в производство являются такие методы ППД, как выглаживание алмазным индентором и обкатывание роликами и шарами. Они в основном осуществляются на базе широко используемых промышленностью универсальных токарных и фрезерных станков.

Для отделочно-упрочняющей обработки широко используются методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Они, помимо снижения шероховатости обрабатываемой поверхности, позволяют в значительной мере увеличить поверхностную твердость и сформировать в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия. Благодаря этому происходит значительное увеличение несущей способности деталей, работающих в условиях трения и циклического нагружения.

В зависимости от вида деформирующего инструмента и характера контакта с поверхностью детали различают статические, динамические и комбинированные способы. При выборе способа учитывают форму и размеры детали, ее жесткость и прочность материала. Также учитывают требования к точности обработки.

В статических способах отделочно-упрочняющей обработки, таких как обкатывание, раскатывание, алмазное выглаживание и дорнование деформирующими элементами, применяются шарики, ролики, алмазные инденторы и дорны. Эти элементы при обработке находятся в непрерывном контакте с поверхностью детали и оказывают на нее постоянное воздействие с определенным усилием деформирования.

В основе динамических способов отделочно-упрочняющей обработки лежат ударные воздействия на поверхность детали деформиру-

ющих элементов. Такими элементами являются металлическая, стеклянная дробь и микрошарики. Эти способы с успехом применяют для упрочнения поверхностей деталей сложной конфигурации.

В качестве операции, предшествующей отделочно-упрочняющей обработке, обычно используют шлифование или чистовое точение.

8.7. Выглаживание и обкатывание поверхностей

Выглаживание и обкатывание поверхностей являются универсальными методами, но при этом имеют свои рациональные области применения. Так, цилиндрические заготовки с твердостью HRC < 50 целесообразно обрабатывать роликами и шарами, а твердые поверхности HRC > 50 – алмазным выглаживанием. При этом исходная поверхность заготовки под выглаживание должна быть обработана до $R_a = 1,2-2,5$ мкм и к тому же не должна иметь рисок и забоин. При такой исходной шероховатости обработанная выглаживанием поверхность имеет шероховатость $R_a = 0,08-0,3$ мкм. Но после обкатывания той же поверхности шероховатость обработанной поверхности незначительно возрастает и составляет в среднем $R_a = 0,2-0,5$ мкм. Выглаживание и обкатывание чаще всего применяются после шлифования и реже – после чистового точения.

В процессе обкатывания деформирующий инструмент (ролик или шар) под действием силы прижатия внедряется в материал поверхностного слоя, вызывая в нем упругопластическую деформацию. При алмазном выглаживании упругопластическая деформация возникает при взаимодействии обрабатываемой поверхности с алмазным индентором. Эта деформация приводит к сглаживанию имеющихся микронеровностей на обрабатываемой поверхности и наклёпу материала поверхностного слоя.

Алмазные наконечники для выглаживания изготавливают двух типов: со сферической и конической рабочей частью из синтетических поликристаллических алмазов АСПК (карбонадо).

При обкатывании взаимодействие деформирующего инструмента с заготовкой осуществляется в условиях трения качения, а при алмазном выглаживании – в условиях трения скольжения.

Алмазное выглаживание по сравнению с обкатыванием имеет меньшую производительность, но позволяет обрабатывать тонкостенные, нежесткие и неравножесткие заготовки.

Обкатывание роликами и шарами имеет ряд неоспоримых достоинств, основными из которых являются простота конструкции обкатного устройства, обеспечение больших контактных давлений при относительно небольших усилиях прижатия инструмента.

Обкатывающие устройства, применяемые в машиностроении, делятся на два типа: жесткого типа, то есть с жестко закрепленным инструментом, и упругого типа, то есть с упруго закрепленным инструментом. Обкатывающие устройства жесткого типа характеризуются большими возможностями формообразования изделий. Они позволяют значительно снизить отклонения формы и волнистость поверхности и тем самым повысить точность изделий.

Выглаживание и обкатывание позволяют уменьшить исходную шероховатость приблизительно в 10 раз. При этом степень упрочнения обрабатываемой поверхности обеспечивается на уровне 30–50 %. Однако процесс упрочнения ограничивается определенной максимально возможной для данного материала интенсивностью пластической деформации, превышение которой вызывает перенаклёп и разрушение материала поверхностного слоя детали.

После обкатывания и алмазного выглаживания износостойкость обработанной поверхности повышается как правило в 1,5–3 раза. Это происходит в результате снижения шероховатости, повышения твердости и создания остаточных напряжений сжатия в материале поверхностного слоя деталей.

Наиболее эффективным в производстве является упрочняюще-сглаживающее обкатывание (рис. 121). Его сущность заключается в одновременном обкатывании за один проход специальным устройством, включающим упрочняющий шарик из шарикоподшипниковой стали диаметром менее 20 мм и два сглаживающих ролика из закаленной стали со слабовыпуклыми профилями радиусом более 50 мм. При таком обкатывании достигается наиболее высокий технико-экономический эффект. Так, например, упрочняюще-сглаживающее обкатывание подступичных частей валов обеспе-

чивает качественную поверхность без последующей обработки, что в 2,5 раза повышает прочность прессового соединения.



Рис. 121. Фото процесса упрочняюще-сглаживающего обкатывания цилиндрической поверхности шаром и роликами

8.8. Обработка дробью

Обработка дробью очень широко применяется для снижения шероховатости, упрочнения поверхностей деталей сложной конфигурации и многократного повышения долговечности сварных узлов различных машин, особенно работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Она также используется для активации поверхности деталей перед нанесением покрытий. Нередко дробью очищают поверхности детали от окалины, пригоревшей смеси и других дефектов.

Дробеструйная отделочно-упрочняющая обработка представляет собой процесс многократных ударов дробью по обрабатываемой поверхности детали. Это вызывает пластическую деформацию поверхностного слоя и, как следствие, повышение его прочности. Интенсивность упрочнения дробью имеет максимальное значение в начальный период обработки. Затем интенсивность упрочнения уменьшается из-за попадания дробинок на ранее упрочнённые участки.

Обработка дробью проводится на пневмодробеструйных и дробебетных установках. При обработке не требуется строгая ориентация деталей в пространстве. В дробеструйной установке (рис. 122) сжатый воздух под давлением проходит через регулируемую и очищающую аппаратуру к форсунке. При таком движении воздуха в трубопроводе создаётся разрежение, благодаря которому дробинки из бункера затягиваются в струю сжатого воздуха. Разгоняясь вместе с этой струей, они вылетают в зону обработки. Избыток дробы оседает в ящике. Крупные детали устанавливают на решётку установки, а мелкие детали устанавливают в поддоне. Рабочая камера имеет окно и лампу, которые облегчают наблюдение за ходом процесса. Сам процесс обработки дробью может при необходимости корректироваться при помощи системы ручного манипулирования.

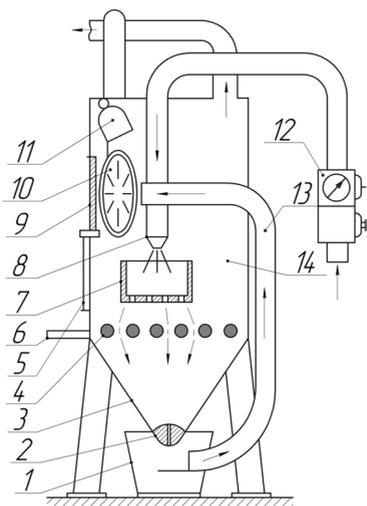


Рис. 122. Схема обработки дробью на пневмодробеструйной установке:
 1 – ящик; 2 – заслонка; 3 – бункер; 4 – решетка; 5 – дверца; 6 – столик;
 7 – поддон; 8 – форсунка; 9 – окно; 10 – проемы; 11 – лампа;
 12 – очищающая аппаратура; 13 – трубопровод; 14 – рабочая камера

Деформирующим элементом на установках является обычно чугунная, стальная или стеклянная дробь. В производстве обычно применяют дробь из нержавеющей стали диаметром до 2 мм. Чем меньше диаметр дробы, тем ниже шероховатость обработанной по-

верхности. Дробь из стали имеет высокую кинетическую энергию. Это в значительной степени определяет качество обработанной поверхности. Обработанная дробью поверхность имеет шероховатость $R_a = 0,16-0,3$ мкм.

Для любых способов дробеструйной обработки на степень упрочнения оказывают влияние следующие факторы:

- скорость дроби при встрече с обрабатываемой деталью;
- размер дроби;
- качество и расход дроби;
- продолжительность обработки;
- угол атаки;
- плотность, с которой дробь покрывает обрабатываемую поверхность;
- расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности;
- физико-механические свойства металла обрабатываемой детали.

Все методы дробеструйной отделочно-упрочняющей обработки на оптимальных режимах повышают поверхностную твёрдость и формируют в материале поверхностного слоя остаточные напряжения сжатия.

Кроме того, эффективность обработки дробью может быть повышена при её сочетании с предварительной термической или химико-термической обработкой детали – закалкой, цементацией, азотированием и др.

Недостатками упрочнения дробью являются неравновесное напряжённое состояние и неравномерный наклёп поверхностного слоя обрабатываемой детали.

8.9. Вибрационное поверхностное деформирование

Широкие технологические возможности для формирования регулярного микрорельефа поверхности и улучшения эксплуатационных свойств деталей имеют способы вибрационного поверхностного пластического деформирования (виброобкатывание, вибораскатывание, чеканка и др.) (рис. 123). Их суть заключается в том, что в результате сложного относительного перемещения деформирующего инструмента (например, шара) относительно обрабатываемой

поверхности на ней выдавливаются по определённому заданному рисунку и форме канавки, между которыми сохраняется первичный микрорельеф поверхности или создаётся новый микрорельеф (рис. 124). Низкочастотная вибрация инструмента в процессе обработки позволяет весьма точно и в больших пределах регулировать размерные параметры регулярного рельефа, взаиморасположение его неровностей, а также изменять в нужную для эксплуатации сторону физико-механические свойства материала поверхностного слоя.

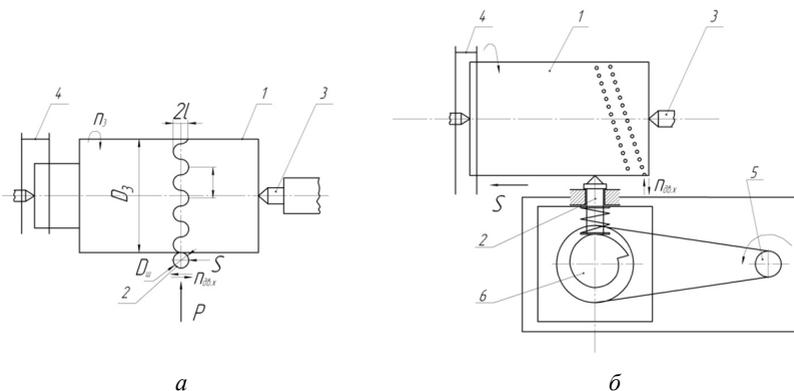


Рис. 123. Схемы формирования регулярного микрорельефа на цилиндрической поверхности вибрационным пластическим деформированием: *a* – виброобкатыванием; *б* – чеканкой;
 1 – деталь; 2 – инструмент; 3 – центр; 4 – поводок;
 5 – шкив на электродвигателе; 6 – кулачок

На поверхности детали можно получать разнообразный и сложный профиль микрорельефа, который зависит от соотношения технологических параметров процесса виброобработки (например, от соотношения числа двойных ходов $n_{\text{дв.х}}$ и частоты вращения заготовки n).

В процессе виброобработки на поверхности образуется система смазочных канавок и карманов, которая дает возможность оптимизировать площадь контакта и повысить маслоёмкость поверхности. При этом существенно улучшаются все физико-механические характеристики поверхностного слоя. Значительное упрочнение материала поверхностного слоя при виброобкатывании достигается в результате того, что деформирующий инструмент «атакует» каж-

дый выступ микронеровностей исходной поверхности с различных сторон, как бы раскатывая металл в разных направлениях.

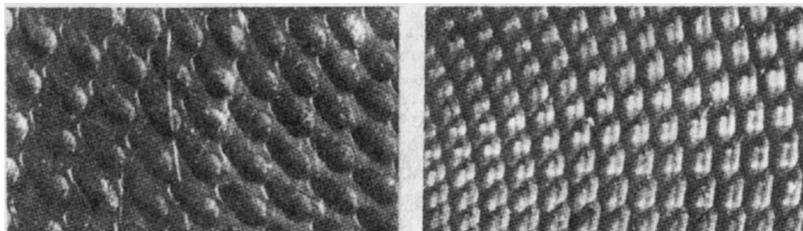


Рис. 124. Вид поверхностей, обработанных методами вибрационного пластического деформирования (extxe.com)

Обычно для создания системы масляных канавок вибрационное обкатывание производят шариками диаметром не менее 3–4 мм. Но обработку деталей, изготовленных из вязких материалов, выполняют с меньшими усилиями деформирования и диаметрами шариков 1–2 мм.

Микрорельеф, сформированный виброобработкой, повышает плавность работы подвижного сопряжения за счет снижения коэффициента трения в 1,6–2,2 раза. При сухом трении канавки работают, как ловушки, задерживая в себе продукты износа, пыль и абразивные частицы, благодаря чему устраняется их абразивное действие.

Создание регулярного микрорельефа на обеих поверхностях пары трения повышает износостойкость сопряжения в среднем в 2 раза.

8.10. Электромеханическая обработка

Электромеханическая обработка в основном применяется для отделки и упрочнения поверхностного слоя изделий, которые работают в тяжёлых условиях. Сущность электромеханической обработки заключается в том, что через зону контакта инструмента с деталью пропускают электрический ток, который разогревает металл до температуры 900 °С (рис. 125). Это облегчает его пластическую деформацию и существенно улучшает эксплуатационные свойства изделия. В качестве инструмента при электромеханиче-

ской обработке используют неподвижно закреплённую пластину с тороидальной рабочей поверхностью или вращающийся ролик. При деформировании этим инструментом обрабатываемая поверхность одновременно подвергается воздействию давления инструмента и тепла проходящего тока. Это способствует повышению физико-механических свойств материала поверхностного слоя и снижению высотных параметров микрорельефа поверхности.

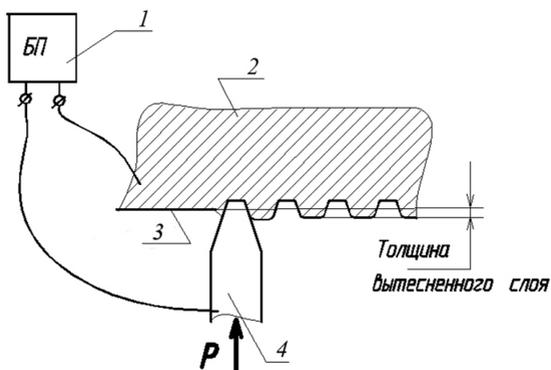


Рис. 125. Схема электрохимической обработки:
1 — источник питания; 2 — заготовка; 3 — обрабатываемая поверхность; 4 — индентор

Наиболее распространён способ электрохимического упрочнения вращающимися роликами, так как их стойкость намного выше, чем плоских пластин. Деформирующий ролик обычно изготавливается из быстрорежущей стали.

Электрохимическая обработка цилиндрических деталей осуществляется на станках токарной группы. Силовой установкой при этом является сварочный трансформатор переменного тока.

Вследствие тепловыделения в зоне обработки и давления инструмента структура материала в поверхностном слое представляет измельчённый мартенсит. Он способствует значительному повышению твердости. Повышение твердости происходит также за счёт увеличения протяжённости границ зёрен и образования вторичных фаз. Глубина упрочненного слоя после электрохимической обработки составляет в среднем 1 мм.

8.11. Ультразвуковая безабразивная обработка

Ультразвуковая безабразивная обработка, применяемая в качестве отделочно-упрочняющей операции после механической обработки резанием, позволяет получить высокое качество рабочих поверхностей. Она особенно эффективна при обработке нежестких и тонкостенных деталей, так как практически не вызывает деформации технологической системы, в которой ведется обработка.

При обработке выглаживанием ультразвуковые колебания, создаваемые колебательной системой (генератором, магнито-стрикционным или пьезоэлектрическим преобразователем, концентратором), передаются через волновод на алмазный индентор и обеспечивают ему импульсивный характер воздействия на обрабатываемую поверхность (рис. 126).

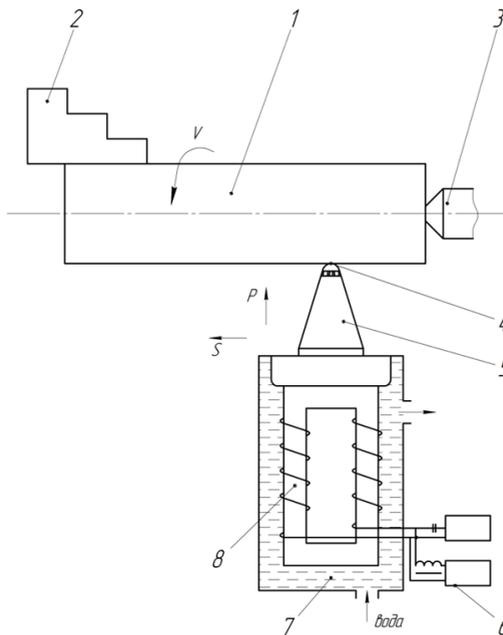


Рис. 126. Схема отделочно-упрочняющей ультразвуковой обработки:
1 — обрабатываемая деталь; 2 — кулачки патрона; 3 — задний центр токарного станка; 4 — индентор; 5 — концентратор; 6 — ультразвуковой генератор; 7 — система охлаждения; 8 — магнито-стрикционный преобразователь

Такое воздействие деформирующего инструмента на поверхностный слой деталей при ультразвуковом выглаживании дает возможность кардинально повысить его прочность как за счет увеличения твердости, так и за счет формирования остаточных напряжений сжатия. Происходит это главным образом за счет резкого увеличения (по сравнению с традиционным алмазным выглаживанием) интенсивности пластической деформации, обусловленного динамической составляющей усилия деформирования при значительно меньшей статической силе ($P = 50\text{--}200$ Н) со стороны инструмента. При ультразвуковой обработке частота колебаний составляет 20–40 кГц, амплитуда колебательных смещений индентора равна 10–20 мкм. В результате ультразвуковой обработки микротвердость поверхностного слоя закаленных сталей увеличивается на 50–71 %, а чистота поверхности не уступает полированным деталям ($R_a = 0,1\text{--}0,3$ мкм).

Ультразвуковую обработку также применяют для прошивания отверстий, долбления полостей, отделки рабочих поверхностей зубьев прямозубых колес с эвольвентным профилем, дорнования и других видов обработки деталей, изготовленных из твердых и хрупких материалов.

8.12. Технологический процесс изготовления детали

Качество изделий и их эксплуатационные свойства зависят от всей совокупности технологических операций процесса изготовления. В этой связи при проектировании технологического процесса изготовления изделий встает трудная технологическая задача выбора наиболее рациональных методов обработки и последовательности их выполнения, обеспечивающих требуемое качество деталей при минимальных расходах на производство. Эта задача должна решаться с учетом изменений точности и физико-механических свойств по ходу механической и термической обработки.

Наиболее ответственные поверхности должны последовательно подвергаться все более тонким процессам обработки, при этом особое внимание следует уделять последним двум-трем операциям, так как они в наибольшей степени оказывают влияние на форми-

рование параметров качества изделий, назначаемых конструктором исходя из служебного назначения детали. Но при этом надо иметь в виду, что в большинстве случаев техническими условиями не оговариваются такие важные для эксплуатационных свойств изделия характеристики, как структура поверхностного слоя, величина и знак остаточных напряжений и др.

Различные методы финишной обработки, обеспечивая в ряде случаев практически одинаковую шероховатость и точность деталей, придают им совершенно различные физико-механические свойства, что сильно влияет на долговечность и надежность изделий.

Наиболее распространенной в машиностроении финишной обработкой закаленных деталей высокой точности является шлифование с последующим полированием. При этом надо иметь в виду, что полирование не исправляет погрешности формы заготовок, поэтому требуемую точность изделий необходимо получить на предыдущих операциях механической обработки, включая чистовое шлифование.

Валы и оси самой разнообразной формы составляют большую часть номенклатуры изготавливаемых деталей и определяют ресурс узлов и агрегатов машин. Их в основном изготавливают из среднеуглеродистых и низколегированных сталей, при этом в качестве заготовки обычно используют штамповку, поковку, горячекатаный прокат и значительно реже — литую заготовку. По ходу технологического процесса их подвергают обработке резанием и улучшению. При этом особое внимание уделяют обеспечению необходимой точности изделий и высокого качества поверхностного слоя, которые зависят от оптимального сочетания технологических операций механической и термической обработки. Решение задачи качественного изготовления деталей этого класса весьма актуально для машиностроительных предприятий. Поэтому именно для этого класса деталей представим типовой технологический процесс изготовления.

На первой фрезерно-центровальной операции производят подрезку торцов заготовки и сверление центровых отверстий. Заготовку устанавливают на призмы с базированием в осевом направлении по упору. Обработку осуществляют на фрезерно-центровальном станке-полуавтомате.

На второй операции проводят черновую токарную обработку в один или несколько проходов в зависимости от величины припуска и требований к точности изделия. Заготовку устанавливают в центрах станка с упором в торец. Обработку осуществляют проходным резцом на токарном станке с числовым программным управлением.

На следующей операции производят получистовую токарную обработку в один или несколько проходов на том же станке, но, естественно, на другом режиме обработки.

На четвертой операции производят фрезерование шпоночных пазов и лысок. Заготовку устанавливают на призмы с базированием в осевом направлении по упору. Обработку осуществляют концевой фрезой на вертикально-фрезерном станке.

На пятой операции проводят термическую обработку — улучшение, которое заключается в последовательном проведении закалки и высокотемпературного отпуска. В результате улучшения металл приобретает однородную структуру сорбита, которая обладает высокой прочностью и пластичностью.

Закалка токами высокой частоты является наиболее распространенным и высокопроизводительным способом поверхностного упрочнения металла. Она позволяет получить требуемое сочетание свойств мартенситной структуры закаленного слоя и пластичной сердцевины при благоприятном характере переходной зоны. Передача электрического тока без соприкосновения с обрабатываемой деталью позволяет получить после закалки чистую, без окалины поверхность изделия. Высокотемпературный отпуск, проводимый при температуре 550–670 °С, позволяет снять высокие закалочные остаточные напряжения. В зависимости от габаритов заготовки термическую обработку проводят в вакуумных шахтных или муфельных печах.

На шестой операции производят центродоводочную операцию, то есть дополнительную обработку центровых отверстий, форма которых была искажена во время термической обработки. Обработку проводят на центрошлифовальном станке. Доводку центровых отверстий проводят последовательно за два установка. При этом базирование заготовки осуществляют в центре и трехопорном люнете.

На седьмой операции проводят чистовое шлифование поверхностей, которые требуют повышенной точности и низкой шероховатости. Заготовку устанавливают в центрах станка с упором в торец. Обработку осуществляют абразивным кругом на круглошлифовальном станке.

На восьмой операции производят полирование поверхностей, причем исключительно тех поверхностей, высокая чистота которых обусловлена условиями эксплуатации. Обработку осуществляют на токарном станке. При этом базирование заготовки осуществляют в центрах станка.

В заключение осуществляют контроль качества изделия. Качество изготовления детали оценивают степенью соответствия полученных физико-механических свойств и геометрических параметров изделия требованиям чертежа или технических условий.

Качество детали определяют путем проведения различных измерений её размеров и взаимного расположения поверхностей. Под измерением понимается определение количественных характеристик объекта измерений. Например, определение размера, чистоты поверхности и твердости.

Методы контроля, измерительные средства и специальные приспособления выбирают в зависимости от конструктивных особенностей детали, вида поверхностей и требований к точности изготовления.

Для измерения размеров обычно используют универсальные измерительные устройства. Они в полной мере обеспечивают измерение величины в пределах определенного интервала значений. В основном универсальные устройства являются шкальными инструментами. Они подразделяются на штриховые инструменты с нониусом, например штангенциркуль, а также на микрометрические механические инструменты, такие как микрометр.

В зависимости от назначения измерительный инструмент снабжается наконечниками и установочными элементами.

Линейные размеры деталей чаще всего измеряют обычными универсальными инструментами: штангенциркулями и микрометрами. Размеры зубьев зубчатых колес и шлицов контролируют штангензубомерами и микрометрическими нормалемрами. Вза-

имное расположение поверхностей измеряют специальными приборами и приспособлениями с индикаторами часового типа.

Погрешность измерения, которая может быть получена при применении того или иного инструмента, не должна превышать поля допуска размера детали.

Выводы

1. Отделочная обработка применяется в технологических процессах, только когда к качеству поверхностей изделий предъявляются высокие требования со стороны условий эксплуатации.

2. Отделочная обработка позволяет значительно снизить шероховатость и волнистость поверхности, а иногда увеличить поверхностную твердость и сформировать в поверхностном слое благоприятное напряженное состояние.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается сущность полирования?
2. В чем заключается сущность хонингования?
3. Что такое наклеп?
4. Чем отличаются абразивные зерна для полирования от зерен для шлифования?
5. Для чего используется выглаживание поверхностей?
6. Для чего используется электромеханическая обработка поверхности?
7. Для чего используется обработка дробью?
8. В чем заключается сущность финишной антифрикционной безабразивной обработки?
9. Для чего используется полирование абразивными и алмазными лентами?
10. Какой способ приводит к образованию сетки на обработанной поверхности от пересечения следов резания абразивными или алмазными зёрнами?

9. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для понимания роли и значения сварки в промышленном производстве важно определить её место среди других способов соединения твердых тел.

Способы соединения твердых материалов можно разделить на две группы: механические, обусловленные исключительно механической связью, и молекулярно-механические, обусловленные образованием металлической связи. К первой группе относятся резьбовые, заклепочные, шпоночные и другие соединения. Ко второй группе относятся соединения сваркой, пайкой, склеиванием разнообразными клеевыми композициями и пр. Соединения могут быть разъёмными, т. е. допускающими разборку без разрушения, и неразъёмными.

В современном производстве сварка широко применяется для соединения практически всех металлов и сплавов, пластмасс, стекол и керамики. Поэтому ее можно считать одним из основных способов соединения твердых материалов.

Для того чтобы получить прочное соединение твердых тел, необходимо обеспечить взаимодействие их поверхностей на молекулярном уровне. Возможность такого взаимодействия соединяемых поверхностей затрудняется наличием оксидных пленок и различного рода загрязнений. Трудности получения прочного соединения преодолеваются либо нагревом металла соединяемых частей, либо механическим сдавливанием. Нагрев повышает подвижность атомов и увеличивает пластичность металла. Механическое сдавливание вызывает пластическое течение металла вдоль раздела соединяемых поверхностей, способствует их обнажению и межмолекулярному взаимодействию. Нагрев и механическое сдавливание при сварке являются взаимосвязанными факторами: чем выше нагрев, тем меньшее давление требуется при сдавливании. Если температура нагрева в зоне сварки сопоставима с температурой плавления металла, то механическое сдавливание становится излишним, так как происходит сварка металлов плавлением. В противном случае требуется значительное механическое сдавливание, которое приводит

к холодной сварке металлов. Таким образом, способы сварки делятся на два вида: сварку плавлением (сварку в жидкой фазе) и сварку давлением (сварку в твердой фазе). Однако во многих способах сварки одновременно используются и нагрев, и механическое сдавливание. При этом прочность сварного соединения зависит от интенсивности процессов взаимного растворения, диффузии и кристаллизации металла соединяемых частей.

При сварке плавлением металл в зоне сварки расплавляется и переходит в жидкое состояние, соединение частей происходит за счет самопроизвольного слияния и взаиморастворения их металла. Металл сварного шва по своему химическому состоянию и структуре значительно отличается от металла соединяемых частей. Напротив, холодная сварка не изменяет химический состав свариваемого металла и лишь незначительно изменяет его структуру.

Достоинствами сварки являются высокая производительность, высокая прочность сварного соединения. К недостаткам сварки можно отнести необходимость применения высоких температур, высокую пожароопасность, световые излучения и большую потребляемую мощность.

9.1. Клепка материалов

Клепка – это способ получения неразборных соединений с помощью специальных крепежных деталей – заклепок. До появления сварки клепка являлась основным способом изготовления неразборных соединений. В настоящее время в связи с интенсивным развитием сварочных технологий клепка применяется в специальных случаях: для соединения трудно свариваемых металлов, соединения металлических элементов конструкции с неметаллическими, соединения элементов конструкции, которая подвержена вибрации, то есть когда сварное соединение считается недостаточно надежным.

Технологический процесс клепки состоит из сборки соединяемых элементов, установки и расклепывания заклепок. Сборка элементов, имеющих подготовленные для установки заклепок отверстия, заключается в совмещении соответствующих отверстий и установки в них заклепок. Эти работы проводятся в специальных

приспособлениях, которые обеспечивают заданное чертежом взаимное положение элементов.

Процесс расклепывания может вестись горячим и холодным методами. При расклепывании горячим методом используются стальные заклепки, диаметр стержня которых как правило превышает 12 мм. Перед клепкой заклепки нагревают до температуры 1050–1100 °С, например, электроконтактным способом. Расклепывание замыкающих головок, как при горячем, так и при холодном методах, преимущественно осуществляется на клепальных машинах.

При производстве крупногабаритных конструкций для получения нахлесточных соединений тонколистовых материалов достаточно успешно применяется высокопроизводительный способ соединения твердых материалов электрозаклепками. Этот способ может осуществляться в атмосфере углекислого газа или под слоем флюса с помощью специальных переносных или стационарных сварочных аппаратов, которые называются электрозаклепочниками.

Сущность процесса соединения твердых материалов электрозаклепками заключается в полном проплавлении верхнего листа и частичном проплавлении нижнего листа электрической дугой и образовании общей сварочной ванны, в которой происходит перемешивание жидкого металла электродной проволоки и заготовок. По мере плавления электродной проволоки происходит непрерывное увеличение длины электрической дуги до ее естественного обрыва, что автоматически прекращает процесс сварки. В результате образуется сварная точка – электрозаклепка, которая по внешнему виду напоминает обычную заклепку.

Сварка электрозаклепками может также выполняться с подачей сварочной проволоки. В этом случае процесс сварки прекращается с помощью реле времени или механического прерывателя после расплавления заданного количества электродной проволоки. Очевидно, что размеры электрозаклепок зависят от времени сварки и скорости подачи сварочной проволоки.

В большинстве случаев при сварке электрозаклепками верхних листов толщиной 6–8 мм применяется низкоуглеродистая сварочная проволока диаметром от 3 до 6 мм. При большой толщине

листов для получения надежного сварного соединения требуется пробивка отверстий в привариваемых листах.

9.2. Склеивание материалов

Склеивание — это универсальный способ изготовления неразборных соединений металлических, пластмассовых, резиновых и других элементов. Причем клеевая сборка применяется как для соединения элементов, изготовленных из одинаковых материалов, так и для элементов из разнородных материалов.

Широкое применение нашли клеевые композиции из различных органических соединений. Они вводятся между соединяемыми частями обычно в жидком состоянии, реже — в виде порошка или пластинок, размягчаемых нагреванием. Введенный жидкий клей постепенно затвердевает вследствие испарения растворителя, химических реакций или полимеризации. В отличие от припоев клеевые композиции изначально обладают некоторой, хотя и незначительной, прочностью, позволяющей удерживать соединяемые части в определенном положении. По мере затвердевания прочность клея только возрастает до максимального значения, которое наступает при полном затвердевании.

Клеевая сборка имеет ряд серьезных преимуществ перед механическим креплением собираемых элементов конструкции: не требуется изготовление крепежных деталей (болтов, винтов, заклепок и др.); собираемые элементы не ослабляются отверстиями; нагрузки равномерно распределяются по всей зоне соединения; склеивание также обеспечивает высокую герметичность соединения. При этом клеевые соединения обладают высокой водо-, масло- и бензоустойчивостью, а также высокой механической прочностью и теплостойкостью.

Соединение частей при склеивании основано исключительно на механическом сцеплении клея с поверхностями материалов без какого-либо межмолекулярного взаимодействия. В профессиональной среде слово «сцепление» принято называть термином «адгезия», а прочность сцепления покрытия с основным металлом — адгезионной прочностью.

Адгезионная прочность клееного соединения может быть достаточно высокой. Это зависит от предварительного механического развития (повышения шероховатости) соединяемых поверхностей.

Технологический процесс склеивания состоит из очистки от загрязнений и обезжиривания сначала бензином, а потом ацетоном склеиваемых поверхностей, механической обработки наждачной бумагой или металлическими щетками с целью развития поверхностей перед склеиванием, нанесения клеевых композиций на соединяемые поверхности, сборки склеиваемых элементов и выдержки собранного соединения при определенных условиях, зависящих от типа применяемого клея. В большинстве случаев процесс склеивания заключается в открытой выдержке нанесенного на поверхность соединяемого элемента слоя клеевой композиции в течение определенного времени при комнатной температуре или температуре 60–90 °С и в последующей выдержке собранных в пакет элементов при температуре 150–190 °С и давлениях до 300 МПа.

Достоинствами склеивания является простота применения, высокая универсальность, позволяющая соединять большое количество разнородных материалов в различных сочетаниях. К недостаткам следует отнести снижение прочности клееных соединений даже при небольшом нагреве, старение с течением времени некоторых клеевых композиций, которое сопровождается уменьшением прочности.

9.3. Резьбовые соединения материалов

Резьбовые соединения до сих пор являются достаточно распространенным способом получения разъемных соединений. Резьбовые соединения на болтах, винтах и саморезах выполняются с помощью различного рода электрических и пневматических гайковертов и шуруповертов, которые могут использоваться как при ручной, так и при механизированной сборке. В последнем случае – в качестве стационарного инструмента в многошпиндельных установках.

Ответственные резьбовые соединения, требующие строго определенного усилия затяжки, собирают с помощью тарированных на заданный крутящий момент гайковертов.

Резьбовые соединения с применением шпилек или резьбовых втулок собираются аналогично болтовым соединениям — с помощью механизированного инструмента, рабочая часть которого способна удерживать крепежные детали.

При сборке резьбовых соединений должны предусматриваться меры, исключающие возможность самооткручивания крепежных деталей во время эксплуатации конструкции. Для этой цели применяется установка разводных шплинтов, пружинных шайб, контргаек и т. п.

Для облегчения процесса сборки резьбовых соединений и повышения прочности соединения в конструкциях соединяемых деталей следует предусматривать для головок болтов специальные гнёзда, предотвращающие прокручивание крепежных деталей, или обеспечивать приварку одного из крепежных элементов, таких как болты, шпильки, гайки, резьбовые втулки и т. п. Такие крепежные элементы, приваренные к панелям кузова, реализуют технологию «безответственного крепления» узлов и агрегатов в современных автомобилях. Они обладают значительно большей надежностью по сравнению с другими резьбовыми креплениями, что является весьма важным фактором для безопасной эксплуатации автотранспортных средств.

Одним из самых эффективных способов приварки крепежных элементов с диаметром от 3 до 25 мм является дуго-контактная сварка, выполняемая в режиме «короткий цикл». Сварка коротким циклом длится от 0,003 до 0,5 с. За это время не происходит значительного тепловложения в металл и образования остаточных деформаций кузовных панелей, приводящих к ухудшению их внешнего вида.

Дуго-контактная сварка позволяет с высоким качеством приваривать крепежные элементы в труднодоступных местах в условиях одностороннего доступа к поверхности кузова, обеспечивая при этом предварительную очистку вспомогательной дугой места приварки и точное позиционирование крепежных элементов на поверхности кузова.

9.4. Сварка плавлением

9.4.1. Электрофизические основы сварки металлов

Сваркой называется процесс получения неразъемного соединения металлических заготовок местным сплавлением или давлением.

Сварку используют для получения сварных конструкций и для устранения различного рода дефектов локального характера, таких как трещины, сколы, изломы и пробоины. В большинстве случаев применяют сварку электрической дугой.

Процесс сварки характеризуется интенсивным тепловложением в свариваемую конструкцию с глубиной провара практически на всю толщину металла. При этом основным затруднением на пути получения качественного сварного соединения является образование трещин в шве и околошовной зоне.

Для получения высокого качества сварных конструкций необходимо учитывать важное свойство материалов, из которых они изготовлены, – свариваемость. Свариваемость – это совокупность технологических характеристик, которые позволяют обеспечить надежное, равнопрочное с основным металлом сварное соединение, без трещин в металле шва и околошовной зоны. Свариваемость зависит от физико-химических свойств свариваемых металлов, способа и режима сварки, режимов подогрева и охлаждения места сварки, составов присадочного материала, флюса, покрытия электрода, защитного газа и др. При сварке соединяемые металлы и присадочный материал должны быть либо идентичны по химическому составу, либо должны обладать одинаковой основой, которая обеспечивает полную металлургическую совместимость.

Качественная оценка свариваемости металлов и сплавов, а также влияния на нее отдельных химических элементов сводится к следующему:

– хром при сварке образует карбиды, ухудшающие коррозионную стойкость стали, но при этом резко повышающие твердость в зонах термического влияния. Хром также содействует образованию тугоплавких окислов, затрудняющих процесс сварки;

– никель увеличивает пластические и прочностные свойства стали, способствует образованию мелкозернистой структуры наплавленного металла;

– молибден дает возможность существенно повысить несущую способность стали при ударных нагрузках и повышенных температурах, а также получить мелкозернистую структуру металла шва. Однако молибден инициирует появление трещин в наплавленном металле и околошовной зоне. В процессе сварки, наплавки молибден склонен к выгоранию и образованию окислов;

– ванадий способствует образованию закалочных структур в сталях, которые затрудняют сварочные процессы. В процессе сварки ванадий активно окисляется и выгорает;

– благодаря вольфраму происходит значительное повышение твердости и износостойкости сталей даже при высоких температурах, но при этом образующиеся окисные пленки сильно затрудняют сварочные процессы;

– углерод при содержании в сталях более 0,35 % резко ухудшает их свариваемость, приводит к образованию закалочных структур, трещин и пористости;

– марганец при малом содержании в сталях (до 0,8 %) существенного влияния на сварочные процессы не оказывает, но при большом содержании способствует образованию закалочных структур и трещин;

– кремний при большом его содержании (более 0,8 %) в сталях, аналогично марганцу, оказывает негативное влияние на сварочные процессы вследствие образования тугоплавких окислов и повышения жидкотекучести высококремнистых сталей.

Лучшей свариваемостью обладают малоуглеродистые стали. Среднеуглеродистые стали свариваются несколько хуже, к тому же более склонны к образованию горячих трещин в сварном шве, которые являются очагами разрушения сварных узлов. Они также склонны к перегреву и закалке в околошовной зоне. Самой плохой свариваемостью обладают чугун и алюминиевые сплавы. Поэтому сварка чугуна и алюминиевых сплавов требует применения особых технологических приемов.

Большое разнообразие форм и размеров конструкций обуславливает необходимость применения в сварочном производстве различных способов.

9.4.2. Электродуговая сварка покрытыми электродами

При электродуговой сварке покрытыми металлическими электродами сварочная дуга горит с электрода на изделие, оплавляя его разделанные кромки, расплавляя материал электродного стержня и его покрытия (рис. 127). Кристаллизация основного и присадочного расплавленных металлов образует сварной шов.

Электрическая дуга — это мощный и стабильный разряд электричества, проходящий в ионизированной атмосфере между электродом и свариваемым металлом. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и постоянно поддерживается в процессе ее горения. Процесс зажигания дуги как правило включает 3 этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3–6 мм и создание устойчивого горения дуги.

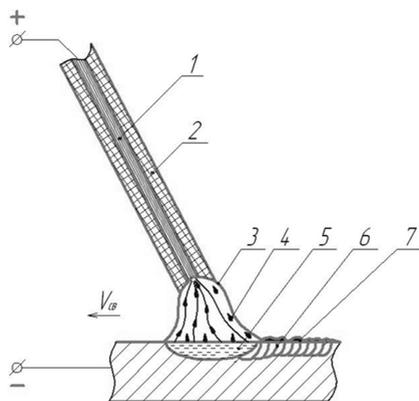


Рис. 127. Схема электродуговой сварки покрытым металлическим электродом: 1 — электродный стержень; 2 — электродное покрытие; 3 — сварочная дуга; 4 — капли металла стержня; 5 — ванна расплавленного металла; 6 — металл сварного шва; 7 — шлак

Короткое замыкание сопровождается нагревом конца электрода 1 и свариваемого металла 2 в зоне контакта (рис. 128).

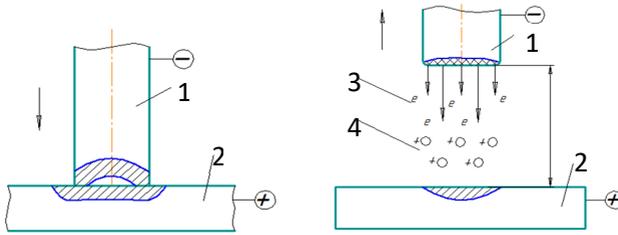


Рис. 128. Схема процесса зажигания электрической дуги:
 1 – электрод; 2 – свариваемый металл; 3 – электроны; 4 – ионы

В момент отвода электрода с его разогретого конца под действием электрического поля возникает эмиссия электронов 3 (рис. 128). Движущиеся с высокой скоростью в направлении свариваемого металла 2 электроны, сталкиваясь с молекулами газов, вызывают образование ионов 4. Ионизация нарушает электрическую прочность дугового промежутка. В результате возникает канал проводимости, по которому проходит электрический разряд. Процесс зажигания заканчивается формированием устойчивого столба дуги (рис. 129). Однако зажигание электрической дуги возможно без короткого замыкания и отвода электрода. Оно может происходить с помощью высокочастотного электрического разряда, который пробивает дуговой промежуток и создает первоначальную ионизацию. Этот способ преимущественно применяют для зажигания дуги при сварке неплавящимся электродом.

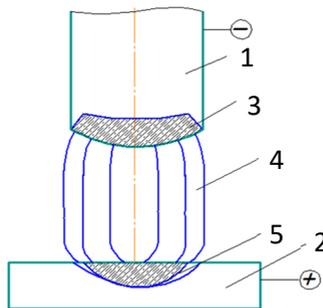


Рис. 129. Схема горения электрической дуги:
 1 – электрод; 2 – свариваемый металл; 3 – катодное пятно электрода;
 4 – столб дуги; 5 – анодное пятно электрода

Плавающий электрод состоит из стержня и электродного покрытия. Электродный стержень – это сварочная проволока, которая по своему химическому составу должна быть наиболее близкой к составу основного металла. В противном случае технологическая прочность сварного соединения может быть неудовлетворительной.

Питание электрической дуги осуществляется от источника постоянного тока, то есть выпрямителя, или переменного тока, то есть сварочного трансформатора. Электрическая дуга на постоянном токе горит более стабильно, чем на переменном токе, что позволяет получить качественный сварной шов. Кроме того, сварку на постоянном токе можно проводить при прямой или обратной полярностях, присоединяя в первом случае к свариваемому металлу «плюс» источника питания, а в другом – «минус». Обратная полярность позволяет уменьшить глубину проплавления основного металла, так как на положительном электроде выделяется тепла на 20 % больше, чем на отрицательном. Поэтому детали толщиной менее 3 мм необходимо сваривать на постоянном токе обратной полярности, чтобы избежать прожогов.

Электродное покрытие – это многокомпонентная смесь металлов и их оксидов, которая при ее плавлении создает газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от воздействия атмосферы. Состав металла шва можно изменять с помощью легирующих компонентов электродного покрытия. Наличие в покрытии кремния и марганца способствует раскислению металла сварочной ванны, а также способствует его рафинированию, которое придаёт шву более высокие физико-механические свойства.

При сварке металл ванны подвергается воздействию окружающего воздуха, и под влиянием высоких температур происходит его окисление, насыщение азотом и водородом. Соединение металла с этими газами приводит к образованию нежелательных химических соединений в виде закиси железа FeO , окиси железа Fe_2O_3 , нитридов железа Fe_2N , Fe_4N и др., а также к выгоранию легирующих элементов. Всё это негативно сказывается на прочности сварного соединения. Поэтому защита сварочной ванны является непременным условием получения качественного сварного шва.

Ионизированный газ, возникающий при горении электродного покрытия, обладает высокой электрической проводимостью, которая способствует устойчивому горению электрической дуги.

Торцевые поверхности заготовок, подлежащие нагреву и расплавлению при сварке, называют *свариваемыми кромками*. Для обеспечения проплавления кромок им придают наиболее оптимальную, в зависимости от толщины свариваемого металла и способа сварки, форму, выполняя предварительную подготовку кромок. От типа и угла разделки кромок зависит количество необходимого электродного металла для заполнения разделки, а значит, качество и производительность сварки. Предусмотрено четыре основных типа разделки кромок: V-образная, Y-образная, X-образная, и U-образная (рис. 130).

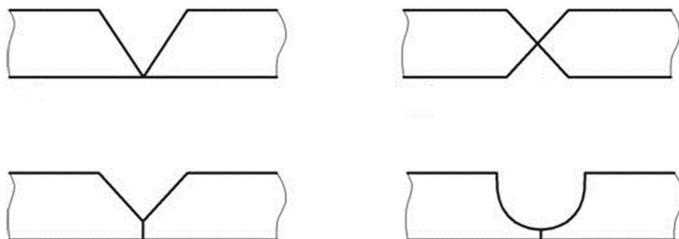


Рис. 130. Типы разделки кромок

Чаще всего проводится Y-образная разделка кромок, но при данном типе разделки кромок после сварки возникают большие остаточные деформации. Поэтому в ряде случаев целесообразно применять X-образную разделку, при которой в 1,7 раза снижается объем наплавленного металла. В особых случаях, когда существует повышенное требование к качеству сварного шва, применяется U-образная разделка.

Сварным соединением называют неразъемное соединение двух или нескольких заготовок (элементов), выполненное сваркой. По форме сопряжения соединяемых элементов различают следующие типы сварных соединений: стыковые, угловые, тавровые, нахлесточные и торцевые.

Стыковое соединение — сварное соединение двух элементов, которые примыкают друг к другу торцовыми поверхностями.

При этом элементы расположены в одной плоскости или на одной поверхности. Поверхности элементов могут быть несколько смещены при соединении листов разной толщины (рис. 131).

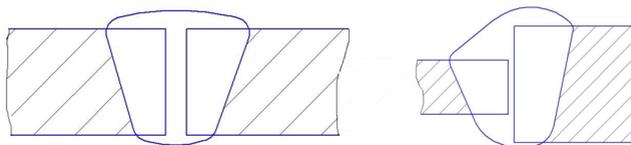


Рис. 131. Схемы стыковых сварных соединений

Угловое соединение — сварное соединение двух элементов, которые расположены под углом друг к другу и сварены в месте примыкания их краев (рис. 132).

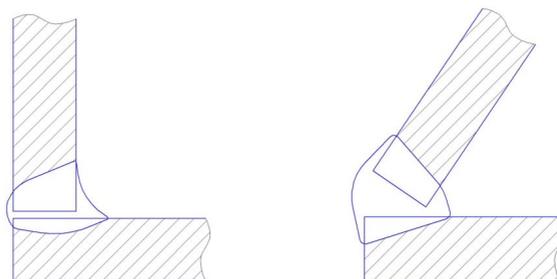


Рис. 132. Схемы угловых сварных соединений

Тавровое соединение — сварное соединение, в котором торец одного элемента примыкает под углом и приварен к боковой поверхности другого элемента (рис. 133). Перед сваркой необходимо обеспечить плотное прилегание свариваемых участков.

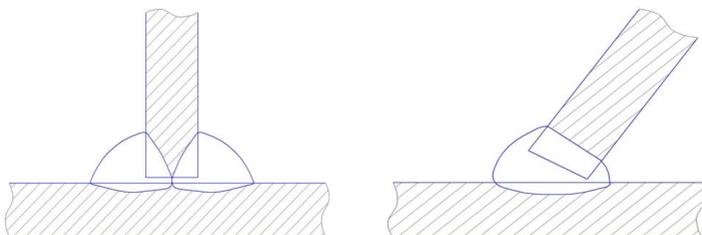


Рис. 133. Схемы тавровых сварных соединений

Нахлесточное соединение — сварное соединение, в котором сваренные элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 134). Отсутствие опасности прожогов при сварке внахлест облегчает применение высокопроизводительных режимов сварки. Применение нахлесточных соединений облегчает сборку и сварку швов, выполняемых при монтаже конструкций. К тому же сварное соединение обладает большей технологической прочностью.

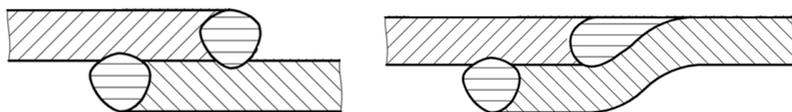


Рис. 134. Схемы нахлесточных сварных соединений

Торцовое соединение — сварное соединение, в котором боковые поверхности сваренных элементов примыкают друг к другу.

Для получения качественного сварного соединения требуется правильно выбрать параметры режима сварки. Так, диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины основного металла. При сварке заготовок толщиной до 4 мм диаметр электрода должен равняться толщине основного металла. Сила сварочного тока определяется значением допустимой плотности тока, которая, в свою очередь, зависит от толщины свариваемого металла, скорости сварки, диаметра электрода, вида его покрытия, положения шва в пространстве. При проведении сварки стремятся к оптимальному проплавлению основного металла при достаточной устойчивости горения электрической дуги. Удовлетворительная устойчивость горения дуги обеспечивается при плотности тока, равной 11–12 А/мм².

Глубина проплавления снижается по мере уменьшения силы тока, увеличения скорости сварки, диаметра электрода и установочной длины электрической дуги (рис. 135). Глубина проплавления также уменьшается при поперечных колебаниях электрода. Кроме того, при сварке углом вперед глубина проплавления меньше, чем при наплавке углом назад.

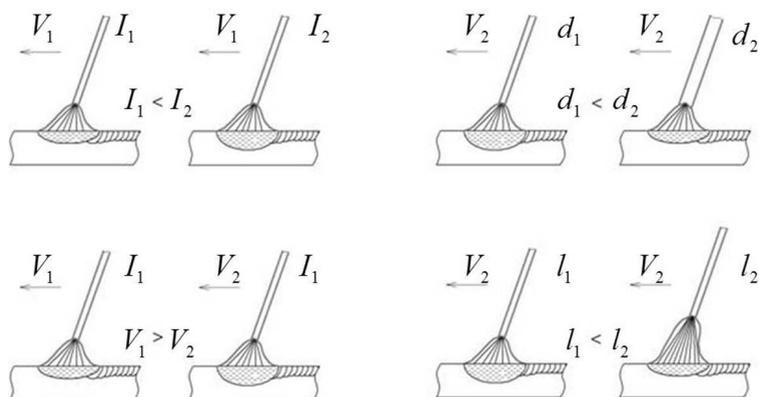


Рис. 135. Факторы, определяющие глубину проплавления основного металла при сварке

Достаточно часто сварку применяют для заварки трещин в изделиях. Перед заваркой с целью исключения развития трещины ее концы засверливают сверлом диаметром 3–6 мм. Диаметр сверла выбирают в зависимости от толщины детали. Кромки трещины разделяют под углом, равным 120–140°, получая, таким образом, V-образную канавку шириной более 3 мм (рис. 136).

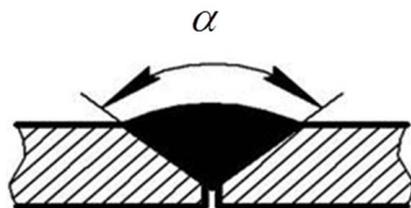


Рис. 136. Схема заварки трещины

Такая канавка позволяет наиболее полно связать разделенные трещиной части детали. Кроме того, для получения сварного шва с высокими механическими свойствами необходимо разделить глухую (несквозную) трещину на всю толщину детали, так как попытка заварить глухую трещину сопровождается выходом из глубины трещины газов, которые разрывают расплавленный металл сварного шва.

Заварку трещин и других подобных дефектов рекомендуется производить в полувертикальном положении (рис. 137), ведя процесс снизу вверх в направлении выхода дефекта, заполняя при этом металлом всё сечение разделки.

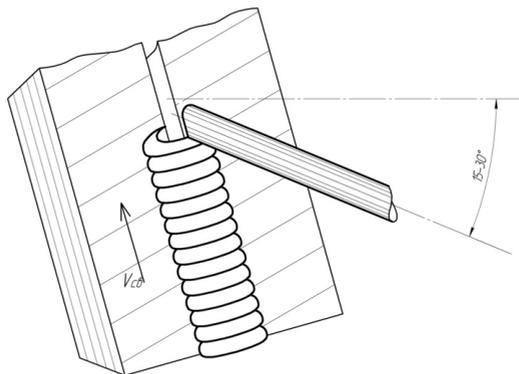


Рис. 137. Схема заварки трещины в полувертикальном положении

В зависимости от длины трещины различают следующие виды швов: короткие (250–300 мм), сварка которых ведется напроход, то есть сварку начинают на одном конце дефекта и заканчивают на другом (рис. 138); средние (350–1000 мм), сварка которых ведется от середины к краям дефекта; длинные (более 1000 мм), сварка которых ведется обратнo-ступенчатым способом.

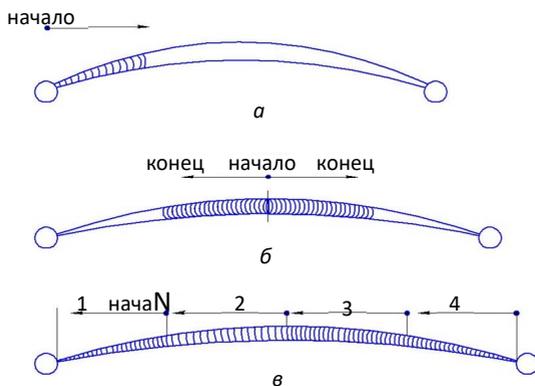


Рис. 138. Схемы заварки трещины:
a – короткой; *б* – средней; *в* – длинной

В зависимости от размеров сечения швы бывают однопроходными, или однослойными, многослойными, многопроходными (рис. 139). Однопроходная сварка производительна и экономична, но металл шва получается недостаточно пластичным вследствие увеличения зоны перегрева.

В случае многослойной сварки каждый нижележащий валик проходит термообработку при наложении следующего шва, что позволяет получать измельченную структуру металла шва и высокие механические свойства сварочного соединения.

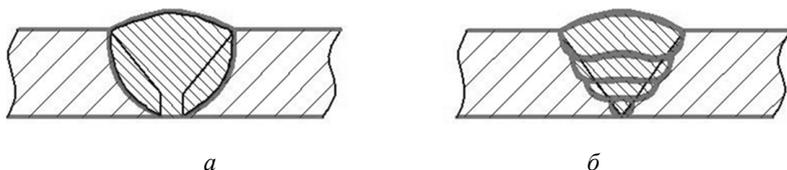


Рис. 139. Схема сварного шва:
а — однослойного; *б* — многослойного

Расположение слоев при многослойной сварке бывает двух видов: последовательное наложение каждого слоя по всей длине шва «каскадным» способом (рис. 139, б) и наложение швов способом отжигающих валиков или «горки» (рис. 141). Оба этих способа применяют при сварке металла значительной толщины (свыше 20–25 мм).

Качество сварного шва, как говорилось ранее, во многом зависит от химического состава основного металла. Например, для чугуна оно зависит от концентрации углерода и кремния, которые оказывают большое влияние на процесс отбеливания чугуна. Отбеливание чугуна происходит при быстром охлаждении наплавленного металла и выгорании кремния. В таких условиях углерод не успевает выделиться в виде графита и остается в химически связанном состоянии, в виде цементита. В результате сварной шов получается очень твердым и хрупким, с большими остаточными напряжениями, которые, как правило, приводят к образованию трещин как самого шва, так и околошовной зоны.

Электродуговая сварка чугуна производится специальными электродами, содержащими медь или никель, на постоянном токе обратной полярности («плюс» на электроде, «минус» на детали).

Заварку трещины проводят короткими участками, которые сваривают в определенной последовательности (рис. 140), обеспечивающей образование минимальных остаточных напряжений.

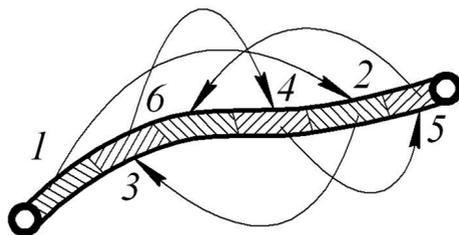


Рис. 140. Последовательность заварки трещины в чугунной детали

Глубокие трещины могут быть заварены тонкими стальными электродами или самозащитными присадочными проволоками марок ПАНЧ-11, МНЧ-1, АНЧ-1, ОЗЧ-1 и др. Достоинством последних является возможность их применения без покрытия, флюсовой или газовой защиты. Заварка трещины производится по способу отжигающих валиков, при котором швы накладываются вдоль трещины по ее разделанным кромкам с последующим смыканием. При этом на заключительном этапе происходит заварка, по сути, не чугунных, а стальных поверхностей (рис. 141).

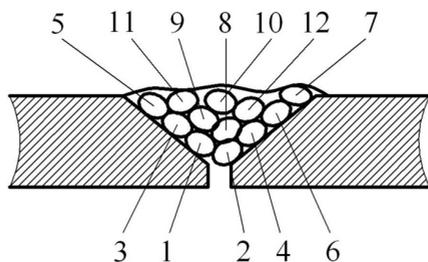


Рис. 141. Схема заварки чугунной трещины методом отжигающих валиков (цифрами условно показана последовательность наложения валиков)

При таком способе заварки каждый последующий валик, воздействуя термически на предыдущий валик, уменьшает его твердость и снимает остаточные напряжения в шве, обеспечивая надежное устранение трещины чугунной корпусной детали.

В большинстве случаев для корпусных чугунных деталей сварку применяют только с целью обеспечения герметичности. Более того, если трещины проходят через зоны детали, которые подвержены воздействию внешних нагрузок, то такие детали подлежат утилизации.

После сварки плавлением возможно образование шести видов дефектов сварных соединений:

- пористость шва (рис. 142, *а*). Она может быть сферическая, канальная и линейная, может состоять из цепи пор и групп пор;
- шлаковые и металлические включения (рис. 142, *а*). Они разделяются на шлак компактный, шлак линейный, металлические включения, поверхностные включения;
- несплавление (рис. 142, *б*). Может быть по кромкам и между слоями многослойного шва;
- непровар в корне одностороннего шва (рис. 142, *в*). Он может быть без подреза и с подрезом;
- трещины. Могут быть поперечные и продольные;
- дефекты формы шва. Это может быть чрезмерный провар корня, который приводит к прожогу или протечку. Это могут быть неровности в виде наплывов и вмятин.

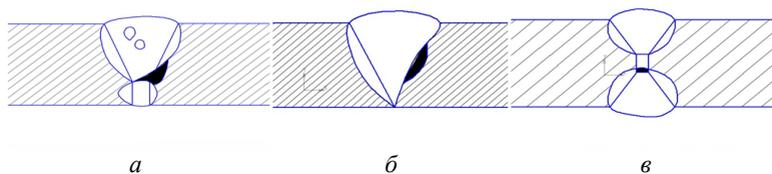


Рис. 142. Схемы дефектов сварных соединений:
а – пористость шва и шлаковые включения; *б* – несплавление по кромкам; *в* – непровар

Все эти дефекты ухудшают механические свойства сварных соединений и, следовательно, работоспособность конструкций. Часть из них, такие как наружная пористость и прожоги, должна быть исправлена самим сварщиком сразу же при обнаружении. Непровары и внутреннюю пористость можно исправить только путем вырубки дефектных мест с последующей заваркой. Из всех дефектов наиболее опасны трещины. При их обнаружении сварное соединение бракуется или же подлежит радикальному исправлению. Однако ис-

правление возможно при наличии единичных трещин. Сварное соединение с множественными трещинами исправлению не подлежит.

Преимущества электродуговой сварки покрытыми электродами:

- универсальность и технологическая гибкость при выполнении сварочных работ;
- простота и доступность оборудования и технологии;
- возможность получения металла сварного шва любой системы легирования.

Недостатки электродуговой сварки покрытыми электродами:

- низкая производительность и тяжелые условия труда;
- нарушение результатов предшествующей термической обработки основного металла;
- низкое качество металла сварного шва, происходящее вследствие окисления и выгорания легирующих элементов;
- большая вероятность образования остаточных деформаций сварных конструкций.

9.4.3. Автоматическая сварка под слоем флюса

При автоматической сварке под слоем флюса непокрытая электродная проволока специальным подающим механизмом подается через мундштук (скользящий электрический контакт) и бункер с флюсом к наплавляемой поверхности детали. Подающий механизм включает как правило четыре ролика, которые служат как для подачи, так и для выпрямления электродной проволоки. В качестве источника питания используют преобразователи и выпрямители с жесткой внешней (вольтамперной) характеристикой. Возникающая в контакте проволоки с деталью электрическая дуга горит под слоем флюса, состоящего из отдельных мелких частиц (зерен) диаметром 1–3 мм (рис. 143). Под действием высокой температуры часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку, которая надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота воздуха. На границе расплавленного металла сварочной ванны с жидким шлаком происходит диффузия компонентов флюса и металла расплавленного шлака в сварочную ванну и обратно. Флюс наряду с защитной функцией выполняет задачи раскисления, легирования и рафинирования металла валика. Благодаря

наличию во флюсе элементов с низким потенциалом ионизации он способствует устойчивому горению электрической дуги.

По мере перемещения электрической дуги жидкий металл твердеет вместе с флюсом, образуя на поверхности сварного шва ломкую шлаковую корку. Флюс, который не расплавился, сыпается с детали в поддон и может быть использован повторно. По истечении 2–3 мин после окончания процесса сварки с помощью молотка, соблюдая меры предосторожности, сбивают шлаковую корку и очищают сварную конструкцию от остатков флюса.

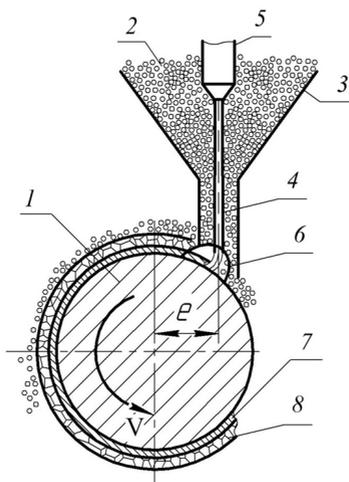


Рис. 143. Схема сварки под слоем флюса:

- 1 – заготовка; 2 – флюс; 3 – бункер; 4 – электродная проволока;
5 – мундштук; 6 – эластичная оболочка, образованная из расплавленного флюса; 7 – сварной шов; 8 – шлаковая корка

Дуговую сварку под слоем флюса проводят сварочными автоматами: сварочными головками или самоходными тракторами, перемещающимися относительно свариваемого изделия. Они позволяют поддерживать постоянный режим сварки во время процесса, что дает возможность получать более стабильные параметры сварного шва. В зависимости от вида подачи электродной проволоки различают следующие сварочные автоматы: с постоянной подачей проволоки, использующие процесс саморегулирования длины и напряжения дуги; с регулируемой скоростью подачи проволоки

в процессе сварки в зависимости от изменения напряжения дуги. Также автоматизированы процессы зажигания дуги и заварка кратера в конце шва.

Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей используются флюс типа АН-348А с добавлением феррохрома, ферромарганца и сварочная проволока из низкоуглеродистых Св-08, Св-08А и низколегированных Св-08Г, Св-08ГА сталей, которые дают твердость металла шва порядка 25 HRC. Стали с большим содержанием углерода сваривают проволокой Нп-65Г, Нп-80, в которой содержится 0,6–0,8 % углерода, с использованием плавящихся и керамических флюсов. Твердость металла шва в этом случае зависит от его толщины, режима сварки и составляет 45–52 HRC.

9.4.4. Сварка в среде защитного газа

Сварка в среде защитного газа в значительной степени отличается от других способов — не нужно ни флюсов, ни электродных покрытий. Ее можно выполнять неплавящимся, обычно вольфрамовым, или плавящимся электродом (рис. 144). В первом случае сварной шов получается за счет расплавления кромок заготовки и, если требуется, подаваемой в зону сварки присадочной проволоки. Плавящийся электрод в процессе сварки расплавляется и участвует в образовании металла шва.

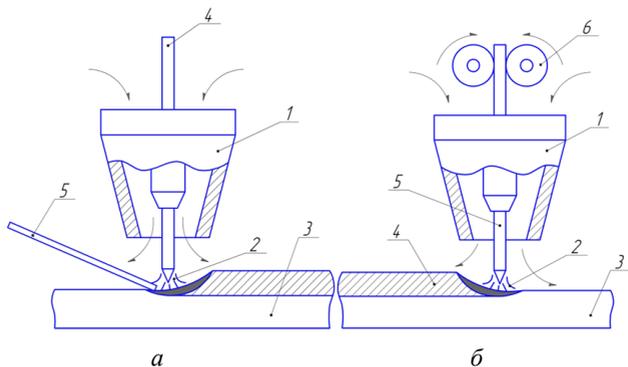


Рис. 144. Схемы сварки в защитных газах неплавящимся (а) и плавящимся (б) электродами: 1 — горелка; 2 — электрическая дуга, 3 — основной металл; 4 — электрод; 5 — присадочная проволока; 6 — ролики

При сварке плавящимся электродом дуга горит между электродом и свариваемым изделием в атмосфере защитного газа, который подается из баллона по рукаву через сопло горелки в пространство между концом электродной проволоки и основным металлом. Медное сопло, изолированное от мундштука и других частей горелки, во время работы постоянно охлаждается водным раствором. Защитный газ окружает электрическую дугу со всех сторон и вытесняет воздух из плавильного пространства, предохраняя расплавленный металл сварочной ванны от воздействия кислорода, водорода и азота воздуха (рис. 145). Защита сварочной ванны потоком газа называется струйной, так как иногда сварку выполняют в камерах, заполненных газом.

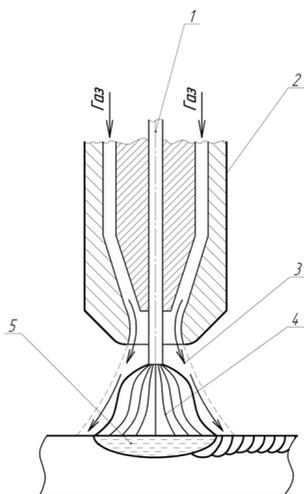


Рис. 145. Схема сварки в среде защитного газа:
 1 – электродная проволока; 2 – сварочная горелка; 3 – атмосфера защитного газа; 4 – электрическая дуга; 5 – сварочная ванна

В качестве защитных газов применяют активные газы (углекислый газ, азот, водород и др.) и инертные газы (аргон и гелий). Наиболее часто при сварке углеродистых и низколегированных сталей применяется углекислый газ, а дорогих высоколегированных сталей – аргон.

При сварке в среде углекислого газа используют электродные проволоки малого диаметра (0,8–2,0 мм) и токи относительно боль-

шой плотности. Расход углекислого газа в зависимости от диаметра электродной проволоки может составлять 8–15 дм³/мин. На расход газа также оказывают влияние скорость сварки, конфигурация изделия и наличие движения воздуха.

Режимы сварки в среде углекислого газа (диаметр электродной проволоки, сила тока, напряжение дуги и скорость наплавки) определяются в том числе по толщине свариваемого металла. Сварку в среде углекислого газа ведут на постоянном токе обратной полярности. Источники питания электрической дуги должны иметь жесткую внешнюю характеристику и скорость нарастания силы тока короткого замыкания в интервале 70–110 кА/с.

Скорость подачи проволоки зависит от силы тока, устанавливаемой с таким расчетом, чтобы в процессе наплавки не было коротких замыканий и обрывов дуги. Скорость сварки устанавливают в зависимости от толщины наплавляемого металла и качества наплавленного слоя.

Твердость металла обусловлена маркой и типом электродной проволоки, которую выбирают в зависимости от материала детали и требуемых физико-механических свойств металла. При сварке в среде углекислого газа в основном используют электродную проволоку Св-12ГС, Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12Х13, Св-06Х19Н9Т, Св-18ХМА, Нп-30ХГСА, порошковую проволоку ПП-Р18Т, ПП-Р19Т, ПП-4Х28Г и др., которые позволяют получить слой твердостью 200–300 НВ.

9.4.5. Дуговая сварка с газопламенной защитой

Большими технологическими возможностями обладает дуговая сварка с газопламенной защитой (рис. 146). Способ позволяет сваривать плотные слои металла, используя при этом доступные и относительно дешевые углеродистые проволоки. С целью повышения твердости слоя также можно сваривать высокоуглеродистые проволоки, которые в последующем хорошо воспринимают закалку.

Особенностью способа является подача защитных газов в зону сварки двумя концентричными потоками: в наружном потоке — природный газ, а во внутреннем потоке — кислород. Таким образом, электрическая дуга горит между электродом и изделием в факеле

газокислородного пламени. Сгорая, природный газ защищает металл от взаимодействия с воздухом. Однако это сопровождается образованием в металле шва обильной пористости. Вредное влияние газа на пористость металла подавляется кислородом.

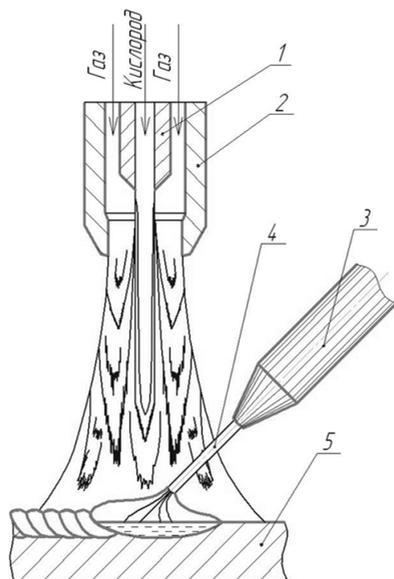


Рис. 146. Схема сварки с газопламенной защитой:

1 – сопло для подачи кислорода; 2 – сопло для подачи природного газа;
3 – мундштук; 4 – присадочная проволока; 5 – деталь

При выполнении сварочных работ в качестве газа обычно используют ацетилен или пропанобутановую смесь.

Для наплавки с газопламенной защитой применяется двухсопловая горелка. Ее крепят к мундштуку таким образом, чтобы её ось совпала с концом электрода. От перегрева в процессе сварки газовая горелка и головка мундштука защищены системой водяного охлаждения.

9.4.6. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка позволяет получить за один поход сварное соединение большой толщины. Сущность электрошлаковой сварки заключается в том, что плавление металла электро-

да — присадочного материала происходит в расплавленном шлаке за счет теплоты электросопротивления (рис. 147). Большое количество тепла выделяется при прохождении тока через шлаковую ванну.

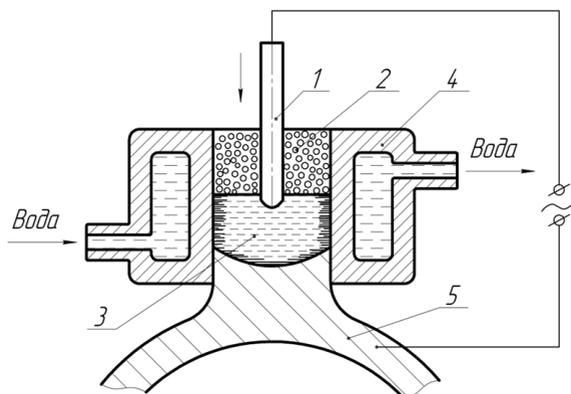


Рис. 147. Схема электрошлаковой сварки:
1 — электрод; 2 — шлак; 3 — шлаковая ванна; 4 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 — изделие

Электрошлаковая сварка состоит из двух последовательно проводимых процессов: дугового и бездугового. В начале сварки в зазор между свариваемым металлом и водоохлаждаемым кристаллизатором засыпают флюс и зажигают электрическую дугу между электродом и металлом. Дуга расплавляет флюс и образует шлаковую ванну. После того, как шлаковая ванна достигнет достаточной глубины, дугу гасят и начинают бездуговой процесс сварки. При реализации этого процесса ток проходит через жидкий шлак и расплавляет присадочный материал, непрерывно подаваемый в шлаковую ванну. Расплавленный присадочный материал формируется в нужную форму с помощью охлаждаемого кристаллизатора.

Достоинствами электрошлаковой сварки являются высокая производительность процесса и высокое качество сварного шва без пор и трещин, которое получается благодаря отсутствию газообразования и разбрызгивания металла.

Основным недостатком электрошлаковой сварки является большая погонная энергия процесса.

9.4.7. Плазменная сварка металлов

Плазменная струя представляет собой направленный поток ионизированного газа, имеющего температуру 20 000–35 000 °С. Она обеспечивает необходимый нагрев металла, плавление присадочного металла и образование сварочной ванны. При этом может происходить весьма глубокое проплавление металла. Во многих случаях присадочным материалом является тугоплавкий металл любой системы легирования. Он легко расплавляется за счет большой энергии плазменной струи. При этом струя плазмы, подогревая металл, обеспечивает хорошее сплавление присадочного материала с основным металлом. Защита сварочной ванны от воздействия кислорода и азота воздуха обеспечивается потоком защитного инертного газа.

Высокотемпературная плазма получается при пропускании под высоким давлением плазмообразующего газа через столб электрической дуги (рис. 148).

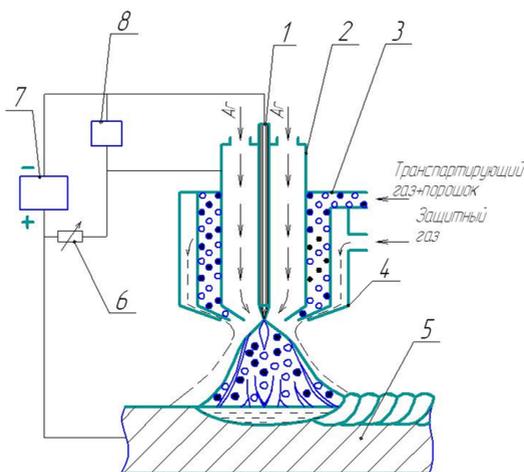


Рис. 148. Схема плазменной сварки:

- 1 – электрод; 2 – плазменное сопло; 3 – фокусирующее сопло;
- 4 – защитное сопло; 5 – изделие; 6 – балластный реостат;
- 7 – источник питания; 8 – осциллятор

Для этого столб электрической дуги, горящий между электродом 2 и соплом 5, помещают в узкий канал 4 с интенсивно охлаждаемыми стенками и через него продувают газ. Плазма, обладаю-

щая высокой электрической проводимостью, способствует сжатию и устойчивому горению дуги, а также вытягиванию плазменной струи, в результате чего она принимает вид столбика. В качестве плазмообразующего газа обычно используют аргон, который обеспечивает устойчивость процесса образования плазмы и защиту металла сварочной ванны.

Плазменная струя, являясь концентрированным источником теплоты, обладает большими технологическими возможностями. Это касается прежде всего возможности регулирования в широком диапазоне соотношения между энергетическими характеристиками дуги и подачей присадочного материала, а также тепловой мощности струи. Это позволяет обеспечить высокую производительность процесса и сваривать заготовки толщиной от нескольких десятков микрон до 15 мм. Благодаря высокой температуре плазменного потока сварку можно осуществлять практически любым присадочным материалом. Таким материалом могут быть любые сплавы независимо от твердости и пластичности. Незначительное тепловложение в металл дает возможность предотвратить образование остаточных деформаций конструкций и изменения структуры основного металла.

Плазменная сварка позволяет получить высококачественное сварное соединение с хорошими физико-химическими свойствами, которые значительно увеличивают долговечность сварных конструкций.

9.4.8. Сварка алюминиевых сплавов

Трудность сваривания алюминия и его сплавов обусловлена следующими факторами:

1. Образованием на поверхности сварочной ванны тугоплавкой оксидной пленки Al_2O_3 , которая не дает возможность вступить расплавленному присадочному материалу в контакт с основным. При этом расплавленный присадочный материал, имеющий такую же пленку, сворачивается в шарик и скатывается с поверхности расплавленного металла.

2. Высокой вероятностью проваливания под действием собственного веса свариваемого металла, обусловленного низкой прочностью алюминия при высоких температурах.

3. Образованием пор и раковин в металле шва, которое обусловлено процессом выделения водорода из расплавленного металла. Водород при быстром охлаждении металла полностью не успевает покинуть сварочную ванну.

4. Повышенной склонностью металла шва к возникновению трещин вследствие образования грубой столбчатой структуры металла шва и выделением по границам зерен легкоплавких эвтектик. Негативное влияние на процесс трещинообразования оказывает также большая усадка расплавленного металла (7 %), приводящая к возникновению больших остаточных напряжений в свариваемом изделии.

Для получения качественного шва при сварке алюминиевых сплавов прежде всего необходимо удалить окисную пленку с поверхностей соединяемых кромок и присадочной проволоки. Это достигается так называемым катодным распылением в атмосфере инертного газа – аргона или растворением в специальном флюсе, содержащем фториды щелочных металлов, например, криолита Na_3AlF_6 , который превращает окись алюминия в легкоплавкое комплексное соединение – шлак. Наряду с растворением оксидных пленок криолит изменяет поверхностное натяжение металла, способствуя мелкокапельному переносу присадочного металла. Остатки флюса и шлака, являющиеся едкими щелочами, вызывают коррозию алюминия. Поэтому после сварки их следует смыть горячей водой. Кроме того, необходимо проводить предварительный и сопутствующий нагревы изделия до температуры 150–250 °С, которые позволяют замедлить кристаллизацию металла сварочной ванны. В результате водород из растворенного металла будет выделяться более полно и тем самым уменьшит пористость.

Алюминий и его сплавы можно сваривать разными способами: в среде инертного газа неплавящимся электродом или плавящимся электродом на основе алюминия, а также трехфазной дугой неплавящимися электродами, электродом с покрытием, ацетиленоокислородным пламенем с применением специальных флюсов.

Одним из надежных способов сварки алюминиевых деталей является способ аргонодуговой сварки неплавящимся электродом из вольфрама. При аргонодуговой сварке соединяемые кромки

детали и присадочный материал нагреваются теплом электрической дуги, образующейся между вольфрамовым электродом и деталью (рис. 149). При этом из сопла наконечника горелки непрерывно подается аргон, который, окружая дугу, создает сосредоточенный нагрев и предохраняет расплавленный металл шва от вредного влияния кислорода и азота воздуха. В результате условия плавления металла улучшаются, а качество шва получается достаточно высоким.

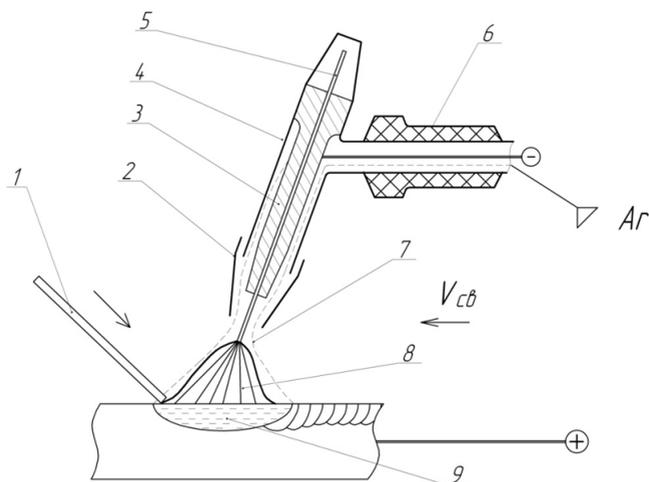


Рис. 149. Схема аргонодуговой сварки неплавящимся электродом:
 1 – присадочный пруток; 2 – сопло; 3 – токоподводящий мундштук;
 4 – корпус горелки; 5 – неплавящийся электрод; 6 – рукоятка горелки;
 7 – атмосфера защитного газа; 8 – сварочная дуга; 9 – сварочная ванна

Необходимо отметить, что при аргонодуговой сварке физико-механические свойства наплавленного металла выше, а пористость ниже, чем при электродуговой сварке. При этом практически отсутствуют шлаковые включения в металле шва и коробление деталей. Примечательно, что при аргонодуговой сварке отпадает необходимость применения электродных покрытий и флюсов.

Кроме высокого качества сварного шва, аргонодуговая сварка позволяет обеспечить высокую производительность процесса и возможность сварки тонкостенных конструкций.

Наиболее эффективным способом в решении задачи обеспечения технологической прочности сварного соединения и снижения уровня остаточных деформаций при сварке изделий из алюминиевых сплавов является способ сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона (рис. 150). Трехфазная дуга представляет собой факел, в котором горят три отдельные дуги переменного тока. Во-первых, это межэлектродная дуга, во-вторых, дуги, горящие между каждым из двух электродов и деталью. Подключение сварочного трансформатора по схеме «открытый треугольник» позволяет получить силу тока, протекающего через деталь, в 1,7 раза большую, чем сила тока на каждом из электродов. Таким образом, при равных значениях силы тока на электроде при трехфазной и однофазной «обычной» аргонодуговой сварке мощность первой существенно выше. Отличительной особенностью горения трехфазной дуги является возможность регулирования силы тока в детали без изменения тока на электродах путем включения в цепь изделия балластного активного сопротивления. Это обстоятельство позволяет проводить процесс сварки при небольшом значении тока в детали (до 10 А), что другими способами практически невозможно.

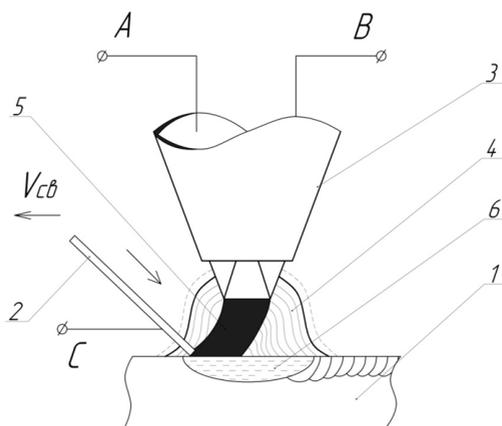


Рис. 150. Схема сварки трехфазной дугой неплавящимся электродом:
 1 – деталь; 2 – присадочная проволока; 3 – сварочная горелка;
 4 – газокинетическая составляющая дуги; 5 – электродинамическая составляющая дуги; 6 – сварочная ванна

Важным преимуществом процесса сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона является возможность подключения присадочной проволоки в среднюю фазу источника питания вместо изделия. Такая схема подключения позволяет в широких пределах регулировать тепловой режим процесса сварки путем перераспределения сварочного тока, протекающего через основной металл, на сварочную проволоку. В результате разделения мощности теплового потока от дуги между основным и присадочным металлами удастся достичь высокой технологической прочности сварного соединения.

К недостаткам однофазной и трехфазной сварки неплавящимися электродами в среде аргона в первую очередь следует отнести дороговизну этих процессов. Так, например, стоимость однофазной аргонодуговой сварки примерно в три раза превышает стоимость ацетиленокислородной.

9.5. Сварка давлением

9.5.1. Электроконтактная сварка металлов

Электроконтактная сварка получила широкое распространение в различных сферах промышленности, в том числе в автомобилестроении, как малозатратный метод соединения стальных листов. В современном автомобиле насчитывается в среднем около 4,5 тысяч соединений контактной точечной сварки и до 700 различных сочетаний листов в свариваемых пакетах. При этом пакеты отличаются друг от друга количеством листов, взаимным расположением листов, марками стали, типом предварительно нанесенного защитного покрытия, толщиной основного металла и покрытия. Электроконтактная сварка является самой производительной сваркой для деталей из тонколистовой малоуглеродистой стали в условиях массового производства.

Технология электроконтактной сварки (рис. 151) достаточно проста и обладает высокой технологической гибкостью. При точечной сварке заготовки соединяются в отдельных точках без образования сплошного сварного шва. Сварка может одновременно вестись

в нескольких точках. Перед сваркой места соединений зачищают и обезжиривают. Затем свариваемые заготовки зажимают в сварочных клещах между неподвижным и подвижным электродами, имеющих как правило плоскую рабочую поверхность. Через электроды на свариваемые заготовки передается сварочное давление. Место контакта двух заготовок является участком, где проходящий в цепи ток испытывает наибольшее электрическое сопротивление. В результате в этом месте выделяется большое количество тепла. Под воздействием этого тепла часть металла расплавляется, образуя ядро расплавленного металла. После выключения тока жидкий металл затвердевает и образуется сварное соединение — сварную точку.

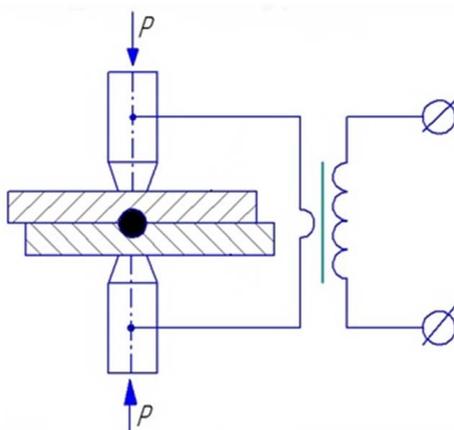


Рис. 151. Схема контактной точечной сварки

Электроконтактная точечная сварка традиционно выполняется с помощью специального оборудования: сварочных клещей и универсального аппарата для контактной сварки. По сравнению с другими методами сварки при точечной сварке свариваемые заготовки нагреваются в меньшей степени и, как следствие, происходит незначительное изменение структуры основного металла. Места соединения почти незаметны, что позволяет сократить трудоемкость подготовительных операций поверхности к последующей грунтовке и окраске.

Тем не менее сварные точки имеют несколько пониженную усталостную прочность по сравнению с усталостной прочностью

основного металла. Это обстоятельство необходимо учитывать при изготовлении ответственных деталей. В остальных случаях точечная сварка позволяет обеспечить длительную эксплуатацию изделий.

Рельефная сварка – это разновидность точечной сварки, при которой расположение сварных точек определяется заранее подготовленными выступами в заготовке. При рельефной сварке заготовки зажимают между плоскими электродами. Такие электроды в профессиональной среде называют контактными плитами. Сварка происходит в местах выступов рифленой заготовки, которую получают штамповкой. При включении источника тока производят надавливание на верхний электрод; он, в свою очередь, сжимает заготовки до полного выравнивания выступов. В результате за один ход машины получают столько сварных точек, сколько было выступов на отштампованной заготовке. Этот способ контактной сварки отличается высокой производительностью и низкой интенсивностью изнашивания электродов. Однако его основным недостатком является большая потребляемая электрическая мощность.

Шовная, или роликовая, сварка – это разновидность контактной сварки, при которой между свариваемыми заготовками образуется прочное сплошное сварное соединение. Электроды выполняют в виде роликов, которым в процессе сварки задают вращение и к которым подводят электрический ток (рис. 152).

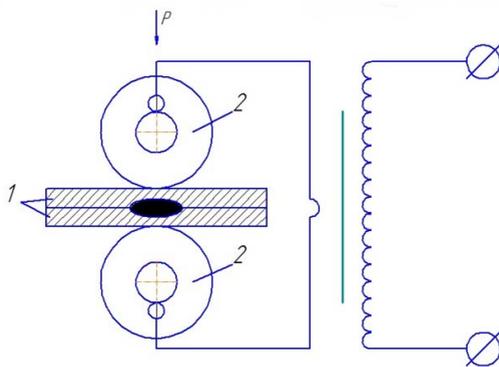


Рис. 152. Схема контактной шовной сварки:
1 – заготовки; 2 – электроды

В процессе сварки вращающиеся ролики приваривают проходящие через них заготовки. Шовной сваркой получают качественные сварные соединения стальных листов, в том числе с защитными покрытиями.

Одновременная сварка нескольких подузлов габаритной тонколистовой конструкции с цинковым покрытием в условиях крупносерийного производства выполняется на многоэлектродных точечных машинах. В этих машинах с целью увеличения производительности используются несколько пар встречно или параллельно расположенных электродов. Однако сварка листов с цинковым покрытием на многоэлектродных точечных машинах сопряжена с рядом трудностей, обусловленных следующими обстоятельствами:

- необходимостью увеличения тока и усилия сжатия до 30 % в зависимости от типа и массы цинкового покрытия по сравнению с непокрытыми сталями;
- сужением области свариваемости в 1,3 раза и необходимостью точного поддержания параметров режима в процессе сварки;
- увеличением частоты зачистки электродов в 2–6 раз и компенсации износа рабочей поверхности электродов за счет ступенчатого увеличения тока;
- снижением стойкости сварочных электродов в 4–14 раз и необходимостью их более частой замены;
- налипанием брызг, образующихся при сварке, на заготовки из оцинкованных сталей;
- увеличением вредных выделений при сварке.

Преодолеть указанные трудности можно путем совершенствования технологии контактной точечной сварки сталей и сварочного оборудования. При этом для повышения качества сварных соединений в каждом конкретном случае требуется специальный выбор параметров режима сварки, сварочного цикла, размеров рабочей поверхности электрода, типа и мощности сварочной машины.

При совершенствовании технологии контактной точечной сварки широко используют возможности новых микропроцессорных регуляторов, имеющих функции стабилизации тока, компенсации износа электродов, устранения аварийных ситуаций путем управления параметрами режима сварки. Они позволяют осуществлять

многофакторное управление процессом сварки с одновременным диагностированием качества сварных соединений, устраняя тем самым производственные риски.

Технология контактной сварки с использованием промежуточного электрода в виде ленты позволяет производить сварку высокопрочных и сверхпрочных сталей с покрытиями. Эта технология позволяет также надежно соединять между собой многолистовые смешанные, то есть состоящие из разнородных материалов, соединения с различной толщиной. Сущность технологии сварки с промежуточным электродом заключается в том, что между электродом и изделием дискретно передвигается металлическая лента. После получения каждой сварной точки лента перемещается на следующую фиксированную позицию. При этом рабочая поверхность основного электрода остается чистой на протяжении всего срока службы. Это позволяет обеспечить гарантированное качество сварных соединений и увеличить долговечность основного электрода. Так, срок службы электрода увеличивается примерно до 30 тысяч сварных точек, что в 1,5 раза выше долговечности электрода при выполнении точечной сварки традиционным способом.

Лента позволяет обеспечить благоприятный тепловой режим сварки, благодаря чему снижается потребляемый сварочный ток. Поэтому для сварки с промежуточным электродом используют источники электропитания сравнительно низкой мощности.

Использование ленты позволяет вести сварку без поверхностных брызг, что существенно образом снижает объем последующей механической обработки поверхностей детали перед покраской и расходы на очистку рабочего места.

Данная технология наиболее целесообразна при сварке трудносвариваемых материалов, таких как алюминий, хромо-никелевые сплавы, титан, магний, а также пакетов, состоящих из листов с различными материалами, например, стали и алюминия. Наличие электродной ленты при сварке алюминиевых листов позволяет до 2,5 раза снизить сварочный ток по сравнению с традиционной точечной сваркой. Малый ток и индивидуальная адаптация электродной ленты к процессу сварки позволяют контролировать тепло-

вложение в металл и управлять положением, размерами и формой сварной точки, повышая тем самым качество сварных соединений.

Прогрессивной технологией является технология комбинированной контактной сварки листов различных толщин и разной комбинации материалов. Эта технология органично соединяет два традиционных процесса: одностороннюю сварку и двустороннюю сварку.

Процесс комбинированной контактной сварки трех листов происходит в две фазы. Во время первой фазы происходит односторонняя сварка одного из внешних листов с центральным листом. Во второй фазе двусторонней сваркой другой крайний лист соединяется с центральным листом. При этом происходит окончательное формирование сварной точки всех трех листов друг с другом.

При сварке трех листов формирование сварных точек между первым и вторым листами, а также между вторым и третьим листами происходит автономно, при этом качество сварных соединений контролируется независимо друг от друга. Комбинированная технология позволяет получить регламентированную глубину проплавления каждой пары листов независимо от комбинации свариваемых материалов и их толщины. Это дает возможность гарантированно обеспечить требуемый размер и форму сварной точки и требуемую (высокую) прочность сварного соединения.

Преимуществами технологии комбинированной контактной сварки являются:

- возможность сварки двух, трех и даже четырех листов;
- возможность сварки различной комбинации материалов и листов различной толщины, в том числе с покрытием;
- возможность управления процессом сварки трех и более листов путем регулирования параметров сварочного режима в достаточно широком диапазоне;
- возможность расширения диапазона предельных значений толщины свариваемых листов;
- отсутствие необходимости в сложном и дорогом сварочном оборудовании и специальных электродах.

Безусловно, весьма эффективными способами для получения локальных соединений заготовок в пакете при изготовлении тонколистовой конструкции являются сварка трением с перемешиванием

металла и контактная точечная пайка, которые разработаны в качестве альтернативы традиционной точечной сварке.

Сварка трением с перемешиванием металла, которая относится к «холодным» методам сварки, наиболее эффективна при соединении листовых панелей, изготовленных из трудносвариваемых материалов с температурой плавления до 1800 °С. Такими материалами являются алюминий, магний, титан, высокопрочная хромистая сталь, медь, свинец, пластмассы и композиционные материалы.

Сущность сварки трением с перемешиванием металла заключается в том, что под действием трения и интенсивной пластической деформации происходит локальная пластификация и перемешивание металла заготовок, которые приводят к образованию прочного сварного соединения.

Сварка осуществляется с помощью специального цилиндрического инструмента особой формы с опорными заплечиками и выступом в центре, которому в процессе сварки задается вращение и прикладывается продольная сила. Вращающийся инструмент под давлением погружается в плотно прижатые друг к другу листовые заготовки. При этом создаётся достаточное количество тепла для пластической сварки деталей без плавления. Нагретый до вязкотекучего состояния металл выдавливается инструментом из зоны перед выступом в зону опорных заплечиков, которые окончательно формируют сварное соединение.

Преимуществами сварки трением с перемешиванием металла являются:

- минимальное количество подготовительных операций;
- незначительные остаточные деформации изделий;
- обеспечение высокой технологической прочности сварного соединения путем управления глубиной внедрения индентора;
- отсутствие необходимости в присадочном материале и защитном газе;
- высокая производительность и экономичность;
- простота автоматизации и возможность визуального наблюдения за процессом сварки с целью коррекции параметров режима;
- большая степень воспроизводимости сварных соединений с высоким уровнем качества;

- отсутствие разбрызгивания и испарений токсичных газов, а также излучений от дуги;
- отсутствие необходимости механической обработки поверхностей изделий после сварки с целью удаления брызг.

Процесс контактной точечной пайки предназначен для соединения листовых заготовок толщиной до 3,0 мм. Припой наносится не на всю поверхность, а лишь на отдельные участки соединяемых заготовок. В отличие от контактной точечной сварки на внешних поверхностях соединяемых листовых заготовок отсутствуют следы термического воздействия на металл, что дает возможность проводить покраску поверхностей без предварительной механической обработки.

Развитие контактной сварки связано также с дальнейшим совершенствованием систем автоматического управления и питания сварочных машин. Так, новое поколение сварочных машин с высокочастотным (10 кГц) трансформатором вместо используемого низкочастотного (50 Гц) сварочного оборудования позволяет добиться превосходных показателей качества сварных соединений листов из твёрдой и высокотвёрдой стали с нанесенным защитным покрытием. Применение нового сварочного оборудования позволяет также обеспечить:

- значительное уменьшение габаритов и веса сварочных клещей, примерно до 70 % от веса клещей, работающих на частоте 50 Гц;
- возможность сварки новых материалов в результате использования постоянного тока;
- лучшую управляемость сварочного процесса за счет точного поддержания параметров режима сварки в достаточно узком диапазоне;
- увеличение срока службы сварочных электродов;
- уменьшение времени производственного цикла и повышение производительности сварочных работ;
- уменьшение разбрызгивания металла при выполнении сварочных работ;
- улучшение энергоэффективности сварочного оборудования.

Реализация на практике новых технологий сварки и расширение номенклатуры свариваемых материалов с покрытиями потре-

бовало от специалистов проведения исследовательских работ по созданию специальных электродных материалов и проектированию новых конструкций электродов.

Созданный отечественными учеными наномодифицированный электродный сплав БрНХК(ф) является альтернативой применяемым для изготовления электродов бериллийсодержащих бронз марок МКБ и БрНБТ. Уникальные свойства этого сплава, такие как высокая температура разупрочнения, жаростойкость, тепло- и электропроводность, были получены путем введения в состав бронзы модификатора «Астрален».

9.5.2. Холодная сварка

Холодная сварка – это высокотехнологичный способ сварки заготовок давлением. Сущность способа заключается в том, что под действием механического сдавливания заготовок в их поверхностных слоях развивается пластическая деформация, приводящая к взаимодействию их металлов на молекулярном уровне и образованию прочного сварного соединения. При сварке давлением металл в зоне сварки не расплавляется, а постоянно остается в твердом состоянии.

Сварка осуществляется с помощью специального оборудования, которое производит механическое сдавливание соединяемых металлов, вызывающее их направленное пластическое течение в контакте. Кроме стационарных машин, развивающих большие усилия деформирования, применяют мобильные ручные клещи для холодной сварки заготовок с толщиной до 5 мм.

Качество сварного соединения обусловлено исходным физико-химическим состоянием контактных поверхностей, величиной усилия деформирования и, следовательно, интенсивностью пластической деформации металла. Наличие оксидных пленок и загрязнений на свариваемых поверхностях приводит к резкому снижению качества сварки, а в некоторых случаях делает её невозможной. Качество сварного соединения также зависит от схемы механического сдавливания и характера (статического, вибрационного) приложения нагрузки. В зависимости от схемы сдавливания заготовок сварка может быть точечной, шовной и стыковой. Холодной свар-

кой можно соединять алюминиевые, медные, цинковые, никелевые и стальные заготовки в основном внахлестку и встык.

Основное внимание перед холодной сваркой уделяется предварительной подготовке свариваемых поверхностей. Их сначала механически очищают стальными щетками, иглофрезами или потоком абразива, а затем обезжиривают, как правило органическими растворителями.

Точечная сварка – наиболее простой и распространенный способ холодной сварки. Она нашла широкое применение в электро-технической промышленности и на транспорте для соединения алюминиевых и медных проводов, а также алюминиевых проводов с медными наконечниками, в электромонтажном производстве, при производстве теплообменников и бытовых приборов. Точечная холодная сварка с успехом может заменить в производстве трудоемкие операции клепки и контактной точечной сварки.

При холодной точечной сварке (рис. 153) очищенные заготовки 1 накладывают друг на друга внахлестку между пуансонами 3, которые имеют рабочую часть в виде конического выступа 2 и опорную поверхность 4. Вдавливание рабочей части пуансонов под воздействием сжимающих сил вызывает интенсивную пластическую деформацию металла заготовок.

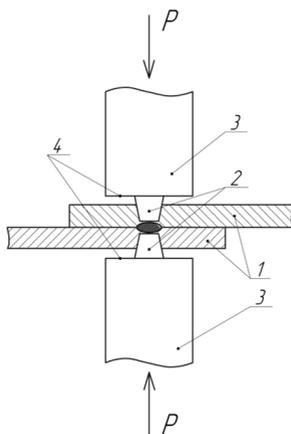


Рис. 153. Схема холодной точечной сварки:
1 – заготовки; 2 – рабочая часть пуансонов; 3 – пуансоны;
4 – опорная поверхность

Опорная поверхность пуансонов в какой-то момент также создает дополнительные напряжения в металле и способствует образованию прочной металлической связи. Она также предназначена для ограничения глубины погружения рабочей части пуансонов в металл и оптимизации его пластической деформации. Это необходимо для формирования качественного сварного соединения и снижения остаточных деформаций изделия.

Достоинством холодной сварки является отсутствие необходимости в мощном источнике питания для нагрева металла заготовок, присадочных материалах и высокой квалификации сварщика. При сварке этим методом не происходит световых излучений, газовых и тепловых выделений. Сварной шов характеризуется высокой однородностью и коррозионной стойкостью. Особенно очевидно преимущество холодной сварки перед другими способами при соединении разнородных металлов, обладающих высокой чувствительностью к нагреву. К недостаткам холодной сварки следует отнести сравнительно небольшую номенклатуру свариваемых материалов, обладающих высокой пластичностью, и значительные расходы металла на величину припуска под стыковую сварку.

Разновидностью холодной сварки является ультразвуковая сварка — сварка давлением с приложением ультразвуковых колебаний.

9.5.3. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка относится к высокоэффективным, тонким способам сварки. Соединение разнообразных материалов при ультразвуковой сварке происходит под совместным действием ультразвуковых колебаний и механического сдавливания заготовок.

Ультразвуковые колебания в сварочных установках получают от генератора тока повышенной частоты (20—40 кГц) (рис. 154). Ток от генератора подаётся на обмотку магнестрикционного преобразователя (вибратора). Он состоит из тонких пластин (0,1—0,2 мм), изготовленных из материала, который способен изменять свои геометрические размеры под воздействием переменного электромагнитного поля. Вибратор соединяется с инструментом-концентратором, предназначенным для усиления амплитуды колебаний. Размеры и форму концентратора рассчитывают с учётом необхо-

димого коэффициента усиления, а размеры волноводной системы подбирают из условия обеспечения максимальной амплитуды колебаний в зоне сварки.

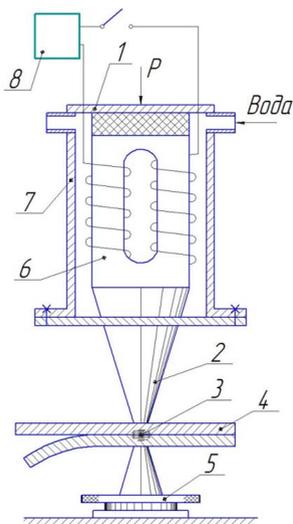


Рис. 154. Схема ультразвуковой сварки:

- 1 — акустический узел; 2 — инструмент; 3 — место контакта;
4 — заготовки; 5 — регулировочный винт опоры; 6 — вибратор;
7 — кожух; 8 — ультразвуковой генератор

Переменное электромагнитное поле, направленное вдоль пакета пластин вибратора, вызывает укорочение или удлинение вибратора, что обеспечивает необходимое преобразование высокочастотных электромагнитных колебаний в механические колебания той же частоты.

Одновременное воздействие на соединяемые заготовки ультразвуковых колебаний и механического сдавливания с относительно небольшой силой со стороны инструмента приводит к разрушению микронеровностей и оксидных пленок на контактных поверхностях и вызывает пластическое течение их металла. Трение в контакте, вызванное возвратно-поступательным перемещением сжатых свариваемых поверхностей, приводит к их интенсивному нагреву. В результате нагрева и сближения соединяемых поверхностей между ними возникает прочная металлическая связь.

Ультразвуковая сварка широко применяется для получения ответственных соединений металлов небольших толщин, полимерных материалов и даже костных тканей в живом организме. Она позволяет радикально решить проблему присоединения к кристаллам кремния, используемым в разнообразных интегральных схемах, алюминиевых выводов, предназначенных для подключения к внешним электрическим цепям. При помощи ультразвука удается получить качественные сварные соединения с размерами контактных площадок в пределах нескольких микрон.

9.5.4. Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная сварка — это способ получения сварного соединения в результате соударения металлических заготовок. Этот способ основан на использовании сил электромеханического взаимодействия между вихревыми токами, наведенными в металле, и самим электромагнитным потоком. Такое взаимодействие происходит при пересечении вихревых токов с силовыми линиями переменного электромагнитного поля. В результате указанного взаимодействия происходит преобразование электрической энергии в механическую в виде мощного силового импульса, направленного на одну из заготовок. Эта заготовка с большой скоростью выбрасывается из индуктора и с силой соударяется с другой свариваемой заготовкой, образуя прочное сварное соединение.

Магнитно-импульсная сварка используется в машиностроении для сварки труб и плоских деталей по их наружному и внутреннему контурам. Толщина свариваемых металлов составляет от 0,5 до 2,5 мм. Свариваемые заготовки могут устанавливаться как под углом, так и параллельно друг к другу. Угловое расположение заготовок позволяет обеспечить последовательное перемещение зоны контакта в процессе сварки. Сварное соединение образуется в результате косо́го удара двух заготовок с образованием между ними металлической связи. При параллельном расположении заготовок в процессе сварки возникает неравномерное распределение давления вдоль их контакта. Оно несколько больше в средней части, чем на краях заготовок, что негативно сказывается на прочности сварного соединения.

Установка для магнитно-импульсной сварки (рис. 155) состоит из зарядного устройства *1*, состоящего из высоковольтного трансформатора и выпрямителя; коммутирующего устройства *3*, которое включается при подаче поджигающего импульса на вспомогательный электрод и вызывает разряд батареи высоковольтных конденсаторов *2* на индуктор *4*. Перед сваркой заготовки *5* и *6* устанавливают под углом друг к другу с определенным зазором. Индуктор *4* устанавливают на поверхности одной из свариваемых заготовок *5*. Индуктор состоит из металлической спирали из одного или нескольких витков. Форма рабочей поверхности спирали повторяет форму заготовки *5*. Вторую заготовку *6* для предотвращения перемещения во время сварки жестко закрепляют в опоре *7*.

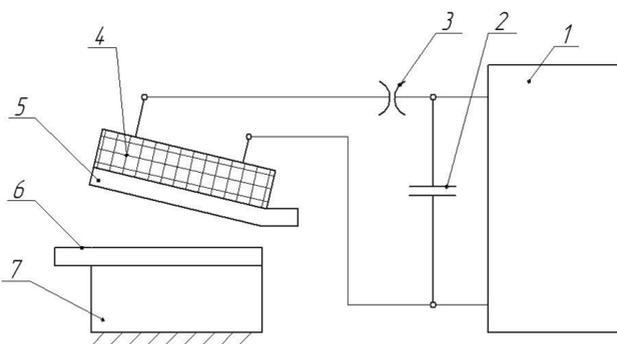


Рис. 155. Схема магнитно-импульсной сварки:

1 – зарядное устройство; *2* – высоковольтные конденсаторы;
3 – устройство коммутации, *4* – индуктор; *5*, *6* – заготовки; *7* – опора

При разрядке батареи конденсаторов в зазоре между индуктором и заготовкой возникает сильное электромагнитное поле, индуцирующее в этой заготовке вихревые токи. Взаимодействие тока индуктора с вихревыми токами в заготовке *5* приводит к возникновению между ними сил отталкивания. Благодаря этим силам заготовка *5* приобретает большую кинетическую энергию, с которой соударяется с неподвижной заготовкой *6*. Выделяющееся при соударении в зоне контакта тепло совместно с высоким давлением образует прочное сварное соединение.

Кинетическая энергия, передаваемая свариваемой заготовке, зависит от числа витков индуктора, напряжения разряда, ёмкости

конденсатора. При получении мощных магнитных полей происходит сильное разогревание индуктора. Поэтому для его охлаждения используется жидкостное (жидкий азот, гелий) охлаждение.

Достоинствами магнитно-импульсной сварки является возможность мгновенного получения сварного соединения практически из любых материалов, а также возможность сварки с помощью удаленного индуктора в атмосфере защитных газов и вакууме.

К недостаткам магнитно-импульсной сварки следует отнести невозможность получения сварных соединений большой площади.

9.5.5. Диффузионная сварка

Диффузионная сварка — это способ получения сварного соединения в результате взаимной диффузии металла свариваемых заготовок. В основе этого способа лежит нагрев и механическое сдавливание свариваемых поверхностей в вакууме или защитной газовой среде. Защитная среда и вакуум необходимы для уменьшения скорости окисления свариваемых металлов.

Диффузионная сварка применяется для получения прочного сварного соединения из достаточно толстых заготовок, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов. При этом соединяемые заготовки могут быть весьма больших размеров и иметь контактные поверхности в виде сложного криволинейного профиля. С помощью диффузионной сварки также получают высококачественные соединения из керамики, меди, титана, стекла, композиционных и порошковых материалов.

Этот способ может производиться в различных пространственных положениях в режиме полуавтоматической или автоматической сварки.

Отличительной особенностью диффузионной сварки по сравнению с другими способами сварки давлением является применение высоких температур нагрева (0,5–0,7 от температуры плавления металла) при сравнительно низких удельных давлениях (до 0,5 МПа).

Формирование прочного диффузионного соединения обусловлено качеством предварительной очистки свариваемых поверхностей от оксидных пленок и загрязнений и физико-химически-

ми процессами (ползучесть и рекристаллизация), протекающими в условиях вакуума или газовой защиты.

Сущность процесса диффузионной сварки в вакууме заключается в установке заготовок в приспособлении, позволяющем передавать давление в зону стыка, в создании вакуума и нагреве металла до температуры сварки. Заготовки под давлением выдерживают в течение определенного времени, достаточного для формирования качественного сварного соединения.

Сближение свариваемых поверхностей происходит главным образом в результате пластической деформации поверхностных микровыступов при изотермической выдержке заготовок. По мере сближения свариваемых поверхностей происходит непрерывное увеличение площади физического контакта металлов и рост межмолекулярного взаимодействия, приводящего в итоге к схватыванию.

В ряде случаев, например при сварке материалов с различными коэффициентами линейного расширения, для получения соединения используют только высокотемпературный нагрев, исключив из процесса сжатие свариваемых заготовок. Но тем не менее механическое сдавливание является важным фактором, определяющим интенсивность пластической деформации металла и скорость образования диффузионного слоя в свариваемых заготовках. В большинстве случаев с увеличением внешнего удельного давления существенным образом снижается время сварки. Так, при сварке в прессе с использованием высоких удельных давлений время образования сварного соединения может составлять всего лишь несколько секунд, в то время как в условиях низких удельных давлений сварка может длиться часами. Таким образом, задачу выбора режима и условий проведения сварки следует решать с учетом технологической схемы нагружения заготовок, типа конструкций и геометрических размеров соединяемых заготовок.

В зависимости от интенсивности пластической деформации металла в зоне контакта, определяющей процесс формирования диффузионного соединения, принято различать сварку с высокоинтенсивным и низкоинтенсивным силовыми воздействиями. При сварке с высокоинтенсивным воздействием механическое сдавливание заготовок производят при помощи пресса, снабжённо-

го вакуумной камерой и нагревательным устройством. Но на таком оборудовании можно сваривать заготовки ограниченных размеров (до 80 мм). При сварке крупногабаритных двухслойных конструкций применяют открытые прессы. При этом свариваемые заготовки перед установкой в пресс собирают в герметичные контейнеры, которые вакуумируют и нагревают до сварочной температуры.

Для изготовления слоистых конструкций перспективна диффузионная сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием, при которой допустимые сжимающие усилия ограничиваются предельным напряжением, не приводящим к потере устойчивости тонкостенных элементов. При этом способе диффузионной сварки не требуется сложного специального оборудования.

Качество сварного соединения при диффузионной сварке в вакууме определяется рядом технологических параметров, таких как температура, давление, время выдержки. Диффузионные процессы, лежащие в основе формирования сварного соединения, являются термически активируемыми, поэтому повышение температуры сварки стимулирует их развитие. Для снижения внешнего давления и уменьшения длительности сварки температуру нагрева свариваемых заготовок целесообразно устанавливать по возможности более высокой, так как это значительно снижает сопротивление металлов пластической деформации. Вместе с тем необходимо учитывать возможность развития нежелательных процессов структурного превращения, приводящих к изменению физико-механических свойств свариваемых металлов. Так, при сварке разнородных материалов увеличение длительности сварки во многих случаях сопровождается снижением прочности сварного соединения из-за формирования в зоне соединения хрупких структурных образований. При сварке одноименных металлов прочность сварного соединения как правило достигает прочности основного металла. Однако это происходит в том случае, когда структура зоны соединения не отличается от структуры основного материала. Для этого создаются такие условия сварки, при которых в зоне контакта образуются общие для соединяемых материалов зерна.

Достоинствами диффузионной сварки являются высокое качество сварных соединений и низкий расход потребляемой энергии,

отсутствие необходимости в сварочных припоях, электродах и дополнительной механической обработке свариваемых поверхностей. К недостаткам диффузионной сварки следует отнести необходимость вакуумирования рабочей камеры и тщательной предварительной очистки свариваемых поверхностей.

9.6. Газовая сварка

Одним из самых распространенных технологических способов сварки является также газовая сварка. Газовая сварка основана на использовании тепла, выделяющегося при сгорании в потоке кислорода и горючих газов: ацетилен, природных пропанобутановых смесей, паров бензина и др.

Для получения сварного шва с высокими механическими свойствами при газовой сварке необходимо хорошо подготовить свариваемые кромки, правильно подобрать мощность горелки, отрегулировать сварочное пламя, выбрать присадочный материал, установить положение горелки и направление ее перемещения по разделанным кромкам.

При газовой сварке пламя направляют на свариваемые кромки так, чтобы они находились на расстоянии 2–6 мм от конца ядра пламени. При этом конец присадочного прутка может находиться в сварочной ванне или на некотором расстоянии от нее. Угол наклона горелки зависит от толщины и теплопроводности основного металла. Чем толще металл и чем выше его теплопроводность, тем больше должен быть угол наклона горелки. Это способствует введению большего количества теплоты в основной металл.

Различают два основных способа газовой сварки: правый и левый. При правом способе (рис. 156, *a*) процесс сварки ведется слева направо. Горелка перемещается впереди присадочного прутка, а пламя направлено на формирующийся шов. Этим обеспечивается хорошая защита сварочной ванны от воздействия воздуха и медленное охлаждение металла шва. Такой способ применяют при сварке металла толщиной более 5 мм, так как он характеризуется большим тепловложением в основной металл. При сварке этим способом

швы получаются высокого качества. При левом способе (рис. 156, б) процесс сварки производится справа налево. Горелка перемещается за присадочным прутком, а пламя, направленное на свариваемые кромки, подготавливает таким образом к сварке. В этом случае шов получается равномерным по высоте и ширине, что особенно важно при сварке тонких стенок детали.

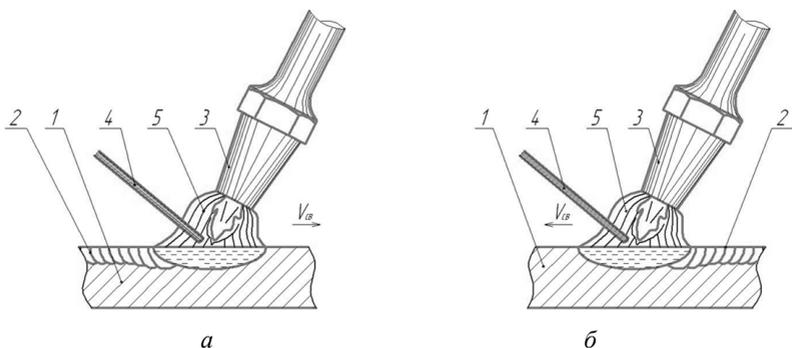


Рис. 156. Схемы основных способов газовой сварки:
а — правый; *б* — левый; 1 — деталь; 2 — сварочный шов; 3 — горелка;
 4 — присадочный пруток; 5 — пламя горелки

Газовую заварку трещины чугунной корпусной детали осуществляют ацетиленокислородным пламенем. В качестве присадочного материала обычно используют специальные чугунные прутики. Перед сваркой производят общий подогрев детали до температуры 650–680 °С, а при газовой заварке — местный нагрев до температуры не менее 500 °С. При этом трещину накрывают специальным защитным кожухом, в котором имеется небольшое окно для доступа к месту сварки. Такая защита позволяет предотвратить появление закалочных структур в околосшовной зоне.

Горячая сварка чугуна дает возможность получить прочность шва, равноценную прочности основного металла. Однако это достигается путем применения трудоемкого процесса, который можно производить в условиях специализированных предприятий.

9.7. Газовая кислородная резка

Газовая кислородная резка — один из наиболее распространенных в машиностроительном производстве технологических методов термической резки. Она позволяет получать заготовки из листовых материалов, труб и профильного проката. Газовая резка основана на свойстве металлов сгорать в струе кислорода с выделением большого количества тепла. Кислородная резка представляет собой процесс интенсивного окисления металла в определенном объеме с последующим удалением жидкого окисла струёй кислорода. Резку начинают с подогрева металла до температуры его воспламенения в кислороде.

Температура горения сплавов на основе железа составляет примерно 1050 °С. По мере увеличения содержания углерода в стали происходит закономерное повышение температуры воспламенения.

Подогрев металла производят подогревающим пламенем. При достижении температуры воспламенения металла на место резки подаётся струя кислорода, под воздействием которой металл начинает гореть. Образовавшийся расплав жидких окислов и железа нагревает нижележащие слои металла, которые последовательно окисляются до тех пор, пока металл не будет прорезан по всей толщине. При этом начинают перемещать резак в направлении резки. В процессе резки окисление металла начинается на поверхности и последовательно перемещается на нижние слои.

Для обеспечения процесса кислородной резки необходимо выполнение следующих условий:

- наличие контакта между струёй кислорода и жидким металлом;
- подогрев металла до температуры воспламенения;
- выделение при горении металла большого количества тепла, необходимого для расплавления нижележащих слоёв металла;
- низкая вязкость расплава жидких окислов и железа, достаточная для интенсивного их перемешивания.

Для газовой кислородной резки металла применяется универсальный резак (рис. 157). Он отличается от сварочной горелки дополнительным каналом, по которому проходит режущая струя кислорода.

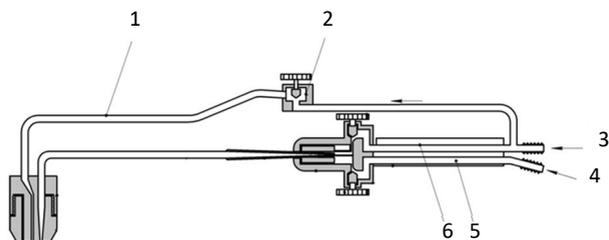


Рис. 157. Схема резака для газовой кислородной резки:

1 — трубка режущего кислорода; 2 — вентиль; 3 — подвод кислорода; 4 — подвод ацетилена; 5 — ацетиленовая трубка; 6 — кислородная трубка

Резак состоит из двух основных частей — ствола и наконечника. Ствол имеет клапаны для подачи ацетилена и кислорода. Его корпус снабжен вентилями для регулирования потоков ацетилена и кислорода.

Наконечник состоит из инжектора смесительной камеры и головки резака. Кислород и ацетилен в резак поступают через редукторы из баллонов, где находятся в сжатом состоянии.

Высокоуглеродистые, высоколегированные стали и чугун обычно кислородной резке не подвергаются из-за высокой температуры воспламенения и образования тугоплавких окислов. Для их резки применяют кислородно-флюсовую резку, при которой вместе с режущим кислородом в зону реза вдувается порошкообразный флюс.

9.8. Пайка металлов

Пайка — процесс, родственник сварке плавлением. Пайкой называется процесс соединения металлов без их расплавления путем введения между ними расплавленного особого металла, который называется припоем. Температура расплавления припоя несколько ниже, чем соединяемых металлов. Он заполняет зазор между металлами за счет действия капиллярных сил. После кристаллизации припой создает прочную связь между соединяемыми металлами.

Основным преимуществом пайки является небольшой нагрев металла при обеспечении высокой функциональности паяного соединения. К недостаткам следует отнести трудности пайки заготовок больших размеров, значительную стоимость многих припоев,

необходимость тщательной предварительной подготовки соединяемых поверхностей.

Современная пайка является передовым технологическим процессом, полностью механизированным и автоматизированным в условиях массового производства. Она получила широкое распространение во многих отраслях электроники, авиационной промышленности, приборо- и машиностроении.

Образование паяного соединения состоит из следующих операций. Сначала производится предварительная подготовка поверхностей заготовки, их зачистка и обезжиривание. Затем материал заготовок нагревают до температуры, близкой к температуре плавления припоя. После этого тщательно заполняют припоем шов и охлаждают полученное паяное соединение. В завершение производится механическая зачистка поверхности паяного шва.

Качество паяного соединения обусловлено прочностью связи припоя с основным металлом. В результате смачивания поверхностей металлов между ними и припоем возникает металлическая связь. Эта связь может образоваться вследствие разных причин:

- растворения основного металла в жидком припое;
- диффузии компонентов припоя в металл основы;
- реактивной диффузии между основным металлом и припоем;
- межатомного взаимодействия.

Одним из решающих факторов, определяющих прочность соединения, является величина технологического сборочного зазора. Для каждого конкретного случая пайки существует свой оптимальный зазор, выше и ниже которого прочность соединения падает.

Выбор величины зазора зависит от состава припоя и теплофизических свойств материала заготовок, способа нагрева, температуры пайки и состава флюса.

Различают следующие виды пайки: капиллярная, диффузионная, контактно-реактивная, реактивно-флюсовая и пайка-сварка.

При капиллярной пайке припой заполняет зазор между соединяемыми металлами и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис. 158). Паяное соединение образуется за счет растворения основного металла в жидком припое. После охлаждения возникает

прочная связь припоя с основным металлом. Этот вид пайки преимущественно применяют при соединении внахлест.

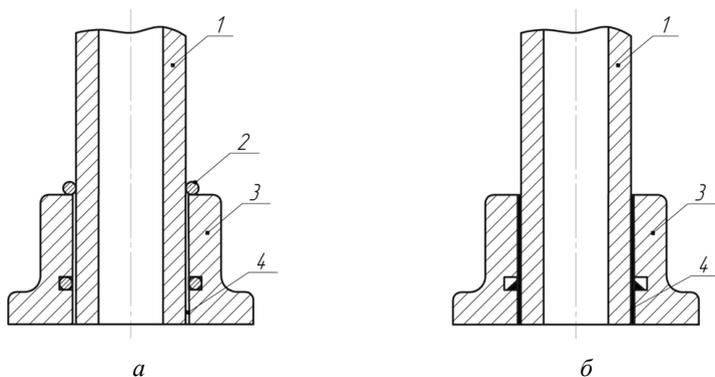


Рис. 158. Схема капиллярной конструкционной пайки:
а — перед пайкой, *б* — после пайки; 1, 3 — соединяемые заготовки;
2 — припой; 4 — зазор

При диффузионной пайке прочная связь припоя с основным металлом образуется за счет диффузии компонентов припоя в металл основы. Для этого необходим длительный нагрев паяного шва.

При контактно-реактивной пайке прочная связь между соединяемыми металлами образуется вследствие их контактного плавления. Такое плавление возникает при определённой температуре нагрева.

При реактивно-флюсовой пайке припой образуется в результате реакции вытеснения между металлом основы и флюсом.

При пайке-сварке паяный шов образуется аналогично сварке плавлением. Но вместо присадочного металла используют припой.

Наиболее широкое распространение получили капиллярная пайка и пайка-сварка.

Применяемые при пайке припои должны отвечать следующим требованиям:

- температура их плавления должна быть ниже температуры плавления соединяемых металлов;
- припои должны хорошо смачивать поверхности соединяемых металлов;
- припои должны быть прочными;

- коэффициенты термического расширения припоя и соединяемых металлов должны быть как можно ближе;
- припои должны обладать высокой электропроводностью.

Широкое применение при пайке получили оловянно-свинцовые и медно-цинковые припои. Оловянно-свинцовые материалы относятся к низкотемпературным припоям, а медно-цинковые материалы относятся к высокотемпературным припоям. Наиболее технологичными являются припои, имеющие малую разницу между начальной и конечной температурами их плавления. К таким припоям относятся оловянно-свинцовые припои марок ПОС61, которые обеспечивают высокую прочность паяного соединения на протяжении длительного времени эксплуатации.

Флюс применяют для очистки поверхности от оксидных пленок и различных загрязнений, а также для улучшения смачивания. Он должен вступать в реакцию с припоем. При этом температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюсы бывают твердыми, газообразными и жидкими. Наибольшее применение получили флюсы щелочных металлов.

Основными видами паяных соединений являются стыковое и внахлест (рис. 159).

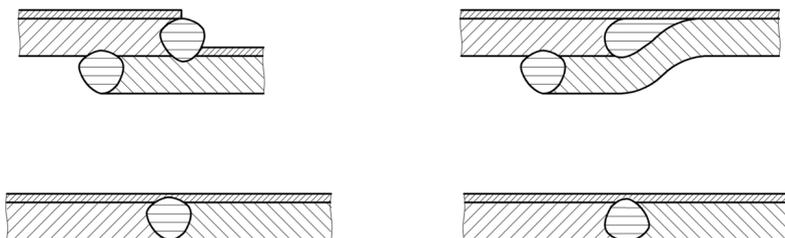


Рис. 159. Соединения заготовок внахлест и встык при пайке

В зависимости от источников нагрева различают следующие методы пайки: пайка в печах, индукционная пайка, пайка сопротивлением, пайка погружением, пайка паяльниками, пайка с радиационным нагревом и экзотермическая пайка.

При пайке в печах соединяемые металлы нагревают в газопламенных, газовых печах, печах сопротивления и с индукционным нагревом. Предварительно припой закладывают в зазор между

соединяемыми металлами. На место пайки наносят флюс и после этого собранное изделие помещают в печь. При температуре пайки припой расплавляется и заполняет зазор между соединяемыми металлами. Нагрев в печи продолжается в течение нескольких часов. Этот метод позволяет обеспечить высокое качество изделий и производительность процесса пайки.

При индукционной пайке соединяемые металлы с припоем и флюсом нагревают в индукторе, через который пропускают токи высокой частоты.

При пайке сопротивлением соединяемые металлы нагревают за счет тепла, которое выделяется при прохождении электрического тока через паяемые заготовки.

При пайке погружением соединяемые металлы нагревают в ваннах с расплавленными солями, которые защищают от взаимодействия с кислородом воздуха. Предварительно наносят флюс на поверхности заготовок и около места пайки размещают припой. Затем скрепляют заготовки и после этого собранное изделие помещают в ванну, которая нагрета до температуры 800 °С.

При пайке паяльниками припой расплавляют теплотой рабочей части электрического паяльника. Рабочая часть выполняется из меди. Пайку паяльниками применяют для получения паяных соединений черных и цветных металлов низкотемпературными припоями с температурой плавления ниже 350 °С.

При пайке с радиационным нагревом соединяемые металлы помещают в специальный контейнер, в котором создают вакуум. После вакуумирования контейнер заполняют аргоном и помещают между двух кварцевых ламп. Лампы нагревают соединяемые металлы до температуры пайки.

При экзотермической пайке соединяемые металлы с припоем нагревают теплотой экзотермических реакций специальной смеси. Предварительно на очищенные поверхности заготовок наносят флюс. Затем скрепляют заготовки и на их противоположные стороны укладывают экзотермическую смесь. После этого заготовки помещают в специальную печь, в которой происходит загорание экзотермической смеси при температуре 500 °С. Выделяющаяся при горении смеси теплота расплавляет припой и образует паяный шов.

При газопламенной пайке соединяемые металлы и припой нагревают до температуры пайки ацетиленокислородным пламенем газосварочных горелок. Предварительно наносят флюс на поверхности соединяемых металлов. Припой в виде прутка вводят в место пайки вручную. Этим методом получают паяные соединения тугоплавких металлов.

Выводы

1. Прочность конструкций зависит от способов соединения твердых тел, которые делятся на механические и молекулярно-механические.

2. Для того чтобы получить прочное соединение твердых тел, необходимо обеспечить взаимодействие их поверхностей на молекулярном уровне.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое сварка?
2. В чем отличие сварки от пайки?
3. Какой эффект при сварке достигается с применением различных элементов (хрома, никеля, молибдена, ванадия, вольфрама)?
4. Какие конструкционные материалы свариваются лучше, а какие – хуже?
5. Для чего предназначено электродное покрытие?
6. От чего зависит глубина проплавления сварного шва?
7. Чем отличаются короткий, средний и длинный сварочные швы?
8. Какие существуют дефекты сварных швов?
9. В чем заключается суть электродуговой сварки покрытыми электродами?
10. Какой вид сварки нужно использовать для работы с деталями из алюминия?

10. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

Методы электрофизической (ЭФ) и электрохимической (ЭХ) обработки используются для формообразования поверхностей заготовок из труднообрабатываемых материалов (весьма вязких, твердых и очень твердых, керамических, металлокерамических). Методы ЭФ и ЭХ обработки применимы для сложных фасонных внешних и внутренних поверхностей; отверстий малых диаметров. Механические нагрузки на обрабатываемую поверхность при ЭФ и ЭХ обработке настолько малы, что практически не влияют на точность обработки. В ряде случаев эти методы обработки способствуют образованию незначительного дефектного слоя. В то же время их использование не приводит к образованию наклепа обработанной поверхности, но они устраняют прижоги после шлифования, повышают эксплуатационные характеристики поверхностного слоя (износостойкость, коррозионную стойкость). Простота кинематических цепей станков для ЭФ и ЭХ обработки позволяет точно регулировать процессы формообразования и автоматизации обработки.

Все методы ЭФ и ЭХ обработки условно можно разделить на электроэрозионную (электроискровая, электроимпульсная, электроконтактная); электрохимическую (электрохимическая, анодно-механическая); химическую (химическая, химико-механическая); импульсно-механическую (ультразвуковая, электрогидравлическая); лучевую (светолучевая, электронно-лучевая); плазменную и взрывную обработки.

Для электроэрозионной обработки используется явление разрушения (эрозия) электродов при пропускании между ними импульсов электрического тока. Электрический разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного промежутка диэлектрической жидкостью (керосин, минеральное масло). Эрозия электродов в жидкой среде происходит значительно интенсивнее, чем в газовой. При замыкании электрической цепи межэлектродное пространство ионизируется, по достижении пороговой разности потенциалов образуется канал проводимости,

по которому проходит искровой, или дуговой, разряд. За время импульса плотность тока возрастает до 8–10 кА/мм², следовательно, повышается температура поверхности заготовки (электрода) до 10 000–12 000 °С. При таких температурах происходит мгновенное оплавление и испарение некоторого элементарного объема материала электрода (заготовки), т. е. протекает его эрозия. Следующий импульс тока пробивает межэлектродный промежуток там, где расстояние между электродами окажется минимальным. Эрозия металла происходит до тех пор, пока расстояние между электродами не окажется больше критического (0,01–0,05 мм). При сближении электродов процесс эрозии повторяется. Наряду с тепловым воздействием заготовка испытывает действие электростатических, электродинамических сил и сил кавитации.

10.1. Электрофизические методы обработки

10.1.1. Электроискровая обработка

Электроискровая обработка (ЭО) основана на использовании импульсного искрового разряда между анодом (заготовкой) и катодом (инструментом). В установке ЭО в ванне с диэлектрической жидкостью 4 (рис. 160) размещены подставка-изолятор 7 и заготовка 6. Между заготовкой и инструментом 3 пропускается импульсный ток с амплитудой 100–200 В.

Импульс продолжительностью 20–200 мкс генерируется ЛС-генератором 1. В зависимости от энергии импульса различают обработку на особо мягких, мягких, средних и жестких режимах. Мягкие режимы позволяют вести обработку с размерной точностью до 2 мкм и шероховатостью обработанной поверхности до $R_z = 0,32$ мкм. Обработка на средних и жестких режимах позволяет получать фасонные открытые полости (полость штампа); цилиндрические отверстия с радиусной осью; прошивать сквозные отверстия любой поперечной формы диаметром 1–50 мм; разрезать заготовку и др. Обработка на особо мягких режимах позволяет шлифовать внутреннюю поверхность особо точных отверстий малого диаметра (фильер) и окончательно отделявать заготовку. Элек-

троискровая обработка применяется для изготовления штампов, пресс-форм, фильер, режущего инструмента, деталей топливной аппаратуры двигателей, сеток, сит; для повышения износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости поверхности деталей машин; стойкости режущего инструмента; получения шероховатости, необходимой для создания последующего гальванического покрытия; легирования поверхностных слоев; увеличения размеров изношенных деталей.

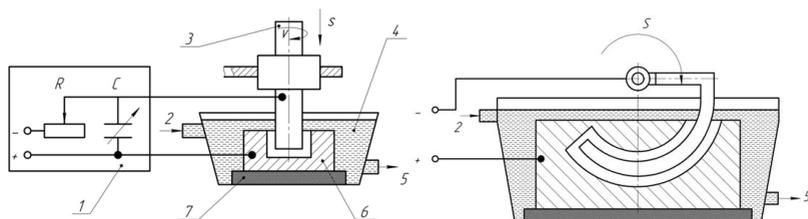


Рис. 160. Схема электроискровой обработки:

1 — генератор; 2 — электролит; 3 — инструмент; 4 — ванна с жидкостью;
5 — слив электролита; 6 — заготовка; 7 — подставка

Суть процесса ЭО состоит в образовании мелкодисперсной закалочной структуры и в легировании поверхностных слоев материала анода при искровом разряде в воздушной среде. Электроискровому упрочнению подвергают кулачки, фиксаторы, направляющие, прижимы, толкатели, стержни выпускных клапанов, клинья, пазы, шлицы, отверстия. Для проведения электроискрового упрочнения требуется предварительная подготовка заготовок: удаление загрязнений, заусенцев и пятен коррозии; обеспечение шероховатости обрабатываемой поверхности не более $R_z = 80$.

10.1.2. Электроимпульсная обработка

Основана на повышенной эрозии анода при подаче импульсов малой и средней продолжительности. При импульсах большой продолжительности (дуговой разряд) катод разрушается значительно быстрее, чем в случае импульсов малой и средней продолжительности.

Униполярные импульсы создаются посредством электромашинного или электронного генератора. Продолжительность импульса составляет 500–10 000 мкс. Заготовку размещают на изоляторе

в ванне с диэлектрической жидкостью. При электроимпульсной обработке инструмент изнашивается медленнее, чем при электроискровой. Значительная мощность импульса обеспечивает высокую производительность, но малую точность обработки. Поэтому метод целесообразно применять для черновой обработки обширных полостей, фасонных наружных поверхностей и отверстий.

10.1.3. Высокочастотная электроискровая обработка

Основана на использовании высокочастотных (100–150 кГц) импульсов при малых энергиях разряда. Производительность метода в 30–50 раз выше по сравнению с ЭО при одновременном повышении точностных параметров обработанной поверхности. В установке высокочастотной электроимпульсной обработки заготовка и инструмент размещены в ванне с диэлектрической жидкостью. Постоянное напряжение от выпрямителя разрывается прерывателем тока и подается на первичную обмотку импульсного трансформатора. Включение заготовки и инструмента во вторичную цепь трансформатора позволяет избежать возникновения дугового разряда.

10.1.4. Электроконтактная обработка

Основана на локальном нагреве заготовки в месте ее контакта с инструментом-электродом и удалении размягченного или расплавленного материала из зоны обработки механическим путем. Источником образования теплоты в зоне обработки является импульсный дуговой разряд. Питание электрической цепи осуществляется от трансформатора через контактор. Электроконтактную обработку применяют при сверлении, точении, разрезании заготовок.

10.2. Электрохимические методы обработки

Электрохимическая обработка основана на анодном растворении выступов и впадин микронеровностей при электролизе.

При прохождении постоянного электрического тока через электролит 2 (рис. 161) на поверхности анода-заготовки 3 происходят химические реакции, и поверхностные слои металла переходят в электролит в виде продуктов растворения.

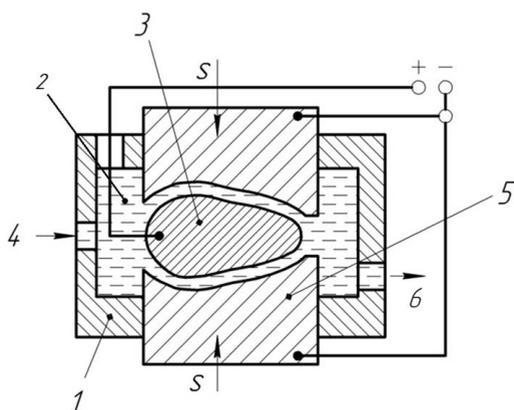


Рис. 161. Электрохимическая обработка:
 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – заготовка; 4 – подача электролита;
 5 – электроды-катоды; 6 – выход электролита

10.2.1. Электрохимическое полирование

При электрохимическом полировании заготовку помещают в ванну 1 с электролитом (рис. 161). В зависимости от обрабатываемого материала в качестве электролита используют растворы кислот или щелочей. Заготовку подключают к аноду. Катодом 5 служит пластина из свинца, меди или стали. При замыкании электрической цепи начинается растворение материала анода. Растворение идет по выступам микронеровностей, так как наибольшая плотность тока соответствует вершинам выступов. Продукты растворения (оксиды или соли, имеющие пониженную проводимость) заполняют впадины между выступами на поверхности и препятствуют растворению металла. Избирательная скорость растворения по выступам и впадинам сглаживает микронеровности. Обработанная поверхность получает металлический блеск.

Достоинствами метода электрохимического полирования являются следующие факторы: возможность уменьшения глубины микронеровностей без деформации заготовки, исключение термических изменений структуры. Способ позволяет обрабатывать нежесткие заготовки одновременно по всей поверхности. Наибольшее применение способ получил для финишной обработки режущих инструментов.

Особенностью электрохимической размерной обработки является электролиз в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, образуемый анодом-заготовкой 3 и катодом 5 – инструментом. Одновременно струя электролита удаляет продукты электролиза из рабочей зоны.

Способ позволяет одновременно обрабатывать всю поверхность заготовки, находящуюся под воздействием катода (необрабатываемые участки поверхности изолируются). При этом можно обрабатывать нежесткие заготовки, сложно-фасонные заготовки, фасонные полости или фасонные глухие (сквозные) отверстия в труднообрабатываемых материалах. При обработке полостей или отверстий электролит подается по сквозному или глухому центральному каналу катода через отверстия.

10.2.2. Электроабразивная обработка

Электроабразивная обработка применяется в качестве чистовой механической обработки ответственных нежестких деталей из труднообрабатываемых материалов типа лопаток турбин. Она позволяет получить высокое качество поверхности изделия, исключив при этом его деформацию.

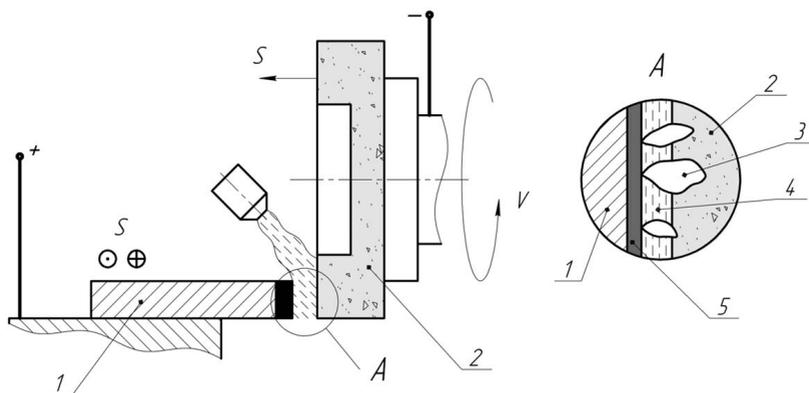


Рис. 162. Электроабразивная обработка:
1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – зерна абразива;
4 – электролит; 5 – припуск

Особенность электроабразивной обработки состоит в том, что катодом является абразивный инструмент 2 (рис. 162), выполненный на электропроводящей связке (например, бакелитовой с графитным наполнителем). Между анодом-заготовкой 1 и инструментом имеется межэлектродный зазор за счет зерен 3 абразива, выступающих из связки. В этот зазор поступает электролит 4. Доля припуска 5, удаляемого за счет анодного растворения, достигает 90 %, и всего лишь 10 % припуска удаляется механической обработкой.

При использовании алмазного абразивного инструмента (электроалмазная обработка) анодным растворением удаляют до 75 % припуска.

10.2.3. Электрохонингование

При электрохонинговании заготовку 1 (рис. 163) устанавливают на токосъемное кольцо 5 и изолятор 7 и помещают в ванну 4 с электролитом. Ванну устанавливают на стол 6 хонинговального станка.

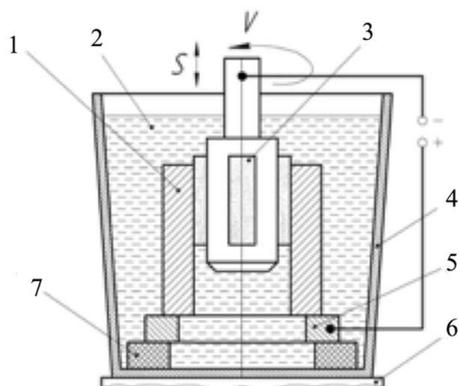


Рис. 163. Схема электрохонингования:
1 – заготовка; 2 – электролит; 3 – хонинговальная головка;
4 – ванна; 5 – токосъемное кольцо; 6 – стол, 7 – изолятор

Кинематика процесса аналогична кинематике обычного хонингования. Однако хонинговальная головка 3 оснащена не абразивными брусками, а брусками из липы, ольхи или пластмассы. Предварительное хонингование ведут в растворе электролита с добавлением

абразивного порошка зернистостью не более М28. Окончательное хонингование ведут в том же электролите, но с добавкой оксида хрома. Способ обеспечивает более низкую шероховатость поверхности R_a 0,04–0,16 мкм (зеркальный блеск) и повышение производительности обработки в 4–5 раз.

10.2.4. Анодно-механическая обработка

Анодно-механическая обработка (АМО) основана на комбинированном механическом, электроэрозионном и электрохимическом воздействии на материал заготовки. Анод – заготовка 1 (рис. 164) и катод – режущий инструмент 2 включены в общую электрическую цепь постоянного тока.

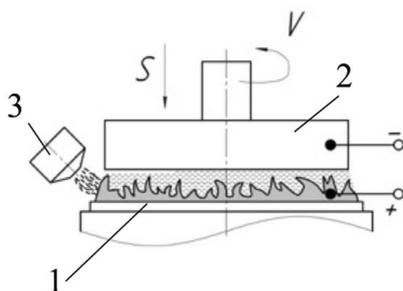


Рис. 164. Анодно-механическая обработка

В зазор между ними через сопло 3 подается электролит (обычно жидкое стекло – водный раствор силиката натрия). Вследствие анодного растворения на заготовке образуется защитная пленка, которая разрушается режущим инструментом. При снятии пленки между выступающими частями электродов происходят электрические разряды, что приводит к электрической эрозии.

Применение комбинации трех процессов позволяет за счет регулирования энергии отдельных составляющих проводить обработку в широких пределах. При черновой обработке операцию выполняют при больших плотностях тока. Основное значение имеет тепловое электроэрозионное воздействие, приводящее к интенсивному снятию материала заготовки в результате плавления и взрывообраз-

ного испарения металла в среде электролита. Анодное растворение необходимо только для образования защитной пленки, обеспечивающей концентрацию дуговых разрядов на вершинах микронеровностей. Механическое воздействие обеспечивает вынос продуктов разрушения из зоны обработки. Чистовую обработку осуществляют при малых плотностях тока. Основное значение имеют механизмы анодного растворения и механического разрушения пленки. Эти процессы развиваются на вершинах микронеровностей, что позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности и повысить точность обработки.

Посредством АМО обрабатываются все токопроводящие материалы, высокопрочные и труднообрабатываемые сплавы, твердые сплавы, вязкие материалы. Способом АМО можно разрезать заготовки, прорезать пазы и щели, точить заготовки, обрабатывать плоские поверхности, полировать поверхности, затачивать режущий инструмент.

Выводы

1. Электрофизическая и электрохимическая обработки, основанные на действии электрического тока, преимущественно применяются для труднообрабатываемых материалов.

2. Электрофизические и электрохимические методы обработки способствуют образованию незначительного дефектного слоя, в то же время их использование не приводит к образованию наклепа обработанной поверхности.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается электронно-лучевой способ обработки материалов?
2. В чем заключается электроконтактный способ обработки материалов?
3. Как можно обработать неэлектропроводные материалы?
4. Какие методы обработки не создают пластически деформированного слоя?

5. Что можно, а что нельзя использовать в качестве среды между электродами при электрофизической обработке?
6. В чем заключается сущность электроабразивной обработки?
7. В чем заключается сущность электрохимической обработки?
8. В чем заключается сущность электроискрового легирования?
9. Какие методы относят к методам электрофизической обработки?
10. В чем заключается электрохимический способ обработки материалов?

11. УСКОРЕННОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ПРОТОТИПОВ

Традиционная аналоговая технология изготовления деталей, эффективная в условиях массового производства, не пригодна для условий гибкого рыночного производства. В условиях рынка требуется быстрая смена поставляемых потребителю изделий ограниченными сериями в количестве до 500 штук. К этому она не приспособлена в силу объективных причин, так как обладает большой трудоемкостью. Традиционные технологии изготовления деталей основаны на методах механической обработки режущими инструментами, таких как точение, шлифование и фрезерование. Эти методы дают возможность получать изделия путем послойного удаления материала с заготовки. Сами заготовки изготавливают методами литья, проката,ковки и штамповки. Этому предшествует длительная работа по созданию модели – прототипа будущего изделия. Для этого требуется много времени, а результаты изготовления не всегда получаются удовлетворительного качества.

Модель, или прототип, – это копия детали, изготавливаемая из легкообрабатываемых материалов – дерева, картона, глины и пластмассы. Она необходима для проведения испытаний с целью оптимизации конструкции детали и процесса изготовления изделия.

Новые этапы развития информатики, техники числового программного управления и лазерной технологии позволили перейти к новейшим цифровым технологиям ускоренного формообразования изделий. Они способны существенно сократить время разработки, освоения и производства новой продукции.

Цифровые технологии ускоренного изготовления деталей и их прототипов – это органичное соединение возможностей компьютерных технологий обработки информации, трехкоординатного моделирования и современных способов изготовления. Трехкоординатное моделирование в профессиональном сообществе принято называть аббревиатурой CAD. Упомянутые способы основаны на процессах нанесения материала в виде тончайших слоев, которые позволяют буквально конструировать деталь. Новые технологии получили название Rapid Prototyping – ускоренное прототипирование. Они позволяют во времени и пространстве совместить или

чрезвычайно сблизить конструирование и изготовление типового единичного прототипа или модели. Более того, их развитие привело к технологии непосредственного изготовления изделий. Такая технология даёт возможность сократить время на их изготовление в зависимости от степени сложности на 30–70 %.

Технология ускоренного формообразования изделия или прототипа базируется на следующих основополагающих процессах:

- на процессе компьютерного автоматизированного проектирования изделия по чертежу, аналитическим зависимостям или результатам измерений;
- компьютерной оптимизации конструкции изделия исходя из требований дизайнера и его функционального назначения;
- трансформации трехкоординатной модели в совокупность послойных двумерных, двухкоординатных моделей;
- процессе воспроизведения совокупности послойных моделей в единое твердотельное изделие (или его прототип), носящее название САМ.

Технологии ускоренного изготовления деталей включают несколько этапов. При этом структура технологического процесса ускоренного формообразования изделия может быть представлена в такой последовательности.

Первой технологической операцией является трехмерное описание геометрии прототипа, предназначенного для изготовления изделия. Трехмерная математическая модель прототипа создается по данным чертежа или частным аналитическим зависимостям. Однако если есть образец изделия, то изготовление твердотельного прототипа необязательно. В этом случае прототип получают в виде фотореалистичного изображения – объемной реплики на трехкоординатной измерительной машине. Это делается путем обмера образца изделия сканированием поверхности послойно или поточно. Потом трехмерное описание прототипа переводится в стандартный формат. Таким форматом может быть формат, называемый STL. Это квази-стандартный формат данных для технологий ускоренного изготовления деталей. В нем все поверхности трехмерного прототипа заменяются STL-данными. Важность этой операции обусловлена тем, что для последующей работы над изготовлением

изделия может не потребоваться твердотельная модель, как это принято в традиционных технологиях.

Вторым этапом является компьютерная оптимизация конструкции прототипа по специальным программам. В качестве критерия оптимизации приняты функциональное назначение изделия и требования эргономики, которые предъявляются к подобным изделиям. Для проведения компьютерной оптимизации вполне достаточно трехмерного фотореалистичного изображения. Это обстоятельство резко сокращает время на проектирование.

Третьим этапом является послойное представление теоретической объемной модели совокупностью двумерных относительно простых моделей. Для этого STL-данные раскладываются на отдельные двумерные сечения с малой высотой, равной 0,2 миллиметра, в формат, который называется HPGL.

Таким образом, трехмерный объект заменяется совокупностью плоских слоев. В основе этого процесса лежат основные положения начертательной геометрии. Согласно этим положениям любой трехмерный объект может быть однозначно описан совокупностью двумерных проекций и сечений. Заканчивается этот этап созданием программы компьютерного управления движением рабочего органа — инструмента, который во время создания твердотельного прототипа должен перемещаться в соответствии с данными двумерных моделей. Эти модели получили название 2D-моделей.

Окончательное изделие или прототип изготавливают с помощью способов материализации теоретических 3D-моделей. Этих способов достаточно много. Они различаются по физической сущности, принципам работы, технологическим возможностям и применяемым материалам. Однако все они без исключения основаны на принципе послойного воспроизведения твердотельной копии компьютерной модели. Послойное воспроизведение — это процесс выращивания по слоям готового изделия по данным компьютерной модели.

Безусловными достоинствами быстрого прототипирования являются:

- значительное повышение гибкости производства;
- повышение конкурентоспособности производства;

- снижение себестоимости продукции, выпускаемой мелкими сериями;
- сокращение сроков выхода на рынок новой продукции;
- интеграция компьютерных технологий и систем автоматического проектирования.

При изготовлении твердой копии строительный процесс идет снизу вверх. К детали последовательно добавляется слой за слоем. Первый слой формируется на поверхности специальной платформы, последующие слои – на поверхностях предыдущих слоев. Если геометрия изготавливаемой детали такова, что пятно предыдущего слоя не полностью перекрывает пятно последующего слоя, то применяют специальную поддерживающую структуру. Специальные поддержки предотвращают обрушение свежестроенных слоев. В различных способах материализации теоретических 3D-моделей поддержки выполняются либо из того же материала, что и сама модель, либо из вспомогательного, менее прочного материала. В большинстве случаев они создаются в виде тонких, легко удаляемых сегментов.

Всем существующим способам материализации 3D-моделей присуще много общего:

- все прототипы или изделия изготавливаются на основе данных проектирования 3D CAD;
- все прототипы или изделия изготавливаются послойно;
- изделие или его прототип получают не путем отделения, снятия припуска с заготовки, а посредством наращивания, добавления материала;
- наращивание материала в процессе формообразования происходит в переходной его фазе от жидкого или порошкообразного к твердому состоянию;
- изготовление конструктивного элемента не требует форм или инструмента, а значит, отпадают проблемы, связанные с износом инструмента, как, например, при формообразовании резанием, штамповкой и ковкой;
- отсутствие ограничений, связанных со сложностью формы изделия. Наличие внутренних полостей, сложных внутренних или внешних поверхностей не мешает процессу изготовления. Чем сложнее конфигурация изделия, тем больше преимущество процесса быстрого изготовления;

- резкое сокращение затрат времени;
- эффективность всех технологий быстрого прототипирования существенно повышается при их комбинации с завершающей технологией изготовления твердотельных изделий, таких как вакуумное литье или литье под давлением.

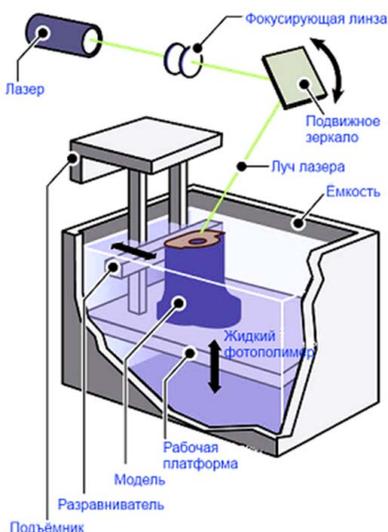
11.1. Некоторые способы материализации 3D-моделей

Используются следующие способы материализации 3D-моделей:

- способ стереолитографии;
- избирательное лазерное спекание;
- изготовление слоистых объектов;
- моделирование оплавлением;
- основное термическое воздействие;
- изготовление с использованием баллистики;
- изготовление направленным светом;
- прямое блочное изготовление оболочки;
- изготовление по принципу трехкоординатной глубокой печати.

Стереолитография стала первой коммерческой реализацией технологии послойного изготовления изделия. В устройствах, реализующих этот способ, строительным материалом является специальная вязкая жидкость. В качестве жидкости можно использовать фоточувствительную синтетическую смолу. Такая фоточувствительная синтетическая смола способна затвердевать под воздействием ультрафиолетового излучения. Устройство представляет собой ванну, заполненную «строительным материалом», с плоской платформой. Платформа имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении. Над ванной расположен лазер (рис. 165).

Изготовление детали происходит в следующей последовательности. Платформа опускается в ванну на глубину, равную толщине одного слоя будущей детали. Слой жидкости покрывает всю поверхность платформы.



а



б

Рис. 165. Схема процесса стереолитографии (*а*) и внешний вид оборудования – настольный стереолитографический принтер Formlabs Form1 (*б*) (top-technologies.ru)

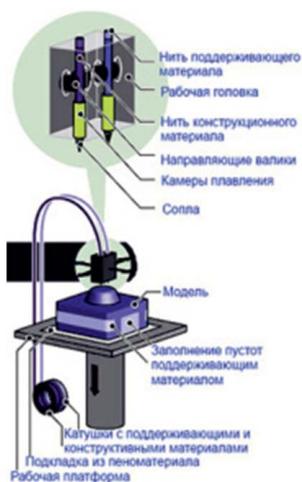
Управляемый компьютерной программой лазерный луч обводит контур первого слоя. Затем методично сканирует все пространство внутри этого контура. Под воздействием лазерного излучения происходит локальное затвердевание строительной жидкости. В результате появляется первый слой будущей детали. Выравнивание слоя по толщине обеспечивается скользящим проходом специального лезвия. После завершения первого слоя платформа опускается на глубину следующего слоя. При этом отвержденный первый слой детали оказывается под слоем строительной жидкости. Второй и последующие слои отверждаются так же, как и первый. При этом каждый новый слой осаждается на поверхности предыдущего. Так, слой за слоем, процесс продолжается до полного завершения построения детали. В завершение платформа поднимается, а избытки строительной жидкости свободно стекают в ванну. Построенную таким образом деталь промывают и сушат. После этого она направляется на испытания или эксплуатацию.

Основное термическое воздействие основано на принципе фотополимеризации. В этом способе каждый слой поверхности строится последовательно — точка за точкой. Это делается при помощи маски-негатива и специальной лампы. На основе описания геометрии детали в STL-формате происходит ее построение. Построение детали происходит через взаимодействие двух раздельно существующих циклов. В первом цикле происходит изготовление маски-негатива, которая служит основой для построения детали.

Строительным материалом для формообразования детали является слой тонкого жидкого полимера, который наносится на маску-негатив. После отверждения воска происходит опускание слоя на определенную толщину, как правило не более 0,15 миллиметров. Затем начинаются цикл обновления восковой маски-негатива и следующий за ним цикл наслоения жидкого фотополимера. Использование воска в качестве строительного материала является характерным для данной технологии.

В способе моделирования оплавлением строительным материалом служит пластиковый шнур, который разматывается с подающей катушки (рис. 166). Он поступает в перемещаемое в горизонтальной плоскости устройство. Устройство состоит из нагревателя, расплавляющего пластик, и форсунки. Через форсунку расплавленный материал выдавливается в рабочее пространство машины. Так же, как и в прочих методах послойного построения детали, в данном процессе присутствует перемещаемая в вертикальном направлении строительная платформа. Процесс изготовления детали начинается в тот момент, когда платформа находится непосредственно под форсункой.

Перемещаемая под управлением компьютерной программы форсунка описывает контур детали. При этом выдавленный расплавленный пластик формирует границу первого слоя. Далее методичными штрихами заполняется все пространство внутри контура. После завершения первого слоя платформа опускается на соответствующую глубину, и процесс продолжается. В общем случае толщина слоя составляет от 0,025 до 1,25 миллиметра, а толщина стенки — от 0,22 до 6 миллиметров.



a



б

Рис. 166. Схема процесса стереолитографии (*a*) и внешний вид оборудования – профессиональный FDM-принтер Stratasys Fortus 360mc, позволяющий печатать нейлоном (*б*) (top-technologies.ru)

Выдавленный из форсунки расплавленный материал быстро затвердевает и при этом схватывается со слоем уже затвердевшей пластмассы. Таким образом, формируется достаточно прочная структура.

Для формирования специальных поддержек используется механизм, аналогичный механизму для размещения основного материала. В качестве материала для формирования поддерживающих структур используется нить менее прочного пластика. Она подается с отдельной катушки и выдавливается через отдельную форсунку.

В способе трехкоординатной глубокой печати строительным материалом служит порошок (рис. 167). Для соединения частиц порошка вместо лазерного луча используется печатающая головка, аналогичная тем, что применяются в офисных струйных принтерах.

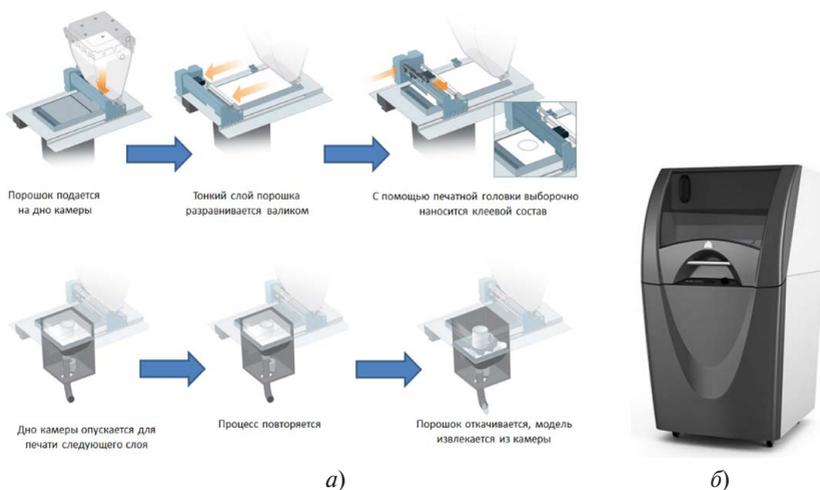


Рис. 167. Схема процесса стереолитографии (а) и внешний вид оборудования – профессиональный 3D-принтер 3D Systems ProJet CJP 260Plus (б) (deltatg.ru)

Через сопла печатающей головки на поверхность порошкового слоя подается связующий раствор. Перемещаемая в горизонтальной плоскости печатающая головка распределяет специальный раствор по поверхности порошкового слоя. Собственно, печатающая головка устройства работает так же, как струйные принтеры и плоттеры, которые распределяют чернила по поверхности бумаги. Связующий раствор пропитывает порошок, прочно склеивая его частицы. После того как завершается «печать» первого слоя, строительная платформа опускается. Поверх первого слоя распределяется новая порция строительного материала. Этот процесс продолжается до полного завершения построения детали.

Этим способом возможно изготовление керамических форм и форм для метода точного литья.

Рассмотренные способы не исчерпывают уже имеющегося арсенала технологий быстрого формообразования деталей. Ведутся разработки новых вариантов, комбинирование уже зарекомендовавших себя способов, новых материалов и сплавов.

Оптико-электронная цифровая сканирующая система предназначена:

- для быстрого, четкого и точного измерения поверхности изделия произвольной формы;
- бесконтактного послойного измерения, в том числе «чувствительных» частей поверхности изделий;
- обеспечения высокой точности построения геометрической формы детали благодаря очень высокой плотности измерений;
- перевода измерений в модифицированную трехмерную математическую модель.

Рабочее место 3D CAD предназначено:

- для быстрого моделирования идей, эскизов, чертежей (фото-снимков);
- представления различных форматов данных измерений в стандартизированной системе STL;
- быстрой параметрической оптимизации конструкции детали путем перебора параметров;
- трансформации и использования данных в системе Интернет или других носителей информации.

Стереолитографическая установка предназначена:

- для материализации математической модели изделия путем быстрого лазерного послойного построения деталей из среды жидкого полимера, других искусственных материалов;
- прямой реализации данных проектирования, данных математического моделирования, цифровых данных измерения в твердотельное изделие.

В общем случае эффективность применения технологий быстрого формообразования деталей в большой мере определяется тем, какая технология принята в качестве завершающей.

11.2. Технология вакуумного литья

Литейный воск – уникальный строительный материал, применяемый для непосредственного выращивания воскового прототипа из мастер-модели. В свою очередь, восковый прототип используется для дальнейшего получения металлической отливки методом вакуумного литья в оболочковые или гипсовые формы.

В зависимости от количества изделий в силиконовой форме, которая изготавливается с помощью мастер-модели, получают необходимое количество восковых прототипов.

Рассмотрим технологию, у которой завершающей технологической операцией является вакуумное литье.

Вакуумное литье обеспечивает расплавление металла в защитной среде и создание перепада давления между тиглем и вакуумной опокой. Это дает возможность регулировать скорость подачи металла в форму и устранять таким образом возникающие при кристаллизации пористость и усадочную раковину в металле. Кроме того, отливки, которые изготавливаются вакуумным литьем, имеют мелкозернистую структуру, свободную от газовых включений. Они не требуют механической обработки, кроме отделки поверхности.

Технологический процесс ускоренного изготовления деталей включает следующие операции:

- создание трехмерной математической модели прототипа;
- компьютерную оптимизацию конструкции прототипа с учетом функционального назначения и эргономики разрабатываемого изделия;
- перевод трехмерной математической модели прототипа в совокупность двумерных моделей;
- разработку программы для компьютерного управления движением печатающей головки;
- изготовление выплавляемой, выжигаемой восковой модели изделия;
- изготовление эластичной силиконовой формы по выплавляемой восковой модели. Силиконовый каучук, применяемый для изготовления форм, обеспечивает высокую эластичность, прочность и размерную точность форм;
- изготовление требуемого количества копий восковой модели изделия на установки литья в вакууме;
- изготовление гипсовой формы. Для этого требуется поместить выплавляемую восковую модель в опоку и залить гипсом в условиях вакуума;

- проведение термической обработки гипсовой формы с целью вытапливания воска. Для этого гипсовую форму помещают в вакуумную печь, которую постепенно нагревают до температуры 700 °С;
- заливку в форму расплавленного цветного сплава с температурой литья 1100 °С и медленное охлаждение;
- разрушение гипсовой формы водяной струей;
- проведение окончательной обработки поверхности изделия методом галтовки в крошке грецкого ореха.

Выводы

1. Цифровые технологии ускоренного формообразования изделий являются альтернативой традиционным аналоговым технологиям изготовления деталей.

2. Современные цифровые технологии изготовления деталей, основанные на процессах послойного нанесения материала, позволяют существенно сократить время разработки, освоения и производства новой продукции.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое 3D-печать?
2. Что такое 3D-принтер?
3. В чем разница между машинами по прототипированию и 3D-принтером?
4. Какие материалы используются при печати 3D-принтером?
5. В чем сущность метода лазерной стереолитографии (SLA)?
6. В чем сущность метода селективного лазерного спекания (SLS)?
7. В чем сущность метода наплавления (FDM)?
8. В чем сущность изготовления объектов с использованием метода ламинирования (LOM)?
9. В чем сущность технологии CJP?
10. В чем сущность технологии MJP?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свойства конструкционных материалов во многом определяют технологию изготовления изделий из них.

Основными материалами, из которых изготавливаются детали машин и приборов, были и остаются металлы, поскольку они в основном имеют более высокие прочностные свойства, чем неметаллические материалы, что обеспечивает повышенную надежность и долговечность изделий.

В производстве все шире используют сверхчистые, сверхтвердые, жаропрочные, композиционные, порошковые, полимерные и другие материалы, позволяющие резко повысить технический уровень и надежность оборудования. Обработка этих материалов связана с решением серьезных технологических вопросов.

Особое место среди конструкционных материалов занимают композиционные материалы — искусственно созданные материалы, состоящие из двух и более компонентов различного химического состава, объединенных в монолит. Свойства композиционного материала как правило отличны от свойств его компонентов, взятых в отдельности. Например, может быть значительно повышена прочность, жесткость композита. В качестве компонентов в композитах используются как металлы, так и неметаллы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология конструкционных материалов : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин [и др.] ; под общ. ред. А. М. Дальского. — 5-е изд., испр. — Москва : Машиностроение, 2003. — 511 с. — (Все для вузов). — ISBN 5-217-03198-0.
2. Материаловедение : учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин [и др.]. — Изд. 4-е, стер. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 646 с. — ISBN 5-7038-1860-5.
3. Технология машиностроения : учеб. пособие для вузов : в 2 книгах / Э. Л. Жуков, И. И. Козарь, С. Л. Мурашкин [и др.] ; под ред. С. Л. Мурашкина. — Изд. 2-е, доп. — Москва : Высшая школа, 2005. — 2 кн. — ISBN 5-06-004245-6.
4. Черепакhin, А. А. Технология обработки материалов : учебник / А. А. Черепакhin. — Москва : Академия, 2004. — 265, [1] с. — (Среднее профессиональное образование. Машиностроение). — ISBN 5-7695-1518-X.
5. Астафьева, Е. А. Технология конструкционных материалов : Лабораторный практикум / Е. А. Астафьева, Ф. М. Носков ; Сибирский федеральный университет. — Красноярск : ИПК СФУ, 2008. — 124 с. — (Электронный учебно-методический комплекс). — URL: www.studmed.ru/view/astafeva-ea-noskov-fm-tehnologiya-konstrukcionnyh-materialov-laboratornyy-praktikum_c66960b4af3.html (дата обращения: 29.01.2024).
6. Материаловедение и технология металлов : учебник для вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин [и др.]. — Москва : Высшая школа, 2001. — 638 с.
7. Проектирование технологии : учебник для машиностроительных вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. — Москва : Машиностроение, 1990. — 416 с.
8. Проектирование технологии автоматизированного машиностроения : учебник для вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. — 2-е изд., испр. — Москва : Высшая школа, 1999. — 416 с. — (Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств).

9. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия : учебник для студентов металлургических специальностей вузов / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. — Москва : Металлургия, 1979. — 487 с.
10. Емельянова, А. П. Технология литейной формы / А. П. Емельянова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1986. — 221, [3] с.
11. Технология металлов и конструкционные материалы / Б. А. Кузьмин, Ю. Е. Абраменко, М. А. Кудрявцев [и др.] ; под общ. ред. Б. А. Кузьмина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1989. — 494, [1] с. — ISBN 5-217-00367-7.
12. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1977. — 663, [1] с.
13. Титов, Н. Д. Технология литейного производства / Н. Д. Титов, Ю. А. Степанов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1985. — 400 с.
14. Технология конструкционных материалов и материаловедение : метод. указания и контрольные задания для студентов-заочников машиностроительных специальностей вузов / ред. Л. Н. Бухаркин. — Изд. 4-е. — Москва : Высшая школа, 1988. — 71 с.
15. Челноков, Н. М. Технология горячей обработки материалов : [учебник] / Н. М. Челноков, Л. К. Власьевнина, Н. А. Адамович ; под ред. Н. М. Челнокова. — Москва : Высшая школа, 1981. — 296 с.
16. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, И. А. Рожнецкий, А. И. Некоз ; под ред. Г. А. Прейса. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев : Выща школа, 1991. — 391 с.
17. Казаков, П. Ф. Технология металлов и других конструкционных материалов : учеб. пособие / П. Ф. Казаков, А. М. Осокин, А. П. Шишкова ; под ред. Н. Ф. Казакова. — Москва : Металлургия, 1976. — 688 с.
18. Ковка и штамповка. Справочник. В 4 томах. Том 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / А. Ю. Аверкиев, Д. И. Бережковский, Э. Ф. Богданов [и др.] ; под ред. Е. И. Семенова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010. — 716 с. — ISBN 978-5-217-03460-4.

19. Ковка и штамповка. Справочник. В 4 томах. Том 2. Горячая объемная штамповка / А. П. Атрошенко, О. А. Белокуров, Г. С. Гарибов [и др.] ; под ред. Е. И. Семенова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010. — 719 с. — ISBN 978-5-217-03462-8.
20. Ковка и штамповка. Справочник. В 4 томах. Том 3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / Е. Г. Белков, Г. В. Бунатян, А. Л. Воронцов [и др.] ; ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] ; под ред. А. М. Дмитриева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010. — 348 с. — ISBN 978-5-217-03463-5.
21. Ковка и штамповка. Справочник. В 4 томах. Том 4. Листовая штамповка / А. Ю. Аверкиев, Ю. А. Аверкиев, Е. А. Антонов [и др.] ; ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) [и др.] ; под ред. С. С. Яковлева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2010. — 731 с. — ISBN 978-5-217-03479-6.
22. Теория и технологияковки : учеб. пособие для вузов / Л. Н. Соколов, Н. К. Голубятников, В. Н. Ефимов, И. П. Шелаев ; под ред. Л. Н. Соколова. — Киев : Выща школа, 1989. — 317 с.
23. Охрименко, Я. М. Теория процессовковки : учеб. пособие для вузов / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. — Москва : Высшая школа, 1977. — 295 с.
24. Фоминых, В. П. Ручная дуговая сварка : учебник для средних ПТУ / В. П. Фоминых, А. П. Яковлев. — Изд. 7-е, испр. и доп. — Москва : Высшая школа, 1986. — 288 с. — (Профтехобразование).
25. Стеклов, О. И. Основы сварочного производства : [учебник] / О. И. Стеклов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Высшая школа, 1986. — 224 с. — (Профтехобразование).
26. Тархов, Н. А. Производство металлических электродов : учеб. пособие / Н. А. Тархов, З. А. Сидлин, А. Д. Рахманов. — Москва : Высшая школа, 1986. — 288 с. — (Профтехобразование).
27. Китаев, А. М. Справочная книга сварщика / А. М. Китаев, Я. А. Китаев. — Москва : Машиностроение, 1985. — 256 с. — (Серия справочников для рабочих).
28. Технология металлов и сварка : [учебник] / П. И. Полухин, Б. Г. Гринберг, В. Т. Жадан [и др.] ; под общ. ред. П. И. Полухина. — Москва : Высшая школа, 1977. — 464 с.

29. ГОСТ 9466—75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное : (Измененная редакция, Изм. № 2) : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27 марта 1975 года № 779 : взамен ГОСТ 9466—60 : дата введения 1976-07-01 / разработан и внесен Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР. — Москва : Стандартинформ, 2007. — 21 с.
30. ГОСТ 3.1125—88. Единая система технологической документации. Правила графического выполнения элементов литейных форм и отливок : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28 июля 1988 года № 2781 : взамен ГОСТ 2.423—73 : дата введения 1989-01-01 / разработан и внесен Государственным комитетом СССР по стандартам. — Москва : Издательство стандартов, 2003. — 13 с.
31. ГОСТ 3212—92. Комплекты модельные. Уклоны формовочные, стержневые знаки, допуски размеров : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Комитета стандартизации и метрологии СССР от 05 февраля 1992 года № 110 : взамен ГОСТ 3212—80, ГОСТ 3606—80, ГОСТ 11961—87 : дата введения 1993-07-01 / разработан и внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 224 «Технологическая оснастка». — Москва : Издательство стандартов, 2004. — 15 с.
32. Справочник металлиста. В 5 томах. Том 3 / Е. Д. Баклунов, А. К. Белопухов, М. И. Жебин [и др.] ; под ред. А. Н. Малова. — Изд. 3-е, перераб. — Москва : Машиностроение, 1977. — 748 с.
33. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 томах / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, А. Г. Косилова [и др.] ; под ред. А. М. Дальского [и др.]. — 5-е изд., испр. — Москва : Машиностроение-1, 2003. — 2 т. — ISBN 5-94275-013-0.

ГЛОССАРИЙ

Абразивная обработка — процесс, при котором твердые частицы или выпуклости вынужденно перемещаются вдоль твердой поверхности; огрубление или наsekание поверхности благодаря абразивному износу; процесс шлифовки или изнашивания с помощью абразивов.

Ацетилено́ кислородная сварка — процесс кислородно-газовой сварки, при котором топливным газом является ацетилен.

Ба́ббит — не содержащий железа подшипниковый сплав, изобретенный Исааком Баббитом в 1839 г. В настоящее время под баббитами понимают ряд сплавов на основе олова, содержащих, кроме того, различные количества меди, сурьмы и свинца. Также используются баббиты на свинцовой основе.

Белый чугу́н — чугун, который является по существу свободным от графита, углерод присутствует в виде отдельных зерен твердого Fe_3C . Белый чугун имеет белую, кристаллическую поверхность излома, проходящего по граням карбида железа. Белые чугуны имеют содержание углерода более 4 %.

Бессе́ровский процесс — процесс производства стали продувкой воздуха через расплавленный чугун, находящийся в огнеупорном конвертере, с целью окисления большей части углерода, кремния и марганца. Этот процесс устарел и редко применяется в Соединенных Штатах Америки.

Бокси́т — беловато-красноватый минерал, состоящий в значительной степени из гидратов глинозема, имеющего состав $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$. Это наиболее важное сырье для получения алюминия, абразивов глинозема и основанных на глиноземе огнеупоров.

Бро́нза — медно-оловянный сплав с малыми примесями других элементов типа цинка и фосфора или без примесей. Расширенный ряд бронз включает сплавы на медной основе, содержащие значительно меньшее количество олова, чем других легирующих элементов, например марганцевые бронзы (медноцинковый сплав плюс марганец, олово и железо), также и свинцово-оловянная бронза (медносвинцовый сплав плюс олово и иногда цинк). Существуют также двойные сплавы с медной основой, не содержащие олова, типа алюминиевой бронзы (медноалюминиевой), кремниевой бронзы (меднокремниевой) и бериллиевой бронзы (меднобериллиевой). Существуют также торговые обозначения для некоторых специфических сплавов с медной основой, которые являются фак-

тически латунями, типа архитектурной бронзы (57Cu, 40Zn, 3Pb) и технической бронзы (90Cu, 10Zn).

Вермикулярный графит — графит в форме чешуек, встречающийся в микроструктуре серого чугуна.

Высокопрочные низколегированные стали — сталь, спроектированная для обеспечения лучших механических свойств и более высокого сопротивления атмосферной коррозии, чем углеродистая сталь. Эта сталь не должна составлять класс легированных сталей, так как была изготовлена скорее для специальных механических свойств, чем для специального химсостава (HSLA стали имеют предел текучести более чем 275 МПа или 40 ksi). Химический состав HSLA сталей может меняться в зависимости от требуемой толщины и механических свойств. Эти стали имеют низкое содержание углерода (0,05–0,25 %) для того, чтобы получить адекватную деформируемость и свариваемость, и имеют содержание марганца до 2,0 %. Малые количества хрома, никеля, молибдена, меди, азота, ванадия, ниобия, титана, циркония используются в различных комбинациях.

Высокопрочный чугун — литейный чугун, обработанный во время плавления элементами типа магния или церия, чтобы стимулировать образование свободного графита сферической формы, сообщающего определенную степень пластичности литому металлу. Типичные составы высокопрочных чугунов: 3,0–4,0 % С, 1,8–2,8 % Si, 0,1–1,0 % Mn, 0,01–0,1 % P и 0,01–0,03 % S. Также известен как гранулированный чугун, чугун с шаровидным графитом.

Газовые раковины — раковины в шве или отливке, которые образованы газом, выделяющимся из расплавленного металла во время затвердевания. Газовые раковины могут встречаться индивидуально или гроздьями в затвердевающем металле.

Гидрометаллургия — промышленная добыча или очистка металла с использованием воды или водного раствора.

Горячая обработка — пластическая деформация металла при такой температуре и степени деформации, при которых рекристаллизация происходит одновременно с деформацией без какого бы то ни было наклепа. Упоминается также как горячая ковка и горячее формование; управляемая операция для формирования заготовки при температурах выше температуры рекристаллизации.

Губчатое железо — когерентная, пористая масса преимущественно чистого железа, произведенного восстановлением твердой фазой оксида железа (прокатная окалина или железная руда).

Дендрит — кристалл, который имеет древовидную ветвящуюся модель, наиболее хорошо видимую в медленно охлажденных литых металлах.

Дефект — разрыв, чьи размер, форма, ориентация или локализация делают его опасным для полезного использования детали, в которой он находится; нарушения сплошности или разрывы, происхождение которых является накопленным результатом воздействий (например, общая длина трещины) на часть или все изделие, что делает невозможным их соответствие минимальным нормам соответствующих стандартов или технических требований. Этот термин означает способность к отказу.

Доменная печь — шахтная печь, в которой сжигается твердое топливо с подачей воздуха для расплавления руды в течение длительного времени. Так как при производстве чугуна температура должна быть высокой, то воздух подогревают. Там, где температура может быть ниже, как при плавлении меди, свинца и олова, меньшие печи экономически выгоднее и подогрев воздуха не требуется.

Допуск — точно установленное допустимое отклонение от установленного номинального (штатного) измерения или допустимая погрешность в размере или другой качественной характеристике детали.

Дуговая печь — печь, в которой металл расплавлен непосредственно электрической дугой, образующейся между электродом и поверхностью металла, или косвенной дугой между двумя электродами, смежными с металлом.

Заготовка — в штамповке — отрезанный кусок листового металла, который обычно подвергается дальнейшему деформированию; спрессованная, полу- или полностью спеченная порошковая металлическая смесь в необработанном состоянии, требующая резки, механической обработки или другой операции для придания окончательной формы; заготовка дляковки; горячекатаная заготовка из слитка, с поперечным сечением обычно в пределах от 105 до 230 см², с шириной меньше, чем двойная толщина. Когда поперечное сечение превышает 230 см², тогда неприменим универсально используемый термин «блум». Размер менее 105 см² обычно называется пруток; круглый или квадратный пруток, полученный путемковки, прокатки или выдавливанием.

Защитная атмосфера — газовая среда, окружающая деталь, подлежащую пайке, сварке, термонапылению с контролируемым

химическим составом, точкой росы, давлением, расходом и т. п. Примеры – инертные газы, отработанные топливные газы, водород, вакуум; специальная среда, создаваемая при термообработке или в печи спекания с целью защиты детали или порошковой заготовки от окисления, насыщения азотом или другого загрязнения из окружающей среды.

Излѳжница, кѳкиль, литейная форма – форма, сделанная из песка, металла или огнеупора, которая имеет полость, в которую заливается расплавленный металл для производства отливки желаемой формы.

Индукционная печь – электропечь переменного тока, в которой первичная обмотка катушки генерирует путем электромагнитной индукции вторичный ток, который вырабатывает тепло в металле, заполняющем печь. Имеется два основных типа индукционных печей: с сердечником и без него.

Инструментальная сталь – любая из класса углеродистых и легированных сталей, обычно используемых для изготовления инструментов. Инструментальные стали характеризуются высокой твердостью и сопротивлением истиранию, сохраняя высокую твердость при повышенных температурах. Эти характеристики обычно достигаются высоким содержанием углерода и легированием.

Качество – совокупность характеристик товара или услуг, которые обеспечивают их способность удовлетворять определенным требованиям (концепция «годность к употреблению»); степень пригодности товара или услуг (сравнительная концепция). Часто определяется путем сравнения со стандартом (эталоном) или подобными товарами и услугами, получаемыми из других источников; количественная оценка характеристик товара или услуг (количественная концепция).

Качество обработки поверхности – геометрическое несовершенство поверхности твердого материала; состояние поверхности в результате чистовой обработки.

Кипящая сталь – низкоуглеродистая сталь, содержащая достаточно оксида железа для того, чтобы непрерывно образовывался монооксид углерода при затвердевании слитка, что приводит к отсутствию усадочной пористости на поверхности и периферии металла. Листы и штрипсы, изготовленные из слитков кипящей стали, обычно имеют хорошее качество поверхности.

Ковка — процесс обработки металла до нужной формы ударами или давлением в молотах, ковочных прессах, высадочных прессах, прессах, валках и связанном с этим оборудовании (кузнечные молоты и ковочные машины) с высокоэнергетическим коэффициентом воздействия удара на заготовку, в то время как в большинстве других типов ковки используют оборудование, применяющее нагнетание давления, необходимого для деформации. Некоторые металлы могут быть откованы при комнатной температуре, но большинство из них становятся более пластичными при нагревании.

Ковкий чугун — чугун, полученный при длительном отжиге белого чугуна, при котором происходят процессы декарбюризации и графитизации, устраняющие частично или полностью цементит. Графит находится в форме углерода отжига. Если преобладает реакция декарбюризации, то продукт имеет светлую поверхность излома — ковкий белосердечный чугун. Если поверхность излома будет темной — темносердечный ковкий чугун. В США производится только темносердечный ковкий чугун. Ковкий чугун имеет преимущественно ферритную матрицу; перлитный ковкий чугун может содержать шаровидный перлит или отпущенный мартенсит, в зависимости от термообработки и желаемой твердости.

Ковш — металлический резервуар, футерованный огнеупорами, используемый для транспортировки и заливки расплавленного металла. То же самое, что и литеевой ковш.

Ковшевая металлургия — процесс дегазации для стали, выполняемый в ковше.

Ковиль — металлический, графитный или керамический шаблон (отличный от изложницы) из двух или более частей, который используется неоднократно для производства большого числа отливок одинаковой формы. Жидкий металл заливают под воздействием силы тяжести или под давлением.

Кокс — пористое, серое, неплавящееся вещество, изготовленное путем сухой дистилляции битумного угля, нефти или каменноугольной смолы таким образом, что при сторании выделяется большое количество теплоты. Используется как топливо в плавильном производстве.

Компактирование — операция или процесс создания компакта, иногда называемый прессованием.

Композитная структура — конструктивный элемент (типа панели, пластины, трубы или другой формы), который изготовлен соединением вместе двух или более различных компонентов, каждый из которых может представлять собой металл, сплав, неметалл или композит. Примеры применения композитных структур: ячеистые панели, облицовочные пластины, электрические контакты, опоры, втулки, карбидные сверла или инструментальные средства токарного станка и сварные соединения, сделанные из двух или более различных сплавов.

Конвёртер — печь, в которой воздух, продуваемый через ванну жидкого металла, окисляет примеси и вследствие окислительной реакции поднимает температуру. В типичном конвертере используют для обезуглероживания аргоно-кислородную смесь.

Красноломкость — тенденция некоторых сплавов к разрушению вдоль границ зерен при приложении напряжения или деформировании при температурах, близких к точке плавления. Красноломкость вызвана легкоплавкой составляющей, часто представленной в незначительных количествах, которая выделяется на границах зерен.

Лату́нь — медно-цинковый сплав, содержащий до 40 % цинка, возможно также наличие некоторых других элементов.

Легированные стали — содержащие определенное количество легирующих элементов (не только углерод, но и некоторое количество марганца, меди, кремния, серы и фосфора) в пределах, необходимых для конструкционных легированных сталей, с целью изменения их механических или физических свойств.

Легированный элемент — элемент, добавляемый и остающийся в металле, который изменяет его структуру и химический состав.

Металл — непрозрачное блестящее элементарное вещество, которое является хорошим проводником тепла и электричества и, когда отполировано, характеризуется хорошим светоотражением. Большинство металлов ковки и пластичны и отличаются большей плотностью, чем другие элементарные вещества; по своей структуре металлы отличаются от неметаллов их межатомной связью и электронным потенциалом. Металлические атомы имеют тенденцию к потере электронов с орбит. Положительные ионы, сформированные таким образом, скрепляются электронным газом. Способность этих «свободных электронов» к переносу электрических зарядов и тот факт, что эти способности уменьшаются с увеличением тем-

пературы, устанавливают главные различия металлических твердых тел; с химической точки зрения — элементарное вещество, чей гидроксид является щелочным; сплав.

Металлургия́ — наука о металлах и сплавах. Metallurgy процесс имеет отношение к извлечению металлов из их руд и их очистке. Физическая металлургия работает с физическими и механическими свойствами металлов в соответствии с их соединением, обработкой и условиями внешней среды. Механические характеристики изучают реакции металлов на приложенные силы.

Модель — деревянная, металлическая или из другого материала деталь, вокруг которой помещается модельный материал для изготовления формы для литья металлов; выплавляемая восковая или пластмассовая модель в огнеупорной оболочке с целью изготовления формы для литья металлов; воспроизведение в масштабе 1:1 части изделия, используемого как шаблон при механообработке.

Обогащѐние — физическая и химическая концентрация сырой руды в продукт, из которого может быть восстановлен металл.

Огнеупор — материал (обычно неорганический, неметаллический или керамический) с высокой температурой плавления и свойствами, которые делают его подходящим для футеровки печей; степень сопротивления нагреву.

Опо́ка — металлическая или деревянная рама, используемая для удержания формовочной смеси в литейной форме. Верхняя часть называется сводом, нижняя — подом.

Остаточные напряжения — напряжения в теле, находящемся в состоянии покоя или равновесия при постоянной температуре и отсутствии воздействия внешних сил. Часто вызваны формованием или термической обработкой; внутренние напряжения, не зависящие от внешних сил, появляющиеся после холодной деформации, фазовых превращений, перепадов температуры и т. д.; напряжения, присутствующие в теле, свободном от воздействия внешних сил или перепадов температур; напряжения, остающиеся в конструкции или ее элементе после термической или механической обработки. Напряжения прежде всего возникают после сварки плавлением, когда свариваемый металл охлаждается от температуры солидуса до комнатной.

Отбеленный чугу́н — литой чугун, который льется в кокиль или в форму с кокильной вставкой, чтобы вызвать быстрое охлаждение, что способствует образованию структуры белого чугуна на поверхности отливки.

Отли́вка — металлическая заготовка, отлитая в форму или полученная литьем под давлением, в отличие от заготовок, изготовленных путем механообработки; заливка расплавленного металла в литейную форму для того, чтобы получить нужную заготовку.

Па́йка — получение неразъемного соединения за счет нагрева до определенной температуры с использованием присадочного металла, имеющего температуру ликвидус выше 450 °С и ниже температуры солидус основного металла. Присадочный металл распределяется между близко расположенными поверхностями, соединяя их благодаря капиллярному эффекту.

Пирометаллургия́ — высокотемпературное извлечение из руд или очистка металлов.

Полирова́ние — процесс отделки поверхности керамики и металлов с использованием последовательных сортов абразива; сглаживание поверхности металла, часто до высокой яркости (блеска), трением поверхности мелким абразивом, обычно содержащимся в ткани или другом мягком материале. Приводит к микроскопическому стиранию некоторого количества поверхностного металла; удаление материала воздействием абразивных шлифовальных зерен, прилагаемых к заготовке подвижной опорой обычно диском или покрытой шлифовальной лентой; механический, химический или электролитический процессы или их комбинация, используемые для подготовки гладкой отражающей поверхности с подходящей микроструктурой, которая не содержит повреждений, полученных во время предшествующего резания или шлифовки.

Порошок — материал в виде отдельных частиц, размеры которых находятся в пределах от 1 до 1000 мкм.

Прока́тка — уменьшение площади поперечного сечения металлических заготовок или общей формы металлоизделий с использованием вращающихся валков.

Пустая порода — отходы руды, отделенные до начала металлургического процесса.

Раскисле́ние — удаление кислорода из расплава металла с помощью подходящего раскислителя; иногда — удаление отличных

от кислорода нежелательных элементов за счет введения элементов или смесей, которые легко реагируют с ними; при полировке металла – удаление оксидной пленки с металлической поверхности химической или электрохимической реакцией.

Руда – естественный минерал, который может быть добыт и обработан для извлечения любых компонентов, металлических или иных.

Сварка – соединение двух или более частей материала, как с применением высоких давления и/или температуры и присадочных материалов, так и без них. Толщина присадочного материала намного больше, чем капиллярные размеры, с которыми сталкиваются в пайке твердым припоем. Может также быть расширена, чтобы включить пайку твердым припоем; в трибологии – сцепление между твердыми поверхностями в прямом контакте при любой температуре.

Сварное соединение – соединение металлов или неметаллов, выполненное за счет нагрева материалов до заданных температур, как с применением давления и присадочных материалов, так и без них.

Серый чугун – широкий класс железных литейных сплавов (чугунов), обычно характеризуемых микроструктурой пластинчатого графита в железной матрице. Серый чугун обычно содержит от 2,5 до 4 % С, от 1 до 3 % кремния и добавки марганца, в зависимости от желательной микроструктуры (от 0,1 % Мп в ферритном сером чугуне и до 1,2 % в перлитном). Сера и фосфор также находятся в малых количествах как остаточные примеси.

Скрап, лом – изделия, отбракованные по причине дефектности или непригодности для продажи; металлический материал, являющийся браком, который может быть использован для переплава.

Спекание – сцепление смежных поверхностей частиц в массе порошка при нагреве. Спекание увеличивает массу порошка и обычно производит уплотнение и рекристаллизацию порошковых металлов.

Сплав – материал, имеющий металлические свойства и состоящий из двух или более химических элементов, из которых по крайней мере один является металлом; расплав двух и более металлов.

Сталь – сплав на основе железа, после литья ковкий при некоторых интервалах температур; содержит марганец, углерод и часто другие легирующие элементы. В углеродистых и низколегированных

сталих максимальное содержание углерода до 2,0 %; в высоколегированной стали приблизительно до 2,5 %. Рубежом между низколегированными и высоколегированными сталями обычно считается содержание приблизительно 5 % металлических легирующих элементов. Содержание марганца — также принципиальный дифференцирующий фактор, причем сталь обычно содержит по крайней мере 0,25 % Mn, а технически чистое железо значительно меньше.

Стружка — фрагменты материала, удаляемого с рабочей поверхности режущими инструментами или абразивной обработкой.

Формо́вание — изменение формы металлической детали без специального изменения толщины; пластическая деформация билета или листа между штампами, чтобы получить окончательную конфигурацию. Металлоформовочные процессы обычно классифицируются. Выделяют объемное формование и формование листа.

Фу́рма — отверстие в доменной печи или конвертере для подачи воздуха или инертного газа.

Хладноло́мкость — хрупкость, которая свойственна некоторым металлам при температурах ниже температуры рекристаллизации.

Холодная обработка — обработка стали при соответствующих температурах ниже нуля (минус 85 °С или 120 °F) с целью получения желаемых свойств, таких как геометрическая или микроструктурная стабильность. Когда обработка производится с целью полного превращения переохлажденного аустенита, она обычно следует за закалкой.

Чистовая обработка — внешний вид, качество или состояние поверхности металла; припуск на поковке или отливке, который будет удален при мехобработке; операцияковки, при которой поковка приобретает конечную форму в финишных штампах. Если предполагается одна финишная операция, то она считается окончательной. В случае использования первой, второй или третьей ступеней финиширования производится несколько окончательных операций, но все они выполняются в одном штампе.

Чу́гун — родовой термин для большой совокупности литых железных сплавов, в которых содержание углерода превышает растворимость углерода в аустените при эвтектической температуре. Большинство чугунов содержит не меньше 2 % углерода плюс кремний и серу и может содержать другие легирующие элементы.

Шероховатость — микронеровности поверхности с преобладающими высотой и шириной, которые устанавливают преобладающую поверхностную модель; микроскопические расстояния между выступами и впадинами на поверхности металла.

Шероховатость поверхности — микродефекты на текстуре поверхности металла, которые обычно являются результатом воздействия технологического процесса. Обычно говорят о средней арифметической шероховатости, выраженной в мкм.

Шихта́ — материалы, заполняющие печь; груз различных жидких и твердых материалов, помещенных в печь в течение одного цикла загрузки.

Шлак — шлаковая пленка, которая образуется на поверхности жидкого металла в значительной степени из-за процесса окисления, но иногда из-за повышенного содержания примесей; оксиды и другие загрязняющие примеси, образующиеся на поверхности расплавленного металла; неметаллический продукт, образуемый взаимным растворением неметаллических примесей при плавлении, очистке и некоторых сварочных действиях. В сталелитейных процессах шлак служит для защиты расплавленного металла от воздуха и удаления некоторых примесей.

Штейн — промежуточный продукт выплавки, неоднородная смесь металлосульфида, получаемая плавлением обожженной сульфидной руды, типа руды меди, свинца или никеля.