

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование процесса резания при токарной обработке материалов
с дополнительным нагревом срезаемого слоя

Студент

К.С. Ластухин

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Л.А. Резников

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	3
1 Подогрев материала заготовки как средство повышения эффективности обработки резанием труднообрабатываемых материалов.....	4
1.1 Методы дополнительного подогрева заготовки.....	4
1.2 Типы лазерных установок, используемые в машиностроении.....	8
1.3 Технологический процесс изготовления клапана из труднообрабатываемого деформируемого титанового сплава ВТ-22.....	12
1.4 Цели и задачи работы.....	21
2 Исследование теплофизики процесса резания с лазерным подогревом обрабатываемого материала.....	22
2.1 Лазерное излучение и его взаимодействие с твердыми телами.....	22
2.2 Схематизация процесса нагрева технологической зоны.....	26
2.3 Расчет мощности лазера.....	38
3 Рекомендации по проектированию технологического процесса лазерно-механической обработки на примере изготовления клапана ДВС из титанового сплава ВТ-22.....	53
3.1 Оптимизация режимов резания.....	53
3.2 Составление кода тепловой задачи.....	53
3.3 Расчет температуры с помощью инженерной методики расчета.....	55
3.4 Теоретический расчет мощности лазера при упрощенной модели процесса нагрева.....	59
3.5 Подбор лазерной установки.....	61
Заключение.....	68
Список используемой литературы и источников.....	69

Введение

Технический прогресс требует от материалов все более совершенных характеристик, таких как прочность, износостойкость, легкость и так далее. Такое веяние в машиностроении вызвано тем, что мощности и скорости разного рода механизмов возрастает и всем привычные материалы изготовления становятся слабым звеном в работе машины. На смену традиционным материалам приходят титановые сплавы, коррозионностойкие стали, высокопрочные чугуны, жаропрочные стали и им подобные.

Приблизившись к автомобилестроению, можно понять, что использование титановых сплавов является одной из основных вех в автоспорте, так как данный материал имеет меньший вес и при большей прочности, чем любая конструкционная сталь (клапана, направляющие клапанов, пружины клапанов, шатуны, болты и т.д.).

Безусловно, данные типы материалов практически по всем параметрам превосходят традиционные конструкционные стали. Но также у них есть и минусы. Самым главным недостатком является то, что они слабо поддаются обработке. Для понимания степени тяжести ситуации – при прочих равных обычная конструкционная сталь обрабатывается в 2-20 раз быстрее чем, например, титановый сплав.

Для улучшения их податливости обработке резанием применяют различные способы нагрева заготовки и ее части. При нагреве материала меняются его механические свойства такие как сопротивление пластическим деформациям.

Существуют различные способы нагрева заготовки – плазменные установки, газовые горелки, индукционный нагрев заготовки и электроконтактный нагрев. Также одним из успешных с точки зрения технологичности является использование нагрева материала заготовки, которые остались после предыдущей операции (прокат, литье и т.д.).

В данной работе мы рассмотрим подробно способы нагрева, изучим теплофизику нагрева заготовок, опишем действующий технологический процесс изготовления клапана двигателя внутреннего сгорания из титанового деформируемого сплава ВТ-22 проведем расчет необходимой мощности излучения для нагрева заготовки до необходимой температуры. Итогам данной работы будут рекомендации по модернизации процесса обработки титанового сплава.

1 Подогрев материала заготовки как средство повышения эффективности обработки резанием труднообрабатываемых материалов

1.1 Методы дополнительного подогрева заготовки

Существуют различные способы нагрева заготовок. Разделить их можно на 2 типа – нагрев всех заготовки и нагрев области заготовки непосредственно перед зоной резания. Также виды нагревов можно разделить еще на 2 типа – при подаче теплоты от внешнего источника и возбуждение тепловой энергии самой заготовки.

Сплошной нагрев заготовки имеет ряд особенностей:

- Расстояние и время перемещения заготовки от нагревательного оборудования на обрабатывающий станок должно быть минимизировано;
- Деталь должна быть мелкогабаритная;
- Материал должен обладать достаточной тепловой инерцией во избежание быстрого охлаждения в процессе механической обработки.

Данный метод обладает некоторыми характерными недостатками:

- Из-за нагрева может измениться структура материала (например, упрочнение, что усложнит его обработку);
- Частые фазы нагрева-охлаждения заготовки;
- Нагрев заготовку в начале нет возможности регулировать ее температуру в процессе дальнейшей обработки (конечно, после каждой операции можно снова отправлять заготовку на донагрев, но это очень сильно увеличивает штучное время);
- Закрепляя разогретую заготовку на станке необходимо предусмотреть систему отвода тепла от деталей оборудования, так как тепловые расширения деталей станка влияют на точность и качество обработки;

— Работа с нагретыми заготовками является вредными условиями труда рабочего.

Более технологичным является нагрев поверхностного слоя непосредственно перед зоной резания инструмента.

Существует различное оборудование по принципу действия по заготовку. Как правило, оно размещается в рабочей зоне станка и нагревает область, которая непосредственно должна зайти в зону работы режущего инструмента и, что самое важное, она разогревается до точно необходимой температуры. По принципу действия можно выделить следующие методы нагрева поверхности:

1. Нагрев газом. Газовую горелку монтируют на суппорте станка. Сопло горелки расположено таким образом, что пламя горелки нагревает область перед режущим инструментом. Данный метод обладает следующими достоинствами:

- Независимость от магнитных свойств материала,
- Независимость от электропроводности материала,
- Независимость от геометрии заготовки,
- Простота оборудования.

Недостатки данного метода:

- Низкая концентрация нагрева,
- Вредные условия труда,
- Воздействие пламени горелки на обработанную поверхность.

Как вывод из всех особенностей данного метода можно сделать такой, что его применимость оправдана только на черновых операциях.

2. Нагрев при помощи электрической дуги. Преимущества данного метода:

- Концентрация нагрева на выбранном участке.

Недостатки:

- Нестабильность электрической дуги,

— Вредные условия труда.

3. Плазменный нагрев. Данный метод близок к электродуговому. Используемое устройство – плазмотрон. Принцип работы заключается в том, что между плазмотроном и заготовкой (плазмотрон имеет вольфрамовый электрод, вторым электродом является сама заготовка) создается электрическая дуга, с помощью которой происходит нагрев заготовки с участием аргона или азота. Существует 2 режима обработки: простое оплавление верхнего слоя материала на величину припуска на механическую обработку и сдувание расплавленного металла с тела заготовки. Второй режим отличается от первого тем, что оплавленный материал не сдувается, а удаляется механическим путем (срезание). При повышенных требованиях к точности изготовления детали второй метод является более верным. Достоинства данного метода:

— Быстрый нагрев,

— Удаление части материала без работы режущего инструмента.

Важнейшим недостатком является колоссальный расход электроэнергии на работу плазмотрона, поэтому данный метод применим, только в случаях, когда необходимо удаление большого количества припуска. На рисунке 1 показаны схемы работы плазмотронов.

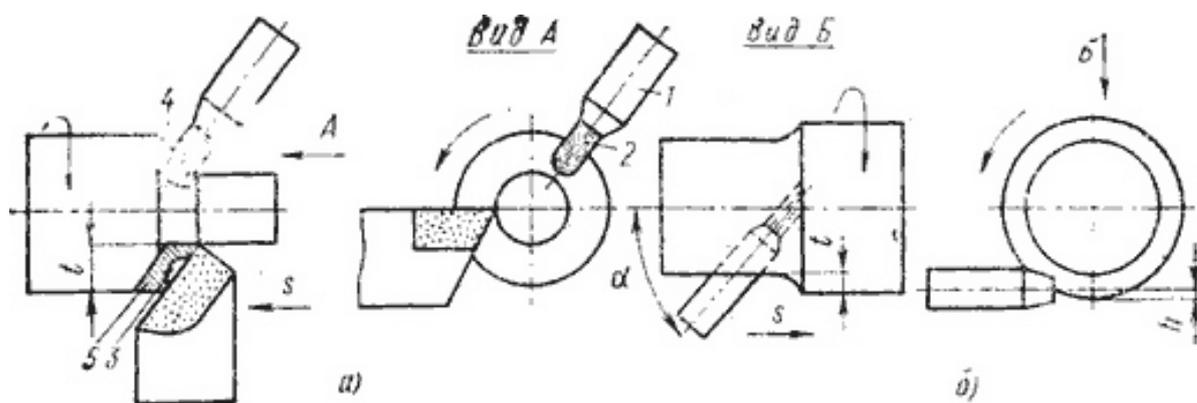


Рисунок 1 – а) Схема обработки с нагревом срезаемого слоя с его последующим удалением с помощью лезвийного инструмента; б) Схема обработки с оплавлением срезаемого слоя металла и его удаление с заготовки посредством сдувания

4. Нагрев при помощи кварцевых или иодных ламп. Сложная конструкция, низкий КПД, низкая плотность светового потока – особенности присущие этому методу нагрева. Однако при обработке стержней из вольфрама показал себя достаточно неплохо. Как итог, применение данного метода обработки имеет смысл только для деталей простых форм.

5. Нагрев в электролите. Под заготовкой устанавливается резервуар с 25% раствором карбоната калия (K_2CO_3). Резервуар связан с системой подачи и отвода жидкости. Заготовки снизу омывается раствором из металлической трубки. Трубка и заготовки заключаются в электрический контур с напряжением порядка 140 В. Раствор карбоната калия является электролитом поэтому, проходящий через него ток создает газовую среду, состоящую из водорода (H) и положительно заряженных ионов металла. Из-за этого свойства создаются каналы сплошной проводимости, по которым электроны разогревают заготовку до $3500^{\circ}C$. Принцип работы устройства показан на рисунке 2.

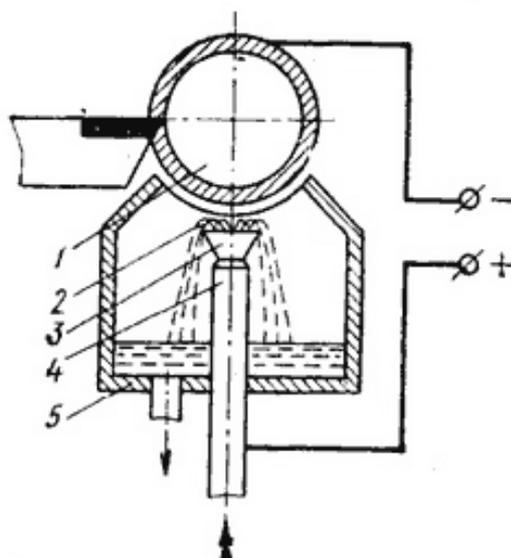


Рисунок 2 - Схема обработки резанием с нагревом в электролите:

1 — заготовка; 2 — электролит; 3 — сопло; 4 — трубка для подачи электролита; 5 — ванна для сбора и отвода электролита

6. Лазерный нагрев. В данном методе используется лазерная установка, которая фокусируется лазерный луч в нужной точке поверхности заготовки. Главным достоинством данного метода является высокая точность концентрации прогрева в нужной области. Одним из недостатков является очень низкий КПД лазерных установок.

1.2 Типы лазерных установок используемые в машиностроении

На данный момент в производстве применяются 4 типа лазерных установок:

1. Дисконные диодные лазерные установки НРРDL. Принцип работы данных лазеров основан на матрице диодных лазеров. Матрица – это единая полупроводниковая структура, с расположенными на ней диодами. Полезная работы такого типа лазеров достигает 100 Вт. Матрица можно соединять, чем можно повышать мощность. Главными преимуществами данного типа установок является их высокий КПД и маленькие размеры. Показатели

энергоэффективности важны в условиях реального производства, а габариты данных установок дают возможность расположить ее в различных местах. На рисунке 3 показан диодный лазер фирмы Coherent.



Рисунок 3 - Coherent Compact Mini

2. Отпаянные CO_2 – лазеры. Сердцем его конструкции является резонатор, заполненный газом. Сам резонатор расположен между двумя электродами, которые инициируют разряд. Полезная мощности может достигать 1000 Вт. Лазеры такой конструкции также не отличаются большими размерами. На рисунке 4 показан диодный лазер фирмы Coherent [3].

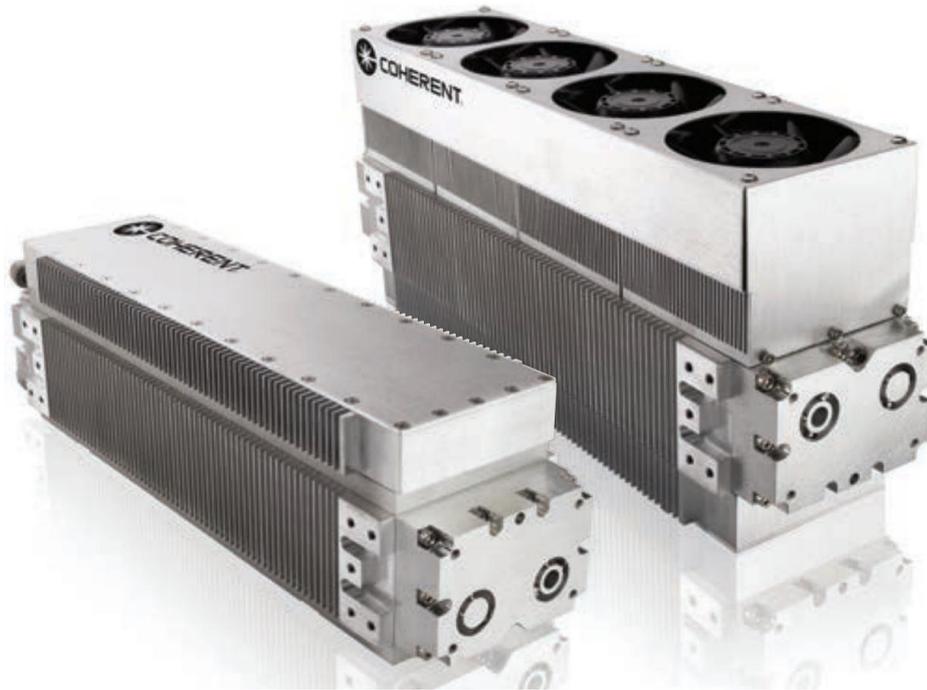


Рисунок 4 - CO₂ – лазеры Coherent C-20 и C-20+

3. Волоконные лазеры. Принцип работы такого типа лазеров основан на возбуждении излучения в легированных оптических волокнах. Выходная мощность напрямую зависит от качества оптического волокна. Существуют одномодовые и многомодовые лазеры. Мощность многомодовых лазеров может достигать 20 кВт. С точки зрения практичности применять имеет смысл многомодовые волоконные лазеры выходной мощности от 1 до 2 кВт, так как они конструктивно проще, чем одномодовые. Оба типа волоконных лазеров имеет хороший КПД (в сравнении с другими типами лазеров), но все же уступают по энергоэффективности диодным лазерам. На рисунке 5 показан диодный лазер фирмы Coherent [3].



Рисунок 5 - Волоконные лазеры Coherent HighLight FL-ARM Compact

4. CO_2 – лазеры проточного типа. Данный тип лазеров больше всех находился в применении. Ввиду этого он обладает рядом отрицательных качеств: имеют низкий КПД, требуют постоянной подачи газа для работы излучателя, необходимо активное охлаждение установки, большие габариты установки и необходимой ей периферии (баллоны с газом, емкость с охлаждающей жидкостью) [3].

Проведя анализ полученных данных, принято решение использовать предварительный нагрев заготовки при помощи лазера. Данный метод выбран по следующим соображениям:

- Лазер обеспечивает высокую точность нагрева нужной нам области заготовки клапана;
- Лазерная установка не предусматривает наличие агрессивных сред, таких как электролит, огонь и т.д.;
- Быстрый нагрев заготовки;

— Один из перспективных методов дополнительного нагрева.

1.3 Технологический процесс изготовления клапана из труднообрабатываемого деформируемого титанового сплава BT-22

В качестве детали для рассмотрения был выбран выпускной клапан двигателя внутреннего сгорания. Выпускной клапан является деталью системы газораспределения двигателя и приводится в движение выпускным распредвалом. Его функция заключается в том, чтобы выпустить отработавшую топливно-воздушную смесь из камеры сгорания. Внутри камеры сгорания двигателя создается большое давление во время такта сжатия, и, чтобы удержать это давление, необходимо изготовить клапан с высокой точностью. Выпускной клапан подвергается различным внешним воздействиям, таким как высокая температура отработанного газа (450...550°C), кислотная среда выхлопа, ударные нагрузки от толкателя клапана, трение. Внешний вид клапана показан на рисунке 6.



Рисунок 6 – Клапан двигателя внутреннего сгорания

Система газораспределения показана на рисунке 7.

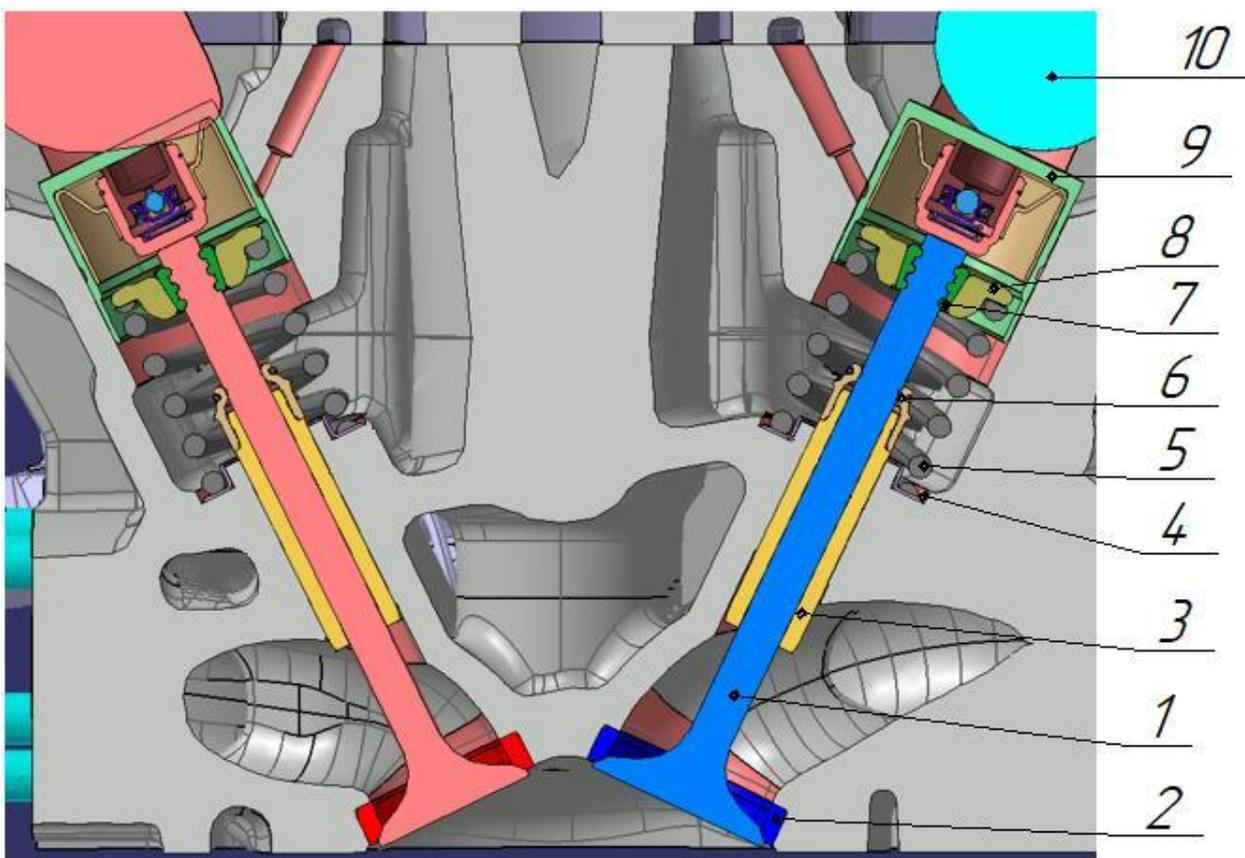


Рисунок 7 – Пример системы газораспределения 16-клапанного двигателя

Кулачок распределительного вала (10) давит на толкатель (гидрокомпенсатор) (9). Перемещаясь вдоль направляющей клапана (3) клапан открывает трубопровод для выхода отработавших газов. Когда такт выпуска заканчивается кулачок распределительного вала перестает давить на гидрокомпенсатор и клапан при помощи пружины (5) возвращается в исходное положение запирая камеру сгорания седлом клапана (2) и юбкой клапана. На направляющей клапана установлен маслосъемный колпачок (6), который снимает излишки масла во избежание попадания его в камеру сгорания. Пружина клапана заключена между шайбой (4) и тарелкой клапана (8). Тарелку клапана удерживает сухарь клапана (7), который состоит из двух частей. Пружина клапана всегда находится в сжатом состоянии, чтобы плотно закупоривать камеру сгорания. Плохая герметизация приводит к

падению компрессии двигателя, следовательно, потери мощности. Седло клапана и направляющая запрессованы в головку блока цилиндров.

Как видно из особенностей конструкции данного механизма к поверхностям юбки и стержня поршня предъявляются жесткие требования по точности и шероховатости изготовления поверхности, так как точность изготовления юбки поршня напрямую влияет на герметичность камеры сгорания, а стержень клапана движется в направляющей, где значение теплового расширения очень велико и может вызвать заклинивание клапана.

В нашем случае клапан изготовлен из титанового деформируемого сплава ВТ-22. Данный материал выбран, так как отлично подходит для использования в высокофорсированных двигателях внутреннего сгорания. Целесообразность применения данного материала вызвана сочетанием его легкости и прочности, что особенно важно в двигателе внутреннего сгорания. Меньший вес данной детали позволяет увеличить мощность двигателя, а высокая прочность важна при форсировании двигателей внутреннего сгорания, так как нагрузка на детали увеличивается. Состав данного сплава приведен в таблице 1 и на рисунке 8 [5].

Таблица 1 – Химический состав титанового сплава ВТ-22 [12]

Материал	Содержание в сплаве, %
Титан (Ti)	78,485 – 86,6
Алюминий (Al)	4,4 – 5,9
Молибден (Mo)	4 – 5,5
Ванадий (V)	4 – 5,5
Хром (Cr)	0,5 - 2
Железо (Fe)	0,5 – 1,5
Цирконий (Zr)	До 0,3
Кислород (O)	До 0,2
Кремний (Si)	До 0,15
Углерод (C)	До 0,1
Азот (N)	До 0,05
Водород (H)	До 0,015

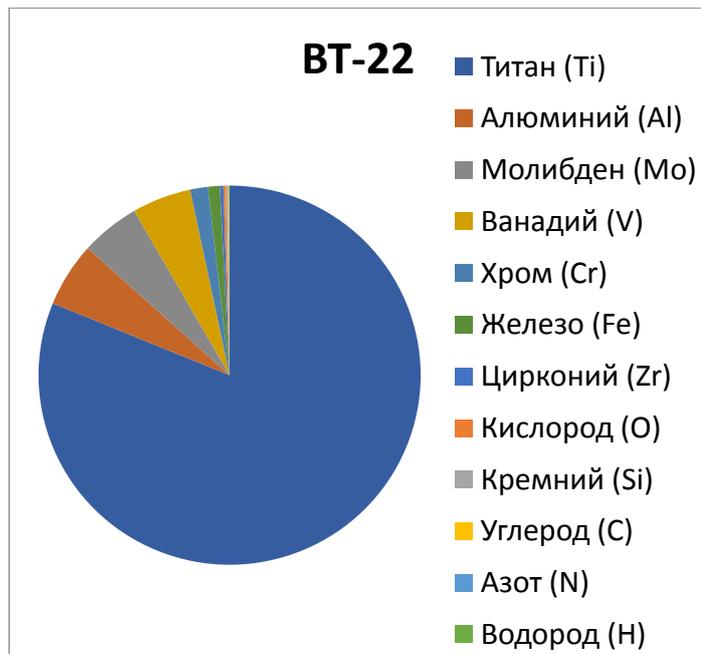


Рисунок 8 - Диаграмма распределения веществ в сплаве BT-22

Существует 4 типа поверхностей деталей с точки зрения технологичности – основные (те, что позиционируют детали в двигателе), вспомогательные (те, что позиционируют другие детали на клапане, например, маслосъемный колпачок, сухарь клапана), исполнительные (те, что выполняют служебное назначение клапана) и свободные (которые служат для связи остальных поверхностей). Схематическое обозначение поверхностей показано на рисунке 9.

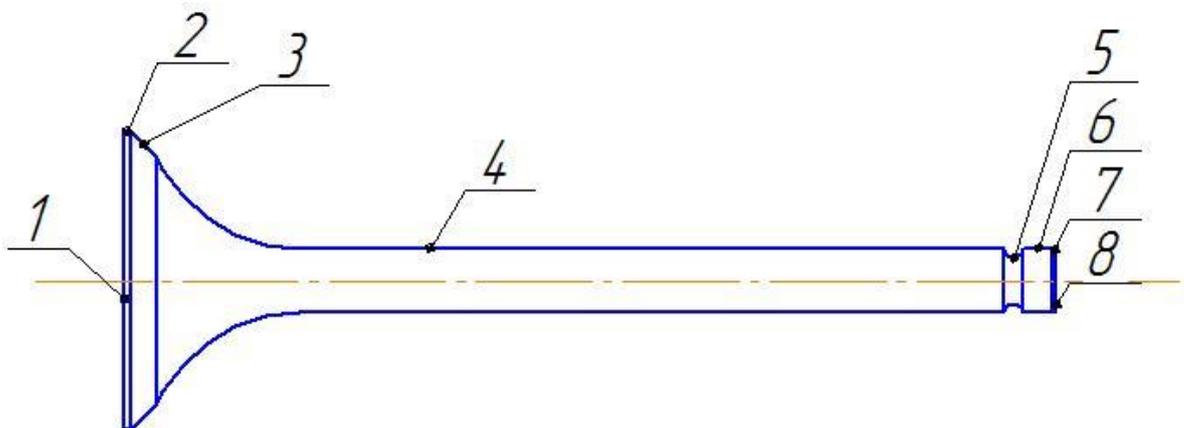


Рисунок 9 - Обозначение поверхностей клапана

Поверхность 3 относится к исполнительным, так как эта поверхность отвечает за герметичность камеры сгорания, а, следовательно, за выпуск отработанного газа – основного назначения клапана. Основными поверхностями являются 3 и 4 поверхности (3 поверхность контактирует с седлом клапана, а 4 - с направляющей втулкой клапана). К вспомогательной поверхности можно отнести 5, так как на нее устанавливается сухарь клапана.

Был выбран самый экономический выгодный и технологичный метод – горячая штамповка. Данный метод позволяет получать достаточно точные заготовки и при этом имеет низкую стоимость производства. Стержень клапана будет изготавливаться из прутка. Припуски под обработку показаны на рисунках 10 и 11.

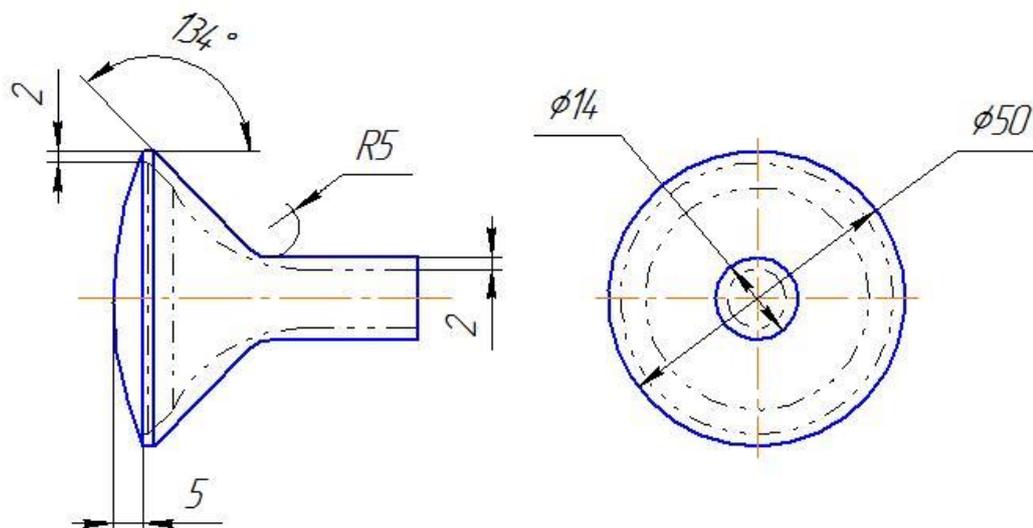


Рисунок 10 - Заготовка головки клапана

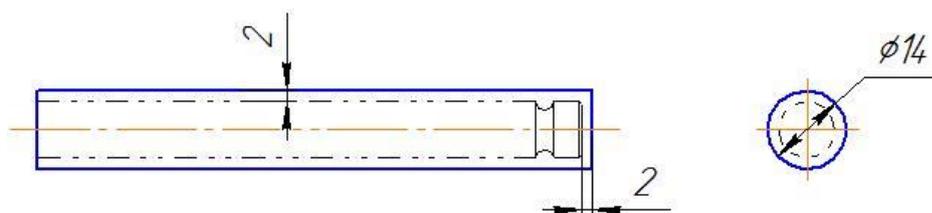


Рисунок 11 - Заготовка стержня клапана

Технологический процесс изготовления клапана изложен в таблице 2.

Таблица 2 – Технологический процесс изготовления клапана

№	Оборудование	Операция	Обрабатываемая поверхность	Получаемая точность поверхности	Получаемая шероховатость поверхности
000		Заготовительная	-	-	Ra 20
005	Полуавтомат сварки трением ПСТ-20Т	Сварочная	-	-	-
010	Полуавтоматический пресс	Прессовая	-	-	Ra 10
015	Универсальный токарный станок NLX 1500	Токарная получистовая	3, 4, 6, 8	10	Ra 5,0
020	Универсальный токарный станок NLX 1500	Токарная чистовая	7, 8	7	Ra 1,25
025	Универсальный токарный станок NLX 1500	Токарная чистовая	5	8	Ra 2,5
030	Универсальный токарный станок NLX 1500	Токарная черновая	1, 2	10	Ra 5,0
035	Установка для промышленной очистки деталей AM1400 BC	Моечная	-	-	-
040	Станок для ТВЧ закалки СЭЛТ-ЗВУ-Л	Термическая	-	-	-
045	Прецизионный универсальный микрошлифовальный станок Jaruga JAG-JIE-AAL	Шлифовальная черновая	2, 3	8	Ra 3,2

Продолжение таблицы 2

№	Оборудование	Операция	Обрабатываемая поверхность	Получаемая точность поверхности	Получаемая шероховатость поверхности
050	Прецизионный универсальный микрошлифовальный станок Jaruga JAG-JIE-AAL	Шлифовальная чистовая	3	6	Ra 0,8
055	Прецизионный универсальный микрошлифовальный станок Jaruga JAG-JIE-AAL	Шлифовальная черновая	6	6	Ra 0,63
060	Прецизионный универсальный микрошлифовальный станок Jaruga JAG-JIE-AAL	Шлифовальная чистовая	4	5	Ra 0,35
065		Азотирование	-	-	-
070		Контрольная	-	-	-

Базирование изделия при его обработке влияет на точность изготовления детали. Опираясь на ранее описанные группы и номера поверхностей клапана опишем схему базирования заготовки на различных операциях.

На токарных операциях используется трехкулачковый патрон, поэтому базирование заготовки производится по 4 и 8 поверхностям. Схема базирования представлена на рисунке 12.

Закрепления заготовки на шлифовальных операциях реализовано цанговым патроном, и базирование осуществляется по 4 и 8 поверхностям.

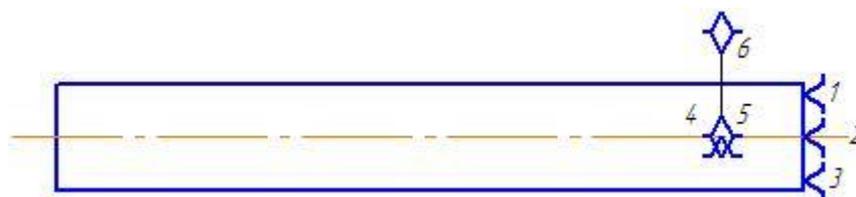


Рисунок 12 - Базирование заготовки

Для расчета режимов резания необходимы следующие данные:

- Материала изделия – ВТ-22,
- Предел прочности $\sigma = 1100$ МПа, твердость по Бринеллю НВ = 285 МПа,
- Припуск под обработку 2 мм на сторону,
- Для токарной обработки применяется универсальный токарный станок NLX 1500.

Для обработки титановых сплавов необходимо применять пластины из твердых сплавов. Обработку титановых сплавов также можно использовать пластины из быстрорежущей стали, но эффективность обработки выше с применением твердосплавных пластин. Также для обработки титановых сплавов желательно использовать твердые сплавы без содержания титана, так как титановые сплавы химически активны. Основываясь на этом факте и на требованиях по точности и шероховатости поверхности, которую необходимо получить выберем твердосплавную пластину ВК8.

Глубину резания и подачу инструмента выбираем, опираясь на 3 параметра: диаметр заготовки, глубина резания и материал.

Таблица 3 – Глубина резания и подача инструмента

№ операции	Глубина резания t , мм	Подача s , мм/об
015	2	0,3
020	0,5	0,2
025	1,5	0,1
030	2	0,3

Скорость резания рассчитывается по следующим формулам:

$$v = \frac{C_v}{Tm_t^x S_y} K_v, \text{ м/мин} \quad (1)$$

$$v = \frac{C_v}{Tm S_y} K_v, \text{ м/мин} \quad (2)$$

Формула (1) нужна для расчета скорости резания при продольном точении, формула (2) – для фасонного точения, протачивания или отрезания. Также необходимо вычислить скорость вращения шпинделя по формуле (3).

$$n = \frac{1000v}{\pi D}, \text{ об/мин} \quad (3)$$

Полученные данные объединены в таблице 4.

Таблица 4 – Режимы резания токарных операций

№	t , мм	s , мм/об	v , м/мин	n , об/мин
015	2	0,3	182	1800
020	0,5	0,2	250	2200
025	1,5	0,1	160	2400
030	2	0,3	80	400

Главной проблемой данного техпроцесса является повышенный износ режущего инструмента на токарных операциях. Повышенный износ инструмента вызван в первую очередь низкой теплопроводностью титана и при обработке режущая часть инструмента испытывает огромные тепловые нагрузки. Для сравнения: при обработке обыкновенной конструкционной стали температура в зоне резания достигает порядка 300°С, то при обработке титановых сплавов она может достигать 1100-1150 °С. Исходя из всего выше сказанного можно сделать вывод, что одной из особенностей механической

обработки титановых сплавов является применение низких скоростей резания.

Одним из способов борьбы с повышенным износом режущего инструмента можно использовать эффективное охлаждение зоны резания. Для таких термонагруженных областей целесообразно применить углекислотные охладители или сульфуризованные масла. Данный способ позволяет повысить износ режущего инструмента, но также у него есть и недостаток. Стружка, которая остается после обработки заготовок отправляется на переплавку для ее дальнейшего использования. Применение охлаждающих жидкостей добавляет определенные сложности – необходимо предварительное травление или обезжиривание стружки перед переплавкой.

Другим средством против повышенного износа режущего инструмента является дополнительный нагрев заготовки. Например, технический титановый сплав ВТ-1-0 достаточно предварительно нагреть до 400°С, чтобы получить следующие изменения в физических свойствах сплава:

- Снижение сопротивления сдвигу в 2 раза,
- Повышение вязкости,
- Повышение податливости резанию.

Данные изменения в свойствах материала дают возможность увеличить скорость резания, что повысит производительность резания [2].

1.4 Цели и задачи работы

Целью данной работы является улучшение экономических показателей производства за счет увеличения производительности токарных операций.

Задачами работы являются:

1. Выполнить анализ теплофизики процесса резания с лазерным нагревом;
2. Разработать рекомендации по выбору мощности лазерного излучения;

3. Разработать рекомендации по модернизации технологического процесса обработки труднообрабатываемых материалов с лазерным подогревом заготовки.

2 Исследование теплофизики процесса резания с лазерным подогревом обрабатываемого материала

2.1 Лазерное излучение и его взаимодействие с твердыми телами

Нагрев твердого тела с помощью лазерного излучения в широком спектре тепловых потоков можно описать моделью поведения, состоящей из следующих стадий: контакт с твердым телом и превращение световой энергии лазера в тепловую; постепенный нагрев твердого тела без нарушения его кристаллической решетки (разрушения); разрушения кристаллической решетки; после окончания воздействия лазерного излучения, постепенное охлаждения твердого тела [16].

В зависимости от поверхности, на которую воздействует лазерное излучение часть его светового потока отражается на тела, а часть взаимодействует с ним, и тем самым, превращает световую энергию в тепловую. Зависимость, описывающая распределение плотности светового потока на глубину описывается законом Бугера (4):

$$q(z) = Aq_0e^{-\alpha z} \quad (4)$$

где q_0 – плотность светового потока на поверхности,

A – поглощающая способность материала,

α - линейный коэффициент поглощения.

Распределения отсчитывается в глубь тела и описывается координатой z . Данный закон распределения можно применять в широком спектре длин волн, но только для металлов, полупроводников и диэлектриков.

Рассматривая металлы как тело воздействия можно отметить, что световой поток поглощается электронами проводимости и рассеивают тепловую энергию 1 – 10 пс. Зона действия данного процесса протекает на

глубине порядка 1 мкм, что соответствует глубине проникновения света в металл.

Преобразование световой энергии в тепловую может вызвать изменения в теплофизических свойствах материала, тепловые расширения, изменения в структуре материала и в крайнем случае разрушение его кристаллической решетки (плавление). Также нагрев, может вызвать разного рода химические процессы в поверхностном слое материала.

Нестабильность лазерного нагрева обусловлена высокими скоростями нагрева и большой спектр градиента температур в теле материала.

Фаза нагрева материала является важным объектом исследования в понимании физической сущности технологических операций, в которых обработка происходит без разрушения основного материала (сварка, термическая обработка детали). В технологических процессах, связанных с разрушением материала стадия нагрева материала также важна для определения начала разрушения материала.

С точки зрения решения инженерных задач интерес представляю ряд физико-химических явлений:

— Плавление. При достаточной мощности лазерного излучения при нагреве материала его температура может возрасти до температуры плавления. Каждый материал имеет свою температуру плавления в зависимости от химического состава. Существуют как легкоплавкие материалы такие как свинец и олово, температуры плавления которых достигает 230°C , так и тугоплавкие (вольфрам, платина), температуры которых достигает 3000°C . В зависимости от температуры плавления разнится время предварительного нагрева материала. Процесс, при котором расплавленный материал удаляется сразу же при помощи сдува расплава называется лазерной абляцией.

Главной задаче с инженерной точки зрения это расчет глубины расплавленного слоя и расчет времени, после которого жидкая фаза материала начнет испаряться.

— Испарение. Расплавленный материал может быть нагрет до состояния, когда начнет протекать процесс испарения. Нужно отметить, что некоторые материалы не имеют фазового перехода из твердого состояния в жидкое и при нагреве твердого тела до температуры испарения он начинает испаряться. Такой процесс называется сублимацией.

Другие материалы имеют в своем составе жидкие компоненты такие как вода. Именно в них происходит сначала испарение жидкой составляющей.

При малых мощностях нагрева до плавления материала доля газовой среды минимальна. При возрастании мощности нагрева увеличивается и температура материала, что приводит к более интенсивному испарению материала.

— Кристаллизация. При превращении лазерного излучения в теплоту изменяются оптические и электрофизические свойства материала. Эти изменения во много зависят от свойств самого материала, мощности лазера, скорости нагрева и охлаждения.

При отвердевании расплавленного материала он может превратиться в материал с другим типом кристаллической решетки.

— Термохимические реакции. При нагреве материала могут возникнуть необратимые химические реакции. Они могут вызвать частичное разрушение материала в поверхностном слое. Тепловое воздействие может вызвать самовоспламенение материала в гораздо большей области, чем зона нагрева.

Также термохимические реакции могут вызвать окисление поверхности детали, с ее помощью можно разлагать сложные соединения и даже синтезировать новые материалы. Есть и недостатки у этого явления – снижение оптических свойств материала.

2.2 Схематизация процесса нагрева технологической зоны

В процессе обработки предварительно нагретого материала на поверхности заготовки в точке с координатами x, y, z возникает температура, которая описывается формулой (5)

$$\theta^+(x, y, z) = \theta_{\Pi}(x, y, z) + \theta_{\text{P}}^+(x, y, z). \quad (5)$$

Формула состоит из двух слагаемых, которые описывают получение энергии заготовкой. Первое слагаемое это температура, возникающая из-за предварительного нагрева заготовки. Второе слагаемое составляет температуру, которая возникает из-за процесса резания (тепло трения).

Поле $\theta_{\Pi}(x, y, z)$ зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала, способа нагрева и параметров нагревающего устройства, а также от расположения последнего по отношению к поверхности заготовки и зоне резания. Температурное поле $\theta_{\text{P}}^+(x, y, z)$ в отличие от поля $\theta(x, y, z)$, возникающего при резании без подогрева, зависит не только от теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, элементов режима резания и геометрии режущего клина, но и от температуры подогрева $\theta_{\Pi}(x, y, z)$, поскольку последняя влияет на механические свойства материала заготовки и условия трения на контактных поверхностях инструмента.

Описание температурного поля $\theta^+(x, y, z)$ экспериментальным путем, а тем более разделение его на слагаемые, входящие в выражение (5), при современной технике измерения температур практически невозможно. Между тем, именно выявление основных закономерностей суммарного поля и его составляющих представляет наибольшую ценность при решении задач управления процессом резания с плазменным подогревом обрабатываемого материала и оптимизации его параметров. Эти закономерности могут быть получены с помощью теоретического анализа тепловых явлений,

происходящих при плазменно-механической обработке, методами технологической теплофизики.

Поскольку, как следует из изложенного выше, второе слагаемое в выражении (5) зависит от первого или, иначе говоря, поле, вызванное собственно процессом резания, в нашем случае зависит от поля, вызванного плазменным нагревом, целесообразно в первую очередь изучить функцию $\theta_{\text{п}}(x, y, z)$, выработав для этого некоторую математическую модель процесса.

Математическая модель в большинстве случаев не в состоянии отобразить все детали рассматриваемого процесса, учесть все обстоятельства и факторы, влияющие на его течение, поскольку для ее построения необходима известная схематизация, включающая в себя некоторое упрощение форм тел и источников тепла, а также определенные допущения, относящиеся к свойствам обрабатываемого материала и теплообмену детали с окружающей средой. Однако, схематизация явления, способная внести некоторые количественные неточности в картину реального процесса, в то же время дает возможность выявить основные закономерности его хода, установить вид взаимосвязей между главными параметрами.

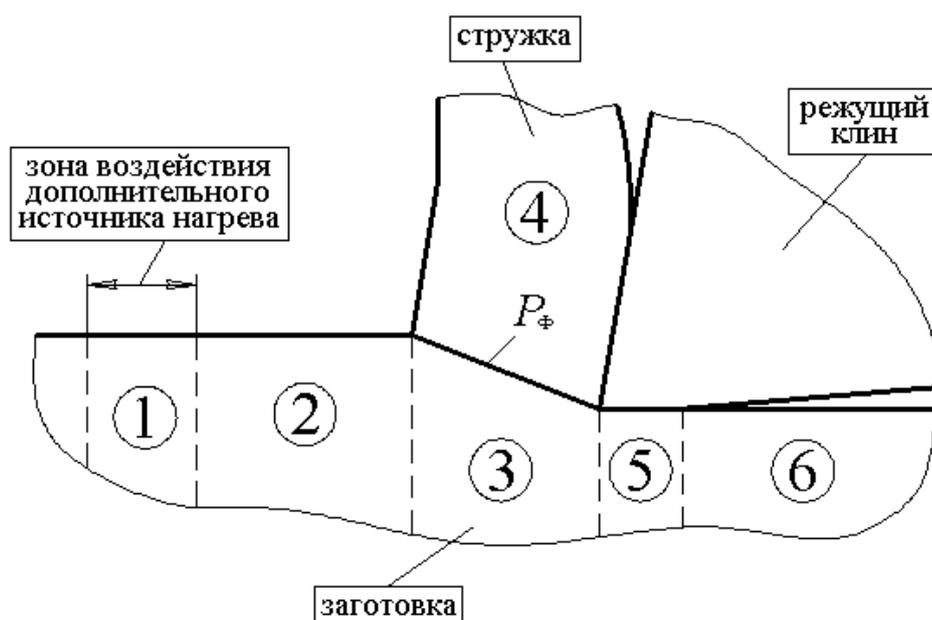


Рисунок 13 - Области теплового воздействия дополнительного нагрева

Общую сферу теплового воздействия плазменного нагрева на технологическую зону можно разделить на шесть областей (рисунок 13): область 1, расположенную непосредственно под источником тепла (под струей плазмы от плазмотрона П); область 2 подхода к зоне резания; область 3, расположенную под поверхностью сдвига; область 4 теплопередачи в стружке; область 5, расположенную под площадкой контакта с задней поверхностью резца Р и область 6, лежащую за пределами зоны резания. Каждая из названных областей имеет определенную специфику с точки зрения происходящих в ней тепловых процессов и распределения температур [1].

В области 1, на которую воздействует концентрированный источник тепла значительной тепловой мощности, возникает высокий градиент температур, а также, в большинстве случаев, происходит расплавление поверхности заготовки и выдувание жидкого металла плазменной струей с образованием канавки проплавления.

Область 2 характеризуется распространением тепла по закону теплопроводности с рассеиванием его в окружающую среду. Доля рассеиваемого тепла в технологической зоне, которая может быть рассчитана по методике, изложенной в работы, весьма незначительна, так как время контакта поверхности области с окружающей средой, определяемое из соотношения ее длины и скорости резания, достаточно мало, поэтому в дальнейших расчетах можно пренебречь потерями тепла на рассеивание в окружающую среду с поверхности заготовки.

Температурное поле в области 3 в нашем случае (когда не учитывается тепловыделение от работы резания) является продолжением температурного поля области 2 и определяется соответствующим решением уравнения теплопроводности. Однако, при построении поля следует учитывать взаимосвязь координат x и y на линии MN , которая обусловлена наличием угла сдвига Φ .

Через области 4 и 5 происходит обмен температурой между режущим клином резца и поверхности заготовки. Контактными площадками являются передняя и задняя поверхность резца.

Температурное поле в области 6 имеет остаточное воздействие и влияет на формирование подповерхностного слоя заготовки.

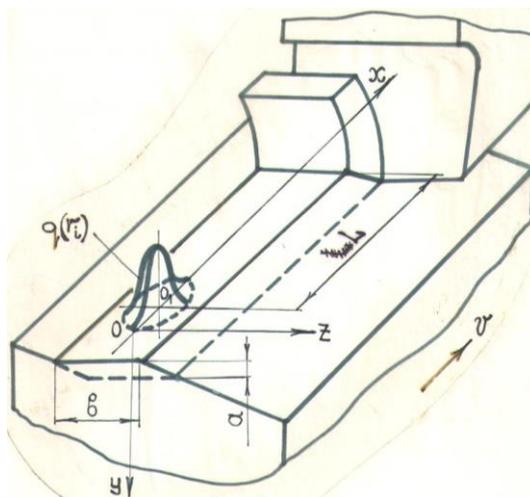


Рисунок 14 - Система координат и схема процесса плазменно-механической обработки

Для математического описания температурных полей во всех шести областях, нами были приняты следующие схематизирующие положения (рисунок 14):

- 1) Обрабатываемая заготовка – полупространство с адиабатической границей;
- 2) Стружка – однородный стрежень бесконечной длины;
- 3) Резец – неограниченный клин
- 4) Теплофизические характеристики обрабатываемого и инструментального материалов (в частности, коэффициент теплопроводности λ) не зависят от температуры материала и приняты средними для предполагаемого диапазона температур (200...600°C). Возможность этого допущения обоснована в работе;

5) Тепловое воздействие плазменной струи представляет собой источник тепла, интенсивность которого распределена по нормально-круговому закону:

$$q(r) = q_0 \exp[-K_0 r^2], \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad (6)$$

В формуле (6): q_0 – максимальная интенсивность тепловыделения (в центре источника), r – произвольный радиус, K_0 – коэффициент сосредоточенности теплового потока плазменной струи, введенный Н. Н. Рыкалиным и связанный с радиусом R источника соотношением

$$K_0 = \frac{3}{R^2}, \frac{1}{\text{см}^2} \quad (7)$$

б) Центр источника находится на расстоянии L от середины режущей кромки инструмента; источник движется по поверхности полупространства со скоростью U , равной скорости резания.

Проверка по критерию Пекле позволяет утверждать, что в области режимов плазменно-механической обработки источник, создаваемый струей плазмы, всегда можно считать быстродвижущимся.

Температурное поле на поверхности заготовки в пределах анодного пятна плазменной струи.

Известно выражение для температуры на поверхности полупространства, по которой перемещается точечный быстродвижущийся источник тепла:

$$\theta_T(x, z) = \frac{Q}{2\pi\lambda(x - x_U)} \exp\left[-\frac{U(z - z_U)^2}{4\omega(x - x_U)}\right]. \quad (8)$$

Здесь Q – интенсивность источника, Вт; λ и ω – коэффициенты тепло- и теплопроводности обрабатываемого материала в $\frac{\text{Вт}}{\text{см}\cdot\text{град}}$ и $\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$ соответственно; x_U и z_U – координаты источника, см; U – скорость движения источника, $\frac{\text{см}}{\text{с}}$.

Перейдем от точечного источника к плоскому нормально-круговому. Закон изменения интенсивности в осях координат XOZ (рисунок 13) запишется в виде:

$$q(x_U, z_U) = q_0 \exp[-K_0(x_U - R)^2 - K_0 z_U^2]. \quad (9)$$

Интегрируя выражение (8) с учетом (9) по площади анодного пятна, получаем:

$$\theta(x, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \int_0^x \frac{dx_U}{x - x_U} \exp[-K_0(x_U - R)^2] \times \int_{-\sqrt{x_U(2R-x_U)}}^{\sqrt{x_U(2R-x_U)}} \exp[-K_0 z_U^2 - \frac{U(z - z_u)^2}{4\omega(x - x_u)}] dz_U. \quad (10)$$

или, переходя к безразмерным величинам:

$$\theta(\psi, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \int_0^\psi \frac{d\psi_U}{\psi - \psi_U} \exp[-3(\psi_U - 1)^2] \times \int_{-\sqrt{\psi_U(2R-\psi_U)}}^{\sqrt{\psi_U(2R-\psi_U)}} \exp[-3z_U^2 - \frac{Pe(z - z_u)^2}{\psi - \psi_u}] dz_U. \quad (11)$$

Последняя из безразмерных величин представляет собою критерий Пекле.

Перепишем выражение (11) в виде:

$$\theta(\psi, z) = \frac{q_0 R}{2\pi\lambda} F_1(P_e, \psi, z).$$

Интеграл

$$J_1 = \sqrt{\frac{\pi(\psi - \psi_U)}{4P_e}} \left\{ \operatorname{erf} \left[\left(z + \sqrt{\psi_U(2 - \psi_U)} \right) \sqrt{\frac{P_e}{\psi - \psi_U}} \right] - \right. \\ \left. - \operatorname{erf} \left[\left(z - \sqrt{\psi_U(2 - \psi_U)} \right) \sqrt{\frac{P_e}{\psi - \psi_U}} \right] \right\}$$

где $\operatorname{erf}[U]$ – функция интеграла вероятности. Дальнейшее интегрирование по $d\psi_U$ выполнялось приближенными методами, поскольку интеграл в пределах от 0 до ψ не приводится к изученным функциям.

Расчеты значений $F_1(P_e, \psi, z)$, выполненные для величин критерия Пекле, отображающих области практически применяемых скоростей резания и коэффициентов сосредоточенности струи при обработке сталей, показывают, что значения этой функции весьма слабо зависят от P_e . С погрешностью, не выходящей за пределы 6%, можно принять, что безразмерное поле температур практически не зависит от P_e и положить $F_1(P_e, \psi, z) \approx F(\psi, z)$, причем последнюю величину вычислить при некотором среднем значении P_e .

Таким образом:

$$\theta(\psi, z) \approx \frac{q_0 R}{2\pi\lambda} F(\psi, z). \quad (12)$$

При $z = 0$ получим закономерность распределения температур вдоль оси OX , проходящей через центр анодного пятна плазменной струи параллельно вектору скорости резания.

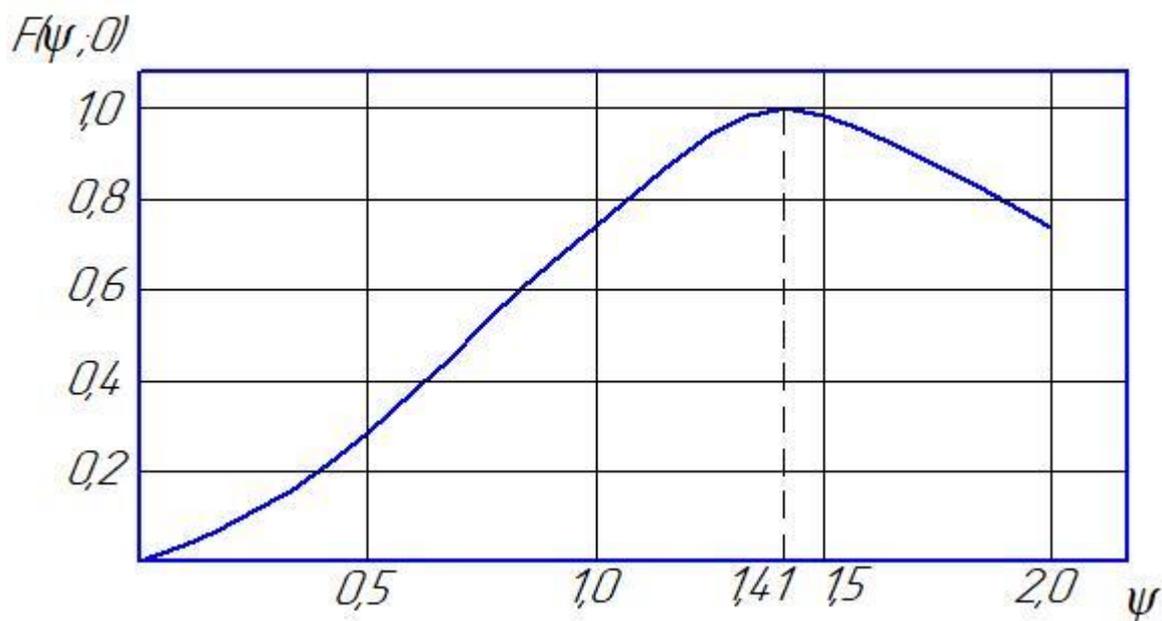


Рисунок 15 - Зависимость безразмерной температуры на оси пятна нагрева от безразмерной координаты.

Как видно из рисунке 15, на котором представлена зависимость безразмерной температуры $F(\psi, 0)$ от безразмерной координаты $\psi = \frac{x}{R}$, максимальная температура достигается не в центре пятна нагрева, где имеет место максимальная интенсивность тепловыделения, а на некотором расстоянии $\psi \approx 1,41$, т.е. в точке, расположенной за центром пятна в направлении, противоположном направлению движения источника. Это явление закономерно, оно связано с высокой скоростью и мощностью источника.

Максимальная температура на пятне нагрева, соответствующая точке с координатами $x = 1,41R; z = 0$, определяется зависимостью

$$\theta_{max} = \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{2\omega R}{\pi U}}. \quad (13)$$

Известна зависимость между максимальной интенсивностью тепловыделения q_0 нормально-кругового источника тепла, создаваемого плазменной струей, и электрической мощностью W плазмотрона в виде:

$$q_0 = \frac{K_0}{\pi} W \zeta'_T, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \quad (14)$$

где ζ'_T - коэффициент, характеризующий долю общего количества тепла, передаваемую в заготовку. В дальнейшем, для краткости, коэффициент ζ'_T будем называть тепловым КПД плазменной струи.

С учетом (14) и (6) выражение (13) примет вид:

$$\theta_{max} = \frac{W \zeta'_T}{3\lambda} K_0^{\frac{3}{4}} \sqrt{\frac{\omega}{U}} \quad (15)$$

Если максимальная температура на пятне нагрева ниже температуры плавления обрабатываемого материала $\theta_{пл}$, проплавление поверхности заготовки не будет иметь место. Положив в формуле (15) $\theta_{max} < \theta_{пл}$, можно получить соотношение между мощностью теплового источника и его скоростью, при котором проплавления поверхности обрабатываемого материала с теплофизическими характеристиками λ, ω и $\theta_{пл}$ не будет. Учитывая зависимость теплового КПД плазменной струи ζ'_T и ее коэффициента сосредоточенности K_0 от электрической мощности W , что будет изложено ниже, перепишем выражение (15) в виде:

$$\frac{\varphi(W)}{\sqrt{U}} < \Omega, \quad (16)$$

где, $\varphi(W)$ – степенная функция от электрической мощности плазмотрона, показатель степени в которой зависит от геометрических параметров плазмотрона и вида плазмообразующего газа; $\Omega = \frac{\lambda}{\sqrt{\omega}} \theta_{\text{пл}}$ – размерный комплекс, постоянный для данного обрабатываемого материала.

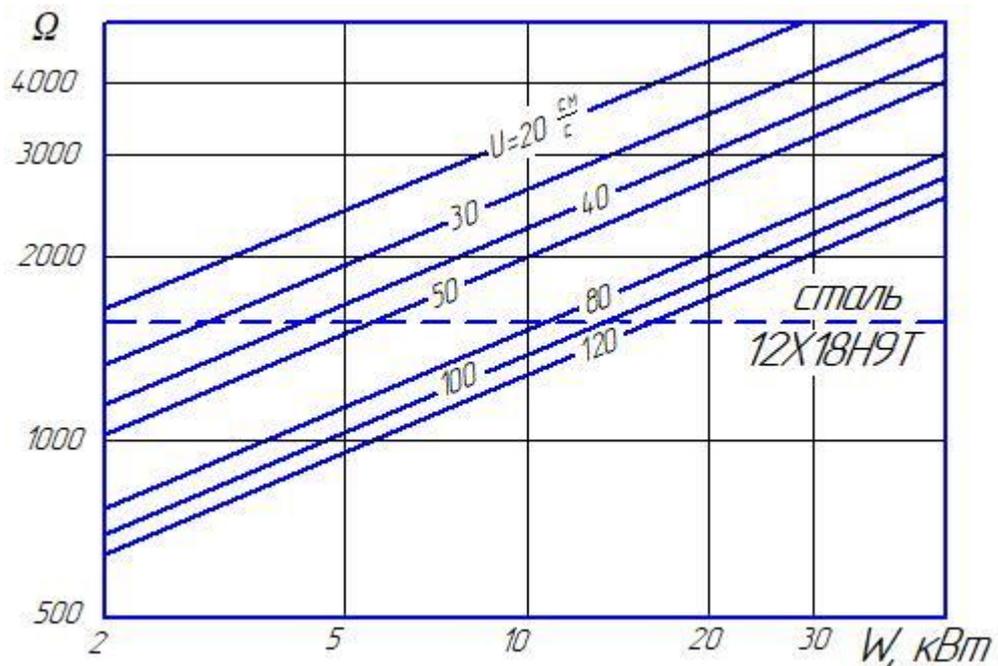


Рисунок 16 - Номограмма для определения условий проплавления поверхности заготовки.

Номограмма, построенная на основании зависимости (15) и представленная на рисунке 16, дает возможность прогнозировать наличие или отсутствие проплавления при тех или иных режимах нагрева. Горизонтальная прямая, соответствующая конкретному значению комплекса Ω , делит всю область режимов и поле чертежа на две части. Ниже линии Ω лежит область соотношений между мощностью и скоростью источника, при

которых проплавление поверхности заготовки отсутствует, выше линии Ω – область режимов, при которых проплавление будет иметь место.

В качестве примера, на рисунке 15 рассмотрен случай нагрева заготовки из стали 12Х18Н9Т ($\Omega = 1555 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}^2}$). Из номограммы видно, что в области практически применяемых скоростей резания U при мощности плазматрона $W \geq 20 \text{ кВт}$ проплавление поверхности такой заготовки неизбежно. И только в области достаточно высоких скоростей резания при сравнительно малой мощности плазматрона проплавление поверхности не будет. Следует заметить, что в этом случае обрабатываемый материал будет прогреваться на сравнительно малую глубину. Такие режимы резания и нагрева подходят для получистовых операций, в то время как режимы с низкими скоростями резания, большой мощностью плазматрона, глубоким прогревом и проплавлением поверхности – для черновых, обдирочных операций. Итак, на номограмме (рисунок 16) выше линии Ω – режимы черновой плазменно-механической обработки, ниже линии Ω – режимы получистовой ПМО.

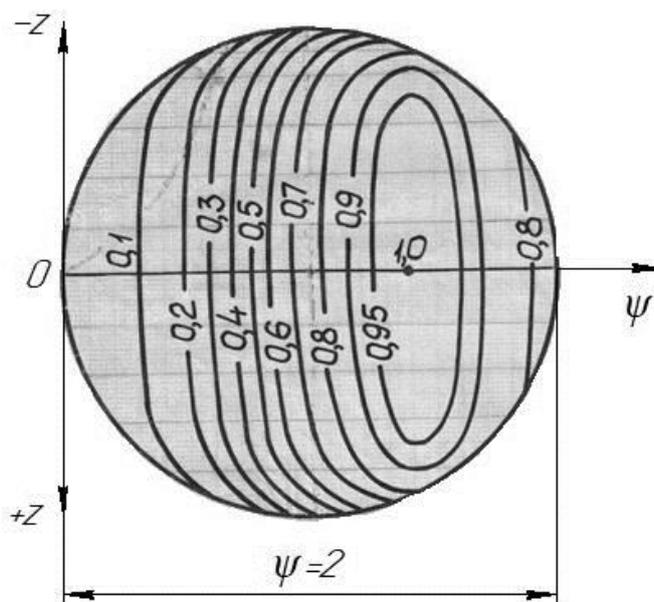


Рисунок 17 - Безразмерное температурное поле на поверхности заготовки в пределах пятна нагрева.

Вернемся к анализу температурного поля на поверхности обрабатываемого материала непосредственно под плазменной струей. Построенное в безразмерных температурных $\frac{\theta(\psi,z)}{\theta_{max}}$, оно показано на рис. 16.

В каждом конкретном случае одна из изотерм этого поля может соответствовать температуре плавления обрабатываемого материала $\theta_{пл}$.

Точка на оси пятна, в которой начинается плавление, имеющая координаты $\psi = \psi_{нп}$ и $z = 0$, может быть определена из выражения (15), если в левой части последнего положить $\theta(\psi, z) = \theta_{пл}$, а в правой упоминается выше координаты $\psi = \psi_{нп}$ и $z = 0$.

При наличии проплавления поверхности температурное поле в пределах анодного пятна струи принимает вид, отличающийся от показанного на рис. 2.5. Если распределение температур за пределами зоны, ограниченной изотермой плавления $\theta = \theta_{пл}$, остается неизменным, то внутри этой зоны поддерживается одинаковая температура, равная температуре плавления обрабатываемого материала.

Это перераспределение температур отражает те изменения в процессе передачи тепла от плазменной струи в заготовку, которые вносит проплавление поверхности последней.

Подведем итоги на основе изложенной выше информации:

При современной технике измерения температур выявление основных закономерностей суммарного температурного поля в технологической зоне при плазменно-механической обработке, а также его составляющих возможно преимущественно теоретическим путем.

Аналитическое описание температурных полей в шести основных областях технологической зоны может быть выполнено с помощью метода источников тепла при соответствующей схематизации процесса.

Теплофизический анализ процесса плавления и выноса металла из зоны пятна нагрева позволяет оценить размеры канавки проплавления и потери тепла, связанные с ее образованием. Расчеты и их экспериментальная проверка показывают, что эти теплотери в области практически применяемых режимов обработки невелики и не превышают 10% от общего тепловыделения плазменной струи.

Сопоставление температурного поля, возникающего в технологической зоне при плазменном подогреве, с полями при индукционном и электроконтактном подогреве, позволяет выявить ряд достоинств плазменно-механической обработки, обеспечивающих ее эффективность:

- Равномерное распределение температур на поверхности контакта «резец-стружка»;
- Подогрев зоны деформации вблизи поверхности сдвига, вызывающий существенное снижение прочности обрабатываемого материала и сил резания;
- Быстрое удаление со сходящей стружкой значительной доли внесенного в заготовку тепла.

Зависимости, выведенные на основании теплофизического анализа, позволяют подойти к оптимизации режимов нагрева при плазменно-механической обработке.

2.3 Расчет мощности лазера

Для решения тепловой задачи применяется кодирование тепловой задачи. Решая такие задачи, существуют большое количество условий однозначности. Запись всех условий может выглядеть очень громоздкой. Вот пример записи особенностей условий без кодирования: точечный источник, прямая площадка которого ограничена в трех направлениях, линейно распределенный по направлению оси Y и X , источник неподвижный и воздействует по поверхности полупространства с граничными условиями

второго рода. Кодирование тепловой задачи служит для сокращения данной словесной записи в цифровую. Кодирование также необходимо, если применяется компьютерного решения тепловой задачи.

Код тепловой задачи имеет вид:

$$\pm \frac{\text{МКО}}{\text{PPP.СД}} \text{ТУ}$$

Дадим расшифровку данного кода:

1) Положительный или отрицательный знак выбирается в зависимости от того какой процесс идет – получение или отдача тепловой энергии.

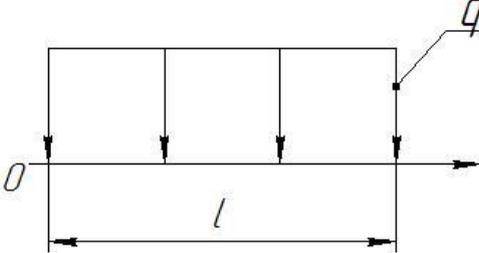
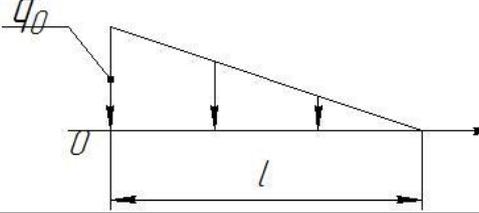
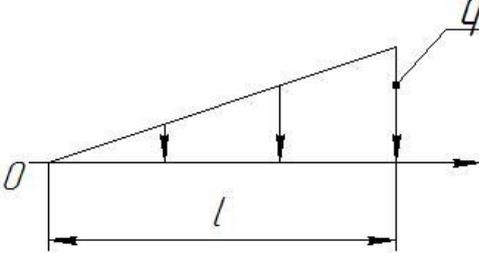
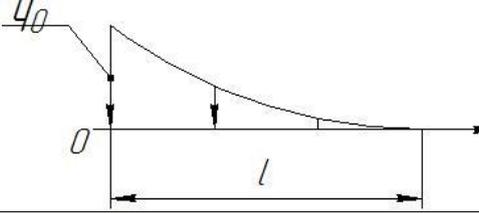
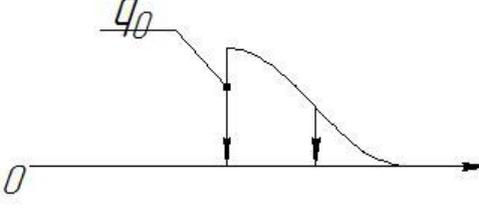
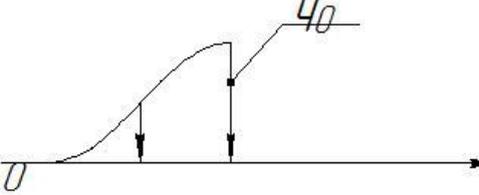
2) Первый символ «М» обозначает мерность источника. Символ «М» может принимать значения от 0 до 3 (0 – точечный источник, 1 – одномерный источник, 2 – плоский источник, 3 – объемный источник);

3) Второй символ «К» обозначает конфигурацию зоны тепловыделения. Символ «К» может принимать значения от 0 до 3 (0 – точечная зона, 1 – прямая зона, 2 – круговая зона, 3 – шарообразная зона);

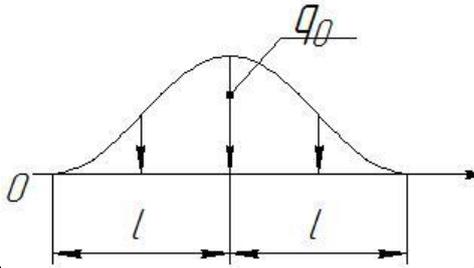
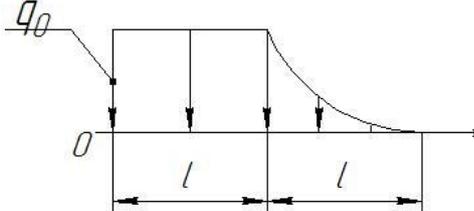
4) Третий символ «О» обозначает ограниченность источника. Символ «О» может принимать значения от 0 до 3 (0 – неограниченный, 1 – ограниченный по одной оси, 2 – ограниченный по двум осям, 3 – ограниченный по трем осям);

5) Четвертый символ «PPP» обозначает закон распределения тепловыделения на соответствующих осях. Каждый символ «Р» соответствует осям XYZ. Значение «Р» может быть равным от 0 до 8. Описание значений «Р» описано в таблице 5.

Таблица 5 – Описание законов распределения плотности тепловых потоков

№	Закон распределения	Схема	Зависимость
1	Равномерно		$f(x_u) = 1$
2	Линейно		$f(x_u) = 1 - \frac{x_u}{l}$
3			$f(x_u) = \frac{x_u}{l}$
4	Экспоненциально		$f(x_u) = e^{-kx_u}$
5	Нормально распределенные источники		$f(x_u) = e^{-k_0 x_u^2}$ $x_u \in [0; l]$
6			$f(x_u) = e^{-k_0 x_u^2}$ $x_u \in [-l; 0]$

Продолжение таблицы 5

№	Закон распределения	Схема	Зависимость
7	Нормально распределенные источники		$f(x_u) = e^{-k_0 x_u^2}$ $x_u \in [-l; l]$
8	Комбинированный		$f(x_u) = \begin{cases} 1, x_u \in [0; l] \\ e^{-kx_u}, x_u \in [l; 2l] \end{cases}$

б) Пятый символ «С» обозначает скорость движения источника. Символ «С» может принимать значения от 0 до 2 (0 – неподвижный, 1 – движущийся, 2 – быстродвижущийся). Определение этого параметра сводится к подсчету критерия Пекле по формуле (17)

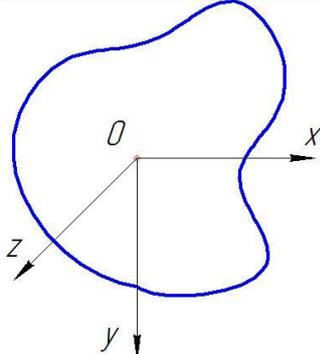
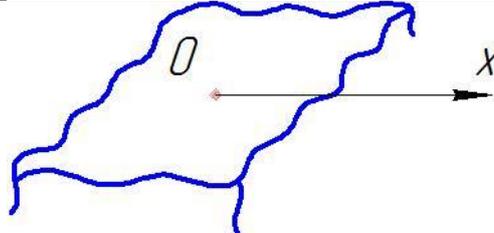
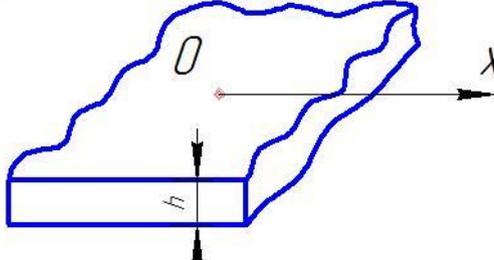
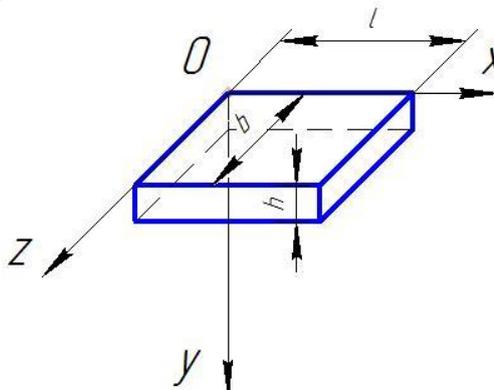
$$Pe = \frac{Ulcp}{\lambda}, \quad (17)$$

где U – скорость резания, l – характерный размер источника, наибольший размер в направлении вектора скорости (если источник неподвижный, то берется наибольший габаритный размер), c – теплоемкость материала при нормальных условиях, ρ – плотность материала при нормальных условиях, λ – теплопроводность материала при нормальных условиях. Если критерий Пекле больше или равен 10, то символ «С» будет 2, если критерий от 0 до 10, то «С» будет равен 1, если критерий равен 0, то «С» равен 0.

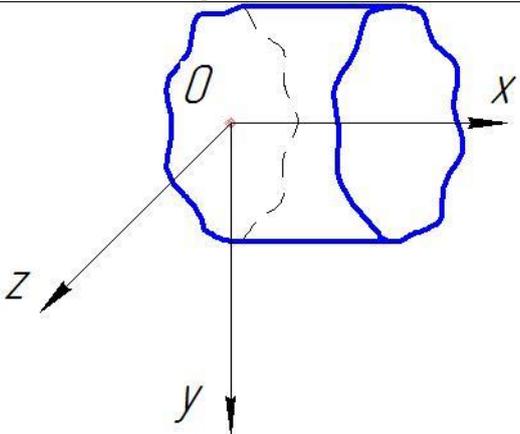
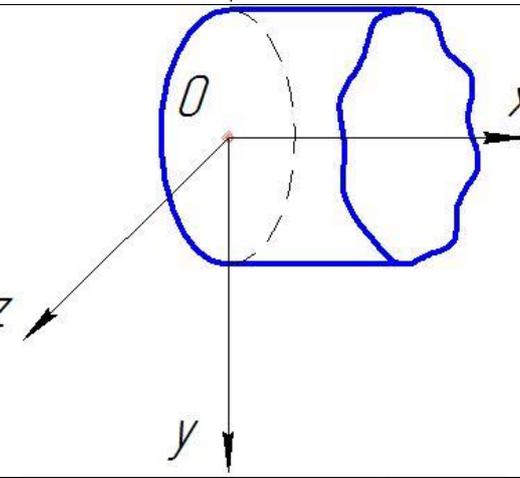
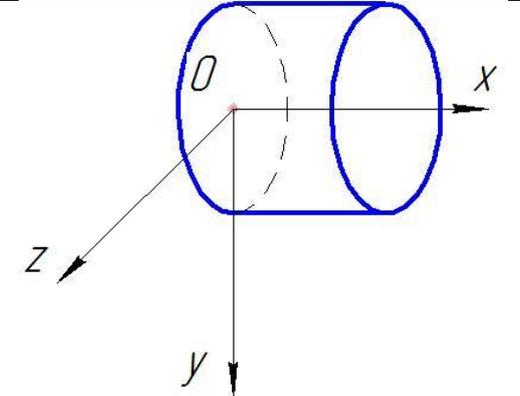
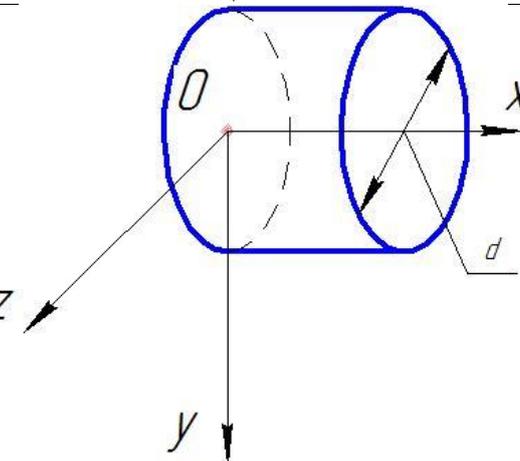
7) Шестой символ «Д» обозначает длительность воздействия источника. Символ «Д» может принимать значения от 0 до 2 (0 – мгновенный, 1 – нестационарный (неустановившийся), 2 – стационарный (установившийся));

8) Седьмой символ «Т» описывает тело, на которое воздействует источник. Символ «Т» может принимать значения от 0 до 9. Описание значений Т описано в таблице 6.

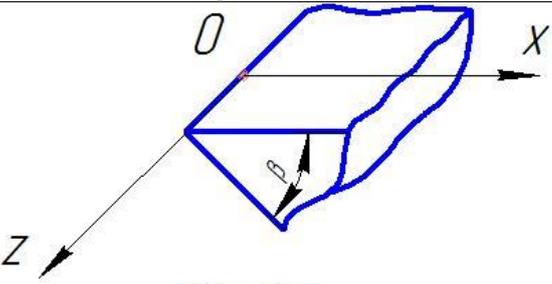
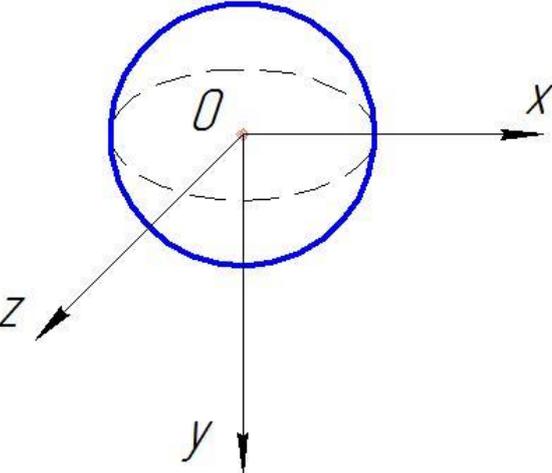
Таблица 6 – характеристика тела, на которое воздействует источник нагрева

Т	Форма объекта	Характер объекта
0		Бесконечно большое тело (пространство)
1		Полупространство (часть пространства ограниченное плоскостью)
2		Часть пространства ограниченное двумя плоскостями
3		Параллелепипед

Продолжение таблицы 5

Т	Форма объекта	Характер объекта
4		Бесконечный стержень
5		Стержень, ограниченный с одного торца
6		Стержень ограниченной длины
7		Цилиндр конечной длины

Продолжение таблицы 5

Т	Форма объекта	Характер объекта
8		Бесконечный клин
9		Шар

9) Восьмой символ «У» обозначает граничные условия, какого рода возникают в процессе решения данной задачи. Символ «У» может принимать значения от 1 до 4. Каждое из этих значений указывает на граничные условия. Граничные условия первого рода возникают, когда известно температурное поле на границах тела (изотермический процесс). Граничные условия второго рода существуют, когда известны тепловые потоки на границе (адиабатный процесс). Граничные условия третьего рода возникают, когда существует теплообмен твердого тела с окружающей средой. Данный теплообмен описывается законом Ньютона-Рихмана. Граничные условия четвертого рода возникают, когда существует теплообмен двух твердых тел.

Цилиндрическая система координат включает в себя полярные координаты – угол φ и радиус r – и аппликату z – ось, перпендикулярную площадке, образуемой множеством радиусов r , проведенных под множеством углов φ (рисунок 18).

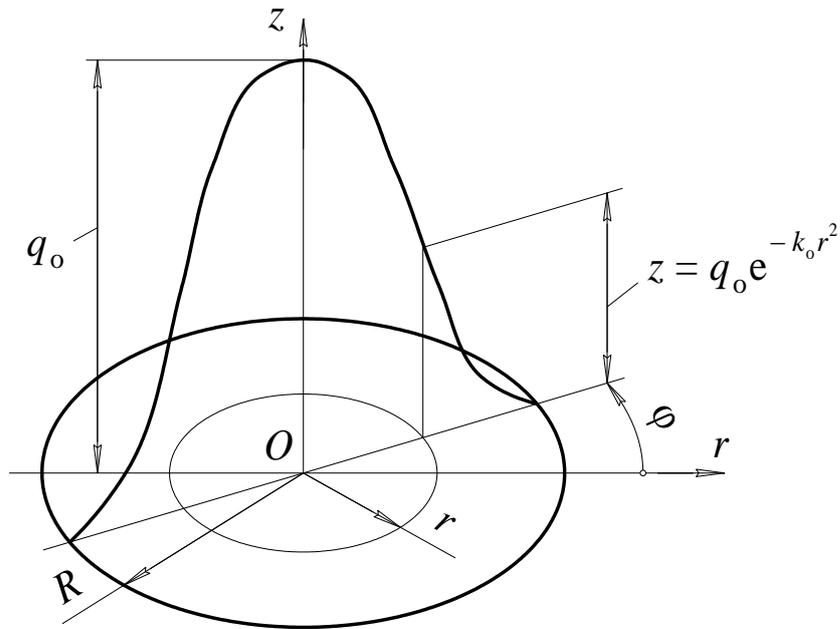


Рисунок 18 - Нормально-круговой источник теплоты в цилиндрической системе координат (φ, r, z)

В нашем случае нормально-круговой источник теплоты описывается функцией (18):

$$\begin{cases} \varphi \in [0; 2\pi]; \\ r \in [0; R]; \\ z = q_0 e^{-k_0 r^2}, \end{cases} \quad (18)$$

где R – наружный радиус пятна нагрева, м; q_0 – максимальная плотность тепловыделения на пятне нагрева (в точке O), Вт/м²; k_0 – коэффициент сосредоточенности теплового потока, м⁻².

Теоретически кривая нормального распределения бесконечна и не касается оси r , однако при инженерном анализе пятно нагрева ограничивают некоторым радиусом R , плотность тепловыделения $q(R)$ на котором не должна превышать 5% от максимальной.

Из условия

$$q(R) = q_0 e^{-k_0 R^2} = 0,05 q_0$$

получаем

$$-k_0 R^2 = \ln 0,05 = -3,$$

то есть

$$k_0 = \frac{3}{R^2} \quad (19)$$

Объем поверхности (φ, r, z) с физической точки зрения представляет собой тепловую мощность нормально-распределенного источника, выделяющуюся на пятне нагрева:

$$W = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R r dr \int_0^{q_0 e^{-k_0 r^2}} dz = 2\pi q_0 \int_0^R r e^{-k_0 r^2} dr \quad (20)$$

Для решения последнего интеграла в выражении (20) введем новую переменную $u = e^{-k_0 r^2}$. Тогда

$$du = -2k_0 r e^{-k_0 r^2} dr;$$

$$r e^{-k_0 r^2} dr = -\frac{du}{2k_0}.$$

Новые пределы интегрирования: при $r = 0$ $u = 1$; при $r = R$ $u = e^{-k_0 R^2}$.

После замены переменной выражение (20) принимает вид

$$W = 2\pi q_0 \int_1^{e^{-k_0 R^2}} -\frac{du}{2k_0} = \frac{\pi}{k_0} q_0 \int_{e^{-k_0 R^2}}^1 du = \frac{\pi}{k_0} q_0 (1 - e^{-k_0 R^2}). \quad (21)$$

С учетом (19) получаем

$$W = \frac{\pi}{3} q_0 R^2 (1 - e^{-3}) \quad (22)$$

Подставив численные значения π и e^{-3} , окончательно имеем

$$W = 0,9948 q_0 R^2, \text{ Вт} \quad (23)$$

Теперь, задавшись необходимой средней температурой нагрева θ и найдя с помощью инженерной методики расчета температур значение q_0 для источника, можно вычислить эффективную (передаваемую заготовке) мощность лазерного излучения, а через нее – номинальную мощность лазера $W_n = W/\eta$, где η – КПД излучения с учетом потерь на нагрев окружающей среды.

Для дальнейших расчетов мощности лазера необходимо найти значение показателя q_0 – наибольшая плотность теплового потока. Для этого воспользуемся инженерной методикой расчета температур на контактных площадках. Принцип данной методики состоит в том, что формулы для расчета температуры представляют в виде сомножителей, причем структура этих формул напрямую связана со структурой кода тепловой задачи. Формула (24) для расчета температур имеет вид:

$$\theta = A_M A_C A_P A_D A_K A_O A_T \quad (24)$$

Каждый множитель данной формулы является характеристикой источника или нагреваемого тела: М - коэффициент мерности источника, С –

коэффициент скорости источника и т.д. Каждый из этих множителей зависит от показателя кода тепловой задачи. При помощи данной формулы можно рассчитать как среднюю температуру в пятне контакта, так и максимальную. В нашем случае мы будем рассчитывать среднюю температуру. Схема алгоритма расчета температур приведена на рисунке 19. Данный алгоритм применим только к двумерным источникам с граничными условиями второго рода.

Первым шагом при расчете является составление кода тепловой задачи.

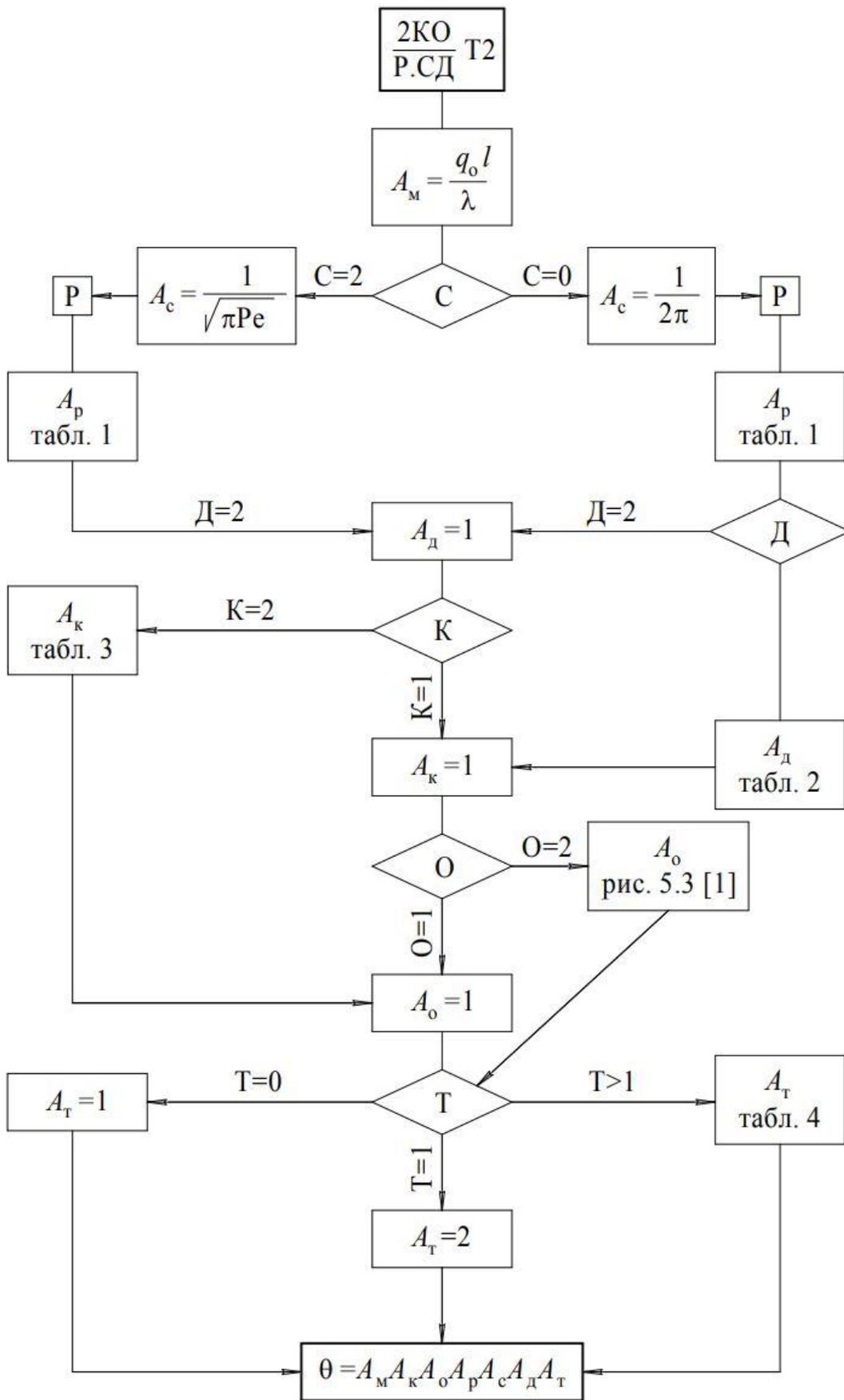


Рисунок 19 - Алгоритм расчета температур.

Мы можем применить данный алгоритм, так как наш источник (лазер) двумерный и мы имеет граничные условия второго рода.

Первый множитель A_M считается по формуле (25):

$$A_M = \frac{q_0 l}{\lambda}. \quad (25)$$

Значение коэффициента A_M является произведением неизвестного нам значения q_0 и числа, получившегося в результате деления характерного размера источника на теплопроводность материала.

Далее алгоритм содержит разветвление при двух различных условиях: источник неподвижен или же источник быстро движущийся. Далее мы определим, что наш источник быстро движущийся, поэтому будем двигаться по левой ветки алгоритма. Коэффициент A_C рассчитывает по формуле (26):

$$A_C = \frac{1}{\sqrt{\pi Pe}}. \quad (26)$$

Следуя по алгоритму, необходимо найти A_P . Определяется он по таблице 7.

Таблица 7 – Коэффициент A_P для расчета температуры

P	A_P^{cp}	A_P^{max}	A_P^{cp}	A_P^{max}
	C = 0		C = 2	
101	3,06	3,31	0,67	1
201	1,53	1,76	0,4	0,47
301			0,27	0,67
501	1,49	1,86	0,36	0,44
601			0,2	0,54
701	2,7	3	0,29	0,49
801	-	-	0,51	0,71

Далее мы видим, что значение коэффициента A_D является постоянной величиной и равен 1.

Следующим для отыскания коэффициентом является A_K . Его значение выбирается в зависимости от значения K в коде тепловой задачи. Таблица 8 представляет значения коэффициента A_K .

Таблица 8 - Коэффициент A_K для круговых источников при стационарном теплообмене

P	A_K^{cp}	A_K^{max}	A_K^{cp}	A_K^{max}
	C = 0		C = 2	
101	0,43	0,47	0,68	0,85
707	0,35	0,47	1,33	1

Следуя по алгоритму, мы достигаем блока, который нам говорит о том, что в нашем случае коэффициент A_O будет равен 1.

Завершающим этапом является нахождение коэффициента A_T . Алгоритм предполагает 3 варианта развития событий – когда T в коде тепловой задачи равен 0, 1 или больше 1. При T равное больше 1, то значение коэффициента A_T должно находится по таблице 9.

Таблица 9 - Коэффициент A_T для расчета температуры

Символы кода		Диапазон значений	A_T^{cp}	A_T^{max}
C	T			
2	2	$0,1 \leq u_1 \leq 1,6$	$2,14u_1^{-0,35}$	$2,36u_1^{-0,35}$
		$u_1 > 1,6$	2	2
2	7	$20 \leq u_1 \leq 12 \cdot 10^3$	$2,78u_1^{-0,045}$	$3,06u_1^{-0,045}$
		$u_1 > 12 \cdot 10^3$	2	2
0	8	$45^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$	$A_T^{cp} \approx A_T^{max} = \frac{630 \operatorname{erf}[0,08\eta]}{\beta^{0,86}}$	

Значение u_1 находим по формуле (27)

$$u_1 = \left(\frac{\Delta}{l}\right)^2 \cdot Pe \quad (27)$$

Значение Δ зависит от символа T в коде тепловой задачи. Если $T = 2$, то Δ является толщиной пластины, а если $T = 7$, то диаметром цилиндра.

Найдя все необходимые коэффициенты, подставляем их численные значения в формулу (22). Задавшись необходимой температурой нагрева, мы сможем найти q_0 и далее сможем найти эффективную мощность нагрева заготовки по формуле (21). Завершающим этапом будет расчет мощности лазера с помощью значения его КПД и необходимой эффективной мощности.

3 Рекомендации по проектированию технологического процесса лазерно-механической обработки на примере изготовления клапана ДВС из титанового сплава BT-22

3.1 Оптимизация режимов резания

При дополнительном нагреве заготовки ее физико-механические свойства снижаются, что в свою очередь позволяет изменить режимы резания с целью увеличения производительности. Назначим новые режимы резания с предварительным подогревом заготовки.

Глубину резания и подачу оставим действующую. Новая скорость резания будет рассчитана по формуле (28) [9].

$$v = \frac{C_v \theta^{u_v}}{T^m t^{x_v} S_0^{y_v}} \quad (28)$$

где $u_v = 0,027 \dots 0,03$.

Подставляя все необходимые коэффициенты в формулу, получаем [4]:

$$v = \frac{126 \cdot 800^{0,03}}{40^{0,3} \cdot 2^{0,22} \cdot 0,3^{0,5}} = 222 \text{ м/мин}$$

Сравнивая полученную скорость резания со скоростью из технологического процесса, можно увидеть, что скорость возросла на 22%, что повысит производительность резания также на 22%.

3.2 Составление кода тепловой задачи

В качестве примера рассчитаем необходимую мощность лазера для подогрева поверхности, входящую в зону резания. Первым шагом будет

составление кода решаемой тепловой задачи. Назначим на каждый символ кода тепловой задачи необходимое значение для конкретно нашего случая:

1) Перед кодом ставим знак «+», так как идет нагрев заготовки от внешнего источника.

2) Мерность источника $M = 2$

Пучок лазера является двумерным источником.

3) Конфигурация источника $K = 2$

Пучок лазера имеет круговое сечение.

4) Ограниченность источника $O = 2$

Пучок ограничен по осям X и Z .

5) Закон распределения источника $PPP = 707$

Руководствуясь значением «О» и данными из таблицы 5 делаем вывод, что наш источник (лазерное излучение) ограничено по двум плоскостям и имеет нормальное распределение.

6) Скорость источника $C = 2$

Для выбора данного значения необходимо подсчитать критерий Пекле. Скорость резания нам известна (80 м/мин), диаметр пучка лазера l на заготовке примем равным 0,001 м. Теплофизические характеристики титанового деформируемого сплава ВТ-22 приведены ниже [10].

$c = 0,565$ Дж/(кг·град);

$\rho = 4620$ кг/м³;

$\lambda = 8,32$ Вт/(м·град).

$$Pe = \frac{U \cdot l \cdot c \cdot \rho}{\lambda} = \frac{222 \cdot 0,001 \cdot 0,565 \cdot 4620}{8,32} = 69,375$$

Так как критерий Пекле больше 10 делаем вывод, что наш источник быстро движущийся.

7) Длительность воздействия источника $D = 2$

Характер воздействия нашего источника будем считать установившимся.

8) Тело $T = 7$

Опираясь на форму стержня клапана (цилиндр) и таблицу 6 оцениваем геометрию.

9) Граничные условия $U = 2$

Эскиз воздействия источника на поверхность стержня клапана показан на рисунке 20.

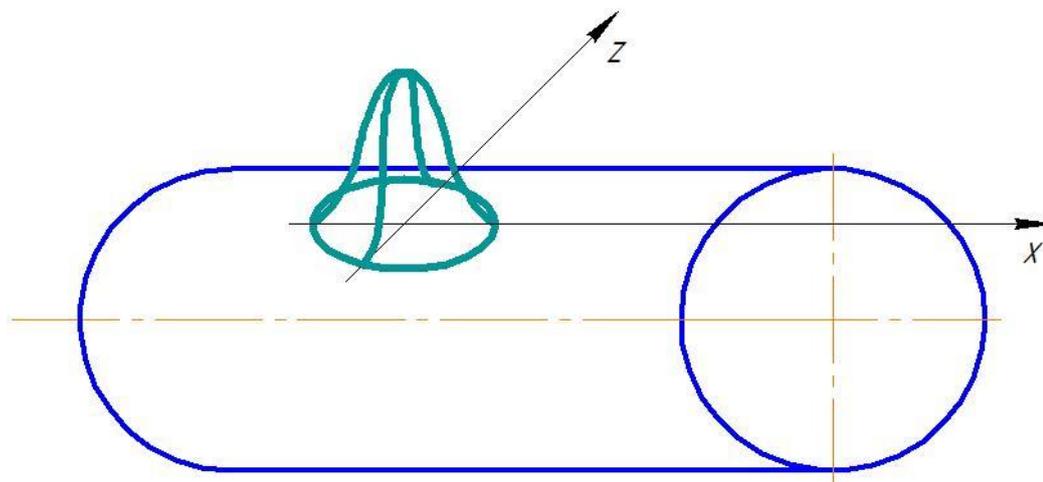


Рисунок 20 - Эскиз тепловой задачи

3.3 Расчет температуры с помощью инженерной методики расчета

Теперь, задавшись необходимой средней температурой нагрева θ и найдя с помощью инженерной методики расчета температур значение q_0 для источника $+\frac{222}{707.22}72$, можно вычислить эффективную (передаваемую заготовке) мощность лазерного излучения, а через нее – номинальную мощность лазера $W_n = W/\eta$, где η – КПД излучения с учетом потерь на нагрев окружающей среды.

Необходимой температурой нагрева является там температура материала, при которой он сильно теряет свои физико-механические свойства. Согласно исследованиям и экспериментам П. И. Полухина, Г. Я. Гуна и А. М. Галкина приведенным в их справочнике титановый

деформируемый сплав ВТ-22 сильно теряет свои прочностные свойства при температуре порядка 800°C. Графики зависимости физических свойств сплава от температуры приведены на рисунке 21 [14].

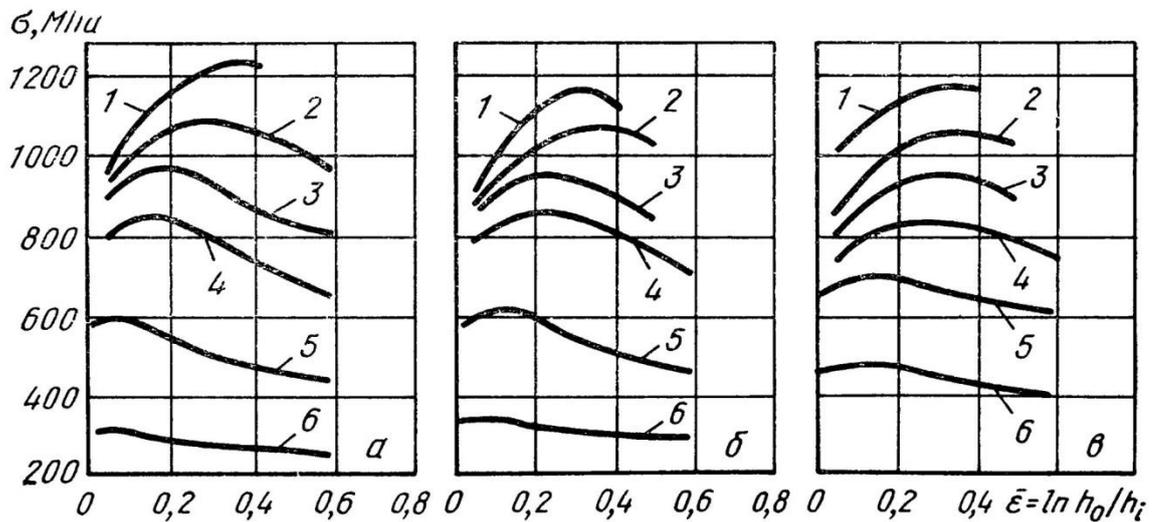


Рисунок 21 - Кривые испытаний на сжатие сплава ВТ-22. Температура, °С:
1 – 300; 2 – 400; 3 – 500; 4 – 600; 5 – 700; 6 – 800

Далее воспользуемся инженерной методикой расчета температуры (рисунок 18) для нахождения значения показателя q_0 .

Значение коэффициента A_M находим по формуле (23). Характерный размер источника l в нашем случае равен $0,5d$. Подставляя известные нам значения получаем

$$A_M = \frac{q_0(0,5 \cdot 1)}{8,32} \cdot 10^{-3} = 0,0601 \cdot 10^{-3} q_0.$$

Значение коэффициента A_C находим по формуле (29)

$$A_C = \frac{1}{\sqrt{\pi Pe}} \quad (29)$$

Критерий Пекле ранее мы уже рассчитали при составлении кода тепловой задачи. Подставляем его в формулу и получаем

$$A_c = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 69,375}} = 0,0677.$$

Следуя по алгоритму, необходимо найти A_p . Определяется он по таблице 7.

Как видно в таблице нет нашей комбинации значений $P = 707$. В таком случае выбирается значение по первой цифре, в нашем случае на цифре 7. В дальнейшем данный коэффициент скорректирует коэффициент A_K . Расчет температуры будем вести по среднему значению температуры. Так как источник у нас быстро движущийся, значит $C = 2$. Делаем вывод, что в нашем случае $A_p = 0,29$.

Далее мы видим, что значение коэффициента A_d является постоянной величиной в конкретно нашем алгоритме для двумерного источника с граничными условиями второго рода и равен 1.

Следующим для отыскания коэффициентом является A_K . В наше коде символ K равен 2, а это значит, что коэффициент A_K мы находим по таблице 8. В нашем случае коэффициент A_K равен 1,33.

Следуя по алгоритму, мы достигаем блока, который нам говорит о том, что в нашем случае коэффициент A_o будет равен 1.

Коэффициент A_T находим по таблице 9, так как значение T в коде тепловой задачи больше 1. Также необходимо рассчитать значение коэффициента u_1 по формуле (25):

$$u_1 = \left(\frac{14}{0,5 \cdot 1} \right)^2 \cdot 69,375 = 54390$$

Исходя из полученного значения u_1 , символов С и Т делаем вывод, что коэффициент A_T равен 2.

Найдя все необходимые коэффициенты, подставляем их численные значения в формулу (22) и получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned}\theta &= A_M A_C A_P A_D A_K A_O A_T = 0,0601 \cdot 0,0677 \cdot 0,29 \cdot 1 \cdot 1,33 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} q_0 = \\ &= 0,0031 \cdot 10^{-3} q_0, \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Из полученного выражения можно выразить необходимое нам q_0

$$q_0 = \frac{\theta}{0,0031 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Подставляя необходимую нам температуру нагрева заготовки из титанового сплава [6], [7], находим значение наибольшей плотности теплового потока q_0

$$q_0 = \frac{800}{0,0031 \cdot 10^{-3}} = 258064516 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Следующим этапом станет нахождение эффективной мощности передаваемой заготовки во время нагрева лазером. Данную мощность посчитаем при помощи формулы (21), где R – радиус пятна контакта лазера.

$$W = 0,9948 q_0 R^2 = 0,9948 \cdot 258064516 \cdot \left(\frac{0,001}{2}\right)^2 = 64,1806 \text{ Вт}$$

Найдя эффективную передаваемую мощность и зная КПД лазерной установки, можно подобрать лазер, опираясь на его мощностные характеристики.

3.4 Теоретический расчет мощности лазера при упрощенной модели процесса нагрева.

При анализе процессов на малых площадках зачастую пренебрегают кривизной границ этих площадок, например, при нахождении площади под кривой с помощью интегрирования криволинейную границу элементарной площадки считают прямолинейной, а саму площадку – прямоугольником. У нас пятно нагрева имеет весьма малый диаметр $d = 2R$. Исходя из всего выше сказанного можно провести расчет для случая, когда источник мы будем считать равномерно распределенным по площадке πR^2 с плотностью q'_0 . Для этого надо заново составить код тепловой задачи, согласно инженерной методике расчета найти q'_0 и, наконец, найти эффективную мощность, передаваемую от лазера заготовке. Получив два значения эффективной мощности для нормально распределенного и равномерно распределенных источников, мы сможем ответить на вопрос – можно ли пренебречь кривизной границ площадки распределения.

Код тепловой задачи для равномерно распределенного источника будет иметь вид

$$+ \frac{222}{101.22} 72.$$

Отличие в нашем случае оказалось лишь в параметре, описывающий закон распределения согласно таблице 5. Все остальные параметры остались без изменений.

Далее, воспользовавшись инженерной методикой расчета температур (рисунок 18), найдем среднюю температуру в пятне контакта излучения лазера с заготовкой. Для этого найдем все необходимые коэффициенты:

$$1. A_M = \frac{q_0(0,5 \cdot 1)}{8,32} \cdot 10^{-3} = 0,0601 \cdot 10^{-3} q_0$$

$$2. A_C = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot 69,375}} = 0,0067$$

$$3. A_P = 0,67 \text{ (согласно таблице 7);}$$

$$4. A_D = 1 \text{ (согласно методике расчета на рисунке 18);}$$

$$5. A_K = 0,68 \text{ (согласно таблице 8);}$$

$$6. A_O = 1 \text{ (согласно методике расчета на рис. 2.9);}$$

$$7. u_1 = \left(\frac{14}{0,5 \cdot 1} \right)^2 \cdot 67,375 = 54390;$$

$$A_T = 2 \text{ (согласно таблице 9).}$$

Найдя все коэффициенты для расчета средней температуры в пятне контакта, составим выражение, описывающее величину температуры

$$\begin{aligned} \theta &= A_M A_C A_P A_D A_K A_O A_T = 0,0601 \cdot 0,0067 \cdot 0,67 \cdot 1 \cdot 0,68 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} q_0 = \\ &= 0,0037 \cdot 10^{-3} q'_0, \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Отсюда найдем плотность теплового потока q'_0 :

$$q'_0 = \frac{800}{0,0037 \cdot 10^{-3}} = 216216216 \text{ Вт/м}$$

Последним шагом станет расчет эффективной мощности излучения лазера

$$W = 0,9948q'_0R^2 = 0,9948 \cdot 216216216 \cdot \left(\frac{0,001}{2}\right)^2 = 53,773 \text{ Вт}$$

В результате проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что, пренебрегая кривизной границ, расчетная эффективная мощность получилась меньше на 16%. Учитывая не самый высокий КПД лазерной установки, можно считать, что данный расчет имеет место быть. К тому же, занижая показатели по эффективной мощности, мы не увеличиваем риск проплавления заготовки, что является один из важнейших факторов при механической обработке с дополнительным нагревом, не предусматривающий удаления материала не лезвийным инструментом.

3.5 Подбор лазерной установки

При выборе лазерной установки будем руководствоваться несколькими критериями:

1. КПД лазера;
2. Стоимость оборудования;
3. Габаритные размеры.

Основываясь на информации, изложенной в главе 1, выберем диодный лазер. Его преимущества перед остальными типами в конкретно нашем случае:

- Самые маленькие лазерные установки на сегодняшний день. Нам это важно, так как лазер будет встраиваться в существующий токарный универсальный станок;
- Электрическая эффективность данного типа лазерных установок одна из самых высоких;
- Внутренние компоненты лазера можно заключить в систему охлаждения, что повысит ее срок службы
- Низкая стоимость интегрирования и содержания

Фирма Coherent производит широкую номенклатуру лазерных установок. В их ассортименте, конечно же, есть и диодные лазеры. Среди доступных лазерных установок есть 3 линейки: Compact, HighLight DL и HighLight DD. Линейки лазеров HighLight имеют выходную мощность от 1кВт, что для наших целей является избыточной мощностью. Линейка Compact предлагает маломощные лазеры от 50 Вт, что является оптимальным для нас выбором. В данную линейку лазеров входят следующие серии лазеров [13]:

1) Серия Compact Mini обеспечивает выходную мощность до 50 Вт. Имеет малые размеры, воздушное охлаждение термонагруженных узлов установки. Основное назначение данного типа лазеров является пайка и сварка полимеров. Внешний вид установки представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 - Диодный лазер Coherent Compact Mini

2) Серия Compact может развить выходную мощность в 120 Вт. Сама установка смонтирована в 19-дюймовом корпусе, что позволяет установить его на стеллаж. Также имеет воздушное охлаждение и предназначен для пайки, сварки полимеров и термообработки. Внешний вид установки представлен на рисунке 23.



Рисунок 23 - Диодный лазер Coherent Compact

3) Серия Compact SE также обладает воздушным охлаждением, 19-дюймовый корпус и развивает мощность до 100 Вт. Главным отличием является наличие улучшенного контроллера, позволяющий проводить электронное обслуживание. Предназначен для пайки, сварки полимеров и термообработки. Внешний вид показан на рисунке 24.



Рисунок 24 - Диодный лазер Coherent Compact SE

4) Серия Compact Evolution имеет выходную мощность в 600 Вт и возможность установки в накопитель. Оснащен системой водяного охлаждения термонагруженных узлов. Также имеет продвинутый контроллер управления. Предназначен для пайки, сварки полимеров и термообработки. Внешний вид показан на рисунке 25.



Рисунок 25 - Диодный лазер Coherent Evolution

5) Серия Compact Evolution XL является мощнейшим представителем линейки лазеров Compact. Его выходная мощность достигает 1200 Вт. Благодаря модульной конструкции, данная серия лазеров обеспечивает оптимальную эффективность, гибкость и надежность в производстве. Подходит для пайки, сварки полимеров и термообработки. Обладает большим набором принадлежностей, таких как коллиматоры, оптики, пирометры и прочие аксессуары, которые позволяют обеспечивать максимально гибкую интеграция в производственную систему. Внешний вид показан на рисунке 26.



Рисунок 26 - Диодный лазер Coherent Evolution XL

Исходя из того, что КПД диодных лазеров не превышает 25%, мы можем посчитать какую выходную мощность лазера нам необходимо иметь. Номинальная необходимая мощность лазера рассчитывается по формуле (30)

$$W_H = \frac{W}{\eta}, \quad (30)$$

где η – КПД лазерной установки, W – эффективная мощность, передаваемая заготовке. Подставив необходимые данные получаем

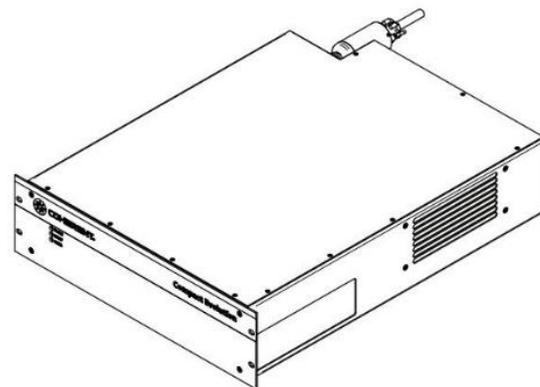
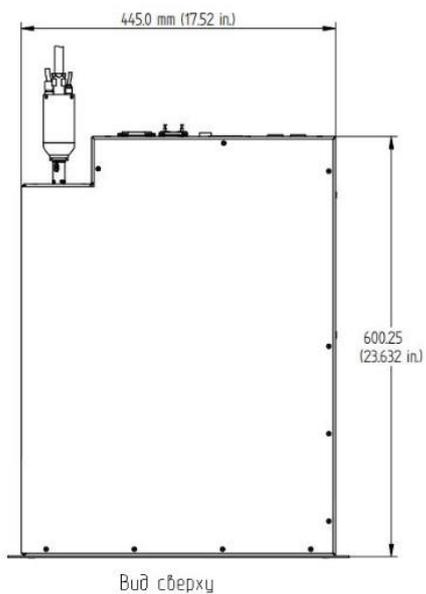
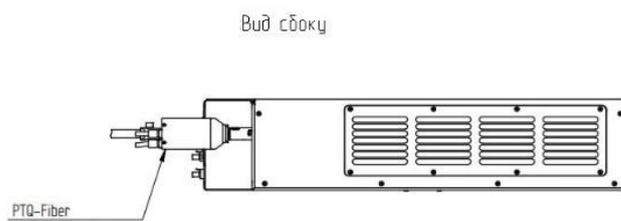
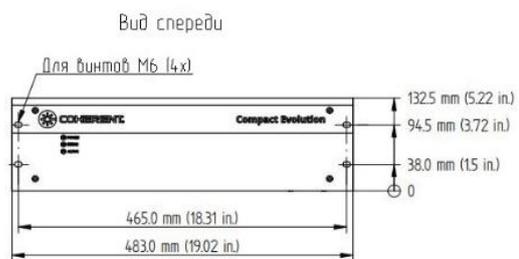
$$W_H = \frac{W}{\eta} = \frac{64,1806}{0,25} = 257 \text{ Вт.}$$

Данную выходную мощность может обеспечить диодный лазер Coherent Compact Evolution, представленный на рисунке 24. Серия Evolution представлена пятью установками мощностью 200, 300, 400, 500 и 600 Вт. Выберем 300-ваттную версию. Характеристики данной установки представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Характеристики диодного лазера Coherent Compact Evolution

Характеристика	Значение
Номинальная мощность, Вт	300
Диапазон отдачи, %	10 - 100
Качество лазерного луча, мм·град	22
Потеря мощности при 24-часовом цикле, %	± 2
Частота пульсации, Гц	1000
Длина волны, нм	980
Давление системы охлаждения (максимальное значение), бар	6
Температура охлаждающей жидкости, °С	22 ± 1
Производительность насоса (минимальное значение), л/мин	5
Требуемая температура окружающей среды во время работы, °С	18 - 40
Требуемая температура окружающей среды во время простоя, °С	5 - 50

Габаритный чертеж представлен на рисунке 27.



Industriegehäuse 19"-3HE
 Industrial Rack Mount 19"-3HU
 Rack Industriel 19"-3UH

Рисунок 27 – Чертеж лазерной установки Coherent Evolution

Заключение

Основные выводы по работе

1. Анализ научно-технической литературы показал, что одним из высокоэффективных методов повышения работоспособности режущего инструмента и экономических показателей процесса резания является дополнительный локальный нагрев обрабатываемого материала.

2. При обработке резанием с небольшими сечениями среза целесообразно использовать устройства локального нагрева, создающие пятно нагрева диаметром 1...2 мм, в частности, промышленные лазеры различных конструкций.

3. Исследования показали, что существует 6 областей воздействия дополнительного нагрева на обрабатываемый материал, среди которых наибольший интерес с точки зрения организации технологического процесса представляет пятно нагрева, расположенное непосредственно под источником тепла.

4. Методами технологической теплофизики получена зависимость безразмерной температуры на оси пятна нагрева от безразмерной координаты, с помощью которой определены условия отсутствия нарушений целостности (проплавления) обрабатываемой поверхности.

5. На базе инженерной методики расчета температур разработан алгоритм расчета эффективной мощности лазерного нагрева, исходя из средней температуры нагрева, обеспечивающей заданное снижение прочности обрабатываемого материала на время обработки. Алгоритм реализован в двух вариантах – при нормально-круговом и равномерном законах распределения плотности тепловыделения на пятне нагрева. Показано, что при малых диаметрах пятна нагрева закономерности распределения плотности тепловыделения практически не играют роли при расчете средней температуры нагрева.

6. В качестве примера практической реализации результатов научных исследований разработан технологический процесс изготовления клапана двигателя внутреннего сгорания из титанового сплава BT-22, в который включена операция точения с лазерным нагревом срезаемого слоя. Выбран диодный лазер необходимой мощности, рассчитан режим резания. Показано, что производительность операции повысится на 22% по сравнению с обычным резанием.

Список используемой литературы и источников

1. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.: ил.;
2. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. 2-е изд. перераб. и доп. Справочник. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М., «Металлургия», 1983, с. 352.;
3. Промышленные лазеры для обработки материалов. С. Вудс, департамент диодных и волоконных лазеров Coherent, 2012, 7 с.;
4. Расчет режимов резания. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие / В. В. Марков, А. В. Сметанников, П. И. Кискеев, Л. И. Лебедева, Д. А. Ветчинников. – Орел: Орел-ГТУ, 2010. – 112 с.;
5. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 137 с.;
6. Механические свойства титана и его сплавов / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, А. А. Буханова. М.: Metallurgy, 1974. 544 с.;
7. Титановые сплавы в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. Л.: Машиностроение, 1990. 400 с.;
8. Справочник технолога машиностроителя [Текст] / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова // В 2-х т. – Т. 1. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.;
9. Теплофизика резания. А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.;
10. Теплопроводность твердых тел: Справочник/Под ред. А. С. Охотина. М: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.;

11. Резание металлов: Учебник для вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский: М.: Высшая школа, 1984. 247 с.;
12. Марочник материалов – metallicheckiy-portal.ru
13. Coherent: Laser Energy Sensors – coherent.com
14. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременном нагружении. М.: Metallurgia, 1968. 280 с.;
15. Пластическая деформация металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Г. Сафронов, А. М. Галкин. Науч. тр./МИСИС. М.: Metallurgia, 1974, № 76, 265 с.;
16. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Г., Яковлев Е. Б. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, 312 с.;
17. Gefvert B., Wallace J., Overton G., Noguee A. Annual Laser Market Review & Forecast 2019: What hoes up... - 2019. – P. 15;
18. Yilbus B. S. Laser heating process and experimental validation. International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1997. – Vol. 5. – P. 1131-1143;
19. Basim A.K., Yassin M. A., Sahari K., Mahadzir I. Titanium and its Alloy. International Journal of Science and Research (IJSR). – 2014. – P. 234-256;
20. Schoenberg R. Manufacturing, With the right surface treatment, titanium might work for truck engines. – 2014. – P. 6;
21. Amin. Z. Diode lasers: Experimental and critical review. Lasers in Medical Science. – 1995. – P. 157-163;
22. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Бибиков Е. Л. и [и др.]. М.: Metallurgia, 1983, 296 с.;
23. Полуфабрикаты из титановых сплавов; под ред. Б. А. Колачева. М.: ОНТИ ВИЛС, 1996. 581 с.;
24. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т.1. Свариваемость материалов: справ. Изд.; под ред. Э. Л. Макарова. М: Metallurgia, 1991. С. 352-361;

25. Колачев Б. А. Титановые сплавы разных стран/ Б. А. Колачев, И.С. Польшкин, В.Д. Талалаев. М: ВИЛС, 2000. 320 с;
26. Солонина О. П. Жаропрочные титановые сплавы / О.П. Солонина, С. Г. Глазунов. М.: Металлургия, 1976. 448 с;
27. Горынин И. В. Титановые сплавы в машиностроении / И.В. Горынин, Б. Б. Чечулин. Л.: Машиностроение, 1990. 500 с;
28. Карслоу Г., Егер. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964, 487 с.;
29. Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Либенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы: Учебное пособие для вузов. Благовещенск: изд-во БПИ, 1993, с. 344;
30. Gamaly E.G. The physics of ultra-short laser interactions with solid at non-relativistic intensities // Physics Reports. V. 508. 2011. P. 91-243.