

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные  
процессы»

(наименование кафедры)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических  
материалов

(направленность(профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Исследование процессов газопламенного напыления алюминия на  
сталь

Студент

И.С. Нестеренко

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Научный

руководитель

А.И. Ковтунов

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Консультанты

Т.А. Варенцова

(И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Руководитель программы

д.т.н. доцент

А.И. Ковтунов

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой

д.т.н., проф.

В.В. Ельцов

(ученая степень, звание И.О. Фамилия)

\_\_\_\_\_ (подпись)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Биметаллы сталь-алюминий и способы их получения .....	6
1.1 Биметаллы сталь- алюминий .....	6
1.2 Плакирование .....	7
1.2 Сварка взрывом .....	9
1.4. Жидкофазное алитирование.....	10
1.5 Напыление.....	12
1.5.2 Плазменное напыление .....	16
1.5.3 Высокоскоростное напыление.....	19
1.5.4 Газопламенное напыление .....	22
1.6 Анализ способов предварительной подготовки поверхности.....	28
1.6.1 Абразивно-струйная обработка .....	28
1.6.2 "Рванная" резьба.....	33
1.6.3. Накатка.....	36
1.6.4 Обезжиривание.....	39
1.6.5 Предварительный подогрев .....	43
1.7 Диффузионный отжиг.....	46
2 Методика исследования алюминиевых покрытий.....	55
2.1 Методика исследования покрытий нанесенных методом газопламенного напыления .....	55
2.2 Методика исследования алюминиевых покрытий полученных жидкофазным алитированием .....	62
3 Исследования формирования алюминиевых покрытий газопламенным напылением .....	68
3.1 Исследование влияния подготовки поверхности подложки, на прочность сцепления при газопламенном напылении алюминия на сталь	68
3.2 Исследования влияния предварительного подогрева основного металла на прочность сцепления .....	71
3.3 Исследования процессов жидкофазного алитирования.....	79

3.4 Исследование диффузионного отжига алюминиевых покрытий полученных газопламенным напылением .....	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ: .....	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	89

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития техники, особое значение уделяется повышению работоспособности и долговечности деталей машин и особенно деталей узлов работающих в агрессивных средах.

Проблема повышения надёжности в условиях интенсификации производства, энерго- и ресурсосбережения, ставит задачу создания новых технологических процессов и применения новых материалов. Но зачастую наиболее слабым элементом в системе "материал - рабочая среда", определяющим условия эксплуатации и ресурс системы механизмов, является поверхность материала. Поэтому важную роль играют покрытия, предохраняющие детали от разрушительного влияния рабочих сред.

Из всех защитных покрытий на стальных изделиях, большой интерес представляют биметаллы на основе сталь-алюминий. При различных механических и эксплуатационных свойствах, объединенные, в единое целое они способны успешно конкурировать с дорогостоящими высоколегированными сталями. Тем самым, многократно снизив стоимость изделий, без снижения качества изделия и срока эксплуатации [1].

Известно много способов формирования алюминиевых покрытий на сталях: жидкофазный, наплавка, сварка взрывом, газотермическая металлизация, плакирование.

Проведя анализ получения биметаллов, сравнив все показатели и экономическую эффективность было решено для формирования алюминиевых покрытий использовать газопламенное напыление.

При таком способе, достигается максимальная производительность, в независимости от сложности поверхности. Установка для газопламенного напыления достаточно мобильна, что позволяет производить наносить покрытие на готовых конструкциях, вне цеховых условиях. Так же следует отметить возможность получения покрытия различной толщины с широким спектром свойств [2].

Однако существенным недостатком данного способа является низкая прочность сцепления покрытия с основой, что вызвано отсутствием адгезионной связи, а также наличием в покрытии остаточных напряжений, которые образуются во время напыления.

Проблема повышения прочности сцепления при напылении покрытий газопламенным напылением эффективно решается созданием на поверхности детали сложной структуры, применяя различные способы механической и термической обработки поверхности. А увеличение области применения биметалла сталь-алюминий, способствует последующий диффузионный отжиг, который способствует образованию интерметаллидных слоев., придающих стальным деталям уникальные свойства коррозионной устойчивости, жаростойкости и износостойкости [3].

Целью магистерской диссертации является повышение адгезионной связи покрытия с основным металлом, путем исследования процессов и разработки технологии формирования алюминиевых и алюминидных покрытий на сталях.

# 1 Биметаллы сталь-алюминий и способы их получения

## 1.1 Биметаллы сталь- алюминий

Биметаллом принято называть двухслойный или многослойный материал, состоящий из двух и более различных металлов или сплавов, прочно соединенных между собой по всей плоскости соприкосновения, и представляющий собой монолитное целое (рисунок 1) [1].

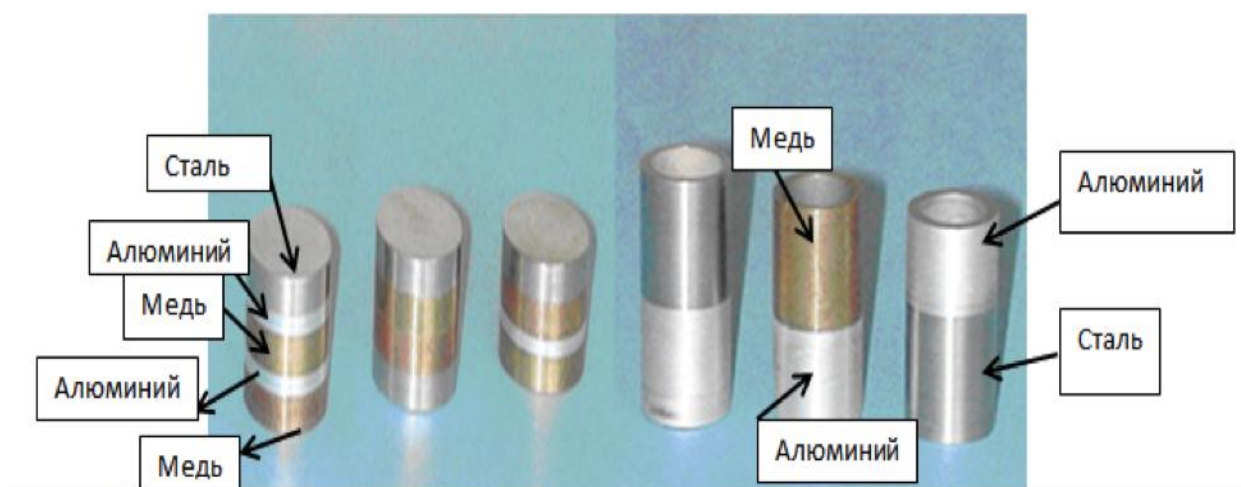


Рисунок 1 - Биметаллы

В настоящее время биметаллы широко используются в различных отраслях промышленности, особенно популярен в химической и нефтехимической промышленности, в машиностроении и судостроении.

В композиции биметалла, от выбора плакирующего слоя зависят его свойства. Подавляющее большинство выпускаемого коррозионностойкого биметалла приходится на выпуск биметалла в котором в качестве основы используется углеродистая или низколегированная сталь. А в качестве плакирующего слоя алюминий. Такие композиты классифицируются как коррозионностойкие, антифрикционные, проводниковые [4].

Использование биметалла ежедневно увеличивается, что приводит не только к экономии дефицитных и дорогостоящих металлов и сплавов, но и непрерывным разработкам технологий их изготовления.

"В основе всех технологических способов получения биметаллических, многослойных и композиционных материалов лежит процесс образования неразъемного соединения разнородных компонентов с достаточно высокой прочностью на отрыв или срез. В связи с этим используются следующие способы соединения сталей"

## **1.2 Плакирование**

Сварка плакированием является разновидностью сварки давлением и осуществляется в условиях деформирования при малой длительности взаимодействия. Сварка может выполняться при нагреве соединяемых металлов (горячая сварка прокаткой) и в холодном состоянии при формировании слоистых материалов из пластичных металлов (холодная сварка прокаткой) [5].

"Холодную сварку прокаткой применяют для получения двух- или трехслойных биметаллов, состоящих из стальной основы и плакирующих слоев из цветных металлов или их сплавов. Непременными условиями прочного соединения слоев в биметалле при холодной сварке прокаткой является значительная деформация и чистота соединяемых поверхностей металлов, причем особенно важно отсутствие даже небольших количеств органических веществ, трудно распаляющихся с поверхности металла" [3]. Метод совместной холодной прокатки получил широкое применение в ряде стран, в том числе и в нашей стране. Этим методом, в частности, в больших количествах получают полосовой антифрикционный биметалл толщиной от 2,2 до 6,2 мм [6].

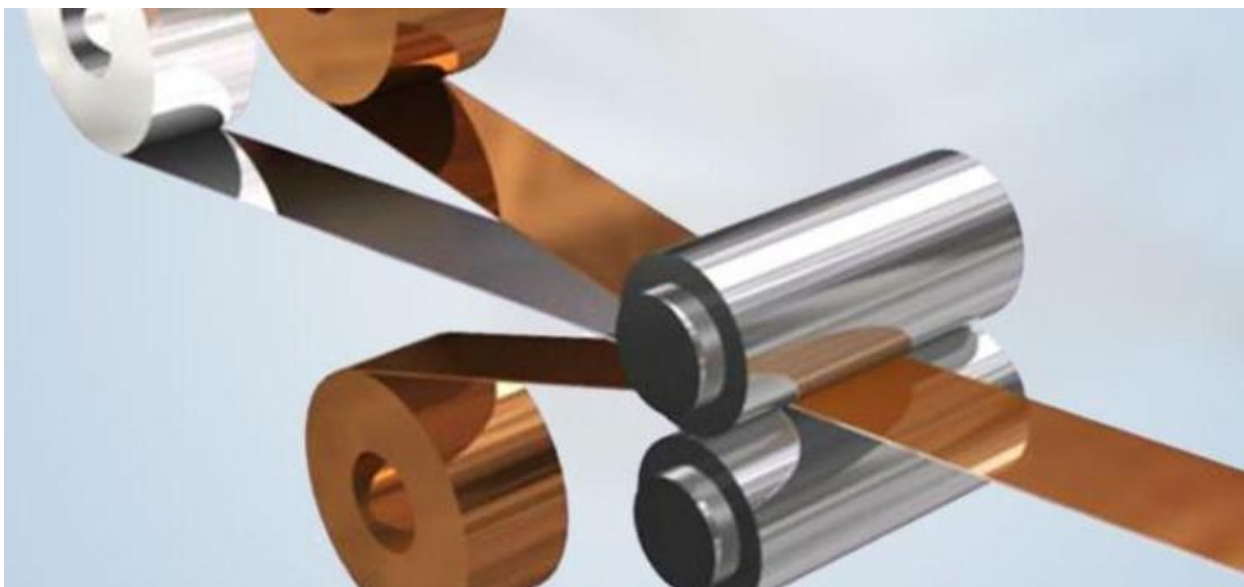


Рисунок 2 -Холодная прокатка трехслойного биметалла

Технологическая схема получения биметаллов холодной сваркой прокаткой состоит из следующих основных операций:

- 1) подготовка контактных поверхностей составляющих биметалла (травление, зачистка) и сборка биметаллических пакетов с помещением между составляющими тонкой фольги из чистого алюминия для облегчения процесса образования соединения;
- 2) холодная прокатка на двухвалковом стане с обжатием 45-50% 33 один проход (рисунок 2);
- 3) промежуточный отжиг биметаллического раската в электрических печах при 320 - 380°C в течение 1 ч;
- 4) холодная прокатка полос;
- 5) калибровка биметаллических полос для получения хорошей планшетности и обеспечения требуемых допусков по толщине,
- 6) правка полос на правильных машинах;
- 7) окончательный отжиг биметалла в электрических печах при 450-460°C в течение 3 ч с последующим медленным охлаждением с печью;
- 8) резка биметаллических полос на заданные размеры;
- 9) испытания биметалла на прочность соединения слоев и на соотношение слоев, твердость и контроль качества поверхностей.



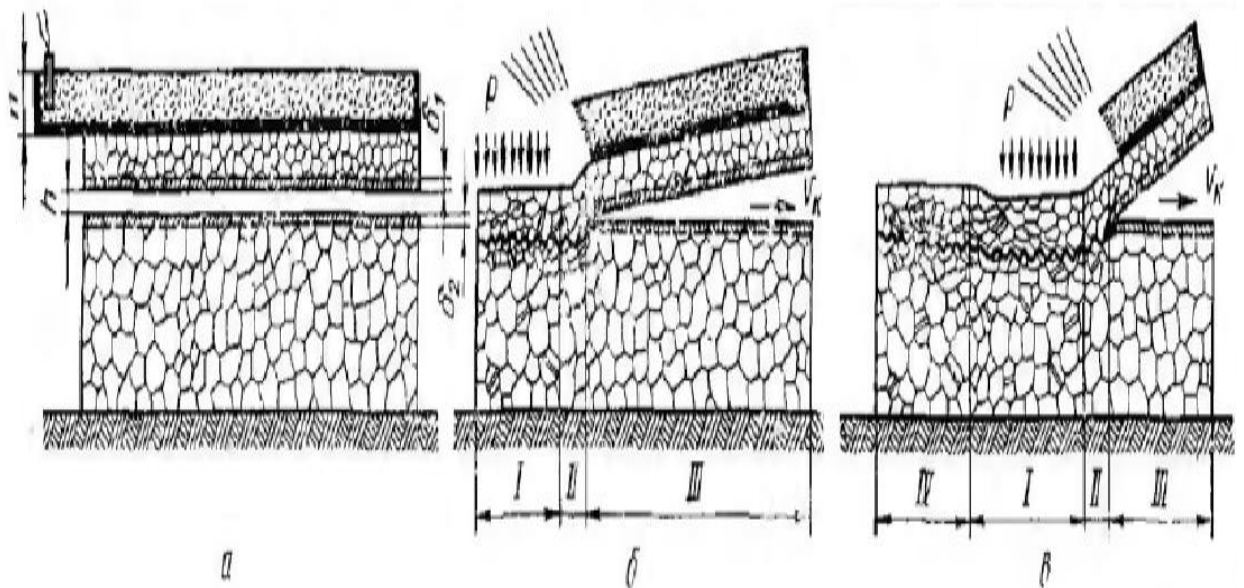
## 1.2 Сварка взрывом

"Сварка взрывом - процесс получения соединений под действием энергии, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ)". Принципиальная схема сварки взрывом изображена на рисунке 3.

На рисунке приведена схема получения биметаллов сваркой взрывом. Над неподвижной плитой (слябом) размещают μεταемую пластину из материала плакирующего слоя. На эту пластину помещают заряд взрывчатого вещества (в.в.); взрыв инициируется детонатором, размещенным у края пластины. В момент взрыва верхняя пластина с большой скоростью соударяется с неподвижным слябом. Вследствие того что фронт детонации перемещается вдоль заряда взрывчатого вещества с определенной скоростью, участки μεταемой пластины последовательно вовлекаются в движение и через некоторое время ( $10^{-3}$ ... $10^{-6}$  с) соударяется с неподвижным слябом. В месте соударения развивается давление, во много раз превышающее динамическую прочность свариваемых металлов [7].

Сваренную с помощью взрыва двух- или многослойную заготовку можно использовать для изготовления изделий либо непосредственно после взрыва, либо после горячей или холодной прокатки заготовки на требуемые размеры. Нагрев, прокатку и отделку производят на обычном оборудовании.

Сваркой взрывом можно соединять металлы и сплавы в любых сочетаниях. Наиболее целесообразно и экономически оправданно применение такой сварки для соединения композиций, которые невозможно или весьма трудно получить другими методами.



I - зона интенсивного сжатия; II- зона интенсивных пластических Сдвигов; III - зона действия кумулятивной струи; IV - зона действия упругой волны разгрузки; высота заряда п.в; h- зазор между пластинками перед сваркой; толщины окисных пленок на плакирующем и основном слоях; vк направление движения кумулятивной струи[7]

Рисунок 3 - Схема процесса сварки взрывом при изготовлении биметаллов

#### 1.4. Жидкофазное алитирование

"Сущность способа состоит в погружении стального изделия с чистой металлической поверхностью в жидкий алюминий или его сплав и выдержки в нем в течение определенного времени (рисунок 4). При этом поверхностный слой металла растворяется в алюминии, вступает с ним во взаимодействие, образуя интерметаллические соединения типа  $Fe_nAl_m$ . Дальнейший рост переходного слоя интерметаллидов идет в результате диффузии алюминия в железе"[4].



Рисунок 4 Жидкофазное алитирование балок стальных конструкций

При этом реакция и диффузия протекают очень быстро, благодаря чему слой толщиной 0,02-0,10 мм образуется в течение 1-15 мин. Процесс алитирования ведут при 700-800°C, т. е. при температуре более низкой, чем алитирование методом калоризации [9].

Алитирование погружением имеет и недостатки:

- 1) наличие хрупкой составляющей;
- 2) разъедание погружаемых изделий, так как алюминий в жидком состоянии очень легко вступает в реакцию с другими металлами;
- 3) довольно высокая температура процесса, что снижает стойкость тиглей;
- 4) местное налипание алюминия на слои алитирования;
- 5) неравномерность насыщения железа алюминием;
- 6) окисление железа во время погружения;
- 7) налипание пленки окиси алюминия.

"Для активирования поверхности а так же лучшего смачивания рекомендуется наносить на изделия флюсы, а также па поверхность ванны с жидким алюминием. В качестве флюсов можно использовать смеси хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов, хлориды цинка и алюминия, криолит, борную кислоту, буру, фториды титана и циркония и др. Некоторые из этих флюсов, например фториды титана и циркония, дороги, поэтому применение их экономически не выгодно; другие флюсы являются не стойкими и быстро обедняются, теряя свою реакционную (флюсующую) способность. Флюсы несколько усложняют процесс алитирования, а нанесение их на поверхность алюминиевого расплава затрудняет последующую обливку арматуры" [8].

Адгезия расплавленного алюминия к стали, обеспечивается и при наличии на поверхности стали пассивной пленки, окислов железа ( $Fe_3O_4$ ) или хлоридов железа определенной толщины.

Во время нахождения детали в расплавленном алюминии поверхность изделий в контакте с жидким алюминием подправляется и происходит образование интерметаллидного слоя. Который значительно влияет на прочность сцепления двух металлов. Он становится более хрупким.

## **1.5 Напыление**

Металлизация металлов или напыление это процесс нагрева до жидкого состояния наносимого материала и его перенос в виде частиц на поверхность детали [2].

"Первым изобретателем способа металлизации распылением является М. Шооп. Он имел патенты в Германии, Швейцарии, Франции и Англии (1900 – 1912 гг.). М. Шоппу после многочисленных опытов в 1912 г. удалось совместно с Харкенратом получить металлический слой, напыленный ручным пистолетом (рисунок 5).

Наблюдая выстрел из охотничьего ружья, он заметил, что свинцовая пуля оказывалась плотно вдавленной в каменную стену. Там, где две пули попадали рядом, они соединялись. Далее опытным путем он установил, что,

если вместо твердых металлических частиц применить расплавленные, то сцепление будет лучше. В этих опытах распыление еще не было совершенным, поэтому последующие опыты он проводил с кольцевыми соплами" [2].



Рисунок 5 - Первый способ металлизации предложенный М. Шооп

"М. Шооп первый предложил электрическую дугу в качестве источника тепла для расплавления металла. В 1917 г. был изготовлен проволочный дуговой аппарат" [9].

"В 1900 г. в США был выдан патент на первый аппарат для порошковой металлизации. Однако плотного и прочного покрытия получить не удавалось, так как порошок распылялся только в холодном состоянии. Лучших результатов достигли при подогреве напыляемых частиц металлического порошка. М. Шооп также пошел по пути напыления металлических порошков и в 1921 г. создал аппарат модели PG, который явился прототипом современных металлизационных аппаратов" [9].

"До истечения срока действия основного патента, взятого М. Шоопом, фундаментальных исследований по разработке технологии и установлению

границ применения процесса не проводили. Вследствие этого процесс очень мало применяли в промышленности. В первые годы после появления способа специалисты часто отклоняли этот процесс в целом. По-видимому, это вызывалось в основном незнанием границ его применения, отсутствием обоснованных технологических режимов и недостаточно надежной (безопасной) работой газовых металлизационных аппаратов. В первых аппаратах смешение горючего газа и кислорода происходило непосредственно по выходе газов из сопла. Горючий газ и кислород подавали под равным давлением. При неточной работе редукторов происходило перетекание кислорода в ацетиленовые шланги и наоборот. Обратные удары пламени часто вызывали воспламенение шлангов и даже взрывы баллонов. Для уменьшения этой опасности создавали различные устройства, позволяющие регулировать давление, но использовали это только для сварочных горелок, а не для металлизационных аппаратов".

"С 1952 г. выпускаются только инжекторные газовые аппараты, безопасные от обратных ударов пламени. Способ напыления металлов вначале применяли для защиты от коррозии. Во Франции, например, уже в 1920 г. более крупные стальные конструкции напыляли цинком. Значительно позднее установили, что в целях повышения износостойкости возможно напыление сталью опорных частей валов. Впервые такую работу провели в 1936 г. Металлизация втулок и подшипников скольжения была осуществлена в 1941 г. Напротив, нанесение металлических покрытий для декоративных целей и экранирования применялось уже с момента появления процесса. Керамические изоляторы высокого напряжения уже в 1918 г. покрывались медью и алюминием. После 1945 г. было проведено много фундаментальных исследований, сконструированы новые безопасные в работе и производительные аппараты и разработаны технологические режимы. К 1950 г. это вызвало во многих странах стремительное развитие техники металлизации" [10].

На данный момент формирование покрытия напылением представляет собой современный высокотехнологичный способ нанесения металлов широкого спектра. В основе этого метода лежит нагрев напыляемого металла и перенос на поверхность. Так как принципиальная схема напыления для всех способов одинакова она изображена на рисунке 6, их подразделяют на две основные категории.

Первый включает в себя процессы, в которых для создания тепловой плазмы используется электрическая дуга, которая используется для нагрева материала, когда он движется к подложке, подлежащей покрытию. Второе включает сгорание смеси горючего газа (пропан, ацетилен, водород или азот) и кислорода или воздуха, чтобы обеспечить необходимую тепловую и кинетическую энергию, необходимую для расплавления и переноса частиц материала к подложке. Процессы сгорания могут быть прерывистыми, такими как процесс детонационной пушки, или непрерывными, как в случае процессов высокоскоростного термического напыления [11].

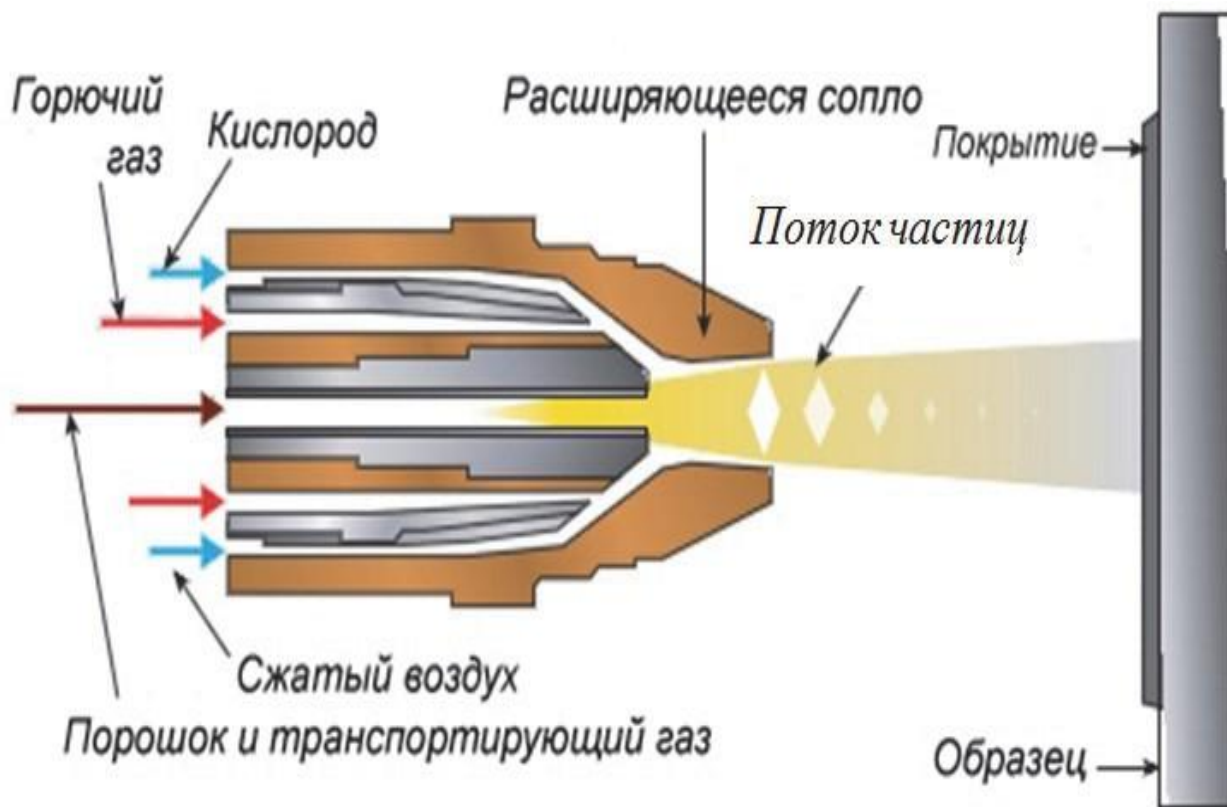


Рисунок 6 - Схема термического напыления материалов

## 1.5.2 Плазменное напыление

Процессы плазменного напыления можно разделить на три основных категории; обычная воздушная плазма, высокоэнергетическая плазменная и плазменная обработка в вакууме. Все эти процессы основаны на одном и том же принципе, хотя выбор процесса и изменения параметров процесса могут оказать существенное влияние на полученную структуру и свойства покрытия.[12] Схематическое изображение типичного воздушного плазменного металлизатора представлено на рисунке 7

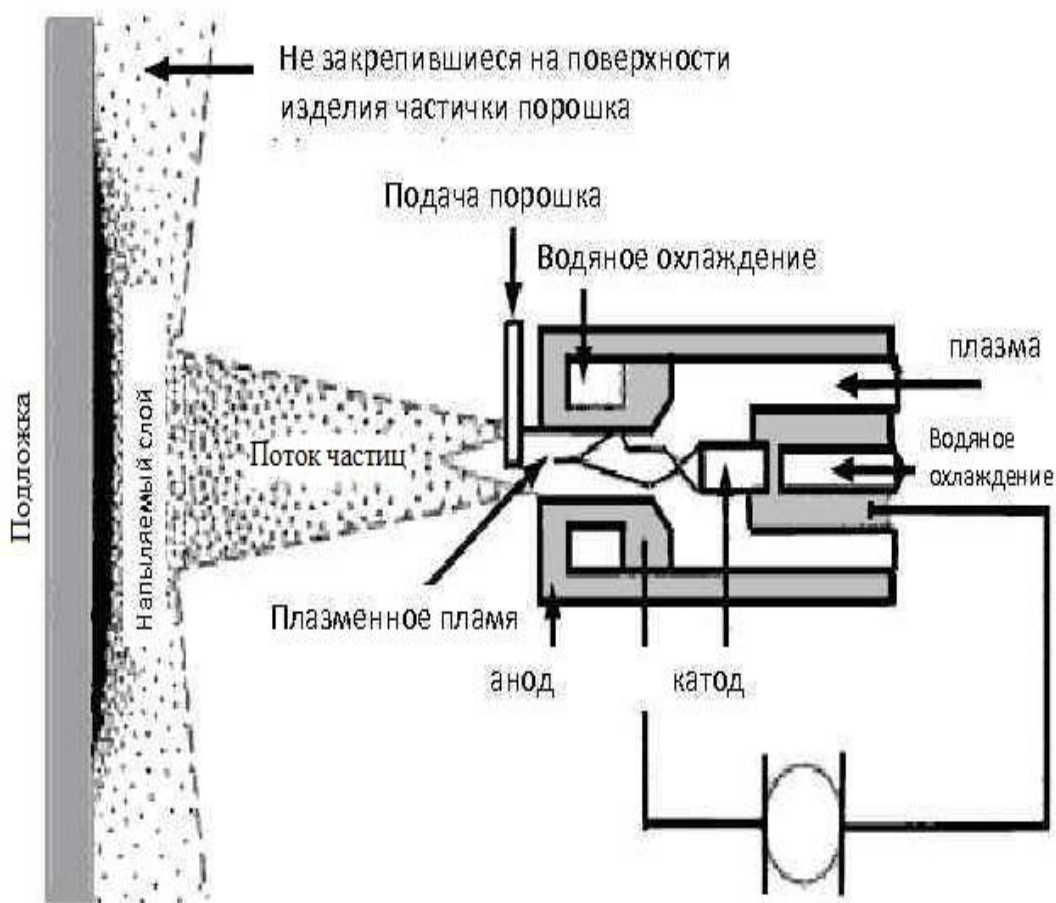


Рисунок 7 Схема плазменного напыления материалов

Металлизатор работает по принципу повышения энергетического состояния газа, пропуская его через электрическую дугу постоянного тока, обычно создаваемую между анодом из вольфрама и медного катода. Когда



молекулы газа (такие как H<sub>2</sub> или N<sub>2</sub>) проходят через дугу, диссоциируют и ионизируются, освобождая свободные электроны. Эти электроны и оставшиеся положительные ионы ускоряются по направлению к аноду и катоду соответственно. Полученные ускоренные частицы сталкиваются с нейтральными атомами или молекулами в газе, диссоциируя молекулы и ионизируя отдельные атомы, в следствии чего процесс продолжается. В результате получается ионизированный газ, в которой энергия электронов преобразуется плазменное пламя [11]. Именно в этот момент материал покрытия, суспендированный в газе-носителе, впрыскивается в плазму и затем нагревается и движется с высокой скоростью к заготовке. Отмечают, что на практике небольшое количество вторичного газа, такого как водород или гелий, смешивается с первичным плазменным газом для увеличения рабочего напряжения и тепловой энергии.

Газы выходят из пистолета со скоростями от 200 до 500 м/с, в зависимости от проходного отверстия сопла, уровня мощности и расхода газа, а скорость удара частиц, как известно, зависит от этих составляющих. Температуры, достижимые в плазменном пламени, зависят от используемых газов, от 4000- 8000 К с водородом и азотом, до 15000К с аргоном, 20000К с гелием. Известно, что азот и водород являются очень эффективными нагревательными средами, но гораздо более высокий износ сопла компенсирует их хорошие термические свойства и низкую стоимость. Наиболее часто используемый дуговой газ - это 90% Ar / 10% H<sub>2</sub>, который обеспечивает достаточный теплообмен для большинства материалов без чрезмерного износа сопла. Однако для очень высоких температур используется смесь 60% Ar / 40% He [13].

В любом случае, ясно, что достижимые температуры значительно превышают температуру плавления любых известных материалов, наиболее важные рабочие параметры, которые определяют плотность покрытия и адгезию, включают; тип сопла, давление и расход газа, уровень мощности, скорость подачи порошка и расстояние распыления. Другой важной

переменной является тип материала материала покрытия, а также размер и форма переносимых частиц. Например, более мелкий размер частиц обычно приводит к более плотному покрытию и более гладкому «напыляемому» поверхностному слою, но слишком маленький размер к перегреву частиц и, возможно, даже к испарению. Мелкие порошки могут распыляться только с низкой скоростью, а в случае оксидов и карбидов могут наноситься только в виде относительно тонких покрытий без потери прочности связи, тогда как слишком грубые частицы не будут эффективно нагреваться плазмой и могут упасть от пламени или отскочить от подложки. Размер частиц обычно находится в диапазоне от  $12 \pm 5$  мкм для мелких порошков до  $60 \pm 15$  мкм для грубых порошков [13].

#### *Высокоэнергетическое плазменное напыление*

Этот способ позволяет достичь значительно более высоких температур нагрева материала благодаря более стабильной, более длинной дуге и более высокой плотности, мощности в сопле. Дополнительная мощность (в три раза выше мощности обычного плазменного процесса) и расход газа (в два раза выше) обеспечивают большую область металлизированной струи с более высокой температурой и уменьшенным содержанием воздуха. Это приводит к улучшению плавления материала, уменьшению количества нерасплавленных частиц и высокой скорости удара частиц с подложкой [13].

#### *Плазменное напыление в вакууме*

При вакуумном плазменном напылении обычный плазменный металлизатор находится в вакуумной камере (рисунок 8) при давлениях в диапазоне 10-50 кПа (0,1-0,5 атм). При этих пониженных давлениях плазма увеличивается в диаметре, длиннее и имеет более высокую скорость. Сочетание более высокой скорости частиц, отсутствия кислорода и способность работать при более высоких температурах подложки приводит к получению более плотных, более прочных адгезионных взаимодействий покрытий с подложкой, с гораздо более низким содержанием оксида. Плазма также может быть использована для очистки подложки на месте, улучшая

тем самым адгезию слоя покрытия. Основным недостатком вакуумного плазменного напыления является высокая стоимость [14].



Рисунок 8 - Установка плазменного напыления в вакуумной камере

### 1.5.3 Высокоскоростное напыление

Процесс сгорания высокоскоростного кислородного топлива расширяет принцип процесса детонационного метализатора, обеспечивая непрерывное осаждение покрытий. Изобретенный Браунингом в середине 1980-х годов, процесс метализации основан на внутреннем сгорании топливной жидкости (газ или распыленная жидкость) и кислорода, создающих пламя с максимальной температурой между 2500-3000°C, в зависимости от переменных сгорания. Этот процесс происходит при очень высоком давлении в камере сгорания, и пламя выходит из пистолета через сопло малого диаметра, создавая гиперзвуковые скорости газа, более чем в пять раз превышающие скорость звука [15].

Из-за присущих проблем в материалах для плазменного напыления, таких как склонность к реакциям обезуглероживания, большой интерес был

проявлен к использованию процессов с более низкой температурой и более высокой скоростью напыления, которые уменьшают вероятность нежелательного образования оксида. Этот интерес привел к разработке и совершенствованию высокоскоростных процессов напыления, обеспечивающих покрытия с очень высокой плотностью, низким остаточным напряжением. Есть два основных типа высокоскоростных процессов напыления, детонационное напыление и непрерывное напыление [15].

Высокоскоростное напыление состоит в образовании покрытия путем динамического осаждения на основном материале расплавленных или оплавленных капель или частиц напыляемого материала, образующихся при нагреве материала прутка или проволоки различными источниками нагрева. Разнообразие способов напыления обеспечивает получение покрытий, значительно отличающихся по своим свойствам.

#### *Детонационное распыление*

Детонационное распыление было разработано и реализовано компанией Union Carbide в начале 1960-х годов. Процесс был назван D-Gun и схематично проиллюстрирован на рисунке 9.

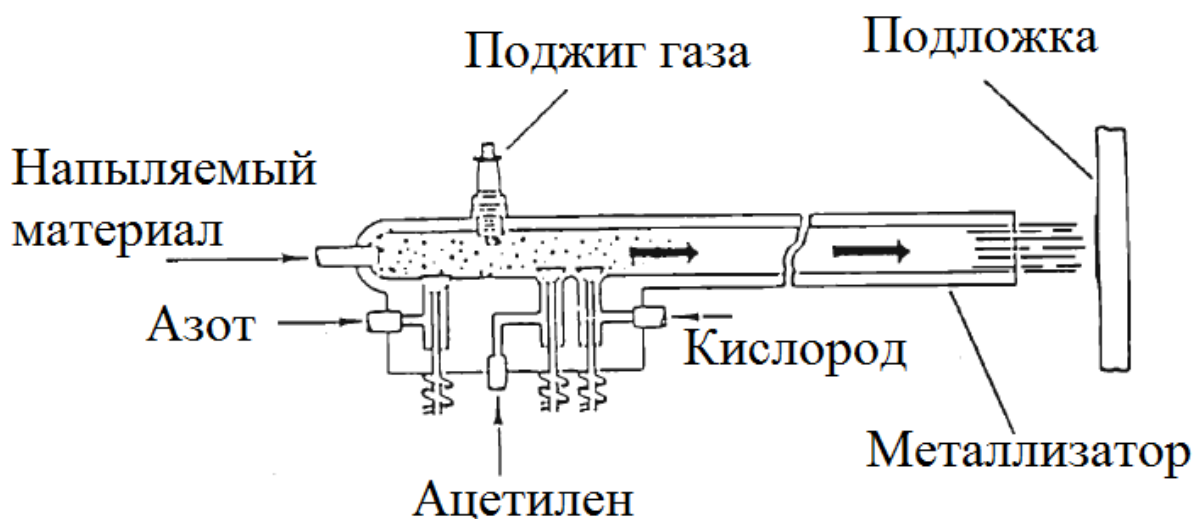


Рисунок 9- Metallizator для детонационного распыления

Принцип этого процесса - смешивание кислорода и ацетиленового топлива в детонационной камере, циклический впрыск топлива, подача материала и последующее воспламенение газа / порошка. Воспламенение производит фронт пламени, который ускоряется до сверхзвуковой детонационной волны, нагревая и продвигая частицы к материалу подложки со скоростью приблизительно 750 м/с. Такие высокие скорости и относительно низкие температуры приводят к более высокой плотности покрытий с меньшим разложением карбида [16].

#### *Распыление горением (HVOF и HVAF)*

Процесс сгорания высокоскоростного кислородного топлива расширяет принцип процесса детонационного напыления, обеспечивая непрерывное нанесение покрытий. Изобретенный Браунингом в середине 1980-х годов, процесс основан на внутреннем сгорании горючей жидкости (газ или распыленная жидкость) и кислород, создающих пламя с максимальной температурой от 2500°C до 3000°C. Этот процесс происходит при очень высоком давлении в камере сгорания, и пламя выходит из металлизатора через сопло малого диаметра, создавая гиперзвуковой поток газа, более чем в пять раз превышающие скорость звука. Распыляемый материал может подаваться в устройство в осевом направлении или в радиальном направлении через сопло, расплавленные частицы ускоряются слабыми газами до скоростей, приближающихся к 1400 м/с. Подобно покрытиям для детонационных пистолетов, покрытия полученные способом высокоскоростного напыления обычно имеют более высокую плотность и содержат меньше признаков окисления по сравнению с обычными покрытиями для плазменного напыления [16].

Порошковый материал может подаваться в осевом направлении в устройство или в радиальном направлении в сопло, и частицы ускоряются пламенными газами до скоростей, приближающихся к сравнению процессов HVOF, Торп и Рихтер описывают ряд конструкций горелок HVOF и связанные с ними преимущества и недостатки. Это сравнение также служит

приблизительным хронологическим руководством к разработке методов HVOF. Одним из самых ранних разработок была горелка с водяным охлаждением горла, разработанная Смитом. Этот блок, не имел отдельной камеры сгорания как таковой, но работал по принципу поддержания зоны сгорания в задней части горелки. В эту область порошок впрыскивают в осевом направлении и затем ускоряют в потоке сгорания. Преимущества были отмечены как снижение потерь тепла и высокая тепловая эффективность (приблизительно 80%). Недостатки включали ограниченное давление в камере и, следовательно, скорость частиц порошка [13].

#### **1.5.4 Газопламенное напыление**

Газопламенный способ напыления является самым старым из перечисленных но до сих пор не утратил своей популярности из за своей простоты. Для обеспечения работы нет необходимости использовать дорогостоящие установки, необходим только подвод смеси горючего газа и сжатого воздуха. В отличие от остальных способов он мобилен и имеет самые высокие показатели производительности и толщины покрытия.

Газопламенное напыление - это процесс нагрева металла, в виде проволоки или порошка, до жидкого состояния, и его перенос, струей сжатого воздуха на поверхность детали. Напыляемый материал расплавляется в пламени газовой горелки при сжигании горючего газа (обычно это ацетилено или пропано кислородная смесь). Перенос расплавленных частиц осуществляется воздушной струей высокого давления. При переносе металла, происходит ударное столкновение и деформация. В последствии чего, переносимые частицы металла принимают форму поверхности детали и соединяются с ней [17].

Формирование покрытия последовательным напылением расплавленных частиц, с высокой скоростью деформации и охлаждения приводит к образованию между частицами, слоями, покрытием и подложкой

полостей (рисунок 10). Толщина покрытия составляет 1-2 мм. На поверхности защищаемого металла образуется пористое покрытие, пористость может быть открытой или закрытой (локализованной) [2].



Рисунок 10 - Структура покрытия полученного газопламенным напылением

Открытая пористость характеризуется слиянием отдельных пор, которые пронизывают всю толщину покрытия, закрытая пористость имеет замкнутый характер, не влияет на проницаемость покрытия. Локализация пористости достигается увеличением толщины покрытия. Рост толщины покрытия сопряжен с увеличением в нем внутренних напряжений и вследствие этого с увеличением толщины покрытия снижается адгезионная прочность сцепления его с основой.

Газотермическое напыление наиболее рационально применять для нанесения защитных покрытий на крупногабаритные изделия и конструкции в собранном виде. В качестве материала покрытия чаще всего применяют цинк и алюминий, однако можно напылять любые металлы на подложку из любого материала. Защитные свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом газотермического напыления, определяются наличием сквозной

пористости, адгезионной прочностью сцепления с основой, видом и степенью агрессивности среды и способностью металла покрытия образовывать в условиях эксплуатации трудно растворимые и плотные продукты коррозии. Во многих агрессивных средах (например, в морской воде) электрохимический потенциал алюминия более электроотрицателен, чем сталь. Поэтому сначала корродирует покрытие, его продукты коррозии забивают поры и в значительной степени замедляют коррозионный процесс [9].

Значительная шероховатость и поверхностная пористость покрытий, нанесенных методом газотермического напыления, приводит к накоплению на его поверхности агрессивных агентов, что способствует ускорению его разрушения. В связи с этим такие покрытия практически не применяются без дополнительной пропитки лакокрасочными материалами. Эти покрытия обеспечивают достаточно высокую долговечность за счет большой толщины и хорошей адгезии [18].

Каждый из способов уникален, и позволяет решать определенные задачи в получении покрытий на деталях различных назначений. К примеру применение плазменного и электродугового напыления позволило технологиям шагнуть далеко вперед, благодаря возможности получения на многих материалах тонких чистых слоев. Широкое применение они нашли в производстве дискретных полупроводниковых приборах, микросхемах и другой продукции электроники, а так же в космической отрасли (рисунок 11). Так же данным способом возможно производить модификацию свойств поверхности, используя различные методы обработки [9].





Рисунок 11 - Детали с покрытием, полученным плазменным напылением

При напылении способом высокочастотной металлизации не происходит выгорания легированных элементов. В качестве энергии расплавляющий материал для нанесения покрытия используется высокочастотный индуктор, питание которого осуществляется током 200-300кГц. Преимущества этого метода позволили закрепиться в ремонтных отделениях, так как малое пятно контакта струи метллизатора позволяет точно наносить материал в дефекты или задиры с небольшой скоростью. Таким способом восстанавливают поверхности головок клапанов автомобилей, радиаторы охлаждения и др( рисунок 12) [19].

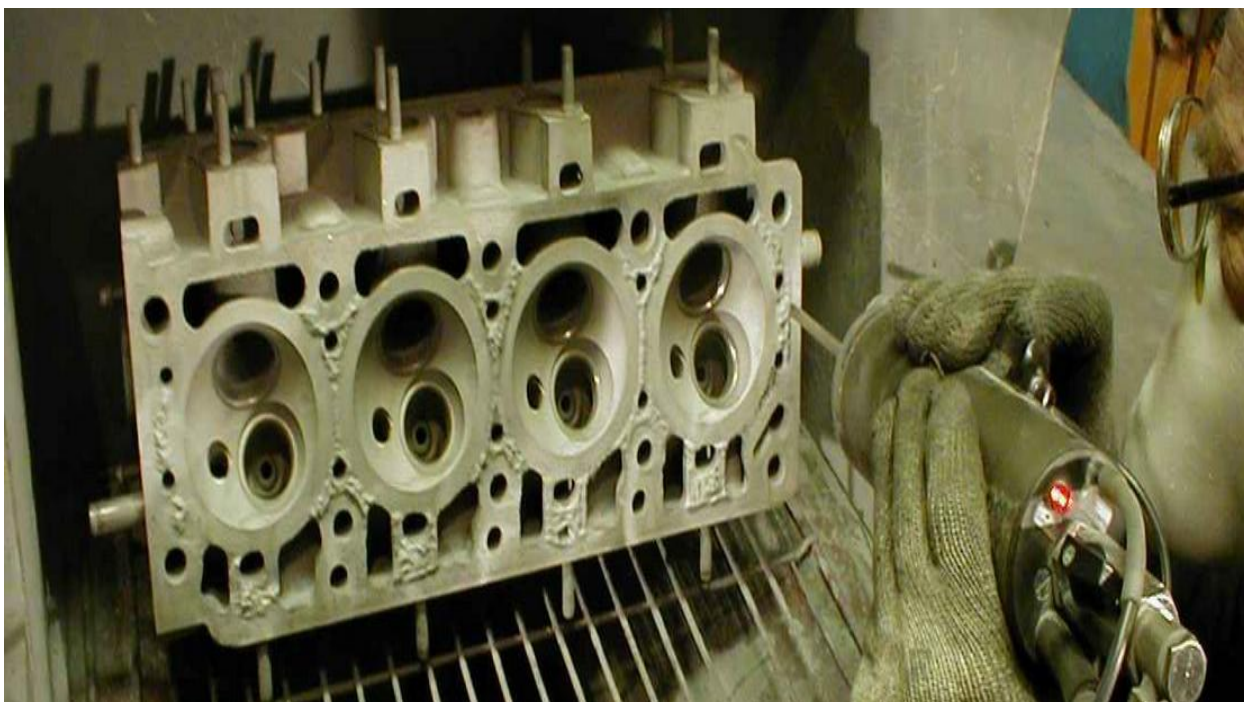


Рисунок 12 - Восстановление Г.Б.Ц. высокоскоростным напылением

Преимущества:

1. Напылением можно наносить различные покрытия на изделия из самых разнообразных материалов.
2. Струя металлизатора имеет пятно напыдения большой площади, что позволяет значительно увеличивать производительность при нанесении покрытий на детали больших площадей. Кроме того металлизатор находится на расстоянии 100-200 мм от детали, что позволяет получить покрытия на поверхностях со сложными формами.
3. Напыление является наиболее эффективным способом восстановления поверхности изношенных или поврежденных деталей. Максимально допустимая толщина при этом способе 2 мм.
4. При напылении покрытия, деталь не испытывает значительных изменений температуры, что сохраняет ее геометрические и механические свойства в отличие от других способов восстановления [20].

Процесс напыления значительно превосходит по производительности и незначительной трудоемкости аналогичные способы получения покрытий.

Проведя анализ указанных выше способов, было установлено, что наносить алюминиевое покрытие возможно всеми из перечисленных выше способов. Нанесение алюминиевого покрытия плакированием и сваркой взрывом, как было указано, имеет ряд существенных преимуществ перед другими способами, это прежде всего высокая производительность и однородность свойств покрытия. Промышленностью в полном объеме освоено производство биметаллов, данным методом, однако, недостаток плакирования и сварки взрывом - это ограниченная номенклатура изделий.

Метод жидкофазного алитирования достаточно производителен, но ограничивается размерами ванны в которую необходимо поместить детали.

Ввиду особенностей каждого способа был выбран наиболее целесообразный по экономическим показателям, а также исходя из производительности способ. Учитывались и такие характеристики как: прочность сцепления покрытия с основным металлом, наличие пористости в нанесенном покрытии, однородность химического состава покрытия и качество покрытия., простота нанесения покрытия, возможность нанесения покрытия на уже готовые детали.

В качестве способов нанесения были выбраны газопламенное напыление и алитирование погружением в расплавленный металл. Использование разных способов нанесения покрытий обусловлено сравнением двух способов так как качественные определяющие для двух способов являются одинаковыми.

Однако для широкого применения газопламенного напыления необходимо повысить прочность сцепления покрытия с подложкой а так же снизить процент пористости покрытия. Для этого проведен анализ способов предварительной и последующей обработки поверхности и полученного покрытия.

## 1.6 Анализ способов предварительной подготовки поверхности

### 1.6.1 Абразивно-струйная обработка

Обеспечение прочного взаимодействия покрытия с основным металлом производится самыми разнообразными способами. Использование их ограничивается лишь геометрическими параметрами самих деталей. Самым распространенным методом подготовки поверхности стала абразивно-струйная обработка.

Сущность данного способа очистки поверхности от различных загрязнений заключается в обработке поверхности струей мелких частиц (абразив) подающимися на деталь из сопла пескоструйного аппарата (рисунок 13).

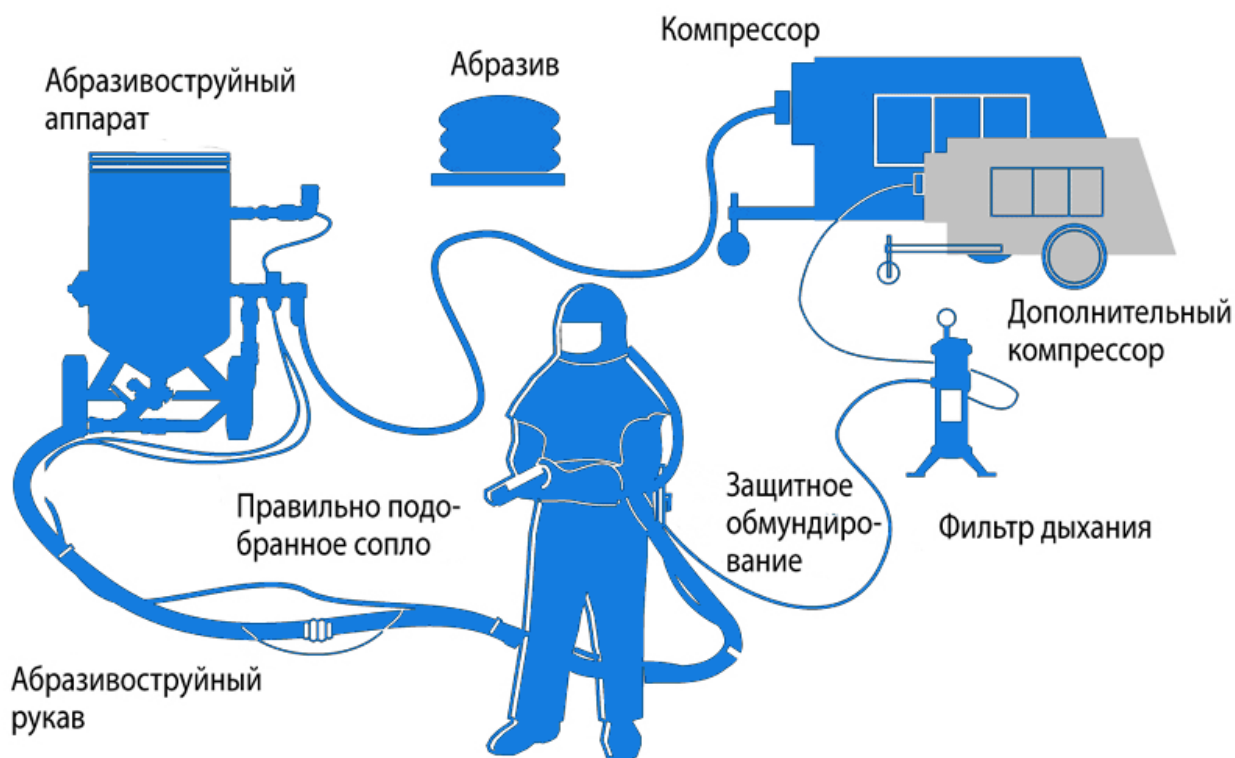


Рисунок 13 - Принципиальная схема абразивно-струйной обработки

Абразив обладая кинетической энергией передаваемый от давления сжатого воздуха, созданным в камере абразивно- струйного аппарата при

соударении с обрабатываемой поверхностью производит сьем загрязнений. В зависимости от давления аппарата возможно производить регулировку степени очистки поверхности. Действие абразивных зерен на поверхность непродолжительно и наносит ударно импульсный характер что приводит не только съему загрязнений, но и пластической деформации элементарных участков поверхности. При суммарном взаимодействии происходит увеличение диффузии атомов поверхности или ее активация, и происходит не только механическое но и молекулярное сцепление частиц [21].

Применение абразивно-струйной обработки нашло достаточно широкий диапазон в самых разнообразных областях машиностроения. С его помощью производится очистные работы, финишные -удаление следов механической обработки (такие как точение, фрезерование) а так же шлифование и полирование (рисунок 14).



Рисунок 14 - Очистная абразивно-струйная обработка

Не маловажным фактором большой популярности этого способа является сохранение геометрических размеров детали после обработки

Детали прошедшие обработку абразивом имеют на своей поверхности остаточное напряжение сжатия от поверхностного наклепа после соударения с абразивом. Однако следует отметить что в напыленном покрытие

присутствуют остаточные напряжения растяжения. Тем самым напряжения сжатия снижают фактор влияния усталостной прочности. Причем при увеличении значения остаточных напряжений сжатия на поверхности после обработки абразивом, тем выше усталостная прочность подложки и покрытия. Поэтому предварительная подготовка абразивно-струйным методом необходима для повышения прочности сцепления при газопламенном напылении.

Использование различных абразивных материалов позволяет создавать на поверхности индивидуальный рельеф. Состоящий в основном из рисок направленных в разные стороны или пересекающие друг друга, впадин различной глубины (рисунок 15). В сумме они позволяют получить шероховатость необходимую для прочной связи частиц напыляемых газопламенным методом.

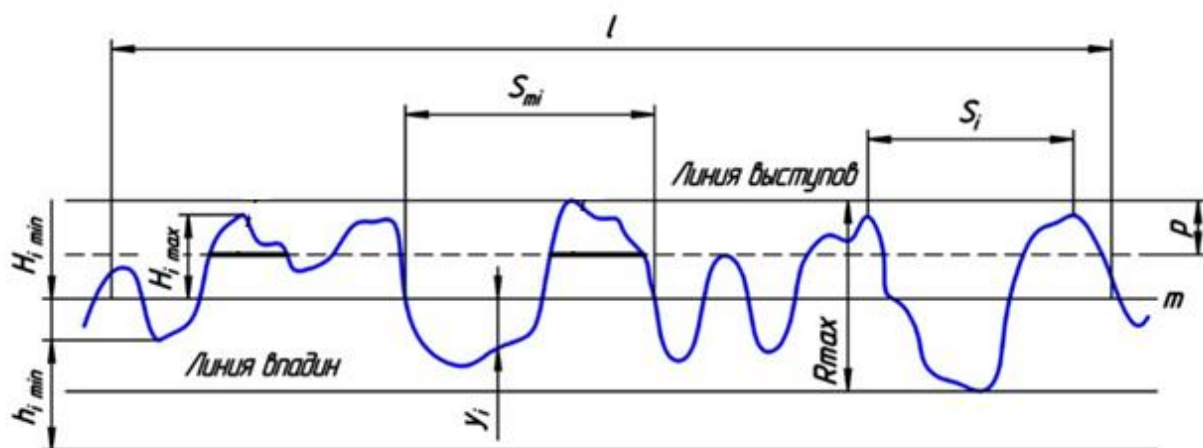


Рисунок 15 - Профиль детали после абразивной обработки

Для активации поверхности перед напылением рекомендуется использовать следующие абразивы:



Рисунок 16 - Кварцевый песок

Кварцевый песок (рисунок 16) - самый распространенный абразив в мире . Его достоинства доступность и дешевизна. Однако для его использования необходимо применять специальные системы пылеподавления или производить работы в камерах закрытого типа. Недостатком данного абразива является значительный расход, и невозможность повторного использования.



Рисунок 17 - Никельшлак

Никельшлак (рисунок 17) - абразивный порошок, полученный как результат переработки шлака никелеплавильного производства. Следствием этого является его низкая цена. Никельшлак в отличии от кварцевого песка возможно использовать до 3 раз.



Рисунок 17 - Электрокорунд

Электрокорунд (рисунок 17) - относится к числу сверхтвердых материалов. Состав электрокорунда на 99% выполнен из оксида алюминия и лишь 1% примесей. По твердости электрокорунд уступает на 1 единицу по шкале Мооса, только алмазу. Его зерна имеют режущие кромки острой формы, что позволяет им самозатачиваться во время работы, а следовательно позволяет использовать его неоднократно. Кроме того электрокорунд значительно повышает время обработки .





Рисунок 18 Стальная дробь

В абразивно-струйной обработке так же нашла применение стальная дробь (рисунок 18). При обработке ей, на поверхности происходит не только очистка но и нанесения ярко выраженных насечек, за счет того что гранулы дробы имеют форму ломанного многогранника с острыми краями обеспечивая тем самым высокую адгезию наносимых на нее частиц. Высокая твердость а также форма граней позволяет использовать его многократно.

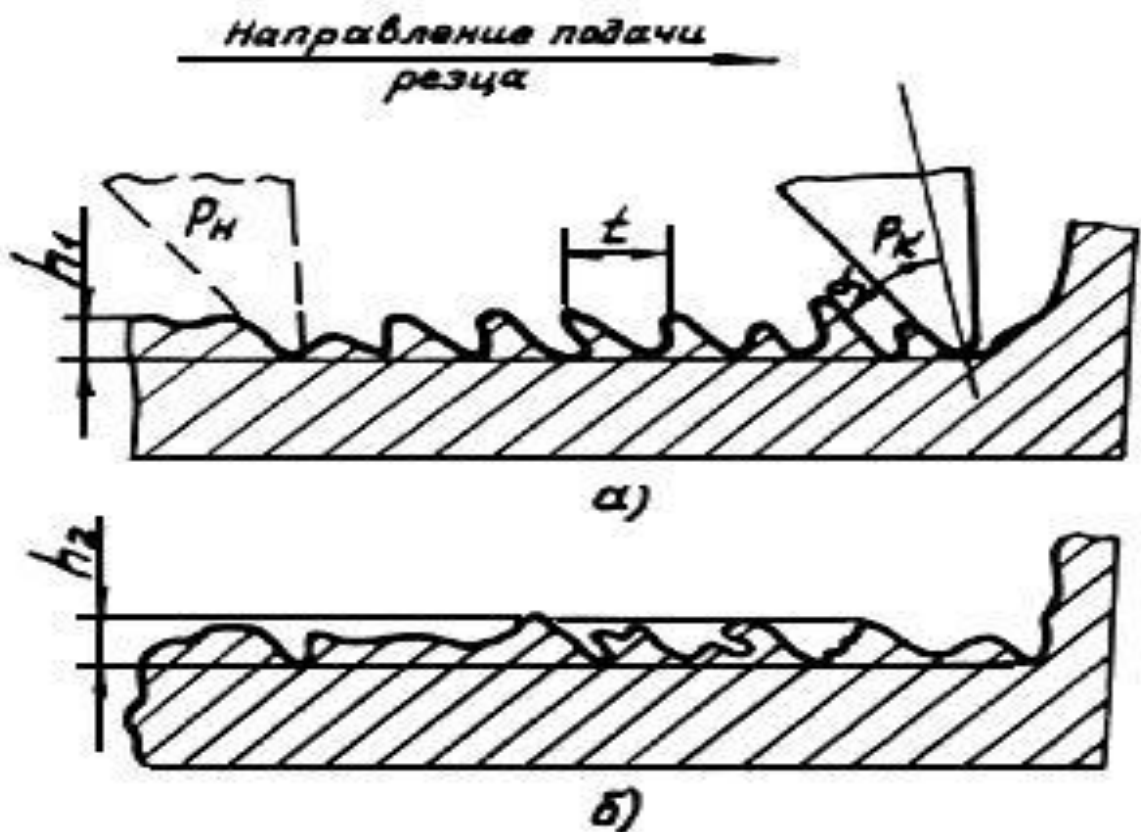
Однако высокая стоимость таких абразивов как электрокорунд и стальная дробь не позволяет использовать их повсеместно. И экономически не выгодно использовать данный абразив в открытых камерах или площадках, без возможности использовать вторично.

### **1.6.2 "Рванная" резьба**

Еще одним не менее часто используемым методом подготовки поверхности под напыление покрытий, является механическая обработка в токарном или фрезерном станке, с целью получения на поверхности, сложного профиля - "рванной" резьбы. Нарезание "рванной" резьбы позволяет обеспечить достаточную прочность сцепления при низких значениях усталостной прочности, получаемых после образования концентраторов напряжения на поверхности. Исходя из этого детали

подверженные условиям циклических нагрузок необходимо дополнительно пластически деформировать, применяя способ абразивной обработки. Так как оно придает изделиям большую усталостную прочность. А при совместной обработке, снижения прочности сцепления будет компенсироваться за счет увеличения площади контакта частиц покрытия и основного металла в профиле рваной резьбы.

Нарезание "рваной" резьбы осуществляют для подготовки поверхности в основном деталей цилиндрической формы. Однако небольшие плоские поверхности так же возможно обработать в патроне токарного станка, применяя при этом нарезание канавки с резьбовым профилем по спирали Архимеда.



а- профиль, обеспечивающий хорошее сцепление напыленного слоя с основным металлом; б- неудовлетворительный профиль;  $P_n$ - положение резца в начале обработки;  $P_k$ - положение резца в конце обработки;  $t$ - шаг резьбы;  $\alpha$ - угол наклона оси резца относительно оси детали;  $h_1, h_2$ - глубина резьбы

Рисунок 19 - Профили "рваной" резьбы

Выборка металла с целью получения профиля "рванной" резьбы осуществляется резбонарезным резцом основные геометрические параметры которого : угол при вершине - 55-60°, передний угол -0° по ГОСТ 153-75. Резец необходимо закрепить в резцедержателе так что бы линия режущей кромки была ниже оси вращающейся детали. Вылет резца обеспечить с максимально возможным, позволяющую надежную фиксацию в пазе резцедержателя. Тело резца при значительном вылете не справляется с нагрузками действующими на него во время резания вследствие чего резец вибрирует и поверхность получается не ровная с наличием на ней задиров (рисунок 19).

Обработка производится за один раз на необходимую глубину, которая зависит от толщины напыляемого слоя и равна 0,3-0,5 мм. Шаг резьбы берется в пределах 0,75-1,50 мм. Основные параметры нарезания "рваной" резьбы приведены в таблице 1 [22].

Таблица 1 - Основные параметры нарезания "рваной" резьбы

Диаметр детали, мм	Смещение резца ниже центра, мм	Частота вращения шпинделя, с
1	2	3
10	1,0	31,4
15	1,5	22,0
20	2,0	15,7
25	2,5	14,0
30	3,0	10,0
40	3,0	7,8
45	3,0	7,3
50	3,5	6,3
75	4,0	4,7
100	4,5	3,2

Продолжение таблицы 1 - Основные параметры нарезания "рваной" резьбы

1	2	3
150	5,0	2,1
250	7,5	1,4
300	9,0	1,0
350	11,0	0,9
400	13,0	0,7
450	15,0	0,6

Для предотвращения загрязнения профиля обработанной поверхности нарезание производится без охлаждения и смазки.

В месте с нарезанием "рваной" резьбы на поверхность рекомендуется наносить насечки применяя накатные ролики.

### **1.6.3. Накатка**

Накатка это процесс формирования на поверхности вращающейся детали определенного профиля. Накатка осуществляется вдавливанием более жесткого ролика (рисунок 20) в тело более мягкого, и в следствии поверхностной деформации происходит формирование рисок, сетки, насечки или резьбы. В ходе токарной накатки на поверхности происходят деформации способствующие образованию наклепа и как следствие увеличение усталостной прочности.



Рисунок 20 - Накатка с двумя косозубыми роликами

Выполняя последовательно две операции будет производиться прикатка вершин резьбы, тем самым получая замковый профиль (рисунок 21), и увеличивая механическую прочность сцепления покрытия с основным металлом.

Для напыления наиболее подходит косая сетчатая накатка, кроме того она является самой простой по исполнению. Врезание роликов осуществляется за два оборота детали, при этом движение продольной подачи не осуществляется.

Кроме этого разработан достаточно перспективный метод предварительной обработки поверхности в котором сначала нарезается рванная резьба, а затем с помощью накатного ролика производится формирование полугибовидного участка.

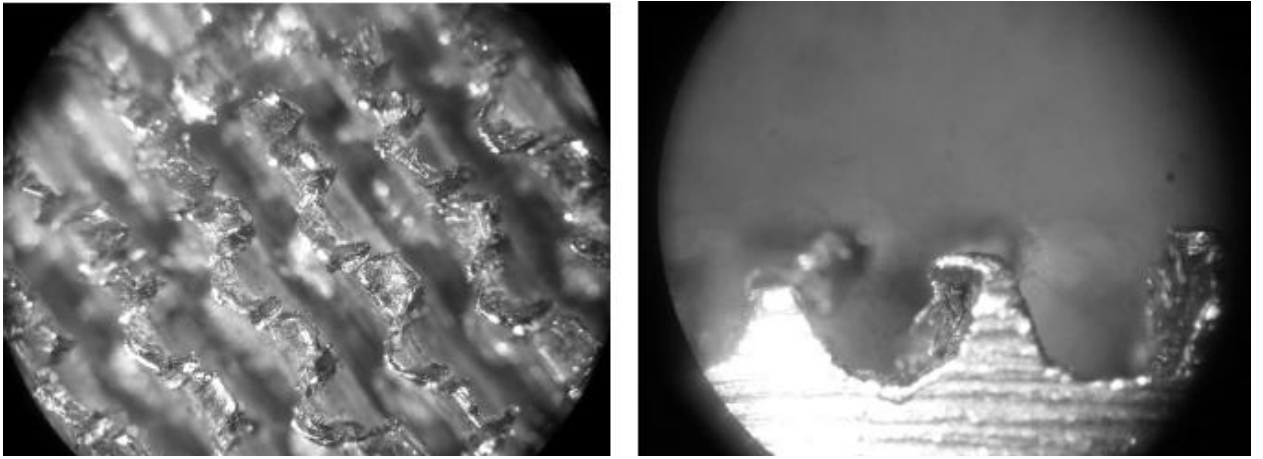


Рисунок 21 - Внешний вид профиля рванной резьбы после накатки

В данном исполнении накатка представляет собой цельный диск, на котором выполнены конические выступы в шахматном порядке а по центру расположен сквозной паз (рисунок 22).

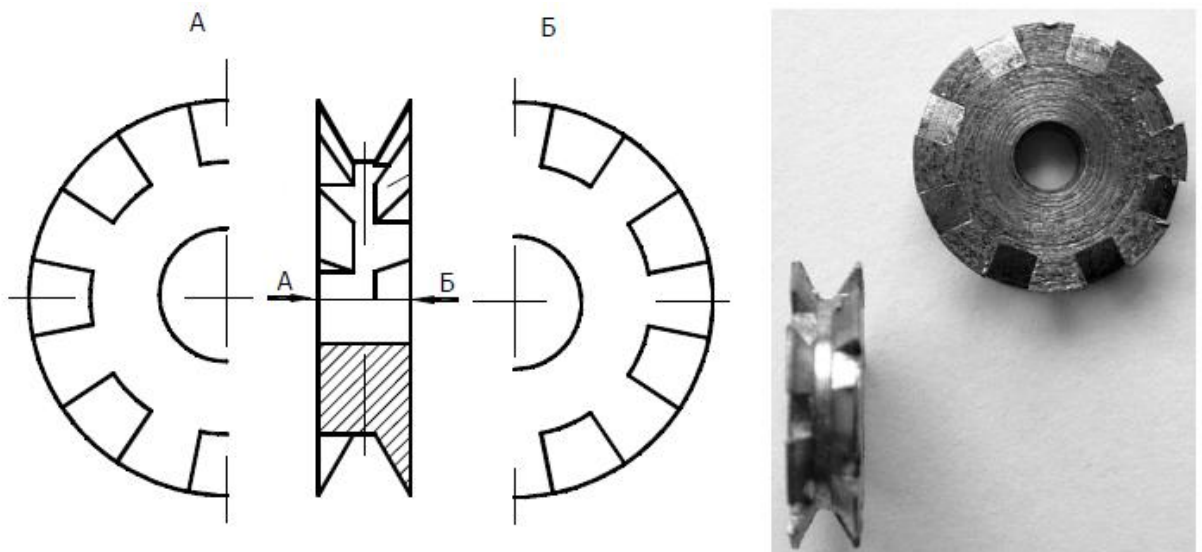


Рисунок 22 - Внешний вид накатки

Благодаря такой конфигурации, диск, располагают на резьбе так что бы профиль резьбы находился между выступами. В таком случае диск во время вращения детали будет проходить во всей длине профиля резьбы и с определенным шагом образовывать полугрибовидные участки (рисунок 23).

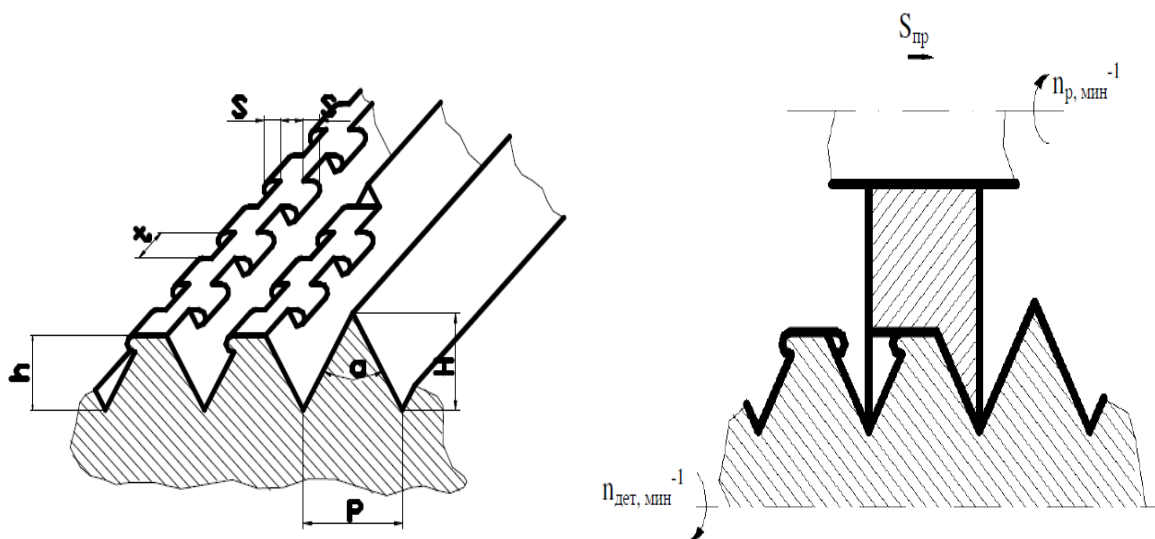


Рисунок 23 - Профиль рванной резьбы после накатки

Особое внимание следует уделить установке подобной оправки с описанным выше диском в резцедержатель токарного станка, строго перпендикулярно оси детали, а прокатку необходимо выполнять на тех же режимах что и рванную резьбу. Значительное повышение прочности сцепления происходит благодаря тому что вершины профиля резьбы пластически деформируются повышая тем самым усталостную прочность [23].

Все выше перечисленные способы относились к механическим, то есть процессы при которых разнообразным образом изменяется поверхность детали.

#### 1.6.4 Обезжиривание

Обезжириватели решают четыре задачи :

1. Они должны проникнуть через поверхность загрязнений.
2. Смочить поверхность металла.
3. Помочь всплыть, эмульгировать или диспергировать жиры и масла.
4. Уйти и создать поверхность, чистую, на которой водная пленка не разрывается.

При этом они должны:

1. Не атаковать поверхность металла.
2. Не создавать опасных выделений или аэрозолей.
3. Быть легко смываемыми.

В настоящее время используется, в основном, два типа обезжиривателей – щелочные и кислотные. Щелочные обезжиривающие составы в настоящее время разработаны достаточно хорошо и применяются в значительном числе технологических процессов, где требуется предварительное получение чистой поверхности. По своему химическому составу все щелочные обезжиривающие составы делятся на три категории: [25].

- на основе чистых щелочей, при pH более 12;
- высокощелочные, pH 10-13;
- низкощелочные, pH 8-10.

#### *Щелочное обезжиривание*

Метод основан на том, что жиры животного и растительного происхождения в щелочных растворах расщепляются по эфирным связям, образуя растворимые в воде мыла, а сами щелочи сильно понижают поверхностное натяжение растворов (повышают смачиваемость поверхности). Минеральные жиры (нефтяные масла) не участвуют в реакциях омыления, но при определенных условиях под воздействием щелочных растворов могут образовывать водные эмульсии, и это облегчает их последующее отделение от поверхности металла. Щелочное обезжиривание к тому же производят при повышенной температуре. Под воздействием горячего щелочного раствора, содержащего эмульгаторы и вещества, понижающие межфазное натяжение на границе раствор-жир и раствор-металл, происходит разрыв жировой пленки, уменьшение ее толщины, образование отдельных капель масла и отрыв их от поверхности металла. При этом одновременно отделяются также мелкие механические загрязнения.



Обезжиривающие щелочные растворы обычно содержат два-четыре щелочных компонента (источники щелочности), поверхностно-активные агенты, кондиционеры воды, ингибиторы коррозии. В качестве щелочных компонентов применяются едкая щелочь, амины, кальцинированная сода, фосфаты и силикаты [25].

Однако преимущество щелочных растворов, связанное с быстрым превращением в мыла растительных и животных жиров и эффективным эмульгированием минеральных масел, понижением межфазного натяжения, является и их недостатком. Щелочные растворы проникают глубоко под коррозионные слои, в дефекты сварного шва и другие места; силикаты могут образовывать на поверхности металла тонкие пленки. Поэтому после стадии обезжиривания щелочными растворами обязательно требуется промывка. Отсюда - проблема переработки больших объемов разбавленных сточных вод, что делает подготовку поверхности значительно более громоздким процессом [8].

### *Травление*

Основная задача этой технологической операции – полное удаление с поверхности обрабатываемого металла даже следов оксидов. Хотя используемые при обезжиривании способы удаления жировых отложений и смазок позволяют удалить и часть оксидов, все же химические методы являются основными методами получения чистой поверхности. Кислоты для травления металла как правило применяются в виде раствора, составленными на основе серной, соляной, азотной или плавиковой кислоты.

Травление происходит в четыре этапа:

Этап 1. Пропитывание окалины кислотой, незначительное растворение оксидов, анодное растворение поляризованного металла на дне пор. Кислота проникает в несплошности и трещины слоя окалины и вызывает растворение нижнего слоя окалины, наиболее обедненного кислородом.

Этап 2. Наряду с медленным химическим и электрохимическим растворением оксидов (за этот период удаляется лишь 2-6% оксидов)

продолжается пропитывание окалины. Роль гальванической пары сталь-окалина еще меньше. В конце этапа возможно начало отложений продуктов коррозии в порах и трещинах оксидного слоя.

Этап 3 (главный). Он характеризуется быстрым электрохимическим разложением окалины. В середине этапа начинает выделяться водород вследствие взаимодействия кислоты с металлом, который разрыхляет и отрывает окалину. За этот период удаляется основная масса окалины (68-72%). Сталь растворяется преимущественно в результате работы пары 160 металл-окалина. Коррозия стали протекает с водородной деполяризацией макро катодов на ее поверхности. Ингибиторы замедляют этот процесс, но не процессы растворения окалины.

Этап 4. Происходит электрохимическое растворение остатков окалины при значительной катодной поляризации и отслаивании водородом магнетита и гематита.

Металл растворяется преимущественно вследствие работы электрохимических микро пар на его поверхности. Удаляются оставшиеся 25-30% окалине [26].

#### *Промывка*

Промывка после травления является обязательной операцией, поскольку операция заканчивает подготовку поверхности перед нанесением покрытий, а поверхность очень чувствительна к кислотности раствора. Поэтому необходимо свести к минимуму поступление веществ, портящих поверхность, а также постоянно или периодически уменьшать содержание основных мешающих веществ, проникающих из ванн травления (соляной кислоты и ионов двухвалентного железа). Основным методом борьбы с ними является организация эффективной промывки.

Так же промывка может использоваться как отдельная процедура подготовки поверхности в том случае когда поверхность детали уже очищена, от окалины, очагов коррозии и прочих загрязнений. Для этого

используются различные растворители такие как метилацетат, амилацетат, ацетон, а так же растворители 646 , 647 [26].

### **1.6.5 Предварительный подогрев**

Предварительный подогрев это проводимое перед каким либо процессом нанесения покрытия повышение температуры основного металла до необходимого значения, называемого температурой предварительного подогрева. При этом температура повышается локально или всего изделия. Подогрев может производиться как перед нанесением покрытия. Так и одновременно, как правило это применяется для массивных деталей, там где место нанесения покрытия имеет не большой участок взаимодействия и низкую скорость перемещения по периметру детали. Кроме этого сохраняется межслойная температура, т.е. температура основного металла в промежутки времени между первым и последним проходом, не должна опускаться ниже температуры предварительного подогрева[20].

Обеспечение термической активизации поверхности детали перед напылением или металлизацией. Напыление на поверхность детали близкого по составу металла, например сталь на сталь, ограничивает количество теплоты, передаваемое поверхностному слою напыляемой частицей. Получаемая при этом прочность сцепления часто невысока, так как в зоне контакта требуемая температура нагрева не достигается. Для увеличения тепловложения в зоне контакта наряду с нагревом присадочного материала используют дополнительный предварительный нагрев поверхности детали. Следует учитывать тот фактор то подогрев углеродистых сталей без защитной среды способствует активному окислению поверхности. Это происходит и при комнатных температурах однако процесс протекает достаточно долго поэтому человеческий глаз не способен сразу заметить изменения. Слой оксидной пленки который возможно рассмотреть без специальных устройств равен 2-5нм.

Оксидные пленки на поверхности затрудняют процесс взаимодействия частиц расплавленного металла, перенесенного металлизатором. И на поверхности детали они могут быть следствием сильного перегрева, так как превышение критической температуры приводит к активному развитию оксидной пленки. К такой поверхности расплавленные частицы не присоединяются. Потому как активировать поверхность с оксидного слоя необходимо затратить значительно больше энергии чем при активации чистого металла, а следовательно необходимо во много раз увеличивать температуру в контакте. Поэтому термическая активация в обычных условиях напыления (без защитной атмосферы) за счет подогрева подложки ограничена узким диапазоном температур.

Использование сопутствующего или последующего оплавления, обеспечивающего получение некоторого объема расплавленного металла в напыленном слое. При напылении контакт частиц между собой и с поверхностью детали осуществляется на относительно небольших по площади участках, что является одной из главных причин пористости полученного слоя. Воздействие на такой слой даже сравнительно низких динамических нагрузок может приводить к его отслоению. Для улучшения сцепления напыленных покрытий и повышения их прочности до уровня, близкого к прочности наплавленных слоев, напыленную поверхность можно подвергнуть дополнительному оплавлению как в процессе нанесения слоя, так и после его формирования [24].

Выбор способа предварительного подогрева строго индивидуален и рассматривается из таких показателей как толщина детали, её габариты, максимальная температура подогрева а так же экономическая эффективность от использования имеющегося оборудования.

Например, небольшие узлы эффективнее всего нагревать в печи. Однако крупные конструкционные компоненты часто требуют применения рядов нагревательных горелок, электрических пластинчатых радиаторов или индукционных или лучистых нагревателей.

Во время подогрева углеродистой стали высокая точность обычно не требуется. Хотя при этом по-прежнему важно, чтобы изделие достигло минимальной температуры, эту температуру можно без вреда превысить примерно на 40°C.

Как известно, для создания прочной адгезионной связи напыляемого покрытия и основного металла, с поверхности детали необходимо удалить все виды загрязнений. Они подразделяются на два основных вида; органические и неорганические. Для удаления большинства загрязнений применяется механическая очистка, щеткой или тканью в моющем растворе.

На данный момент существует большое количество способов и средств для очистки поверхности, выбор которого зависит за частую от экономической составляющей и необходимой чистоты получаемой поверхности.

## 1.7 Диффузионный отжиг

Алюминиевые покрытия нанесенные на сталь газопламенным способом, содержат порядка 25-30% пор и оксидных включений.

Термическая обработка позволяет значительно снизить или полностью исключить нежелательные включения. Однако в процессе термической обработки сталей с нанесенным на них покрытием алюминия, кроме перестроения покрытия так же происходит проникание алюминия в железо. Данный процесс называется растворимостью, и в зависимости от температуры нагрева происходят фазовые превращения. "Растворимость железа в алюминии незначительна (0,03 ат. % при эвтектической температуре 654 °С), растворимость алюминия в железе в 600 раз выше и составляет примерно 32 %. При затвердевании в структуре сплавов алюминия с железом появляются кристаллы соединения FeAl<sub>3</sub> (77,5 ат. % Al). При содержании до 1,8 % железа и температуре 654 °С образуется эвтектика Al + FeAl<sub>3</sub>. Дальнейшее увеличение содержания железа в сплаве влечет за собой появление химических соединений следующих составов: Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> (71 ат. % Al), FeAl<sub>2</sub> (67,59 ат. % Al), FeAl (45,2 ат. % Al) и др" [27].

Механизм образования и роста интерметаллидной прослойки можно разделить на несколько этапов (рисунок 24):

- взаимная диффузия контактирующих металлов с различной скоростью, возникновение локально пересыщенных твердых растворов вокруг дефектов кристаллического строения со стороны алюминий;
- образование первых центров новой фазы в дефектных участках с повышенной концентрацией диффундирующего элемента со стороны алюминия (рисунок 24 б);
- поперечный рост интерметаллидной фазы вдоль плоскости стыка со стороны алюминия (рисунок 24 в);
- смыкание и нормальный рост первого слоя интерметаллидной прослойки со стороны алюминия (рисунок 24 г);

– образование первых центров второй интерметаллической прослойки, продолжение нормального роста первой интерметаллической прослойки со стороны стали (рисунок 24 д)

– смыкание второй интерметаллической фазы в результате поперечного роста со стороны стали (рисунок 24 е).

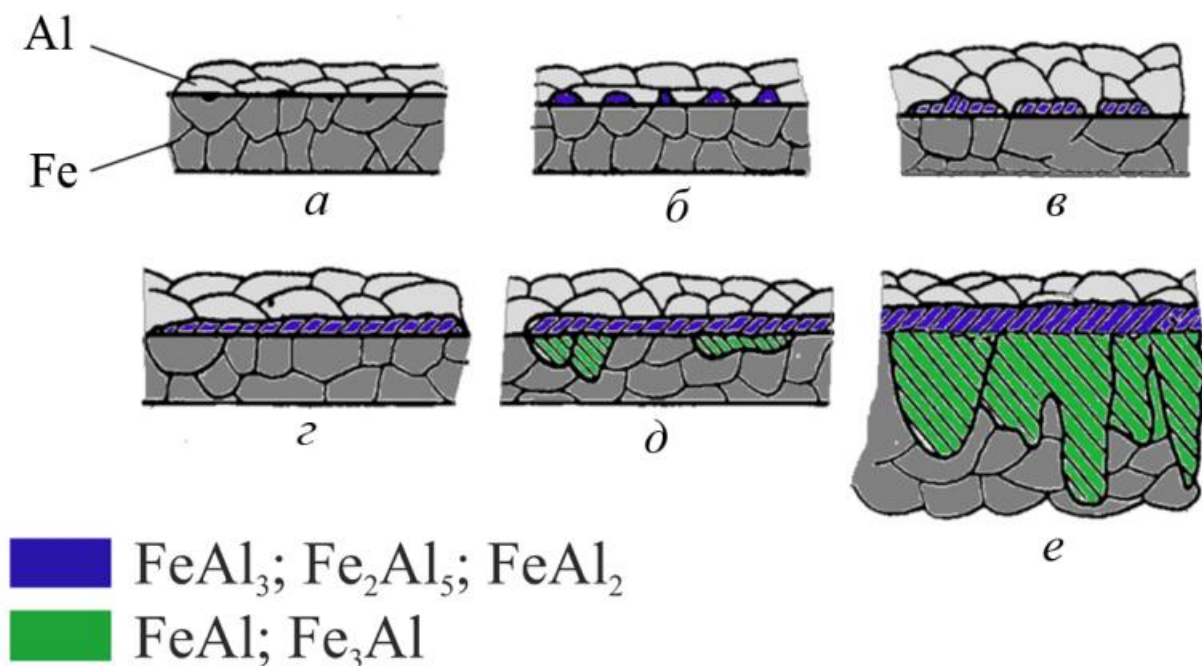


Рисунок 24 - Схема образования и роста интерметаллидов при взаимодействии Al с Fe

"Компоненты системы Fe-Al обладают простейшими структурами:  $\alpha$ -Fe – кубическая объемно-центрированная,  $a = 2,8664 \text{ \AA}$ ;  $\gamma$ -Fe – кубическая гранецентрированная,  $a = 3,656 \text{ \AA}$ ; Al – кубическая гранецентрированная,  $a = 4,04914 \text{ \AA}$ ".

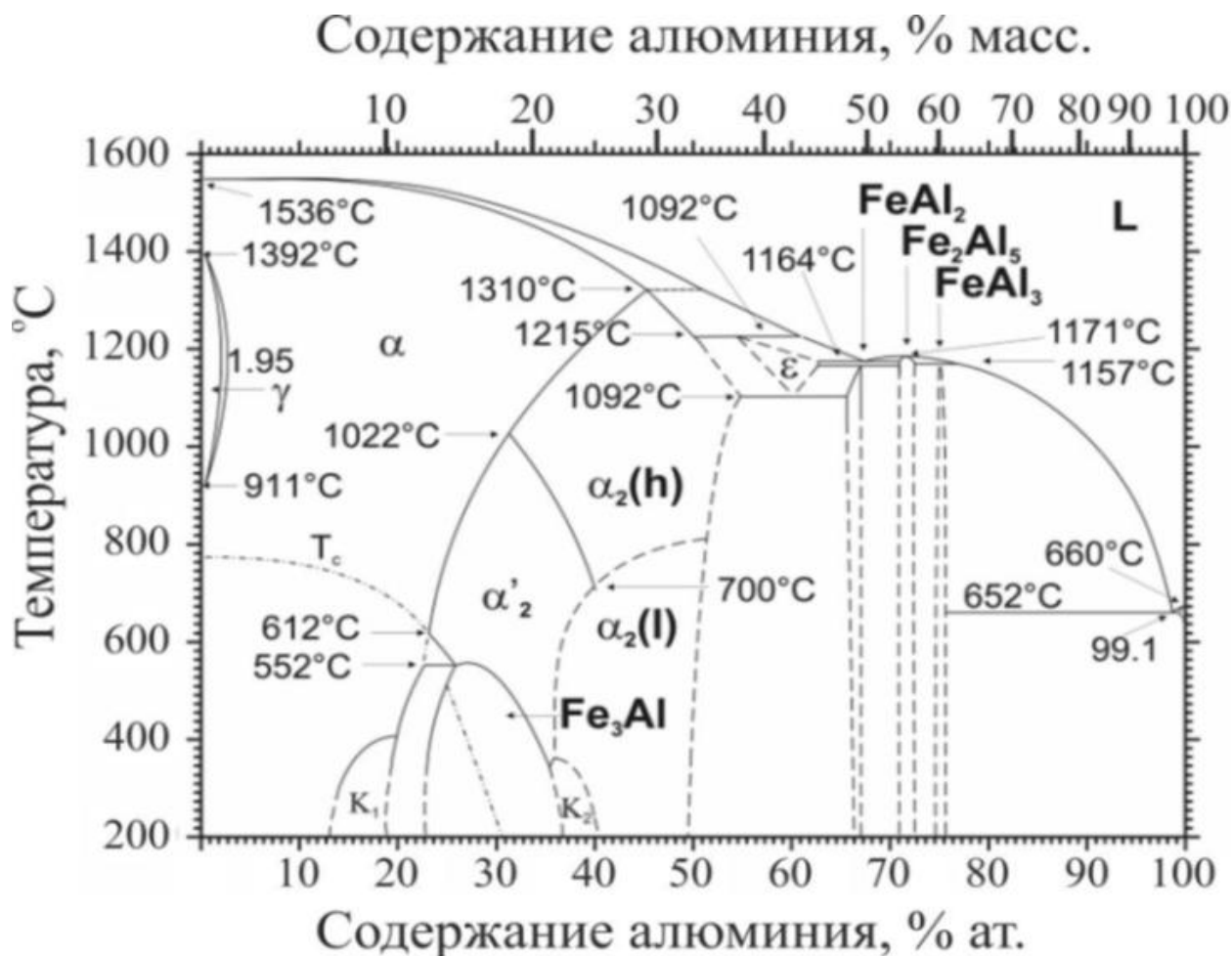


Рисунок 25 - Диаграмма состояния железо — алюминий

"Несмотря на сравнительно близкие величины периодов, изо-структурные компоненты не образуют непрерывный ряд твердых растворов. На  $\alpha$ -модификации железа базируется ограниченный ряд твердых растворов с максимальным содержанием алюминия, равным приблизительно 53 ат. % при температуре 1103 °С. Из этого твердого раствора в результате превращения, состоящего в упорядочении распределения атомов железа и алюминия, образуются два самых богатых железом соединения (рисунок 25) – FeAl и Fe<sub>3</sub>Al со следующими структурами: FeAl – кубическая примитивная структура типа CsCl,  $a = 2,903 \text{ \AA}$ ; Fe<sub>3</sub>Al – кубическая гранцентрированная структура типа DO<sub>3</sub> (BiFe<sub>3</sub>),  $a = 5,78 \text{ \AA}$ . При 552 °С и 26,8 ат. % Al реализуется вырожденное перитектоидное превращение  $\alpha + \alpha_2 \leftrightarrow \text{Fe}_3\text{Al}$ ; в точке с указанными выше координатами сосуществуют ферромагнитная фаза  $\alpha$ -Fe и парамагнитная фаза Fe<sub>3</sub>Al" [28].



"По данным [29], упорядоченная структура типа Fe<sub>3</sub>Al образуется в сплавах, содержащих от 25 до 34 ат. % Al, после медленного охлаждения. После закалки этих сплавов от температуры 600 °С и выше возникает структура FeAl. Процесс упорядочения характеризуется изменением ряда физических свойств, в частности более низким значением точки Кюри, изменением периода кристаллической решетки при комнатной температуре в зависимости от содержания алюминия. При его содержании до 10 % период кристаллической решетки увеличивается линейно с повышением содержания легирующего элемента. Сплавы с содержанием алюминия от 10 до 20 % характеризуются в упорядоченном состоянии почти постоянным периодом решетки. В области невысокого содержания алюминия образуется также нестабильная фаза Fe<sub>2</sub>Al с гексагональной структурой типа MgZn<sub>2</sub> (фаза Лавеса),  $a = 4,76 \text{ \AA}$ ;  $b = 7,70 \text{ \AA}$ ;  $a/c = 1,62$ ".

"При содержании алюминия, превышающем 50 ат. %, в системе Al-Fe образуются фазы FeAl<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>3</sub> (Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub>) и метастабильные соединения FeAl<sub>6</sub>. Структура FeAl<sub>6</sub> – ромбическая с периодами решетки  $a = 7,440 \text{ \AA}$ ;  $b = 6,4644 \text{ \AA}$ ;  $c = 8,779 \text{ \AA}$ . Структура Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> (FeAl<sub>3</sub>) – одна из самых сложных структур интерметаллических соединений, имеющая моноклинную элементарную ячейку с периодами  $a = 15,489 \text{ \AA}$ ;  $b = 8,0834 \text{ \AA}$ ;  $c = 12,476 \text{ \AA}$ ;  $\beta = 107^\circ 43'$ . Структура соединения Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, содержащего больше железа, чем FeAl<sub>3</sub>, ромбическая с параметрами  $a = 7,68 \text{ \AA}$ ;  $b = 6,40 \text{ \AA}$ ;  $c = 4,20 \text{ \AA}$  [29].

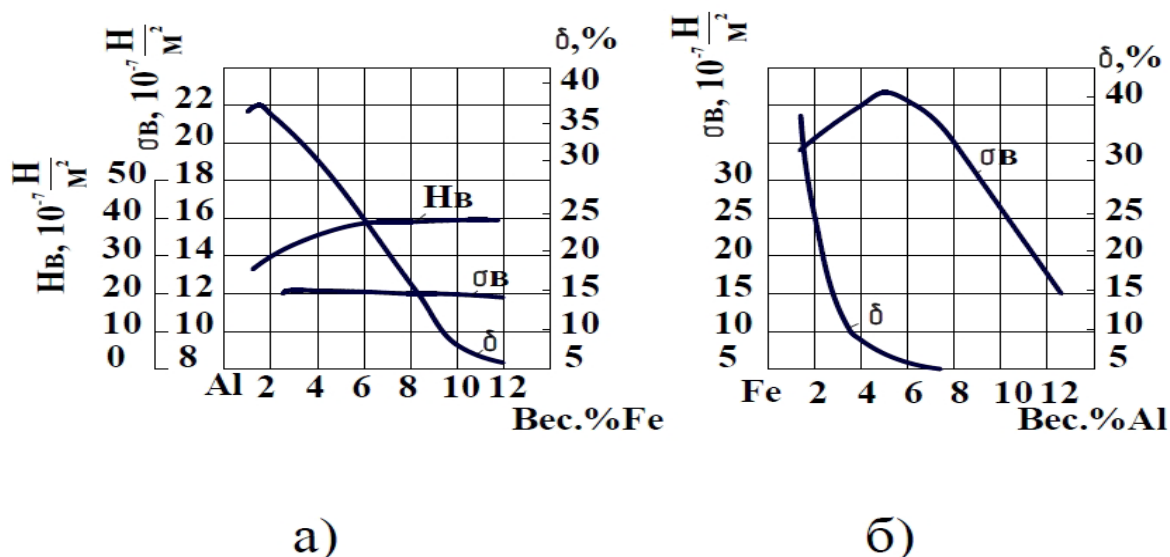
"Особенности строения и параметров кристаллической решетки во многом определяют механические и эксплуатационные свойства соединений системы Fe-Al. Так, при отношении числа валентных электронов к числу атомов в решетке, равном 3/2, интерметаллические соединения образуют β-фазы с о. ц. к. структурой или со сложной кубической решеткой. К таким соединениям относится сплав FeAl, который обладает металлическими свойствами, однако участие d-электронов в межатомной связи определяет появление ковалентной составляющей.

Интерметаллиды этого типа характеризуются высокой стойкостью против окисления и газовой коррозии, что позволяет использовать их в качестве жаростойких материалов и покрытий" [27].

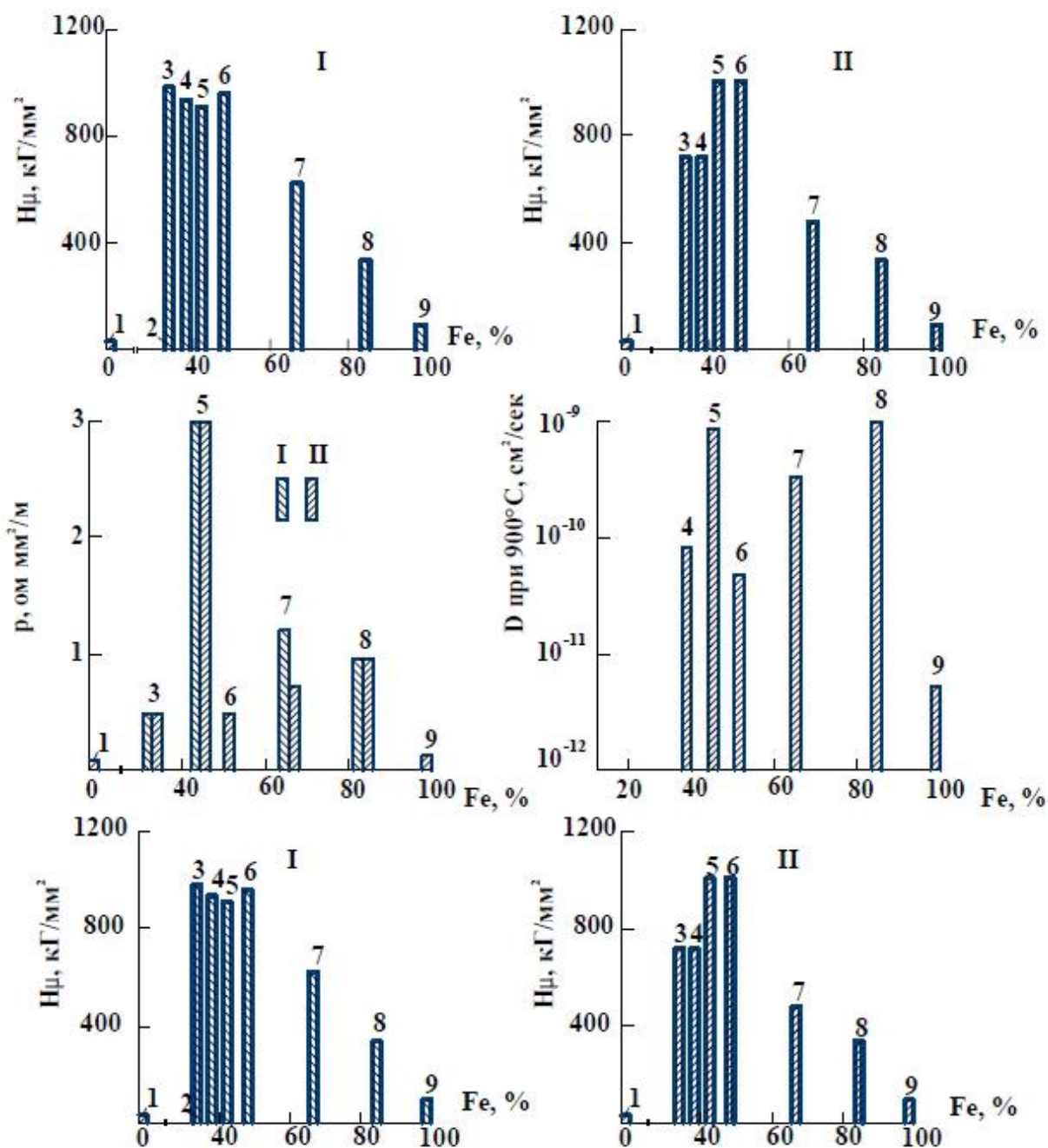
Присутствующее в алюминии железо находится в виде химических соединений, что и определяет механические свойства сплавов железо-алюминий. Железо приводит к повышению твердости и прочности сплава и резкому снижению его пластичности (рисунок 26). Железоалюминиевые сплавы с содержанием железа 8...10 масс. % обладают незначительной пластичностью, а еще более легированные железом весьма хрупки.

Свойства сплавов системы алюминий-железо весьма различны (рисунок 26).

Микротвердость сплавов системы Fe-Al независимо от их фазового состава значительно выше, чем у алюминия и железа. Максимальной микротвердостью обладают фазы FeAl<sub>3</sub>; FeAl<sub>2</sub>; Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>; Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>. Значение микротвердости для этих фаз колеблется в интервале 9,6...11,5 ГПа. Для фазы FeAl значение микротвердости достигает 6 ГПа, а для фазы Fe<sub>3</sub>Al – 2,7 ГПа.14



а) механические свойства в зависимости от содержания железа  
 б) механические свойства в зависимости от содержания алюминия  
 Рисунок 26 - Изменение механических свойств алюминиево-железных сплавов



I – литое состояние; II – состояние после отжига; 1 – Al; 2 – Al + FeAl<sub>3</sub>; 3 – Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>; 4 – FeAl<sub>3</sub>; 5 – Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>; 6 – FeAl<sub>2</sub>; 7 – FeAl; 8 – Fe<sub>3</sub>Al; 9 – Fe [29]  
 Рисунок 27- Свойства интерметаллических фаз системы железо-алюминий

"Наибольшей твердостью 11,5 ГПа при комнатной температуре обладает соединение Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>. Твердость всех интерметаллидных фаз уменьшается с ростом содержания железа. С увеличением температуры микротвердость соединений падает. Точка перегиба в значениях микротвердости лежит в пределах 0,3...0,5 тпл. Для фаз FeAl<sub>3</sub> и FeAl<sub>2</sub> разупрочнение наступает при 0,5 тпл; фаза Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> разупрочняется при 0,45

тпл, фаза FeAl – при 0,33 тпл. А для Fe<sub>3</sub>Al происходит постепенное снижение твердости. Приведенные данные (рисунок 27) объясняют хорошую деформируемость исследуемых материалов при повышенных температурах. Высокая твердость некоторых фаз характеризует их высокую абразивную износостойкость".

"Прочностные свойства этих фаз изменяются практически противоположно твердости. Наибольшей прочностью при растяжении обладают фазы Fe<sub>3</sub>Al; FeAl, а наименьшей – фазы FeAl<sub>3</sub>; FeAl<sub>2</sub>; Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>; Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>. Прочность Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>; FeAl<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> составляет соответственно 18, 15 и 17 МПа".

Таблица 2 - Основные виды интерметаллидных соединений системы Fe<sub>x</sub>-Al<sub>y</sub> и их свойства

Интер-металлид	Тип кристаллической решетки	Содержание алюминия, % ат.	Микро-твердость, НВ	σв, МПа	
				при растяжении	при сжатии
FeAl <sub>3</sub>	Моноклинная	74,5...76,5	1050	15	45
Fe <sub>2</sub> Al <sub>5</sub>	Орторомбическая	70...73	1150	17	75
FeAl <sub>2</sub>	Триклинная	66...66.9	910	45	60
Fe <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	Кубическая	58...65	-	-	-
FeAl	DO <sub>3</sub>	23...55	530	> 100	980
Fe <sub>3</sub> Al	Кубическая объемно-центрированная	23...34	400	> 100	90

"Наименьшая прочность при сжатии наблюдается у соединения FeAl<sub>3</sub> – 16 МПа. Наиболее высокой прочностью при сжатии обладают фазы Fe<sub>3</sub>Al;

FeAl; Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub>. Высокая прочность 190 МПа при сжатии фазы Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub> объясняется наличием мягкой межзеренной прослойки алюминия. Однако разрушение соединения Fe<sub>2</sub>Al<sub>7</sub> протекает хрупко – на диаграмме практически не регистрируется площадка текучести. Значительно хрупки и фазы FeAl<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>, FeAl<sub>2</sub> (таблица 2). С увеличением содержания железа в сплавах FeAl и Fe<sub>3</sub>Al зерна приобретают более правильную форму и заметно увеличиваются в размере " [29].

"Следует отметить, что всем интерметаллидам системы железо-алюминий присущ хрупкий характер разрушения. Хрупкость этих соединений объясняется их сложным кристаллическим строением, наличием ковалентной и ионной связей. При деформации подобных соединений скольжение быстро прекращается и не возникает при дальнейшей деформации полос. Искажение кристаллической решетки, вызывающее появление полос скольжения, кристаллографически ограничено, что и приводит к хрупкому разрушению".

"Несмотря на хрупкость при низких температурах, при высоких температурах интерметаллические соединения в какой-то мере становятся пластичными"

"Возможность промышленного использования в качестве специальных покрытий сплавов на основе алюминида железа во многом обусловлена наличием у них при комнатной температуре (в некоторых случаях и при минусовых температурах) определенной минимальной пластичности, которая соответствует достаточному уровню их вязкости разрушения. Наибольшего внимания заслуживают упорядоченные интерметаллидные сплавы на основе Fe<sub>3</sub>Al, отличающиеся высокой жаростойкостью, в частности в серосодержащих средах".

В ходе проведенного анализа способов повышения адгезионных показателей алюминиевых покрытий нанесенных газопламенным напылением предпочтение отдается таким способам, как абразивная обработка, нарезание рваной резьбы и предварительный подогрев, кроме

этого поверхность, так же необходимо обезжиривать. Для устранения в покрытии пор и Для придания алюминиевым покрытиям повышенной коррозионной стойкости, окалинстойкости и износостойкости решено подвергать сталь с алюминиевым покрытием диффузионному отжигу что позволит сформировать покрытие на основе интерметаллидов алюминия.

Таким образом, задачами работы являются:

- 1) Разработка методики исследования процессов газопламенного напыления и диффузионного отжига стали с алюминиевым покрытием
- 2) исследовать процессы газопламенного напыления алюминия на сталь и свойства покрытия
- 3) Провести исследования процессов жидкофазного алюминирования стали
- 4) Провести исследования процессов диффузионного отжига сталей с алюминиевым покрытием

## **2 Методика исследования алюминиевых покрытий**

### **2.1 Методика исследования покрытий нанесенных методом газопламенного напыления**

Исследования процессов газопламенного напыления алюминия на сталь, производились с использованием установки проволочного газопламенного металлизатора Плакарт FS-15(рисунок 28).

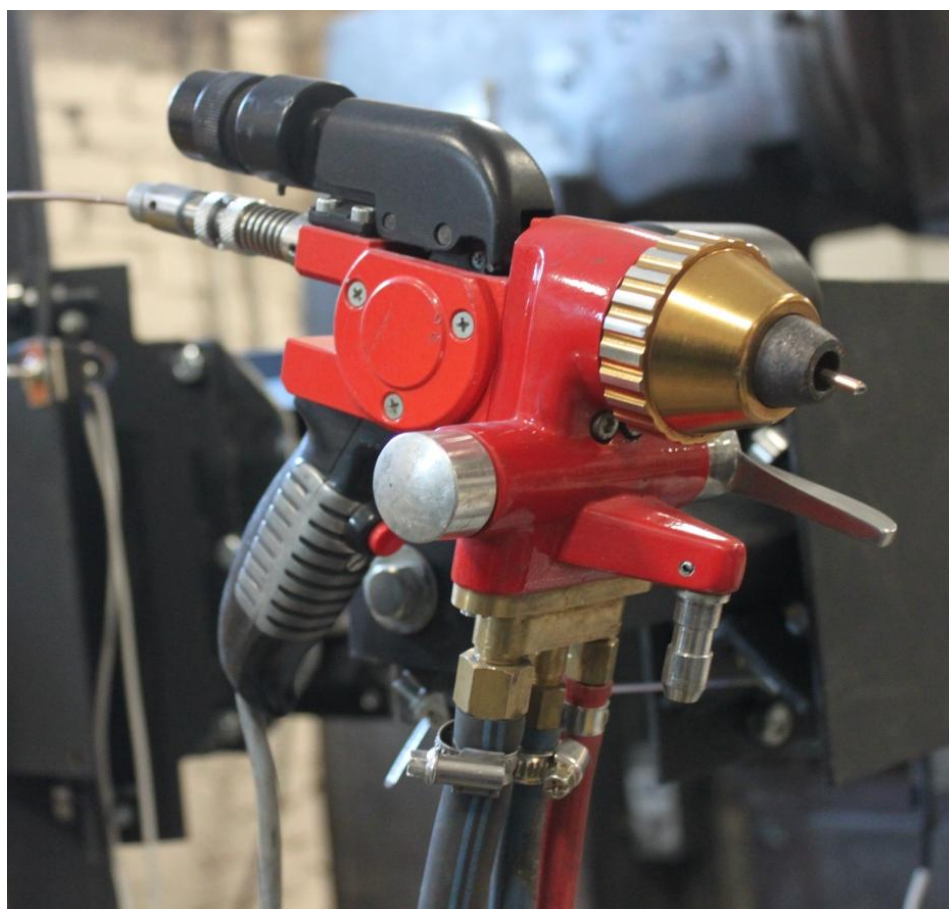


Рисунок 28 - Металлизатор Плакарт FS-15

Для стабилизации пространственного положения металлизатор жестко крепился на специально сконструированной колонне (рисунок 29), с возможностью перемещения в трех плоскостях. Вертикальное перемещение осуществляется электроприводом через винтовую пару. Перемещения в горизонтальной плоскости осуществляется вручную. Основание колонны позиционируется на площади 1,5 м<sup>2</sup>. Колонна дает возможность перемещать

металлизатор по оси X-1200 мм, Y-1800 мм Z-1200мм, а также позволяет придать необходимый угол напыления материалов путем наклона металлизатора. Таким образом происходит регулировка основных параметров напыления: расстояние до детали, угол ввода газопламенного потока расплавленных частиц. Частичная механизация и жесткое закрепление металлизатора позволяет получать более однородные по свойствам и равномерные по толщине покрытия [31].



Рисунок 29-Общий вид установки для газопламенного напыления с металлизатором Плакарт FS-15

Подача необходимых газов для работы, таких как пропан, кислород, сжатый воздух, совершалась в блоке газо-подготовки. Состоящего из:- шланг пакета



- редукторов БКО-50-5-АЛ и БПО-5-СВ-АЛ, предназначенных для понижения и регулировки давления газа поступающего из баллона, а так же поддержания рабочего давления газа.
- ротаметра марки GTV, необходимых для регулирования объемного расхода горючего газа и кислорода
- редуктор осушитель Pneumax, необходимый для центробежной очистки воздуха от паров влаги и компрессорного масла, а так же регулирования давления сжатого воздуха в системе.

Нагнетание и подача сжатого воздуха совершалась высокопроизводительным компрессором винтового типа, Comrag A-1108.

Нанесение алюминиевого слоя производилось на образцы из стали 20. Образцы выполнены двух типов и представляют собой пластину размерами 35x35 мм (рисунок 30) и "шайбу" диаметром 70мм (рисунок 31) толщина равная для обоих образцов 14 мм, в центре выполнено отверстие с минимальным допуском, диаметром 20 мм, для скользящей посадки цилиндрического штифта, который в последствии отрывается в разрывной машине для определения усилия отрыва. Такое выполнение необходимо для получения наиболее точных данных об адгезионном взаимодействии материала подложки( сталь 20) с напыляемым алюминиевым слоем.

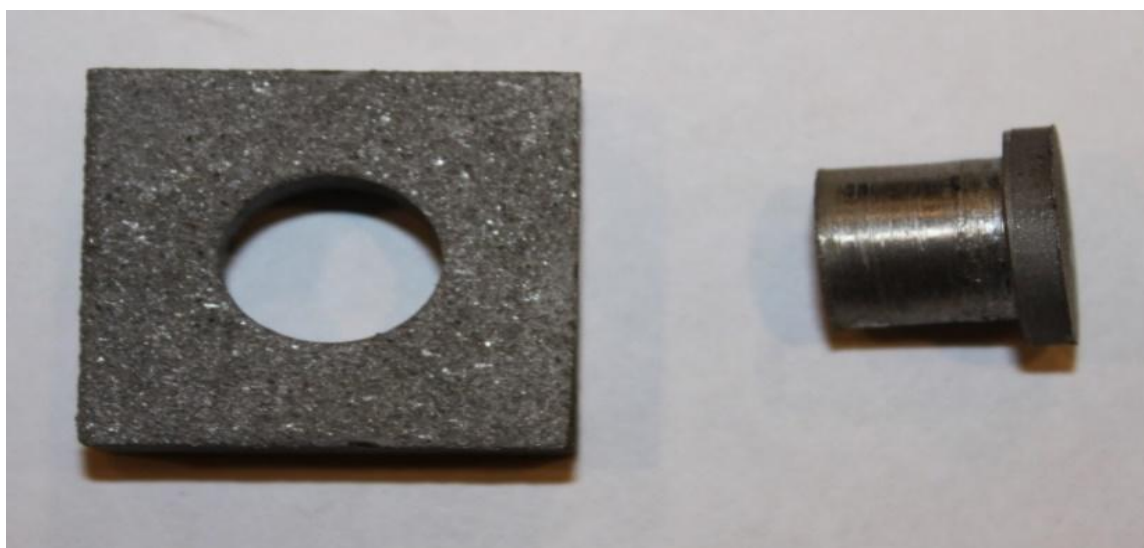


Рисунок 30 – Внешний вид образца для исследования прочности сцепления покрытия и основного металла

Для напыления алюминиевого слоя использовалась проволока СвА5 по ГОСТ 7871-75 диаметром 3.15 мм. Нанесение покрытий производилось в течении 45 секунд. Металлизатор при этом расположен строго-перпендикулярно, относительно центра деталей на расстоянии 130 мм от среза сопла. Напыление на все образцы производилось на одном режиме (таблица 3). Режим был установлен экспериментально, при котором основные критерии, такие как, цвет пламени, длина проволоки выступающей от среза сопла металлизатора до зоны расплавления, а так же перенос расплавленных частиц соответствуют рекомендациям завода изготовителя.[32]

Таблица 3 - Режим напыления алюминия на сталь

Давление воздуха, МПа	Давление кислорода, МПа	Расход кислорода, л/мин	Давление пропана, МПа	Расход пропана, л/мин	Скорость подачи проволоки, м/сек
0,5	0,7	35	0,2	26	0,6

Подготовка образцов к нанесению на их поверхность алюминиевого слоя представляет собой совокупность различных технологических операций, выполняемых в определенной последовательности. Для активации поверхности а так же создания развитого рельефа использовались способы:

Нарезания "рванной" резьбы или спирали Архимеда (в зависимости от геометрических параметров обрабатываемых образцов) (рисунок 31 в) Сложную форму рельефа поверхности детали нарезали на токарно-винторезном станке 1К62, резбонарезным резцом с маркой напаянной твердосплавной пластины ВК8. Резец располагался ниже оси детали на 2-3 мм, с максимальным вылетом, возможным для его жесткой фиксации в резцедержателе. Частота вращения соответствовала 60-80 оборотов в минуту, скорость резания 8-10 метров в минуту. Резьба нарезается за один проход без охлаждающей жидкости, высота профиля 0.6-0.8 мм [31].



а) механическая обработка; б) абразивно-струйная обработка никельшлаком; в) “рваная резьба”, нарезанная по спирали Архимеда; г) с “рваная резьба” и последующая абразивно-струйная обработка никельшлаком  
 Рисунок 31 - Образцы из стали 20 с различным характером подготовки поверхности

Механическая обработка, при которой поверхность считается условно ровной. Она выполнялась на образцах второго типа и осуществлялась так же на токарном станке (рисунок 31).

Абразивно-струйная обработка. В качестве абразива использовались два материала. Кварцевый песок имеющий твердость по шкале Мооса 5 единиц, и никельшлак (рисунок 31 б), с величиной фракции одной гранулы 0.5-1.5 и твердостью по шкале Мооса 6-7 единиц, которая позволяет получать шероховатость поверхности равной 20-45мкм (рисунок 31 б). Обработка производилась с использованием пескоструйного аппарат DBS-100, подача воздуха осуществлялась компрессором Comrag A-1108.

Химический способ, для удаления зажиренных и масляных слоев с поверхности. Поверхность образцов обрабатывалась щеткой смоченной распространенным обезжиривателем металла- ацетоном.

Термическая обработка - предварительный подогрев. Повышение температуры основного металла до необходимых значений, при которых остаточные напряжения в покрытии будут существенно меньше внутренних

сил, действующих на него, осуществлялось нагревом в муфельной печи с вертикальной загрузкой Nabertherm Top 45 ECO (рисунок 34). Время выдержки было одинаково для всех образцов 1 час, а температура выдержки варьировалась от 100 до 500°C.

Прочность сцепления нанесенного алюминиевого покрытия с основным металлом оценивалось в испытательной установке компании Time Group Inc (рисунок 32), в разрывной машине Time WAW-1000C.



Рисунок 32 - Испытательная установка Time Group Inc

Перед испытанием на разрыв, образцы прошедшие нанесение покрытия необходимо подготовить. Так как выступающей части штифта недостаточно, для надежной фиксации в губках разрывной машины, к тыльной стороне штифта крепили Т образный болт, от которого передавалась нагрузка для испытания, от верхних салазок с зажатой в ней технологической пластине, а пластина с нанесенным покрытием закреплялась в нижних салазках через губки машины (рисунок 33). Фиксация захватов происходила с усилием в 400 НЬЮТОН.

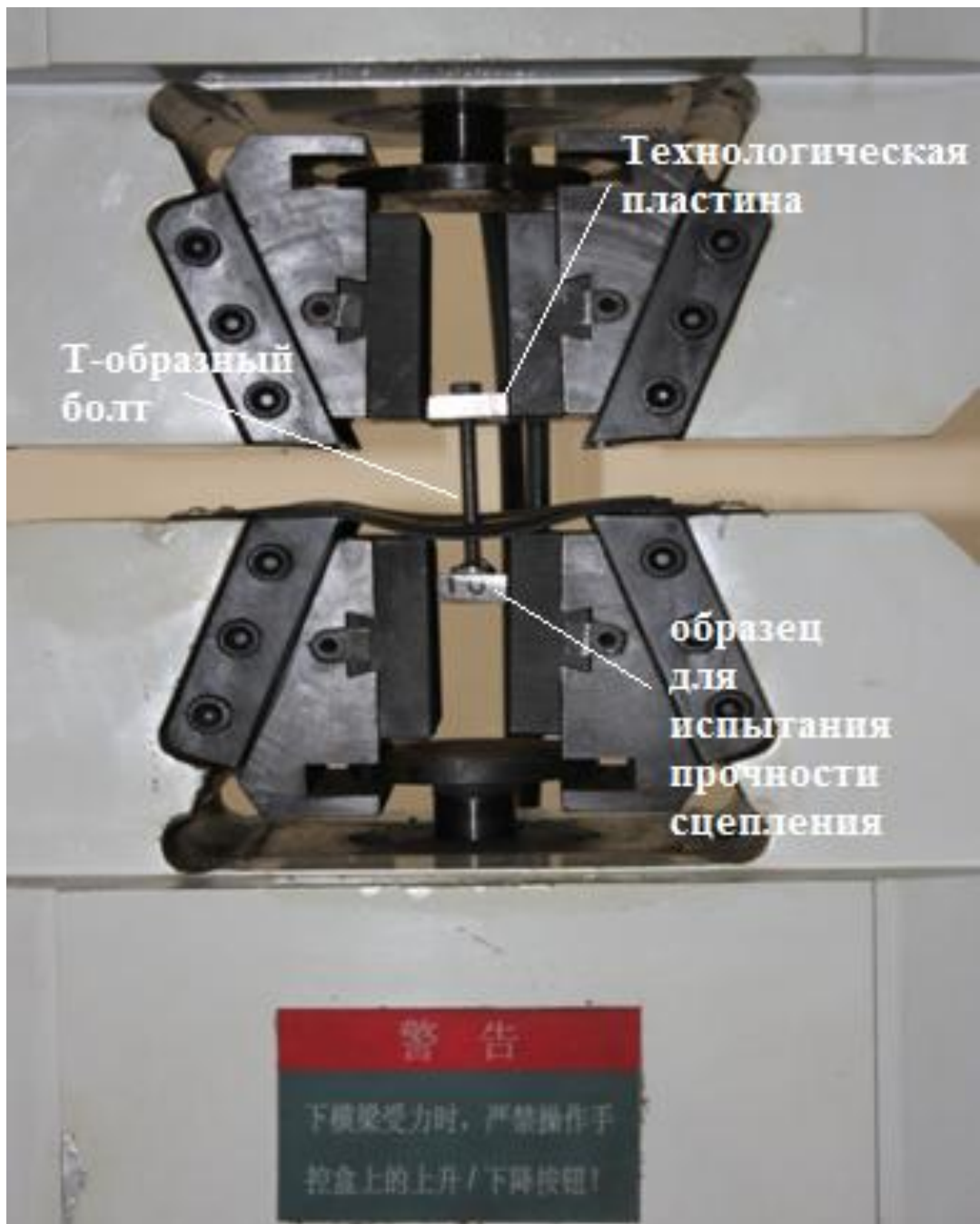


Рисунок 33 - Образец в разрывной машине

Фиксация и отображение данных, обеспечивается программным обеспечением установки. В ходе испытания данные регистрируются в виде графика зависимости (рисунок 33), нагрузки (kN) от времени(с). Для дальнейшей оценки в прочности сцепления покрытия с основой из графика использовались данные о пиковой нагрузке при которых происходит разрушение.

Расчеты производились из выражения (1):

$$\sigma_c = F / (S_o - S_c) \quad (1)$$

где: F- усилие отрыва напыленного слоя от основного металла, Н;

$S_o$  - площадь образца, мм<sup>2</sup>;

$S_c$ - площадь напыляемой поверхности отрывного стержня, мм<sup>2</sup>.

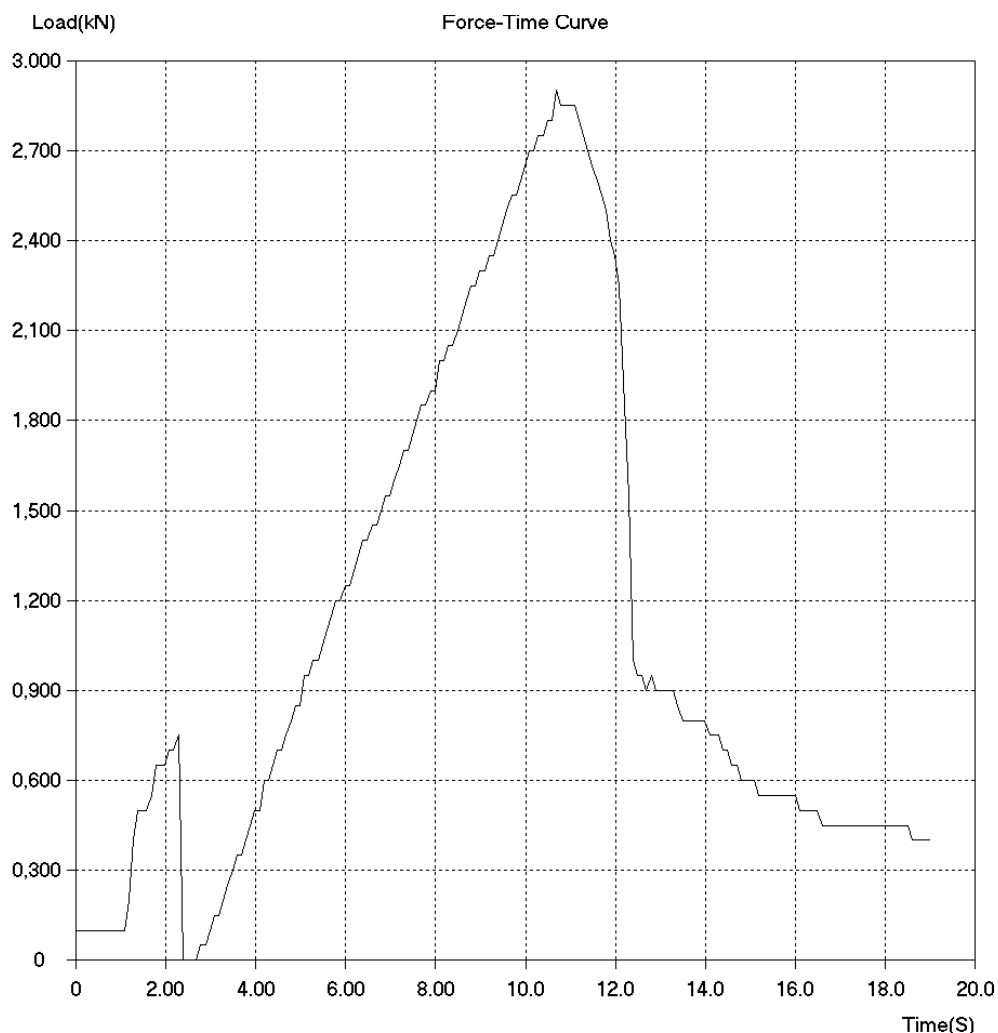


Рисунок 33 Внешний вид графического отображения данных

## 2.2 Методика исследования алюминиевых покрытий полученных жидкофазным алитированием

Диффузионное алитирование осуществлялось в тигле с расплавленным алюминием следующего состава 99% процентов по массе алюминия технической чистоты А85 ГОСТ11069-2001. Алюминий расплавляли в печи в печи Nabertherm Top 45 ECO. Наиболее важным технологическим фактором при алитировании является температура, в ходе исследования выбран

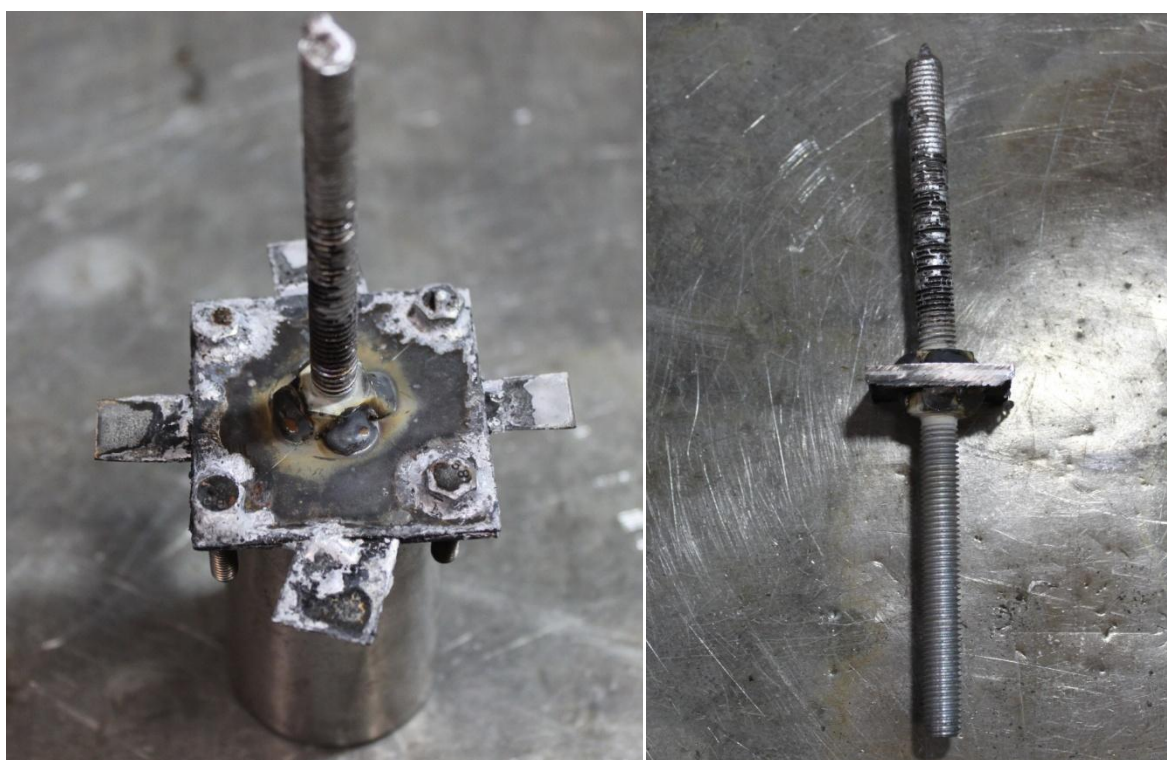
диапазон от 700 до 900°C. Так как именно от нее зависит структура материала, науглероживание поверхности а так же время прогрева детали. Перед погружением в расплавленный алюминий, с поверхности убирается шлак до чистого зеркала ванны, образцы загружаются так чтобы они не выступали над поверхностью.



Рисунок 34 - Печь Nabertherm Top 45 ECO, тигель для плавки алюминия

Образцы для алитирования представляют собой пластины размерами 40x40x1,5 мм, по краям которых выполнены 4 отверстия, для стягивания болтами М5. По центру пластины приваривается болт, необходимый для дальнейшего исследования прочности сцепления, методом разрыва (рисунок 35). Сборка образца осуществляется после подогрева заготовок в печи до 150°C и нанесения на них активирующего флюса "NOCOLOC" необходимого для активации поверхности, удаления оксидной пленки с расплавленного алюминия. При сборке, между образцами устанавливаются пластины для регулирования зазора, толщиной 0,5 мм, он необходим для заполнения

пустого пространства жидким алюминием. Во время окунания заготовок, их положение строго вертикальное, оно сохраняется во время вынимания из тигля а так же некоторое время после, для того что бы расплавленный алюминий не вытек из зазора между пластинами и успел кристаллизоваться, соединив их между собой. После остывания образцов механическим путем обрезаются края до размеров пластин соответствующих 35x35 мм от центра. Далее производится испытания на разрыв по технологии описанной в пункте 2.1.



а  
б  
Образец а) после погружения б) перед испытанием на разрыв.  
Рисунок 35 - Внешний вид образцов для аллитирования

### **2.3 Методика исследования алюминиевых покрытий полученных газопламенным напылением с последующим диффузионным отжигом**

Для исследования процессов формирования интерметаллидных покрытий системы железо алюминий, была выбрана подложка. Она



представляет собой трубы диаметром 57 мм, с толщиной стенки 3,5 мм из стали 20 (рисунок. 36). Методом газопламенного напыления производили нанесение покрытия. Предварительно труба проходила все стадии подготовки поверхности а так же предварительного подогрева. Нанесение алюминия производилось на режимах указанных в таблице №3 После чего труба с покрытием распиливалась на ленточнопильном станке сначала на кольца толщиной 10мм, а затем на 4 равных сегмента.



Рисунок 36 - Образцы после нанесения алюминиевого покрытия

Полученные сегменты подвергались термической обработке , которая производилась при различных температурах от 400 °С до 800°С включительно. Кроме температуры изменялся так же параметр временного диапазона нахождения образцов в печи, он составлял от 1, 2 и 5 часов.

Дальнейшие исследования структуры и элементного состава металла зон напыленного слоя выполнялся на поперечном сечении сегмента прошедшего термообработку.

Для изучения применялся метод растровой электронной микроскопии (РЭМ), который основан на регистрации различных типов сигналов, генерируемых в образце при сканировании его поверхности сфокусированным электронным зондом. Вторичные, отраженные электроны, рентгеновское излучение и другие типы сигналов несут информацию о структуре, фазовом и химическом составе образца

Рентгеноспектральный анализ проводился в условиях ОАО «АВТОВАЗ» на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCAEnergy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCAWave-500 и в условиях ФГУП НИАР на комплексе состоящий из автоэмиссионного растрового микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss SUPRA 55VP в комплекте с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy 350, волновым спектрометром Inca Wave 500 и системой регистрации и анализа дифракции отраженных электронов HKL EBSD Premium System.

Последовательность проведения измерений была подобной для всех образцов.

На первом этапе регистрировались изображения исследуемой поверхности во вторичных электронах при небольших увеличениях с тем, чтобы определить особенности структурных изменений металла по его толщине.

Далее как в целом на больших участках поверхности металла, так и на её локальных участках проводилось определение элементного состава напыленного металла. В дальнейшем, как от отдельных участков поверхности «матрицы», так и от участков поверхности каких-либо выделений (карбиды, интерметаллиды) получали дифракционные картины. Одновременный анализ элементного состава и дифракционной картины

одного и того же участка поверхности позволяет более достоверно определить принадлежность какого-либо выделения к определённому классу веществ [33].

### 3 Исследования формирования алюминиевых покрытий газопламенным напылением

#### 3.1 Исследование влияния подготовки поверхности подложки, на прочность сцепления при газопламенном напылении алюминия на сталь

Предварительная оценка прочности сцепления напыленных образцов из стали 20 сравнивалась между образцами диаметром 70мм с различной поверхностью, после механической обработки в токарном станке (поверхность условно ровная), после нарезания рванной резьбы по спирали Архимеда, после обработки абразивно-струйным методом, кварцевым песком и никельшлаком с фракцией 0.5-1.5. А так же комбинирования данных методов.

Таблица 4 - Зависимость прочности сцепления от характера подготовки поверхности основного металла диаметром 70мм

Обрзец	Материал образца	Характер подготовки поверхности	Подогрев	Прочность сцепления, МПа
1	Сталь 20	Токарная обработка	-	-
2	Сталь 20	Рваная резьба	-	2.1
3	Сталь 20	Абразивно-струйная обработка кварцевым песком	-	-
4	Сталь 20	Абразивно-струйная обработка никельшлаком		1.2
5	Сталь 20	Рваная резьба, Абразивно-струйная обработка никельшлаком	-	4.4
6	Сталь 20	Рваная резьба, Абразивно-струйная обработка никельшлаком	350°C 60 мин	7.4

Проведенные исследования показали (таблица 4), что ровная поверхность полученная после механической обработки не подходит для напыления. Потому как во время нанесения покрытия, края покрытия стали загибаться к центру, это следствие остаточных напряжений, значение которых существенно превышает адгезию алюминиевого слоя к подложке (рисунок 37).



Рисунок 37 - Внешний вид образца №1 после нанесения покрытия

Применение абразивно-струйной обработки, показало, что увеличение шероховатости поверхности позволяет закрепиться алюминиевому покрытию на детали. Однако, прочность сцепления при обработке кварцевым песком, незначительная, покрытие легло на подложку но не имело механического сцепления по всей плоскости что привело к отслоению. Но покрытие не загибалось как ранее (рисунок 38).



Рисунок 38 - Внешний вид образца №2 после нанесения покрытия

Абразивная обработка никельшлаком за счет более твердых гранул создает более грубую, хаотичную шероховатую поверхность в следствии чего прочность сцепления составляет 1.2 МПа.

Созданная на поверхности сложная структура "рванной" резьбы, позволила частицам алюминия при переносе из сопла металлатора её заполнить обеспечив тем самым повышение прочности сцепления до 2.1 МПа. Объединив два наиболее результативных способа подготовки поверхности, нарезания "рваной" резьбы и активирования поверхности никельшлаком удалось поднять значение прочности сцепления на 33%, что составляет 4.4 МПа.

Проведенный микро рентгеноструктурный анализ образцов с обработкой поверхности для образца №5 позволил оценить макро и микроструктуру напыленных покрытий и определить химический состав. Анализ проводили на образцах вырезанных из трубных напыленных заготовок.

При напылении на трубные образцы стали с “рваной” резьбой отслоение покрытия не наблюдалось. Но по границе покрытия и основного металла фиксируется большое количество дефектов: пор, протяженных участков с отсутствием механической связи (рисунок 39).[31]

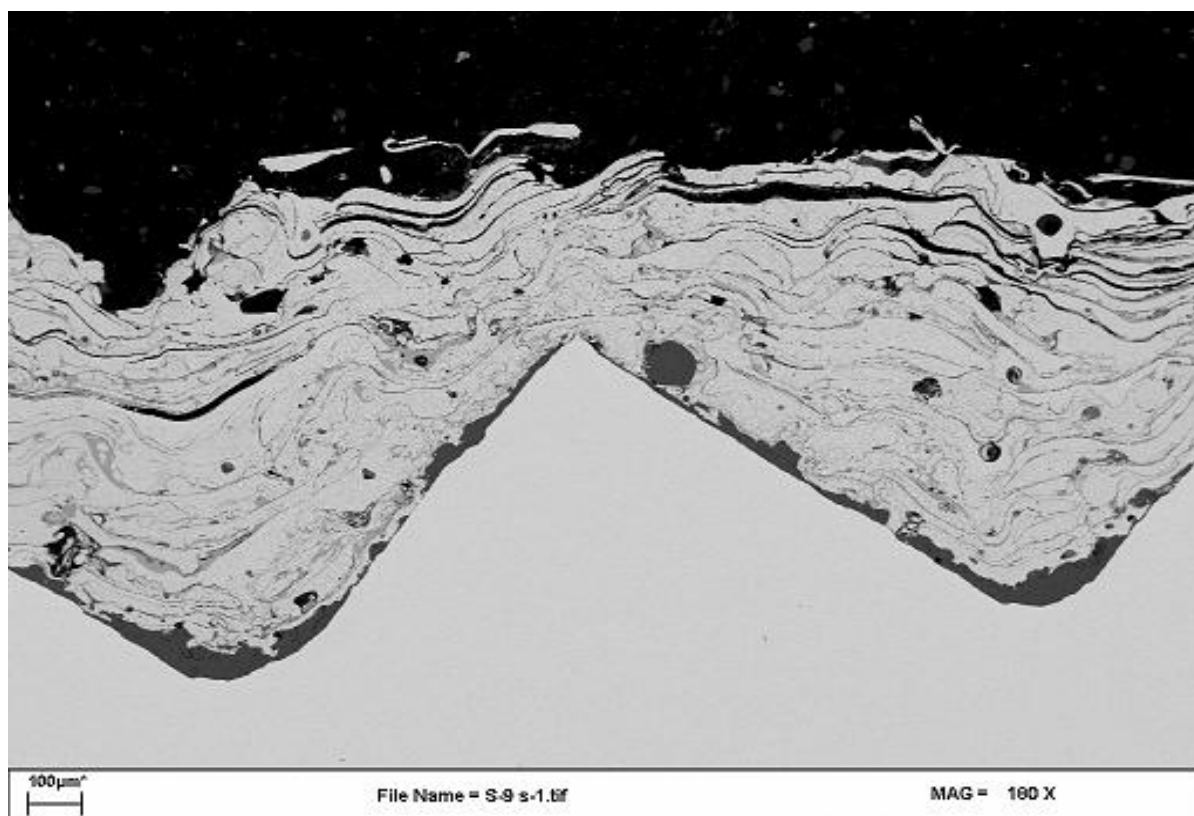


Рисунок 39 - Структура алюминиевого покрытия нанесенного на поверхность рванной резьбы

### **3.2 Исследования влияния предварительного подогрева основного металла на прочность сцепления**

Для данной части работы использовались образцы изображенные на рисунке 30. Напыление происходило по режимам таблицы 3. Предварительная оценка прочности сцепления производилась на образцах обработанных струйным способом. Абразивными материалами - никельшлак с фракцией 0.5-1.5.,

Проведенные исследования показали, что при нанесении покрытия без подогрева, зачастую происходит отслоение алюминия от металла основы, сразу после окончания напыления или во время него либо значения значения прочности сцепления очень низкие 1.2 МПа (таблица 4). При предварительном подогреве основного металла выше 100°C алюминиевое покрытие не отслаивается от основного металла. Однако прочность сцепления покрытия при этом зависит от температуры предварительного подогрева. Увеличивая температуру подогрева перед напылением, до 300°C замечается значительное повышение прочности сцепления алюминия со сталью. Разрушение при вытягивании штифта во время испытания происходит в данном случае частично по покрытию, (рисунок 40).

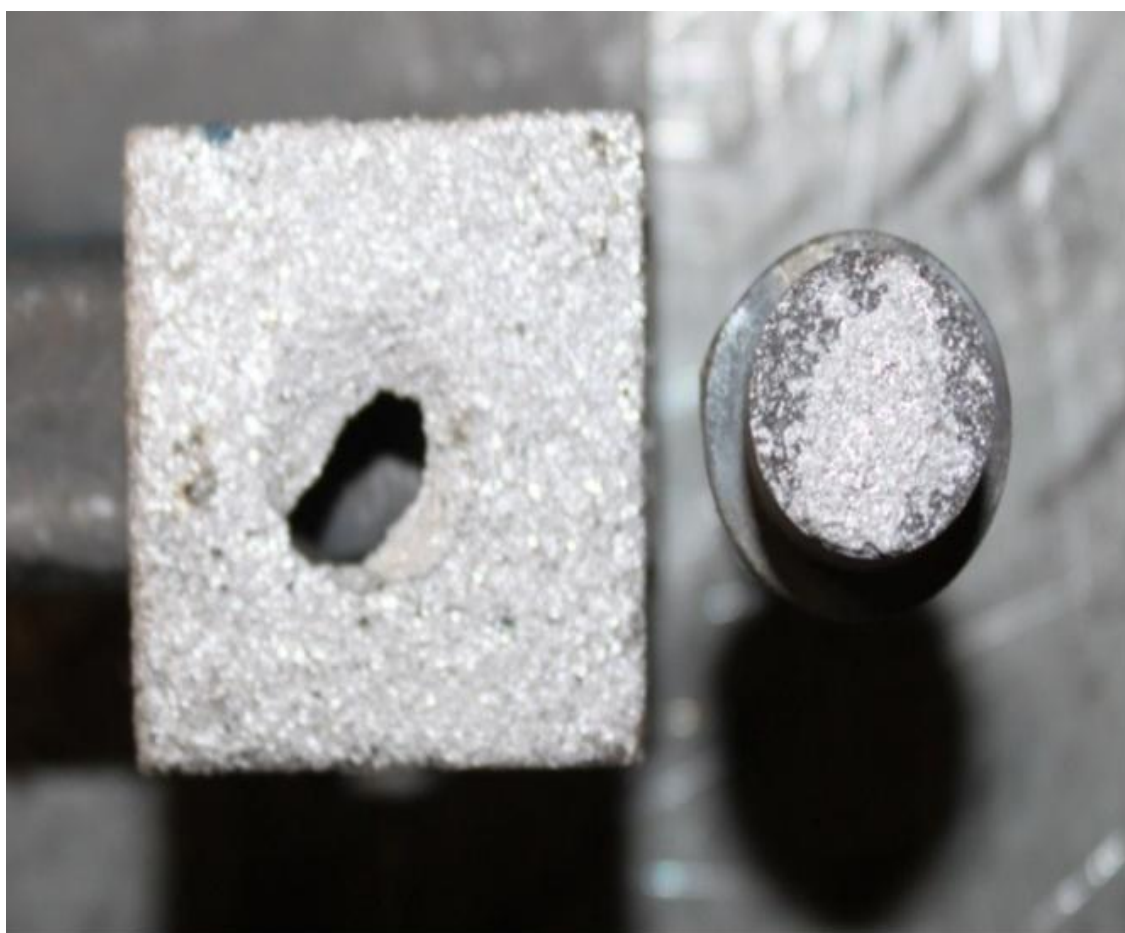


Рисунок 40 – Внешний вид образца №4 после испытания на прочности сцепления при температурах подогрева перед напылением 300°C.



При более высоких температурах подогрева основного металла отмечается, снижение прочности сцепления, что вероятно связано с повышением окисляемости углеродистых сталей при температурах выше 350-400°C (рисунок 41). Визуальный осмотр разрушенных образцов подтвердил наличия окисленного слоя по линии разрушения образцов.

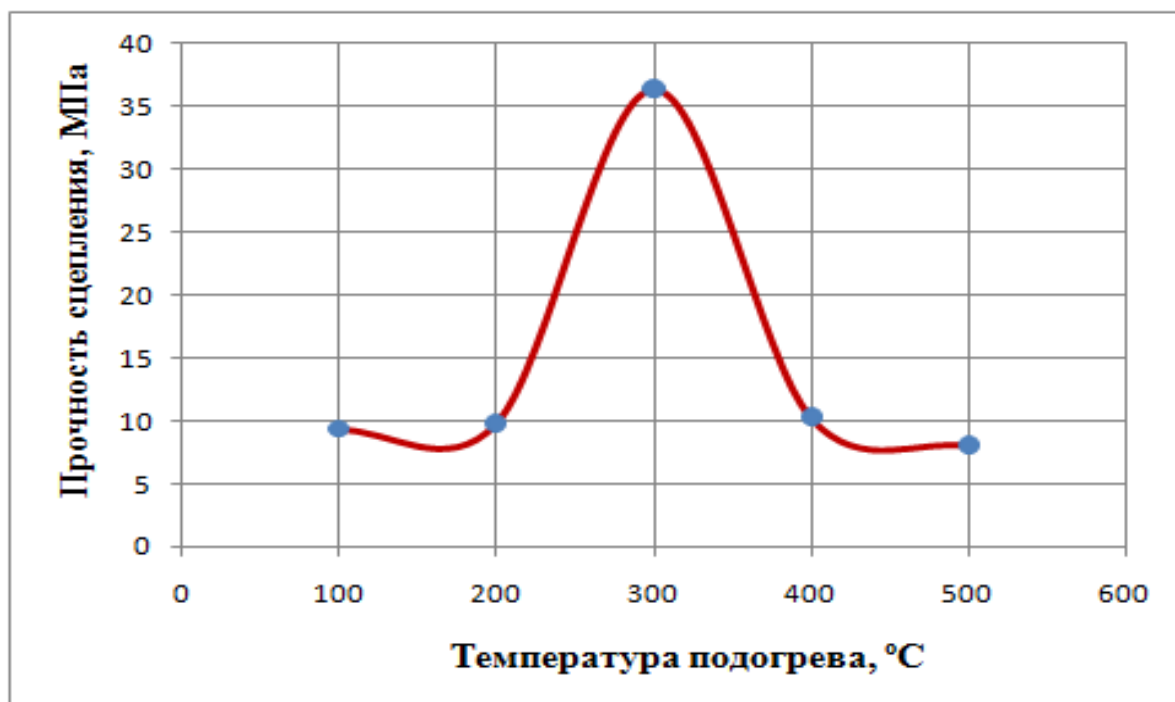


Рисунок 41 - График зависимости прочности сцепления алюминиевого покрытия со сталью от температуры подогрева

Металлографические исследования напыленных образцов показали, что без предварительного подогрева на границе основного металла и покрытия отсутствует сплошной механический контакт (рисунок 42-44). На границе алюминия и стали видны несплошности, поры, неспаи ит.д. Предварительный подогрев до 300°C способствует уменьшению количества дефектов на границе контакта, улучшается повторяемость рельефа поверхности основного металла при напылении, что несомненно способствует повышению прочности сцепления алюминиевого покрытия со сталью (рисунок 45). Химический анализ основного металла при напылении с предварительным подогревом выше 300°C показал наличие алюминия до 0,2% в поверхностных слоях стали, что является следствием его диффузии из

покрытия при напылении и обеспечивает образование адгезионной связи между алюминиевым покрытием и основным металлом (рисунок 46).

В структуре образцов подогретых до 500°C на границе контакта наблюдаются включения интерметаллидных фаз (рисунок 47), образовавшиеся в результате реакционной диффузии алюминия и железа и которые, вероятно, тоже снижают прочность сцепления покрытия с основным металлом.

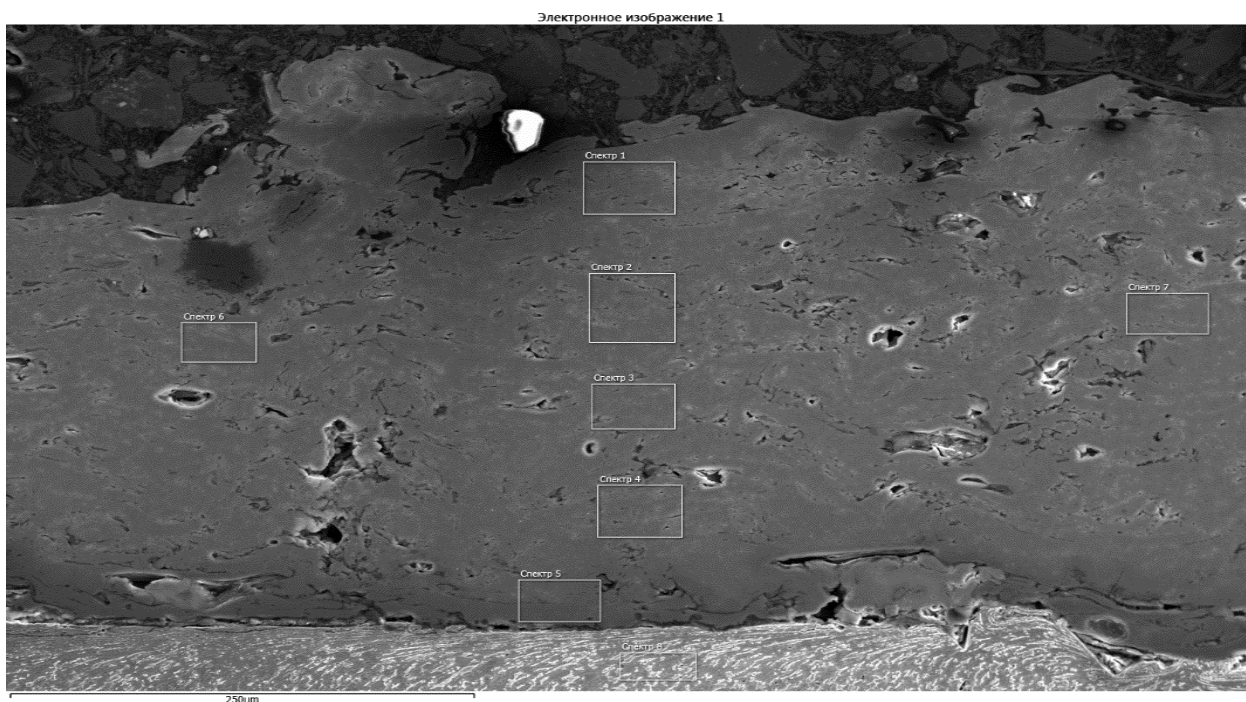


Рисунок - 42 Структура алюминиевого покрытия на стали 20 без предварительного подогрева

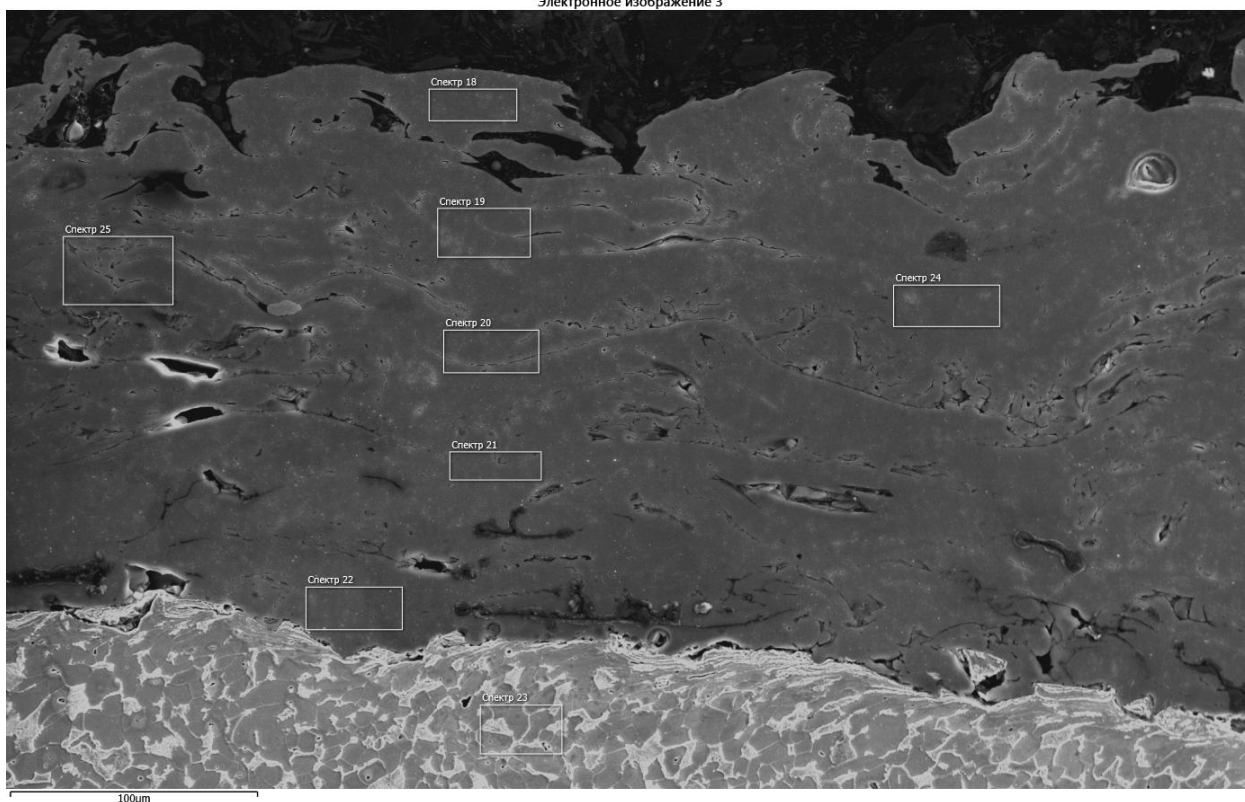


Рисунок 43 - Структура алюминиевого покрытия на стали 20 с подогревом до 100°C

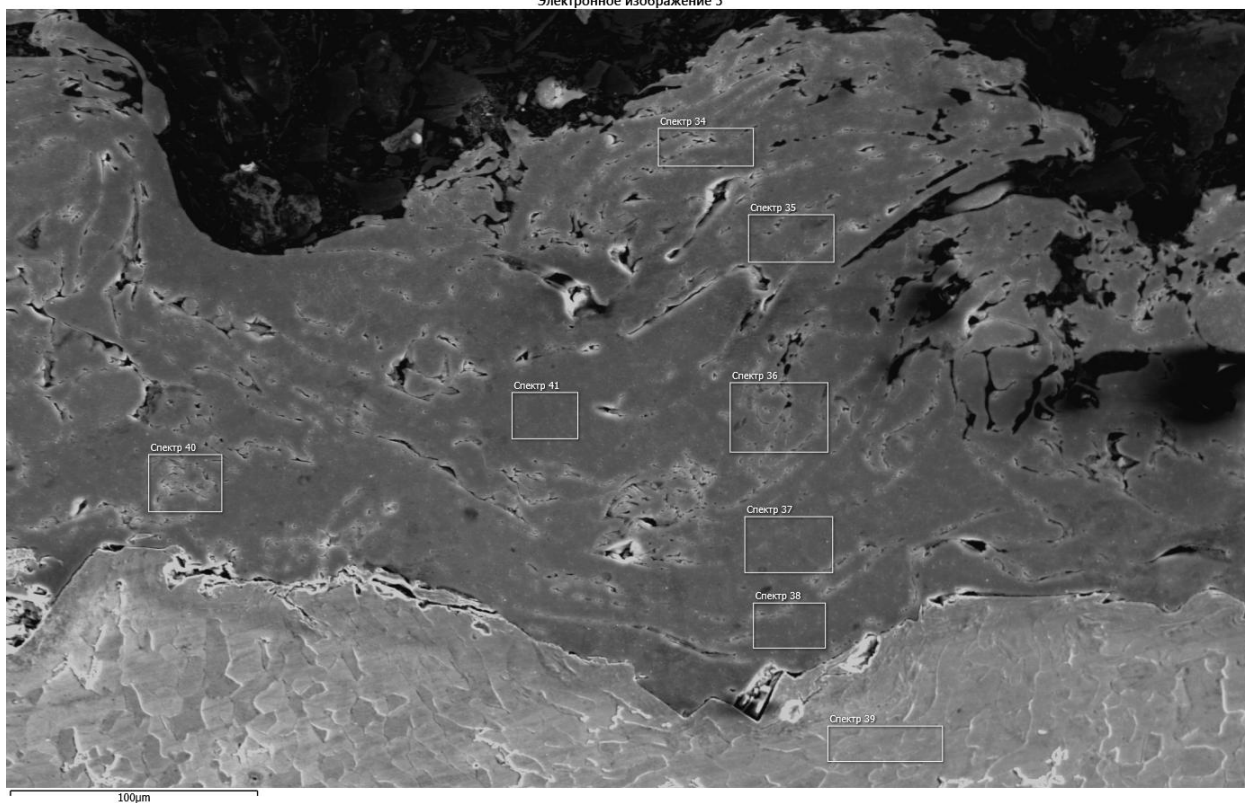


Рисунок 44 - Структура алюминиевого покрытия на стали 20 с подогревом до 200°C

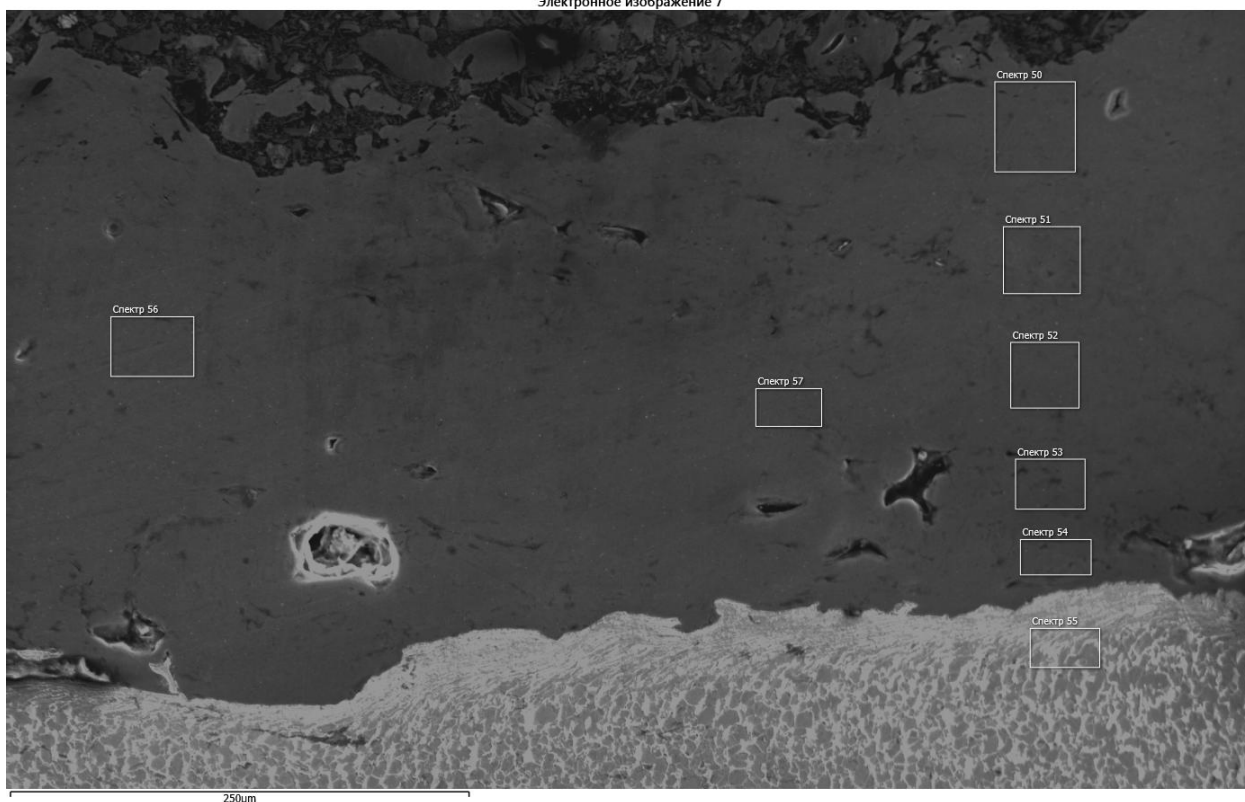


Рисунок 45 - Структура алюминиевого покрытия на стали 20 с подогревом до 300°C

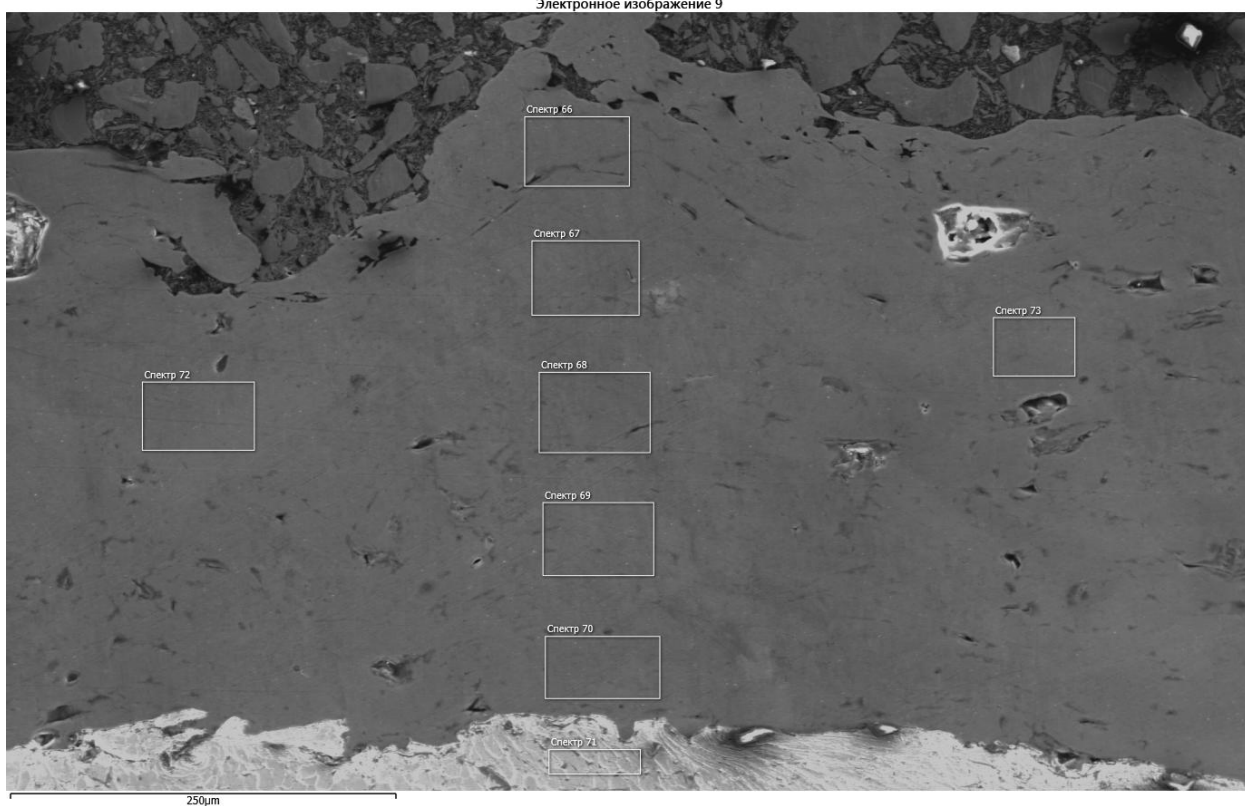


Рисунок 46 - Структура алюминиевого покрытия на стали 20 с подогревом до 400°C

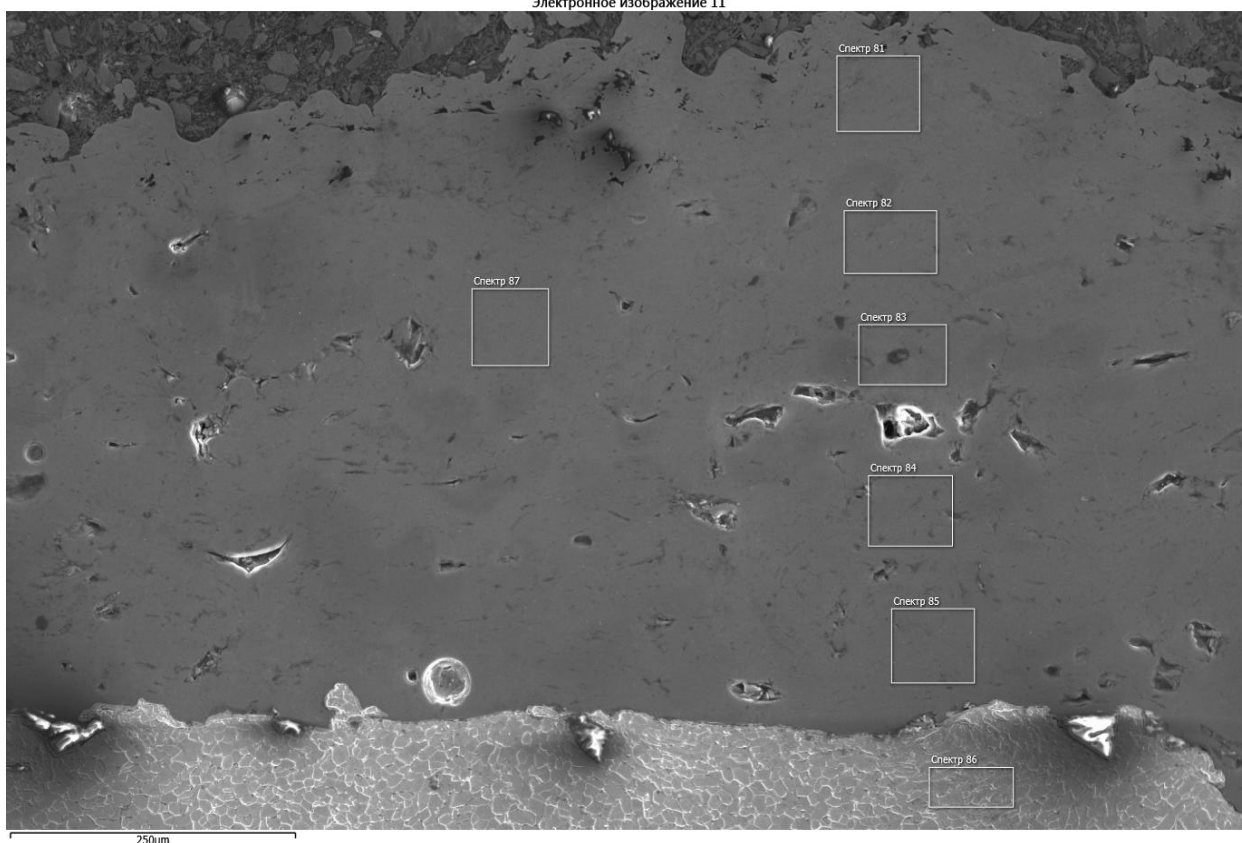


Рисунок 47 - Структура алюминиевого покрытия на стали 20с подогревом до 500°C

Предварительный подогрев при газопламенном напылении алюминия на углеродистые стали способствует повышению прочности сцепления основного металла и покрытия вследствие улучшения механического сцепления покрытия с основным металлом и образования адгезионной связи между ними. Наиболее высокая прочность сцепления основного металла с напыляемым слоем наблюдается при подогреве до 300°C. При более высоких температурах увеличивается толщина оксидного слоя на основном металле и образуются хрупкие интерметаллиды по границе контакта, что снижает прочность сцепления покрытия.

Следующим этапом исследований было объединение способов придания поверхности подложки сложной структуры и термической обработки перед нанесением на него алюминиевого покрытия газопламенным напылением. Для экспериментов так же использовались образцы диаметром 70мм.

Таблица 5 - Результаты исследования прочности сцепления алюминиевого покрытия со сталью

образец	Материал образца	Характер подготовки поверхности	Подогрев	Прочность сцепления, МПа
10	Сталь 20	Токарная обработка	350°С 60 мин	менее 1
11	Сталь 20	Рваная резьба	350°С 60 мин	3.3
12	Сталь 20	Абразивно-струйная обработка кварцевым песком	350°С 60 мин	1.1
13	Сталь 20	Абразивно-струйная обработка	350°С 60 мин	5
14	Сталь 20	Рваная резьба, Абразивно-струйная обработка никельшлаком	350°С 60 мин	7.4

Применение предварительного подогрева деталей при прочих равных параметрах обработки поверхности перед процессом металлизации способствует увеличению сцепления покрытия с основой на 50%, 7,5 МПа. Нагрев образцов до 350°С уменьшает разницу температур между подложкой что способствует более продолжительному времени кристаллизации перенесенных алюминиевых частиц, улучшает заполнение и повторяемость геометрии поверхности напыленным слоем, уменьшает количество пор и (рисунок 48 ).

Максимальная прочность сцепления достигается при применении комбинированной обработки: рваная резьба и пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5 . Применение предварительного подогрева деталей при прочих равных параметрах обработки поверхности перед процессом металлизации способствует увеличению сцепления покрытия с основой на 50%. Более низкие значения прочности сцепления по сравнению с

предыдущими данными объясняются большими размерами образцов и неравномерным слоем напыленного покрытия [34].

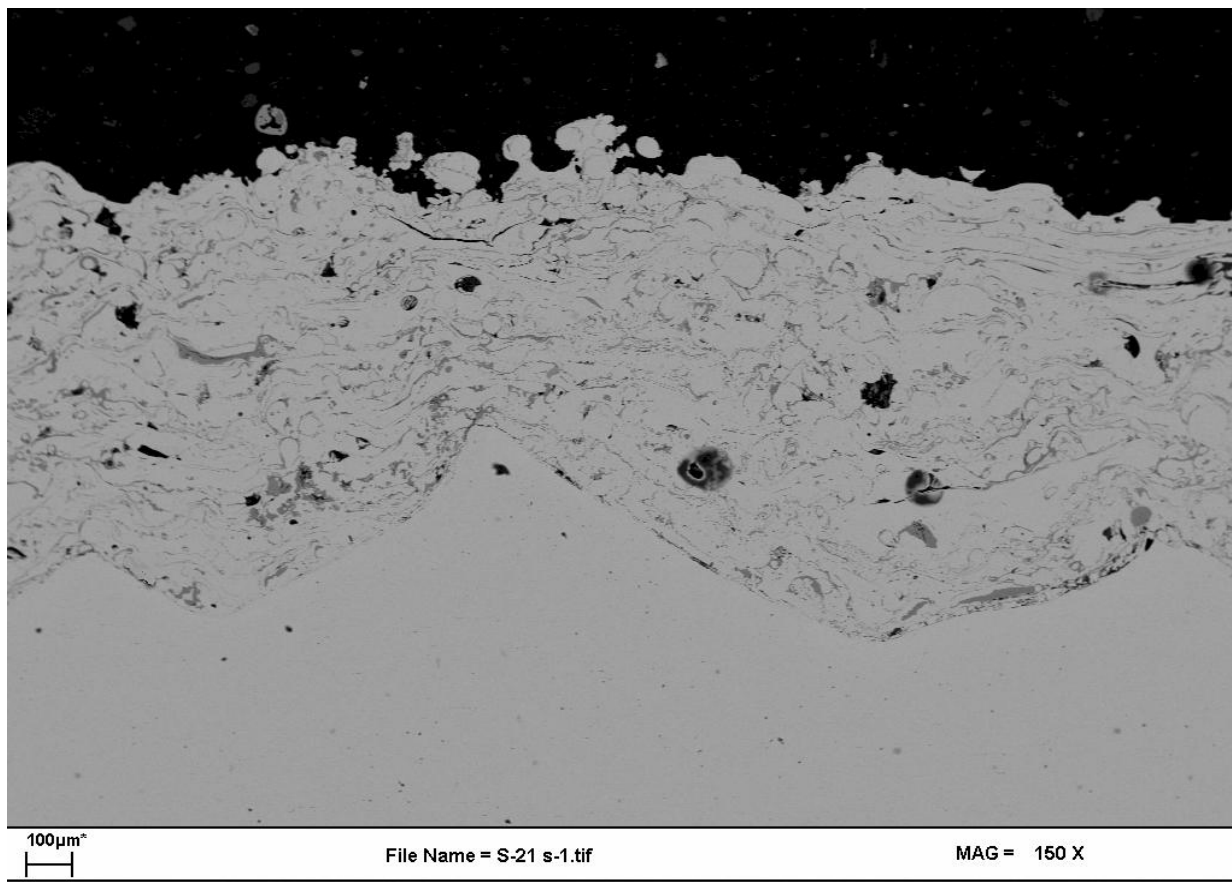


Рисунок 48 Структура алюминиевого покрытия, напыленного на сталь 20 с "рваной" резьбой, абразивно-струйной обработкой и подогревом 350°С

### 3.3 Исследования процессов жидкофазного алитирования

Проведенные исследования алитирования, методом погружения в расплавленный алюминий показали что среднее значение прочности сцепления составляет 3,2 МПа (таблица 6). Кроме этого наблюдается закономерность уменьшения прочности сцепления с возрастанием температуры алюминиевого расплава и времени нахождения детали в нем. Разрушение происходит по границе сталь- алюминий при 700 °С (рисунок 49), а при температуре 900 °С в слое алюминия (рисунок 50). Это связано с образованием на границе стальная пластина- расплавленный алюминий, интерметаллидной прослойки. При увеличении температуры кинетика роста

только увеличивается, что увеличивает толщину интерметаллидного слоя и уменьшает прочность соединения.

Таблица 6- Результаты исследования прочности сцепления алюминиевого покрытия со сталью

№ образца	Материал образца	Сплав	Температура 350°С	Время выдержки, мин	Прочность сцепления, МПа
1	Сталь 20	Al	700	1	5,2
2				1,5	3,8
3				2	2,9
4			800	1	3,8
5				1,5	3,2
6				2	2,9
7			900	1	3,0
8				1,5	2,7
9				2	1,6





Рисунок 49 - алюминиевое покрытие на стали после испытания образца при температуре 700 °С

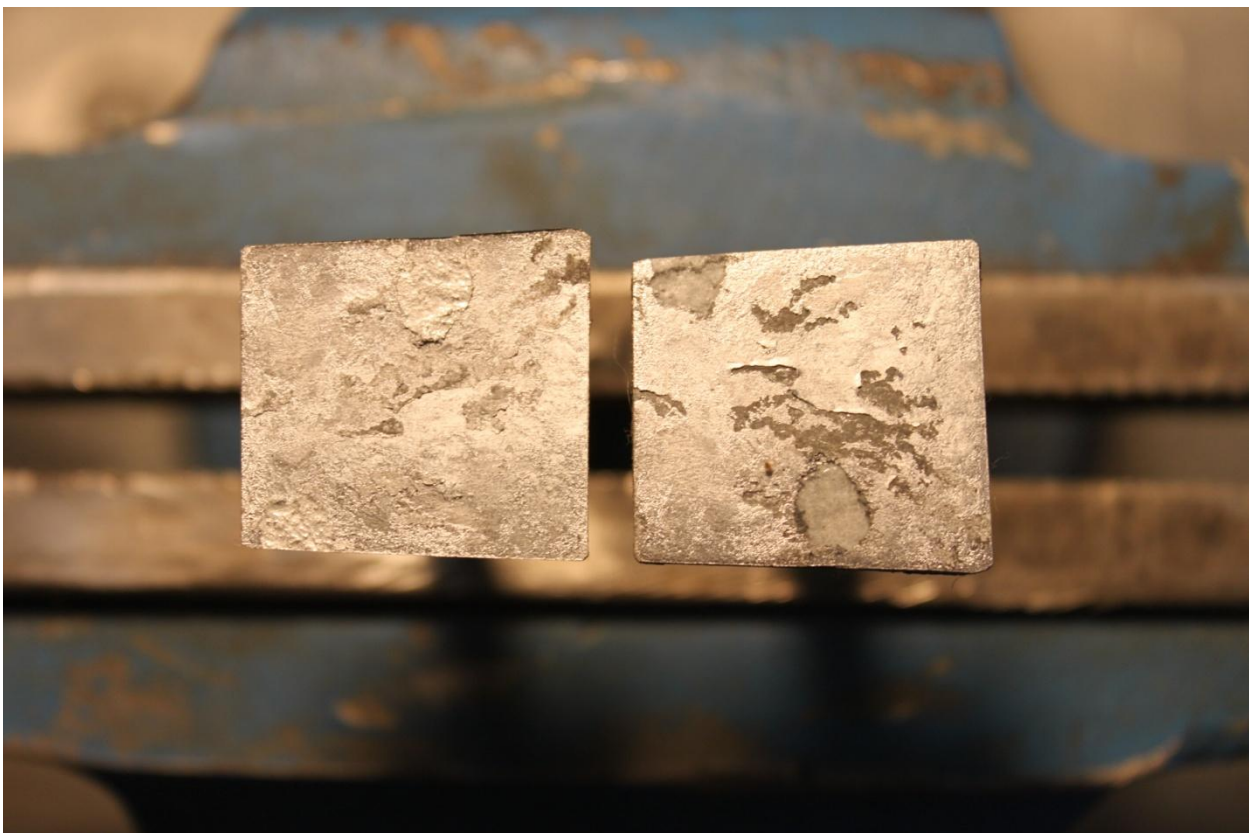


Рисунок 50 - алюминиевое покрытие на стали после испытания образца при 900°С

### **3.4 Исследование диффузионного отжига алюминиевых покрытий полученных газопламенным напылением**

Проведенные исследования показали, что предложенная технология газопламенного напыления алюминия на сталь обеспечивала формирования адгезионной связи между напыляемым и основным металлом. Во время проведения химического анализа основного металла при напылении с предварительным подогревом 300°С, в поверхностных слоях стали было обнаружено до 0,2% алюминия, что является следствием диффузии и способствует увеличению адгезионных сил между ними. На основании этого проводились исследования диффузионного отжига с целью определения механизма образования и роста интерметаллидного слоя (рисунок 51).

Диффузионный отжиг образцов с алюминиевым покрытием углеродистой и стали при температурах 300-400°С и выдержке в течение 5 часов не привел к образованию интерметаллидного слоя.

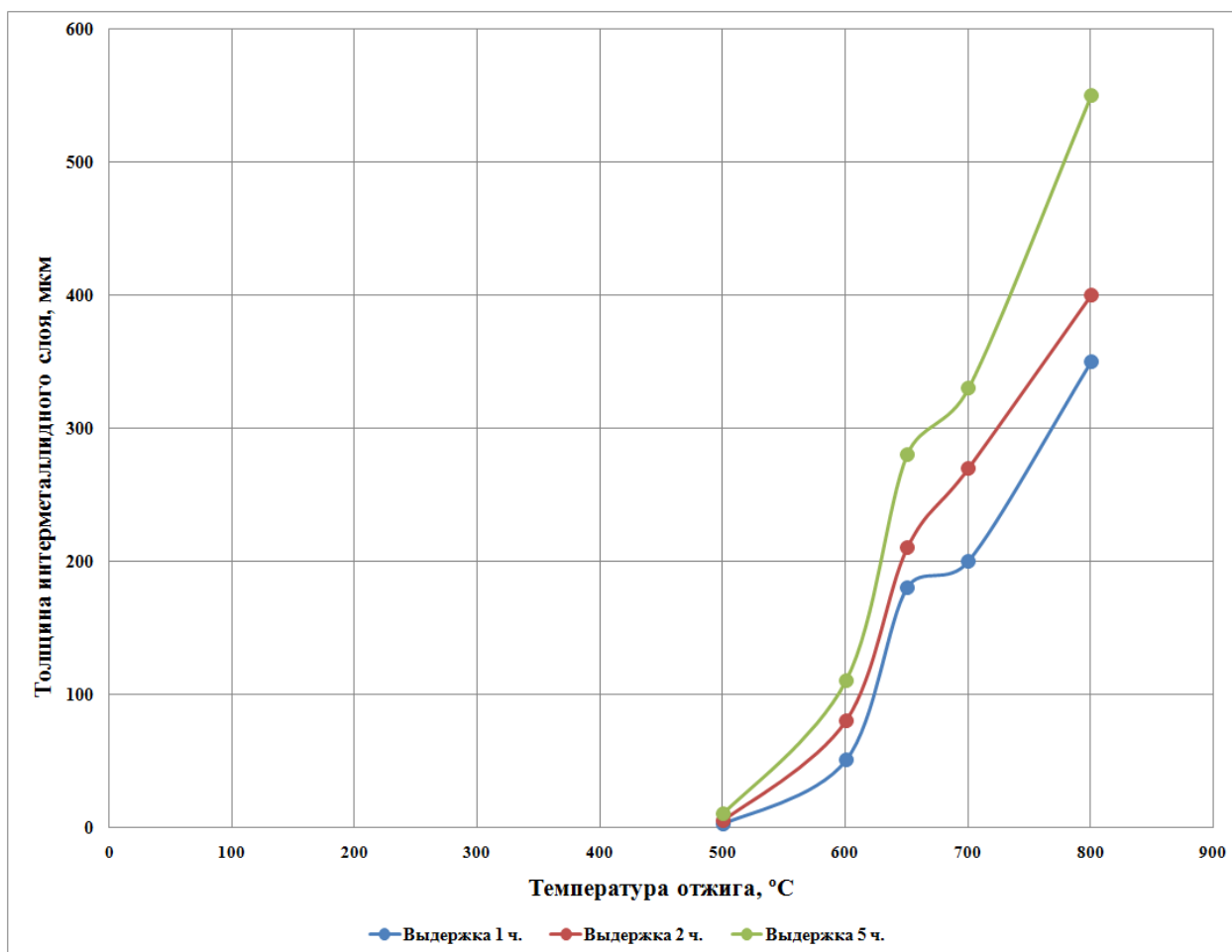


Рисунок 51 - Зависимость толщины интерметаллидного слоя от температуры отжига образцов из стали

При температурах диффузионного отжига 400-500 на стальных образцах наблюдается интерметаллидный слой с толщиной 18-25мкм при 500°С и выдержке в течение 5 часов (рисунок 51).

Увеличение температуры отжига до 600°С привело к скачкообразному росту слоя интерметаллида. При выдержке в течении 5 часов толщина слоя составила 135мкм. Увеличение температуры отжига до 650°С позволило получить слой интерметаллида толщиной 280 мкм при выдержки 5 часов. Микрорентгеноспектральный анализ слоя интерметаллидов показал, что химический состав интерметаллидного слоя на стали 20 соответствует области существования фазы  $Fe_2Al_5$  [35].

При диффузионном отжиге стали 20 с напыленным алюминиевым слоем при температуре 700°С в течении 1 часа формируется слой толщиной 200 мкм, а в течении 5 часов слой толщиной 330мкм (рисунок 51.). При

температуре отжига 800°C толщина интерметаллидного слоя после выдержки в течение одного часа составляет 350 мкм, а при 5 часовой выдержки – 550мкм.

Микрорентгеноспектральный анализ слоя интерметаллидов показал, что при диффузионном отжиге стали 20 с напыленным покрытием в результате реакционной диффузии алюминия и железа формируется двухслойное интерметаллидное покрытие (рисунок 52). Со стороны стали формируется языкообразный слой, который, исходя из химического состава, является фазой  $Fe_2Al_5$ [29]. Со стороны алюминия формируется слой незначительной толщины 5-10 мкм соответствующий химическому составу интерметаллида  $FeAl_3$ . Толщина этого слоя с повышением температуры и времени выдержки уменьшается.[34-38]

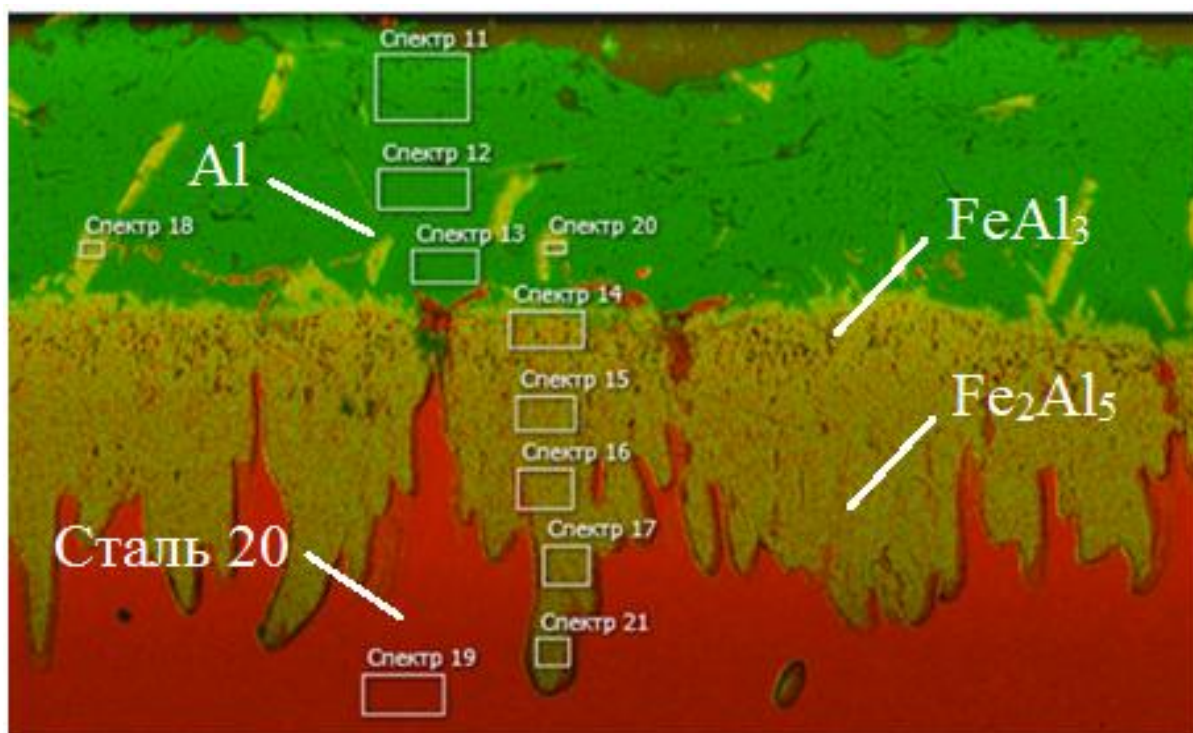


Рисунок 52 - Микрорентгеноспектральный анализ образца №24

При температуре отжига 800°C и времени выдержки 5 часов на стали 20 наблюдается однослойное алитированное покрытие на основе фазы  $Fe_2Al_5$  (рисунок 53). Алюминиевое покрытие при этих режимах полностью расходуется на формирования алитированного слоя.

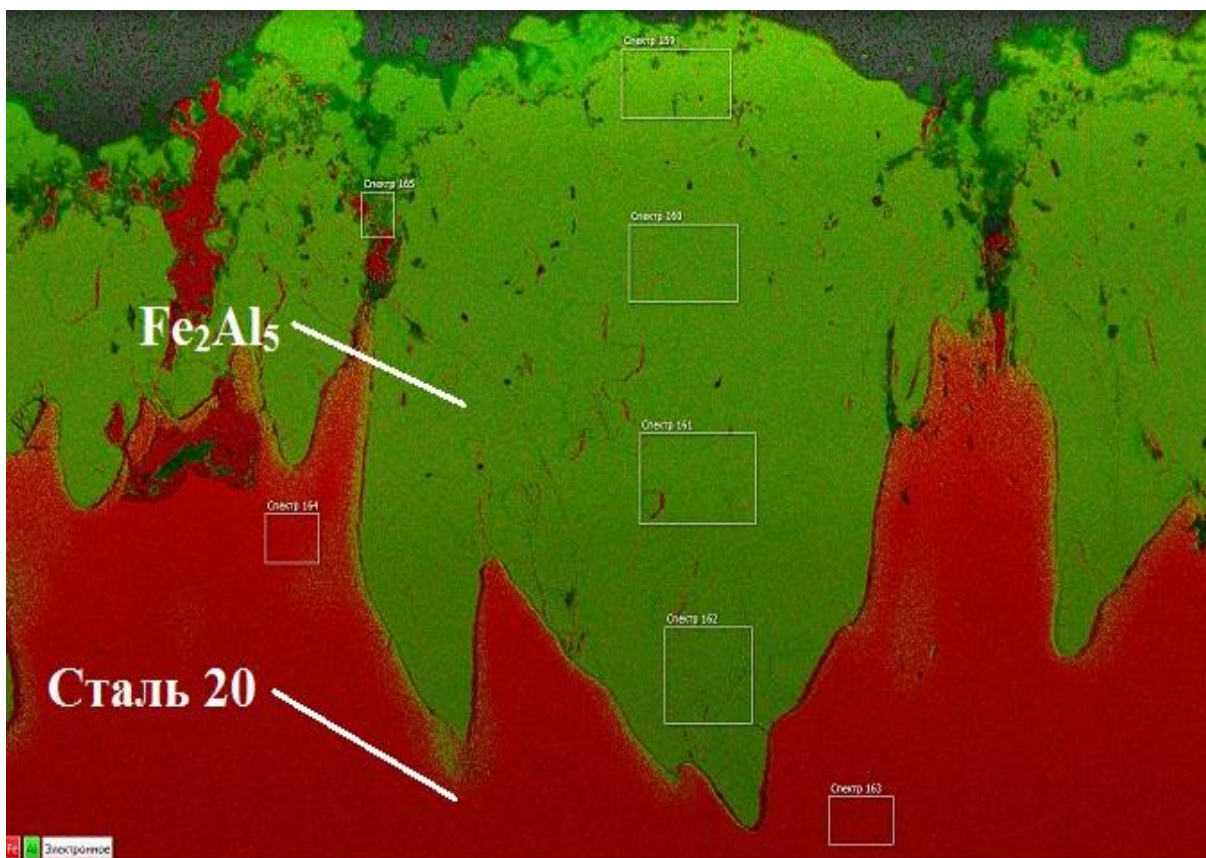


Рисунок 53 - Микрорентгеноспектральный анализ образца № 30

На основе полученных данных была определена закономерность роста переходного слоя. Закон роста интерметаллидного слоя имеет параболический характер уравнение 2

$$x^2 = Kt \quad (2)$$

где  $x$  – толщина слоя,

$K$  – коэффициент, пропорциональный коэффициенту диффузии.

Исходя из уравнения Аррениуса (3):

$$K = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

Величина энергии активации  $Q$  и  $K_0$  определяются по зависимости (4)

$$\ln k = f\left(\frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

построенной по экспериментальным данным (рисунок 54 ).

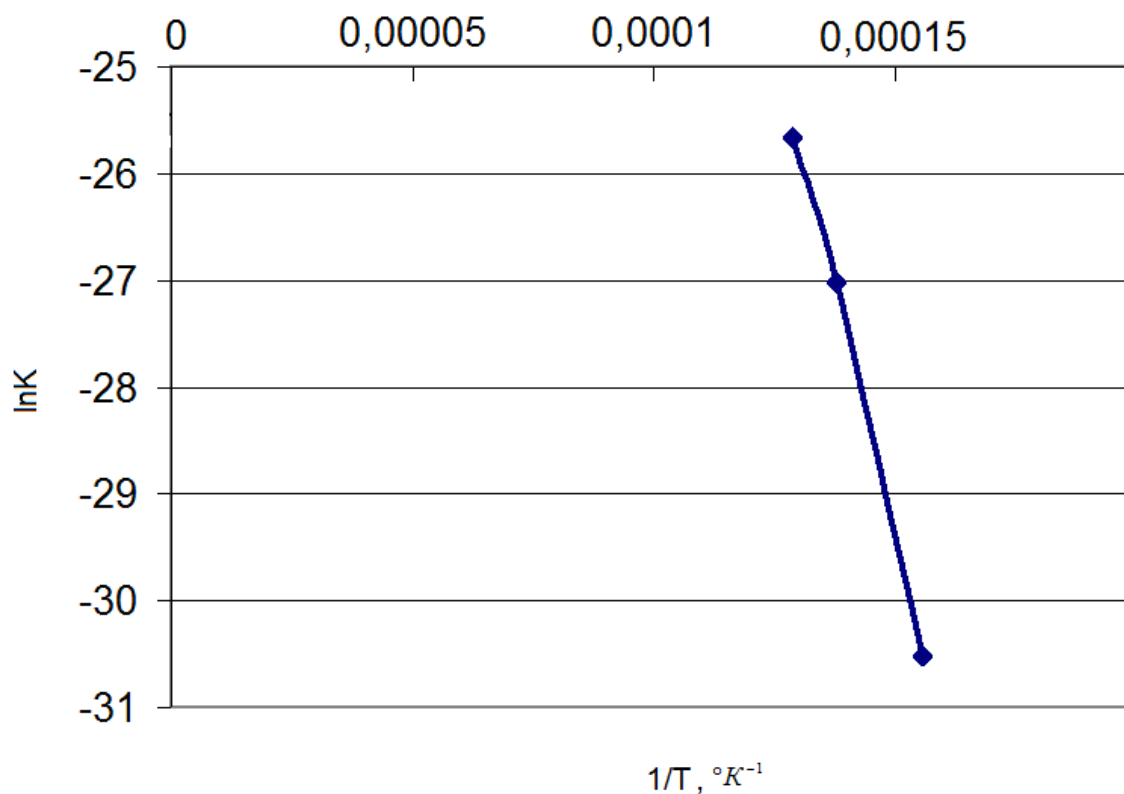


Рисунок 54 - Зависимость  $\ln k = f(1/T)$  при отжиге образцов сталь 20-алюминий СвА5 при температурах 500-650<sup>0</sup>С

Исходя из этого, закон роста интерметаллидного слоя при температурах 500-650<sup>0</sup>С можно записать следующим образом (5):

$$x^2 = 0,023 \cdot \exp\left(-\frac{152100}{RT}\right)t \quad (5)$$

Таким образом, в интервале температур 700-800<sup>0</sup>С закон роста интерметаллидного слоя в системе Сталь 20-А5 будет иметь вид (6):

$$x^2 = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(-\frac{135700}{RT}\right)t \quad (6)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Проведенный анализ способов формирования алюминиевых покрытий на стали показал что наиболее универсальными простыми, производительными способами являются газопламенное напыление и жидкофазное алитирование.
2. Основным недостатком газопламенного напыления является низкая прочность адгезионной связи алюминия со сталью. Для повышения прочности сцепления предложено использовать предварительную обработку поверхности и подогрев.
3. Для исследования процессов газопламенного напыления и жидкофазного алитирования разработана методика, спроектирована и изготовлена механизированная установка для газопламенного напыления на основе металлизатора Плакарт FS-15.
4. Проведенные исследования газопламенного напыления показали что наиболее высокая прочность сцепления алюминия со сталью наблюдается при использовании в качестве предварительной подготовки поверхности «рваную» резьбу и абразивно-струйную обработку
5. Проведенные исследования влияния предварительного подогрева на прочность сцепления алюминия со сталью показали что максимальные значения прочности сцепления наблюдается при температурах 300-350°C
6. Прочность сцепления алюминия со сталью при жидкофазном способе не превышает значений , в связи с этим гпн имеет существенное преимущество
7. Проведенные исследования процессов диффузионного отжига стали с алюминиевым покрыт нанесенным газопламенным напылением позволили установить влияние температуры и времени процесса, на химический и фазовый состав, структуру и толщину интерметаллидного покрытия

8. Зависимость толщины алюминиевых покрытий от режимов описывается уравнением



## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голованенко, С.А. Производство биметаллов / С.А. Голованенко, Л.В. Меандров – М. : «Металлургия», 1966. -153 с.
2. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки; пер. с яп. В.Н. Попова, ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – Москва: «Машиностроение», 1985. – 240 с.
3. Ильющенко, А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко. - Минск: «Беларуская навука», 2011. – 356 с.
4. Рябов, В.Р. Алитирование стали / В.Р. Рябов. – М.: «Металлургия», 1973. – 240 с.
5. Волоченко, В.Н. Сварка и свариваемые материалы Том 2 Технология и оборудование / В.Н. Волоченко. - М.: «Машиностроение», 1989. - 640 с.
6. Голованенко, С.А. Сварка прокаткой биметаллов / С.А. Голованенко. – М.: «Металлургия», 1998. - 160 с.
7. Кудинов, В.М. Сварка взрывом / В.М. Кудинов [и др.]. – М.: «Машиностроение», 1987. – 216 с.
8. Перинский, В.В. Специальные материалы, покрытия и технологии в машиностроении: учеб. пособие / В.В. Перинский, В.Н. Лясников, Г.П. Фетисов. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. - 740 с.
9. Хасуй, А. Техника напыления / А. Хасуй. М.: «Машиностроение», 1975. - 287 с.
10. Бартнев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартнев, Федько Ю.П., Григорьев А.И. – Ленинград: «Машиностроение», 1982. - 215 с.
11. Кудинов, В. В. Получение покрытий высокотемпературным распылением / В. В. Кудинов, Л. К. Дружинин. - Москва. : «МИР», 1973. - 85с.

12. Кудинов, В. В., Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. - Москва. : «Машиностроение», 1981. - 192 с.
13. Лясников, В.Н. Плазменное напыление: монография / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. - Саратов:Сарат. гос. техн. ун-т, 2016. – 643 с.
14. Герасимов, А.Н. Плазменная технология: опыт, разработки и внедрения / А.В. Бобылев. - Л.: «Лениздат», 1980. - 110с.
15. Кудинов, В.В. Получение покрытий высокотемпературным распылением / В.В. Кудинов, Л.К. Дружинин. - М.: «МИР», 1973. - 85с.
16. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. -М.: «Машиностроение», 1987. - 190с.
17. Сонин, В.И. Газотермическое напыление материалов в машиностроении / В.И. Сонин. -М.: «Машиностроение», 1973, - 152 с.
18. Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин, Г.М. Абрамович, В.И. Жарник. - Минск: «Наука и техника», 1985. - 175с.
19. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов. - Киев: «Наукова Думка», 1987. - 210 с.
20. Станчев, Д.И. Восстановление деталей машин газотермическими способами / учеб. пособие / Д.И. Станчев, А.М. Кадырметов, В.И. Ключников, К.А. Яковлев. – Воронеж: «ВГЛТА», 2003. – 83 с.
21. Макиенко, Н.И. Слесарное дело с основами материаловедения /Н.И. Макиенко. - М., «Высш. школа», 1976. - 423с.
22. Кравченко, И.Н. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением / И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, А.А. Коломейченко// Вестник Орловский аграрный университет. - 2015. - № 1 С. 36-40.
23. Дорожкин, Н.Н. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, В. К. Ярошевич; Под ред. Г. А. Анисовича. – Минск : «Наука и техника», 1985. - 279 с

24. Полевой, Г.В. Газопламенная обработка металлов / учеб. пособие / Г. В. Полевой, Г. К. Сухинин. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 336 с.
25. Глихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов / С.Я. Глихес. - Ленинград: «Машиностроение», 1977. — 112 с.
26. Войтович, В.А. Новые противокоррозионные материалы в строительстве / В.А. Войтович. – Горький : Волго-Вятское кн. изд-во, 1980. – 95 с.
27. Ковтунов, А.И. Интерметаллидные сплавы / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин. – Тольятти: «Тольяттинский государственные университет», 2018. – 77 с.
28. Гольдштейн, М.И. Специальные стали / учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М. : Металлургия, 1985. – 408 с.
29. Шанк, Ф.А. Структуры двойных сплавов / Ф.А. Шанк ; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1973. – 760 с.
30. Ковтунов, А.И. Исследование влияния условий газопламенного напыления на прочность сцепления покрытия с основным металлом / А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов, И.С. Нестеренко, Ю.Ю. Юриков // Журн. «Сварка и Диагностика». - 2018. - №3. - С – 53-57.
31. Ковтунов, А.И. Исследование процессов газопламенного напыления алюминия на сталь / А.И. Ковтунов, И.С. Нестеренко // Журн. «Технология металлов». - 2019. - №3. - С - 42-50.
32. Ковтунов, А.И. Исследование процессов восстановления валов из высоколегированных сталей газопламенным напылением в условиях ОАО "Сибур-Тольятти" / А.И. Ковтунов, Д.А. Семистенов, И.С. Нестеренко, Ю.Ю. Юриков // Журн. «Упрочняющие технологии и покрытия». - 2018. - Т. 14.- №12. - С – 566-571.
33. Исследования процессов газопламенного напыления алюминия на сталь / Ковтунов А.И., Нестеренко И.С., // Тез.докл. международная научно-практическая конференция «Современные концепции развития науки» - Пермь 16 марта 2018 года – С. 58-63.

34. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник: В 3-х т.: Т1 / ред. Н.П. Лякишев. – Москва.: «Машиностроение», 1997. – 1024 с.
35. Минкевич, А.Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А.Н. Минкевич. – 2-е. изд., перераб. – М. : Машиностроение, 1965. – 492 с.
36. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозаказным упрочнением / Ю.Р. Колобов [и др.] ; под ред. Е.Н. Каблова, Ю.Р. Колобова. – М. : МИСиС издательский дом, 2008. – 326 с.
37. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа / пер. с англ. / Под ред. Л.А. Петровой. – Москва: «Металлургия», 1985. – 184 с.
38. Криштал, М.М., Ясников И.С., Полуниин В.И., Филатов А.М., Ульяненокв А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
39. Щедров, К.П. Жаростойкие материалы : справочное пособие / К.П. Щедров, Э.Л. Гакман – М.: «Машиностроение». 1965. – 168 с.
40. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – Москва: «Металлургиздат», 1962. Т 1,2. – 1188 с.
41. Murry J.L. The Aluminum-Iron-Silicon, 91-56-EB7 [Текст] / J.L. Murry Alcoa Technical Center, Aluminum Company of America, ALCOA Center, PA, 1991.
42. Шатт, В. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / В. Шатт. - Москва.: «Металлургия», 1983. 520 с.
43. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази [и др.]. - Москва. : «Машиностроение», 1989. - 200 с.
44. Способ подготовки поверхности изделия под напыление пат. 2004350 Рос. Федерация : МПК В05D3/12 Б / Храменков С.В. Кычин В. П., Бабинокв В. И. Фомушкин В. П., заявитель и патентообладатель Орловский

государственный аграрный университет. - № 2003119672/12; заявл. 30.06.2003; опубл. 10.10.2004

45. Масино, М.А. Организация восстановления автомобильных деталей / М.А. Масино. - Москва. : «Транспорт», 1981. - 176с.

46. Навознов, Н. А. Обоснование и разработка технологии восстановления деталей газопламенным напылением порошковых материалов с применением электромеханической обработки. : автореф. дис. ... канд. тех. Наук : 05.20.03 / Навознов Александр Николаевич – Ульяновск, 1995. –16 с.

47. Бобылев, А.В. Механические и технологические свойства металлов: справочник / А.В. Бобылев. - Москва.: «Металлургия», 1980. 296 с.

48. Азизов, Р.О., Разработка износостойких газопламенных покрытий с повышенной прочностью сцепления: дис. канд. техн. наук /Р.О. Азизов. Мн.:1986.-176 с.

49. Лясников, В.Н. Конструкционные материалы: учеб. пособие / Лясников В.Н., О.А. Дударева. Саратов. – «Сарат. гос. техн. ун-т», 2016. – 146 с.

50. Лясников, В.Н. Плазменные технологии и оборудование: учеб. пособие / В.Н. Лясников, А.В. Лясникова, О.А. Дударева. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т,2016. – 111 с.

51. Полевой, С. Н. Упрочнение металлов: Справочник /. С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. - М,: «Машиностроение», 1986. - 320 с.

52. High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying Process and Coating Characteristics H. Kreye, R. Schwetzke, S. Zimmermann: Proc. 9th Natl. Thermal Spray Conf. NTSC '96, ASM International USA, (1996) p. 451-456

53. Comparison of HVOF-Systems Materials Behaviour and Coating Characteristics H. Kreye: Proc. 4. Kolloquium zum Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, Erding, GTS 1997, S. 13-21

54. Microstructure and Properties of Tungsten Carbide Coatings Sprayed with Various HVOF-Spray Systems R. Schwetzke, H. Kreye: Journal Thermal Spray Technology JTST 8.3 (1999), p. 434-439

55. Oxidation of Stainless Steel in the High Velocity Oxy-Fuel Process. K. Dobler, H. Kreye, R. Schwetzke: Journal of Thermal Spray Technolog JTST 9.3 (2000) p. 407-413
56. Processing and Properties of intermetallic-Ceramic Composites with Interpenetrating Microstructure T. Klassen, R. Guenther, B. Dickau, F. Gaertner, A. Bartels, R. Bormann, H. Mecking: J. American Ceramic Society. 81 (1998) 2504-2506.
57. High Velocity Oxy-Fuel Flame Spraying State of the Art, Prospects and Alternatives. H. Kreye, F. Gaertner, A. Kirsten, R. Schwetzke: Proc. 5th HVOF Colloquium, Erding, Gemeinschaft Thermisches Spritzen Ed. 2000, p 5-18.
58. High Velocity Combustion Wire Spraying Systems and Coatings. A. Kirsten, F. Gaertner, H. Kreye, W. Kroemmer: Proc. Internationa. Thermal Spray Conference, Singapore, 2001.
59. ГОСТ 28076-89. Газотермическое напыление. Термины и определения. Введ. 1990-07-01. - М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.
60. ГОСТ 28302-89. Покрyтия газотермические защитные из цинка и алюминия металлических конструкций. Общие требования к типовому технологическому процессу. . - Введ. 1991-01-01. - М. Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.
61. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. покpытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования. - Введ. 1987-07-01. - М. : Изд-во стандартов, 2010. – 34 с.
62. ГОСТ 9.304-87. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия газотермические. Общие требования и методы контроля. - Введ. 1989-01-01. - М. : Изд-во стандартов, 2001. – 34 с.
- 63.ГОСТ 2.105–95 «Общие требования к текстовым документам»
64. ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание общие требования и правила составления. - 2004-07-01. - М.: Стандартинформ, 2010

65. Амирджанова, И.Ю. Правила оформления выпускных квалификационных работ: учебно-методическое пособие / И.Ю. Амирджанова, Т.А. Варенцова, В.Г. Виткалов, А.Г. Егоров, В.В. Петрова  
Тольятти : ТГУ, 2019, - 145 с.