

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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 полностью)

22.04.01 Материаловедение и технологии материалов

(код и наименование направления подготовки)

«Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов»

(направленность, (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Исследование процессов и разработка технологии восстановления валов из углеродистых сталей газопламенным напылением

Студент	Ю. Ю. Юриков	_____	_____
		(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Научный руководитель	А. И. Ковтунов	_____	_____
		(И.О. Фамилия)	(личная подпись)
Консультант	В. Г. Виткалов	_____	_____
		(И.О. Фамилия)	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., проф. Ковтунов А.И.
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« _____ » _____ 2018 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., проф. Ельцов В.В.
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)
« _____ » _____ 2018 г.

Тольятти 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Особенности технологии газопламенного напыления.....	6
2 Анализ возможных направлений увеличения прочности связи напыленного материала и материала основы.....	9
3 Методика исследования процессов газопламенного напыления	17
3.1 Методика исследования процессов газопламенного восстановления валов из углеродистых сталей	17
3.2 Методика исследования тепловых процессов формирования напыленного слоя.....	25
3.3 Определение прочности сцепления основного и напыленного металла.....	29
3.4 Методика исследования структуры и химического состава покрытий	33
4 Исследования процессов газопламенного напыления	36
4.1 Исследование тепловых процессов формирования напыленного слоя.....	36
4.2 Исследование влияния температуры подогрева на проч- ность сцепления основного и напыленного металла.....	48
4.3 Исследование влияния состава промежуточного слоя на прочность сцепления основного и напыленного металла.....	53
4.4 Исследование влияния характера подготовки поверхности основного металла на прочность сцепления	60
4.5 Исследование прочности сцепления основного и напыленного металла при использовании ацетилена	64
4.6 Исследование процессов газопламенного напыления с применением цилиндрических образцов	67
4.7 Исследование структуры и химического состава	

напыленного и промежуточных слоев.....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	77

ВВЕДЕНИЕ

«Повышение надежности оборудования и машин, а также, снижение затрат на эксплуатацию, ремонт, является актуальной задачей и в настоящее время» [1].

Валы, передающие крутящий момент от силовой установки (двигателя внутреннего сгорания, электродвигателя и т.д.) являются одной из самых важных и трудоемких в изготовлении деталей машин, агрегатов, насосов и компрессоров. В состав ООО «СИБУР Тольятти» входят порядка 20 технологических установок, связанных в последовательную производственную цепочку, на которых происходит переработка углеводородных фракций в различные марки каучуков. В этом процессе участвуют тысячи единиц оборудования, в конструкции которых присутствуют валы. Механические свойства материала валов должны обеспечивать долговременный пробег оборудования. Поэтому для изготовления валов используется дорогостоящая высококачественная сталь. Технологический процесс изготовления валов состоит из множества трудоемких технологических операций. Кроме высокой трудоемкости, процесс изготовления новых валов энергозатратен, поскольку используется множество единиц станочного оборудования. В связи с этим ремонт дефектных поверхностей валов (шейки под подшипники, сальниковые уплотнения и т. д.) является приоритетной задачей для ремонтного производства ООО «СИБУР Тольятти».

«Уже давно известно, что восстановление и ремонт изношенных деталей будет экономически выгоднее, чем изготовление новых (35% от цены новой детали). Сокращается число производственных операций примерно в 5-8 раз по отношению к изготовлению новых» [2].

РМЦ ООО «СИБУР Тольятти» владеет следующими способами восстановления изношенных деталей:

- Запрессовка втулок, установка гужонок;

- Накатка посадочных мест под подшипники;
- Механическая обработка, фрезеровка;
- Наплавка ручной дуговой, аргодуговой сваркой, механизированной сваркой в среде углекислого и инертного газов;

В 2015 году на предприятиях холдинга СИБУР началась программа по повышению эффективности производства и производительности труда, обеспечению производства перспективными технологиями. В связи с этим было принято решение о закупке оборудования для ремонта, в числе которого была установка для газопламенного напыления металлических покрытий. По сравнению с перечисленными способами ремонта, газопламенное напыление обладает следующими преимуществами:

- технология позволяет ремонтировать поверхности деталей различной конструкции;
- можно наносить покрытия как из металлов, так и из не металлов (например керамики);
- технология достаточно эффективна при тщательном соблюдении всех технологических операций;
- технологию возможно внедрить в производство без больших материальных вложений;
- низкое энергетическое вложение в ремонтируемую деталь позволяет восстанавливать детали малых толщин и диаметров без деформации их конструкции.

Целью работы является повышение качества и сокращение времени ремонта валов, расширение номенклатуры ремонтируемых валов за счет исследования процессов, происходящих при восстановлении изношенных конструкций методом газопламенного напыления.

1 Особенности технологии газопламенного напыления

Газопламенное напыление это технологический процесс, при котором происходит расплавление металлической проволоки пропан- кислородным или ацетилен- кислородным пламенем, мельчайшие частицы расплавленного металла транспортируются сжатым воздухом к подложке и кристаллизуются на ней.

«В ряду современных способов поверхностной обработки материалов напыление занимает особое место. Для выбора оптимального способа нанесения покрытия необходимо учитывать форму и размеры изделий, требования, предъявляемые к точности нанесения покрытия, его эксплуатационным свойствам» [3].

«Существующую технологию напыления в зависимости от применяемого источника тепловой энергии можно разделить на два основных вида: газопламенное напыление, при котором используется теплота, выделяющаяся при сгорании смеси горючего газа с кислородом, и электрическое напыление, основанное на использовании теплоты, выделяющейся при горении электрической дуги» [1].

«Газопламенное напыление получило широкое распространение в промышленности, благодаря дешевизне процесса, относительно небольшому нагреву основной поверхности детали, широкому диапазону толщины напыляемого слоя. Газопламенным напылением восстанавливают геометрию изношенных деталей, придают им износоустойчивые свойства, а также используют в качестве декоративного покрытия и защиты от коррозии различных конструкций» [4].

Преимущества:

- Напыляемый материал можно наносить на детали с развитой поверхностью, различной геометрии;

- материал напыляемого и основного материала может быть различным (металл, неметалл, керамика);

- большая эффективность технологии;
- доступность оборудования и материалов участвующих в процессе;
- низкое тепловложение в ремонтируемую деталь;

Недостатки:

- низкая адгезионная связь напыляемого материала и подложки;
- неизбежно высокая пористость покрытия (от 5 до 25%).

Снижение прочности покрытия по причине низкой адгезионной связи между напыленным материалом, и материалом подложки- основная причина, которая тормозит развитие и применяемость газопламенного напыления для ремонта оборудования.

«Технологический процесс газопламенного напыления заключается в нагреве напыляемого материала (металлов, керамики, пластмасс и др.) газовым пламенем и нанесением его на поверхность воздушной струей высокого давления. В качестве горючего газа принято использовать пропан или ацетилен, так же возможно применение водородно-кислородной смеси» [5].

Газопламенное напыление как процесс включает в себя следующие действия:

- возбуждение пламени газокислородной смеси, выход на рабочий режим горения пламени;
- введение металлической проволоки в сопло через протяжной механизм;
- корректировка скорости подачи проволоки для достижения равномерного расплавления;

- перенос мелкодисперсных частиц расплавленной проволоки на подложку при помощи струи сжатого воздуха;
- осаждение частиц расплавленной металлической проволоки на основном материале;
- деформация частиц при ударе о поверхность основного материала, их затвердевание и формирование покрытия.

«Ответственным этапом является перевод распыляемого материала в жидкое состояние, так как количество тепла вложенного в каплю материала должно хватить на транспортировку его до соударения с основной поверхностью. А воздушному потоку необходимо обеспечить максимально быстрый перенос от газового пламени до поверхности с дальнейшей деформацией. Достаточной для принятия определенной геометрии поверхности детали. От этого зависит соединение частиц с основой на уровне химического и механического взаимодействия. При движении напыляемых частиц в факеле они непрерывно нагреваются. Но так как при напылении проволокой, с использованием струи сжатого воздуха из-за поступления большого количества в пламя последнее в большей своей части имеет окислительные свойства. При газотермическом способе напыление осуществляется в основном теми материалами, температура плавления которых ниже температуры пламени. После напыления иногда проводят оплавление покрытия, которому, в частности, подвергают покрытия» [1].

Рекомендуемая максимально допустимая толщина напыленного покрытия при газопламенном напылении в соответствии с ГОСТ 28844-90 составляет 1,5мм.

С учетом указанных недостатков газопламенного напыления для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ и определить основные пути повышения прочности сцепления напыляемого покрытия и основного металла;

- разработать методику исследования процессов газопламенного напыления стальных валов;
- исследовать процессы газопламенного напыления и разработать рекомендации по повышению прочности сцепления напыляемого покрытия с основным металлом.

2 Анализ возможных направлений увеличения прочности связи напыленного материала и материала основы

В предыдущей главе было отмечено, что низкая адгезия препятствует созданию прочной связи между двумя материалами. Анализируя это физическое явление, можно прийти к выводу, что этот случай не является уникальным. Такое свойство материалов явно нам знакомо по таким технологическим процессам, как склеивание и пайка. Поэтому для повышения прочности сцепления напыляемого материала и материала подложки можно предложить технологические приемы подобные процессам склеиванию и пайке:

- подготовка поверхности детали (создание определенной шероховатости, обезжиривание поверхности);
- создание промежуточного слоя (нанесение слоя материала, обладающего адгезией к двум соединяемым материалам);
- активация поверхности ремонтируемой детали (абразивная обработка, предварительный подогрев).

Подготовка поверхности при склеивании и пайке предполагает операции абразивной подготовки, обезжиривания. Можно предположить, что аналогичные операции будут полезными и при газопламенном напылении.

«Для очистки и активации используют механическое, химическое и термическое воздействие. Механическое воздействие подразделяется на три вида: обработка поверхности заготовки струей газа (подогрев); струей

жидкости; твёрдым материалом, который может быть компактным (резец, ролик) или дискретным (щётки, зёрна абразивного круга, частицы абразива)» [1].

Известны следующие методы подготовительных операций с помощью применения механического инструмента: пескоструйная, дробеструйная очистка, прокатка поверхностей рельефными роликами, создание профиля резьбового типа. Эти подготовительные операции позволяют создать напряжения на поверхности материала, создать более развитую структуру, а тем самым увеличить площадь контакта основы с напыляемым материалом.

«Наиболее производительный и экономичный вид абразивной обработки поверхности металла способ струйной обработки. При такой очистке песок, стальная или чугунная дробь, выбрасываются на очищаемую поверхность потоком сжатого воздуха. Причем размер дроби является важным параметром, так, как мелкая дробь не обеспечит достаточной для равномерного сцепления шероховатости, а её основа должна быть твёрдой (7 500 МПа), остроугольной, свободной от ржавчины. Подбор размера дроби производится с учетом материала, из которого изготовлена деталь, а так же давления воздуха подаваемого в установку. При такой очистке поверхность металла становится однородно шероховатой и матовой. При этом необходимо следить за чистотой используемого сжатого воздуха. Наличие влаги и масла, в котором могут привести к неудовлетворительному качеству очистки» [3].

Следующий способ подготовки поверхности- очистка при помощи металлических щеток, шарошек, разной формы зачистных абразивных кругов с различной степенью шероховатости. Для повышения производительности очистки необходимо использовать специализированные электроинструменты.

После механической обработки на поверхности всегда остаются масляные пленки от инструмента, или от охлаждающей жидкости. Наличие

масляных пленок резко ухудшает качество сцепления двух материалов. Для удаления загрязнения этого вида применяется очистка различными растворителями. Таким способом детали можно очищать вручную бязевой материей, смоченной в растворителе, а если позволяют размеры изделий, очистку можно производить погружением в емкость. При массовом производстве обезжиривание производят в парах трихлорэтилена.

Анализ литературных данных по применению метода газопламенного напыления показал, что для создания еще более развитой поверхности, наряду с абразивной подготовкой поверхности под напыление необходимо нарезать рваную резьбу. Чтобы произвести такую резьбу необходимо резьбовой резец опустить ниже оси детали и нарезать ее на всю глубину за один проход, при этом не охлаждая зону реза. Угол верха инструмента должен быть в пределах $53...62^\circ$, его радиус $0,25...0,48$ мм, а наклон реза около восьмидесяти градусов. Возможно нанесение рваной резьбы и на плоскостях- для этого используются фрезеровальные станки, с помощью которых нарезаются спиралевидные канавки.

Таблица 2.1 - Геометрические характеристики рваной резьбы.

Вариант	Диаметр изделия, мм	Шаг, мм
а	До 20	0,5
б	25-50	0,8-1,0
в	60-100	1,5

Еще более эффективно после нарезания рваной резьбы дополнительно создавать на ее вершинах замковый профиль. Для этой цели при подготовке поверхности под процесс напыления используются специальный инструмент: профилированные диски для нарезки. В итоге вершины резьбы изгибаются под воздействием этого инструмента с получением Т-образного профиля.



Рисунок 2.1 – Профилированные диски для получения замкового профиля

Анализ общедоступных литературных данных показывает, что при технологических процессах, схожих с процессом газопламенного напыления, для улучшения связи между двумя материалами применяется такой технологический прием как подогрев поверхности. Напыляемый материал будет охлаждаться с меньшей скоростью, что с большой долей вероятности предотвратит образование больших пор, и улучшит степень повторяемости поверхности основы. «Детали перед сваркой нагревают в термических печах, горнах или с помощью газовых горелок ацетилено-кислородным пламенем. При подогреве газовой горелкой необходимо следить за равномерностью нагрева подогреваемой поверхности» [5].

«Нанесение промежуточных слоев – способ подготовки поверхностей, который применяется, как правило, в сочетании с абразивной подготовкой. При напылении самофлюсующихся твердых сплавов применение промежуточных слоев необходимо, если напыляются изделия из высокоактивных материалов, например, титана и сплавов на его основе» [4]. Основой технологического процесса пайки является применение припоев-

материалов с температурой плавления ниже, чем паяемые материалы, и обладающие свойством высокой адгезии к основному материалу. Процесс напыления довольно схож с процессом пайки в том, что основной и напыляемый материалы не нагреваются до температуры плавления. По аналогии с процессом пайки, применение промежуточных материалов для технологического процесса напыления должно быть весьма перспективно. Для нанесения промежуточного слоя можно предложить следующие материалы: медь и сплавы на основе меди, алюминий и сплавы на основе алюминия, цинк, никель.

Медь начинает плавиться при температуре около $1090\text{ }^{\circ}\text{C}$, что ниже чем температура плавления стали. К тому же медь достаточно стойка к окислению внешней средой, а это значит, что в напыленном слое будет меньше оксидов, что само по себе должно увеличивать силу связи двух материалов.

Анализ диаграммы состояния Fe-Cu показывает, что в этих сплавах не создаются хрупкие фазы.

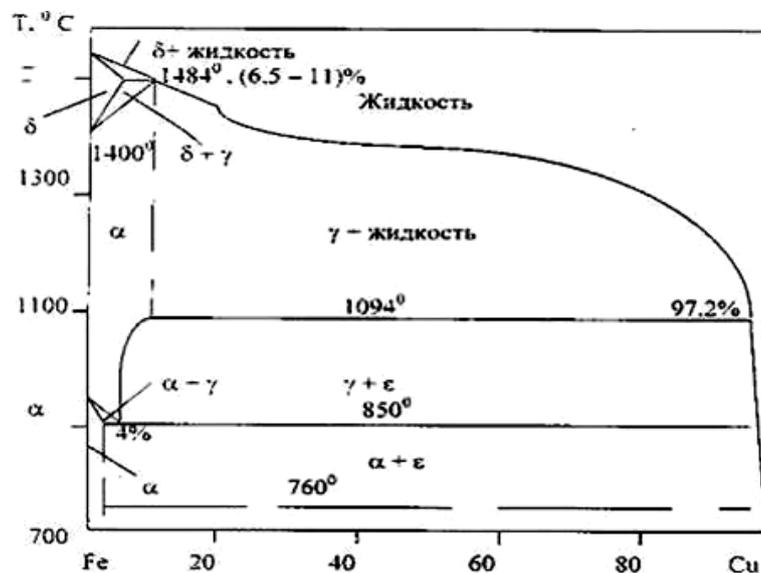


Рисунок 2.2 – Fe-Cu. Диаграмма состояния

Прочность и пластичность материала переходного слоя не должны критически отличаться от этих характеристик основного материала, этим свойством медь обладает.

«Легирование железом способствует измельчению структуры меди, что повышает её прочностные свойства» [12]. В сплавах на основе меди широко применяется железо, как легирующая добавка. Прочностные характеристики напыленного покрытия с промежуточным слоем из меди должны быть высокими.

Никель широко используется для легирования сплавов на основе железа. Плавление никеля происходит при температуре 1455°C . Температура плавления железа выше. Особенность никеля состоит в том, что он обладает низкой активностью к окружающей среде, а это значит, что в промежуточном слое будет мало оксидов, что должно положительно сказываться на прочности сцепления напыляемого материала и материала основы.

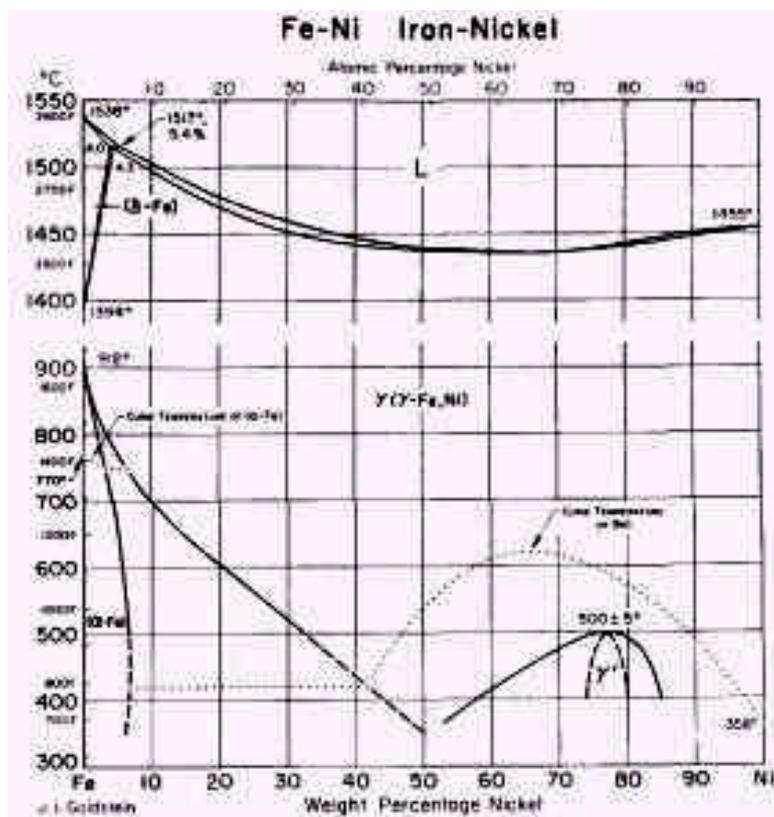


Рисунок 2.3 – Fe-Ni. Диаграмма состояния

«Цинк относится к широкоприменяемым цветным металлам. Цинк при нормальных условиях отличается высокой коррозионной стойкостью. При наличии в воздухе паров воды и углекислого газа металл покрывается тонкой и очень плотной пленкой $ZnCO_3 \cdot Zn(OH)_2$, которая практически полностью прекращает процесс дальнейшего окисления» [20]. Температура начала плавки цинка довольно низкая и составляет около 420 °С.

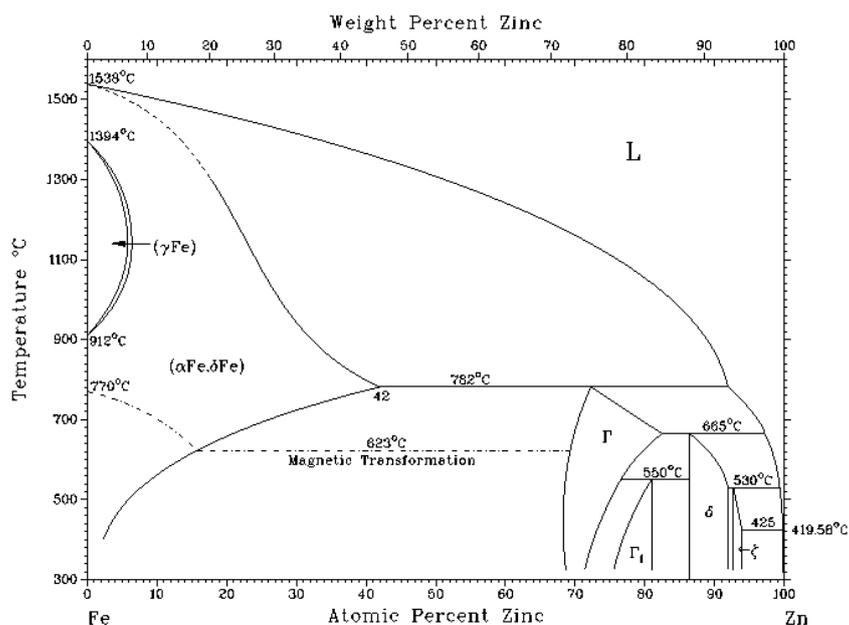


Рисунок 2.4 – Fe-Zn. Диаграмма состояния

«С железом цинк образует систему с широкой областью существования твердого раствора на основе α -Feи существования четырех соединений в богатой цинком части диаграммы состояния, обозначенных Γ , Γ_1 , δ и ζ ($FeZn_{13}$)» [21].

«В равновесных условиях алюминий с железом образуют твердые растворы, интерметаллические соединения и эвтектику» [33, 34].

При описании особенностей процессов образования интерметаллидных фаз имеют значение физико-химические свойства. Физико-химические свойства образующихся интерметаллических фаз существенно отличаются от

свойств алюминия и железа, что может влиять на конечные механические свойства сплава.

Алюминий и алюминиевые сплавы можно рекомендовать для применения в качестве промежуточного слоя, на при режимах напыления, которые не приводят к образования промежуточных интерметаллидных слоев. Интерметаллиды системы железо-алюминий хрупки и имеют низкие значения прочности и пластичности.

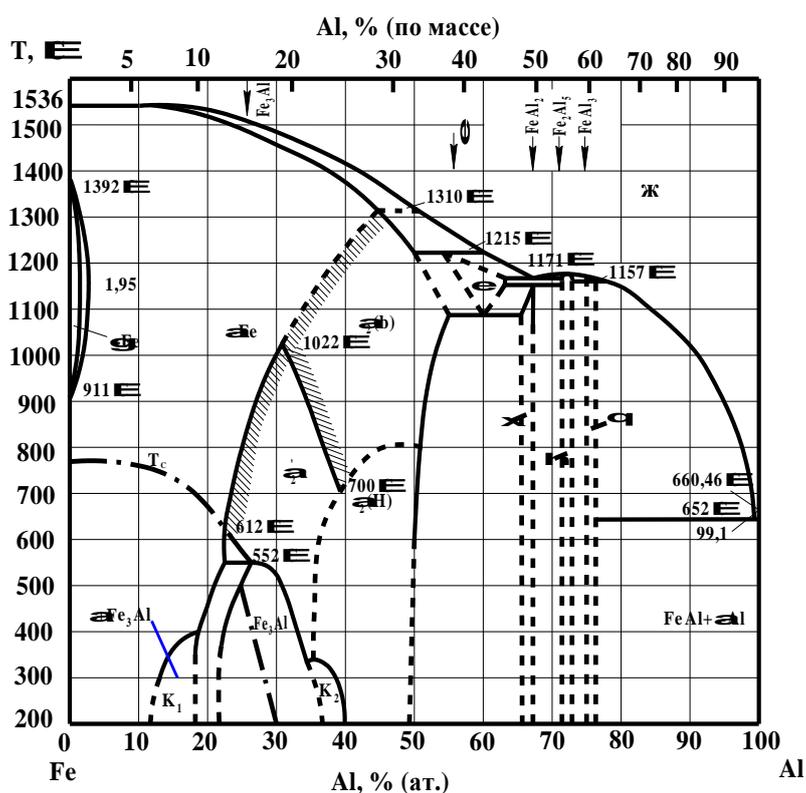


Рисунок 2.5 – Fe-Al. Диаграмма состояния

Наряду с анализом общедоступных литературных данных, были проведены экспериментальные работы по напылению изношенных валов. В совокупности это позволило сделать вывод, что основным фактором, ограничивающим применение газотермического напыления для ремонта деталей, служит недостаточная или нулевая адгезия, что влечет за собой резкое снижение прочности покрытия.

Итогом проведенного анализа и предварительных экспериментальных работ будут следующие рекомендации:

- для увеличения прочности связи основного и напыляемого материала необходимо увеличивать площадь контакта путем усложнения геометрии поверхности (рельефная, рваная резьбы, пескоструйная обработка, обезжиривание);

- подогрев поверхности перед нанесением покрытия в электропечах, индукционным нагревом, или нагревом газовым пламенем;

- напыление переходного слоя между основным материалом и материалом основы из металлов с более низкой температурой плавления (Cu, Zn, Ni, Al).

3 Методика исследования процессов газопламенного напыления

3.1 Методика исследования процессов газопламенного восстановления валов из углеродистых и высоколегированных сталей

Опытные работы велись на территории ремонтно- механического цеха ООО «СИБУР Тольятти». На (рис. 3.1) показан общий вид установки для газопламенного напыления FS-15.



Рисунок 3. 1 – Установка для газопламенного напыления FS-15

Для снижения давления газа и установки рабочего давления применялись редукционные клапаны БКО-50 и БПО-5. Так же в комплект оборудования входил расходомер, при помощи которого устанавливалось необходимое значение расхода газов. Давления горючих газов недостаточно для транспортирования расплавленных частиц к основному материалу, поэтому в комплект оборудования так же должен входить компрессор с объемом ресивера не менее 200 л. Для этого был закуплен винтовой компрессор Skoda 200.02. с системой воздухоподготовки (очистка, осушка).



Рисунок 3.2. – Система воздухоподготовки и расходомер

В связи с тем, что металлизатор FS-15 весит порядка 3 кг, вести процесс напыления вручную достаточно трудоемко и неэффективно. Для механизации процесса напыления после несложных доработок была применена сварочная колонна (рис.3.3.). применение сварочной колонны позволяет перемещать металлизатор вдоль ремонтируемой детали с постоянной скоростью, плавно, без рывков.

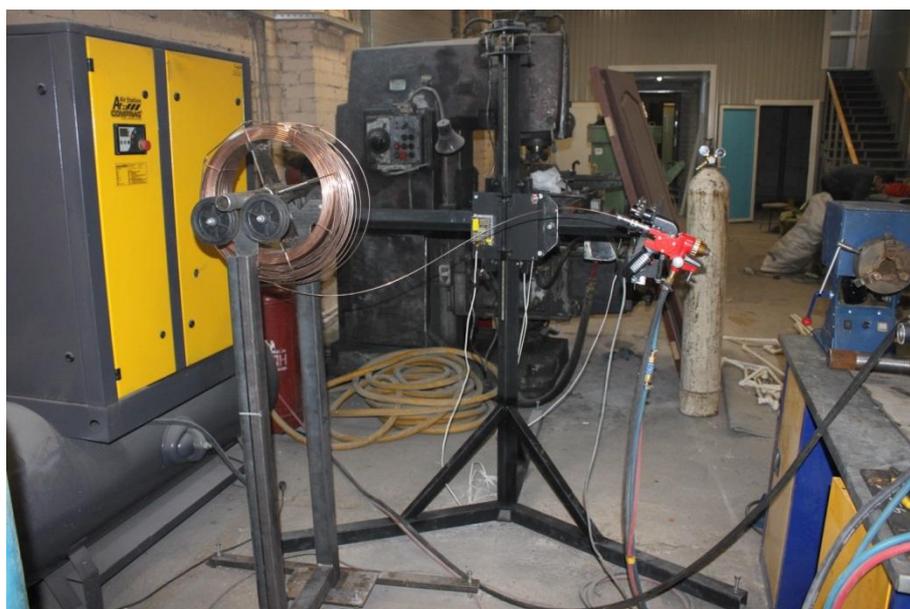


Рисунок 3.3. – Установка для газопламенного напыления в сборе

Образцы при проведении напыления зажимались в план- шайбе сварочного позиционера (рис.3.4.). Применение позиционера позволяет вращать детали с постоянной скоростью в вертикальной и в горизонтальной плоскостях. Постоянную скорость обеспечивает шаговый электродвигатель, управление вращением происходит от ножной педали. Грузоподъемность данного позиционера- 50 кг в горизонтальной плоскости, 150 кг- в вертикальной



Рисунок 3.4 – Сварочный позиционер

В качестве горючего газа при напылении применяли пропан и ацетилен. Диапазоны регулирования параметров напыления были очень узки особенно при использовании пропана. Удалось добиться стабильного распыления на двух режимах при использовании пропана (таблица 3.1, 3.2).

Таблица 3.1 - Режимы напыления I

№	Наименование параметров	Значения параметров
1	Давление воздуха	0,5 МПа
2	Давление кислорода	0,7 МПа
3	Расход кислорода	35 Л/Мин.
4	Давление пропана	0,2 МПа
5	Расход пропана	30 Л/Мин.
6	Подача проволоки	0,4 м/с

Таблица 3.2 - Режимы напыления II

№	Наименование параметров	Значения параметров
1	Давление воздуха	0,5 МПа
2	Давление кислорода	0,7 МПа
3	Расход кислорода	58 Л/Мин.
4	Давление пропана	0,2 МПа
5	Расход пропана	30 Л/Мин.
6	Подача проволоки	0,4 м/с

Режимы напыления при использовании ацетилен указаны в таблице 3.3. Режимы напыления подслоев с использованием пропана и ацетилен указаны в таблице 3.4., 3.5.

Таблица 3.3 - Режимы напыления с использованием ацетилена

№	Наименование параметров	Значения параметров
1	Давление воздуха	0,5 МПа
2	Давление кислорода	0,7 МПа
3	Расход кислорода	56 Л/Мин.
4	Давление ацетилена	0,15 МПа
5	Расход ацетилена	38Л/Мин.
6	Подача проволоки	0,4 м/с

Таблица 3.4 - Режимы напыления промежуточных слоев с использованием пропана

Материал подслоя	Давление воздуха МПа	Давление кислорода МПа	Расход кислорода л/мин.	Давление пропана МПа	Расход пропана л/мин.	Подача проволоки м/с
Al	0.5	0,7	45	0,2	30	0.7
Cu	0.5	0,7	40	0,2	30	0.6
Ni	0.5	0,7	55	0,2	32	0.3
NiCr	0.5	0,7	45	0,2	33	0.4

Таблица 3.5 - Режимы напыления промежуточных слоев с использованием ацетилена

Материал подслоя	Давление воздуха МПа	Давление кислорода МПа	Расход кислорода л/мин.	Давление ацетилена МПа	Расход ацетилена л/мин.	Подача проволоки м/с
Al	0.5	0,7	40	0,15	35	0.5
Cu	0.5	0,7	50	0,15	38	0.5
Ni	0.5	0,7	55	0,15	38	0.4

Для напыления основного металла из стали 20 использовали проволоку Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70 (таблица 3.6), а для напыления на сталь 12Х18Н9Т использовали проволоку Св07Х23Н13 по ГОСТ 2246-70 (таблица 3.7.).

Таблица 3.6 - Химический состав проволоки Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70

Марка проволоки	Химический состав, %									
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Титан	Сера, не более	Фосфор, не более	Прочие элементы
Св-08Г2С	0,05-0,11	0,70-0,95	1,80-2,10	Не более 0,20	Не более 0,25	-	-	0,025	0,030	-

Таблица 3.7 - Химический состав проволоки Св07Х23Н13 по ГОСТ 2246-70

Марка проволоки	Химический состав, %									
	Углерод	Кремний	Марганец	Хром	Никель	Молибден	Титан	Сера, не более	Фосфор, не более	Прочие элементы
Св-07Х23Н13	Не более 0,09	0,50-1,00	1,00-2,00	23,00 - 26,00	12,00-14,00	-	-	0,018	0,025	-

Для напыления промежуточных слоев использовали проволоки из алюминия СвА5 по ГОСТ 7871-75 (таблица 3.8.), меди М1 по ГОСТ 859-2001

(таблица 3.9), никеля НП2 по ГОСТ492-73 (таблица 3.10), нихрома Х15Н60-Н по ГОСТ 10994-74 (таблица 3.11).

Таблица 3.8 - Химический состав проволоки СВА5 по ГОСТ 7871-75

Марка сплава	Массовая доля элементов, %					
	Основные компоненты			Примеси, не более		
	Алюминий	Железо	Кремний	Медь	Прочие примеси	Сумма примесей
СВА5	Не менее 99,5	0,2 - 0,35	0,10 - 0,25	0,015	0,05	0,5

Таблица 3.9 - Химический состав проволоки М1 по ГОСТ 859-2001

Обозначение марок	Массовая доля элемента, %												
	Медь, не менее	Медь + серебро, не менее	Массовая доля элемента										
			Висмут	Железо	Никель	Цинк	Олово	Сурьма	Мышь як	Свинец	Сера	Кислород	
М1	99,96	99,90	0,001	0,005	0,002	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,004	0,005

Таблица 3.10 - Химический состав проволоки НП2 по ГОСТ 492-73

Марка	Химический состав, %									
	Основной компонент				Примесь, не более					
	Никель + кобальт, не менее	Медь	Кислород	Сера	Железо	Кремний	Магний	Марганец	Медь	Свинец
НП2	99,5	-	-	-	0,10	0,15	0,10	0,05	0,10	0,002

Таблица 3.11 - Химический состав проволоки Х15Н60-Н по ГОСТ 10994-74

Марки сплавов	Химический состав, %										
	Углерод, не более	Кремний	Марганец	Сера	Фосфор	Хром	Никель	Титан	Алюминий	Железо	Остальные элементы
				не более							
Х15Н60-Н	0,06	1,0-1,5	Не более 0,6	0,015	0,020	15,0-18,0	55,0-61,0	Не более 0,20	Не более 0,20	Остальное	Цирконий 0,2-0,5

3.2 Методика исследования тепловых процессов формирования напыленного слоя

Из курса технологии паяных соединений известно, что для получения качественного паяного соединения необходимо создать условия для увеличения диффузии припоя в основной металл, что достигается в том числе нагревом паяных поверхностей до приемлемой температуры. По этой аналогии необходимо подогреть основной металл и перед газопламенным напылением.

Изучение зависимости степени подогрева основы на прочность связи основного и напыленного материала проводились в ходе выполнения опытных работ разделенных на три группы:

- Определение зависимости температуры основного материала от длины пути, который проходят расплавленные частицы до соударения с поверхностью основы.

На (рис.3.5) можно увидеть общий вид подготовленных образцов. Термопара подводилась к просверленному в центре образцов отверстию. Для автоматизации процесса записи температурных показателей был применен регистратор фирмы Philips, а полученные данные обрабатывались специализированной компьютерной программой. См. (рис.3.6).

Струя расплавленных частиц попадала на термопару в течении 1 минуты. Было решено расстояние от среза сопла горелки до напыляемого образца принять равным пятьдесят, сто и сто пятьдесят мм. Образцы обозначали арабскими цифрами см. табл.3.12.

- образцы нагревались в муфельной печи полтора часа. Температура в печи составляла триста пятьдесят градусов цельсия.

- при прочих равных условиях варьировали типом горючего газа. При проведении экспериментальных работ применялся пропан и ацетилен.

Таблица 3.12 - Данные проводимых исследований

Образец, №	Расстояние, мм.
1, 4, 7, 10	50
2, 5, 8, 11	100
3, 6, 9, 12	150



Рисунок 3.5 – Внешний вид образцов для исследования тепловых процессов ГТН

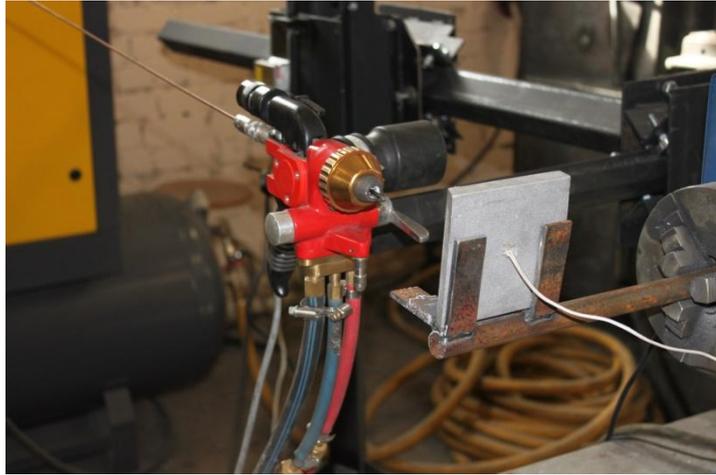


Рисунок 3.6 – Внешний вид металлизатора и блока измерения температуры образцов



Рисунок 3.7 – Печь сопротивления с нагреваемыми образцами

3.3 Определение прочности сцепления основного и напыленного металла

Подготовительные операции включающие в себя механическую обработку и химическую очистку поверхности непосредственно перед проведением напыления оказывают сильное влияние на силу связи основного и напыленного металлов. Пути повышения прочности связи между основным и напыляемым материалами- нанесение промежуточного слоя, обладающего адгезией к материалу основы, создание более развитой геометрии поверхности (рваная резьба, рельефная резьба, абразивоструйная обработка поверхности). Подогрев поверхности ремонтируемой детали так же способствует повышению адгезии, а значит и прочности связи покрытия с основой.

Опытные работы по изучению степени связи основного и напыленного материала проводили в следующем порядке:

- проводили опытные работы по изучению зависимости прочности связи напыленного покрытия от различных режимов газопламенного напыления;
- проводили опытные работы по изучению зависимости прочности связи напыленного покрытия от вида подготовительных операций;
- проводили опытные работы по изучению зависимости прочности связи напыленного покрытия от вида переходного материала.
- исследовали влияние вида используемого газа на прочность связи напыленного материала с основным материалом.

Серию первых опытных работ проводили на плоских образцах размером 50x115x12 мм, в центр которых в отверстия диаметром 22 мм вставляли плотно цилиндр соответствующего диаметра (рис.3.8.). перед проведением опытов образцы очищались струйным методом (никель- шлак) и удалялись масляные отложения. Усилие отрыва отмечалось в памяти компьютера разрывной машины.

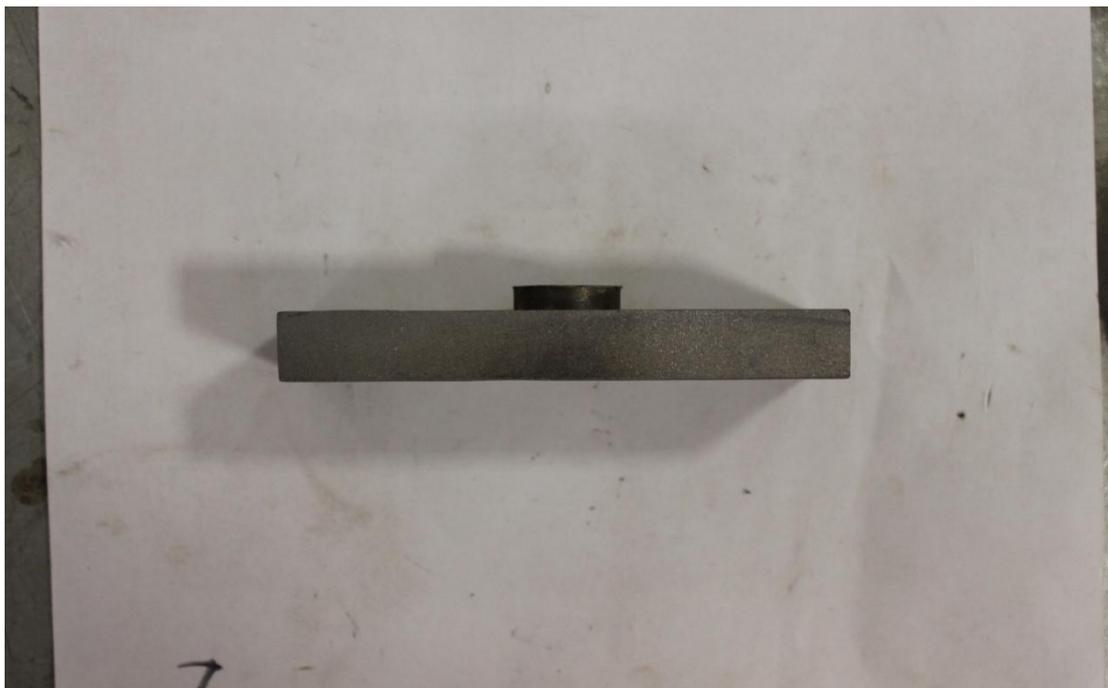


Рисунок 3.8 – Образец для испытания прочности сцепления основного и напыленного металла

При проведении экспериментов ограничивали время нанесения покрытия в рамках 1 минуты. Изменяли расстояние между срезом сопла горелки и подложкой в пределах пятидесяти, сто и сто пятидесяти мм и степень подогрева поверхности. Для обеспечения равных условий материал проволоки распыляли по центру цилиндра.

Проведенные исследования показали, что предложенная схема определения прочности сцепления по усилию отрыва стержня не всегда обеспечивает удовлетворительные результаты. Прочность сцепления стержня и подложки зачастую сильно отличаются, что не позволяет адекватно оценивать значения прочности.

Было предложено оценивать прочность сцепления по усилию отрыва напыленного слоя от основного металла. Образцы были изготовлены из стали 20 или стали 12Х18Н9Т. Размер образцов 35-35мм. Толщина 14 мм. В центре образца выполнено отверстие диаметром 20 мм. В отверстие

устанавливается клапан (рис. 3.9). После напыления через клапан напыленный слой отрывают от основного металла. Прочность сцепления при этом рассчитывается по формуле:

$$\sigma_c = \frac{F}{P},$$

где: F- усилие отрыва напыленного слоя, Н;

P – площадь контакта оторванного, напыленного слоя и основного металла, мм².

При исследовании влияния температуры подогрева образцов на прочность сцепления температура образцов составляла 150, 250, 350, 450, 550°С.

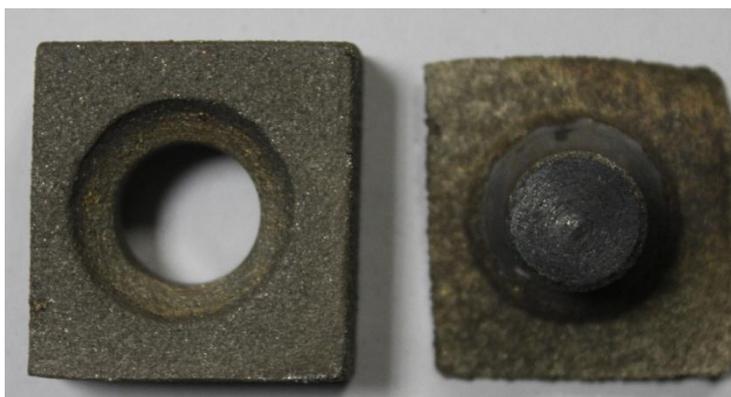


Рисунок 3.9 – Образец для испытания прочности сцепления на отрыв напыленного слоя

Вторая серия экспериментов была направлена на определения зависимости прочности связи от способа подготовительных операций на поверхности ремонтируемой детали. Для этого применялись образцы диаметром 85 мм и толщиной 20 мм (рис.3.10). В центре образца так же устанавливался клапан для отрыва напыленного слоя. При испытаниях

сравнивалась прочность сцепления образцов после токарной обработки, после пескоструйной обработки никельшлаком, с фракцией 0.5-1.5 и твердостью по шкале Мооса 6 ед. Кроме того, испытывались образцы с рваной резьбой и с рваной резьбой и пескоструйной обработкой.



Рисунок 3.10 – Образцы для испытания прочности сцепления с различным характером подготовки поверхности

Третья серия экспериментов проводилась с целью определения состава промежуточного слоя, обеспечивающего наибольшую прочность сцепления напыленного и основного металла. Подготовка поверхности и режимы напыления у всех образцов были одинаковые. Поверхность подвергалась пескоструйной обработке. Режимы напыления соответствовали данным таблицы 2.1, 2.2 Прочность сцепления оценивалась у образцов как из стали 20, так и стали 12Х18Н9Т. В качестве подслоев использовали алюминиевый, медный, никелевый, нихромовый.

Четвертая серия экспериментов проводилась с использованием ацетилена. Цель эксперимента сравнить влияние пропана и ацетилена, используемых в качестве горючих газов на прочность сцепления

напыленного слоя и основного металла. Режимы напыления соответствовали данным таблиц 2.2, 2.3, 2.4, 2.5.

Опытные работы по определению зависимости прочности связи покрытия от геометрии сечения верхнего слоя проводились на образцах изготовленных из труб. Размеры образцов: диаметром 45 мм, толщина стенки 6 мм, материал- 09Г2С и 10Х17Н13М2Т. Перед напылением поверхность подготавливали в следующем порядке: обработка струйным методом (в качестве абразива служил никель- шлак), механическая зачистка абразивным зачистным кругом, создание развитого профиля в виде рваной резьбы. (рис.3.11).



а)

б)

а) - подготовка поверхности абразивным кругом; б) – нарезание рваной резьбы на поверхности образца

Рисунок 3.11 – Образцы с подготовкой поверхности

3.4 Методика исследования структуры и химического состава покрытий.

Применение электронного микроскопа позволило определить химический состав материалов в любой точке исследуемых образцов. «Вторичные, отраженные и лже-электроны, рентгеновское излучение и другие типы сигналов несут информацию о структуре, фазовом и химическом составе образца» [22, 23]. «Высокая разрешающая способность,

большая глубина фокуса в сочетании с наглядностью изображения, простота подготовки объектов исследований, широкие возможности элементного анализа при использовании различных систем регистрации рентгеновского излучения (волнодисперсионные (WDS) или энергодисперсионные (EDS) системы) позволяют успешно использовать метод РЭМ в материаловедческих исследованиях» [24, 25, 26, 27].

Порядок ведения измерений:

- выявление изменений структуры распределенных по всей толщине покрытия;

- определение химического состава отдельных участков напыленного слоя как большой, так и малой площади;

Определение состава металла проводился в поперечном разрезе образца с шагом 0,1...0,2 мм (рис.3.12, рис.3.13.), процентное содержание элементов указано в таблице 3.13.

Электронное изображение 3

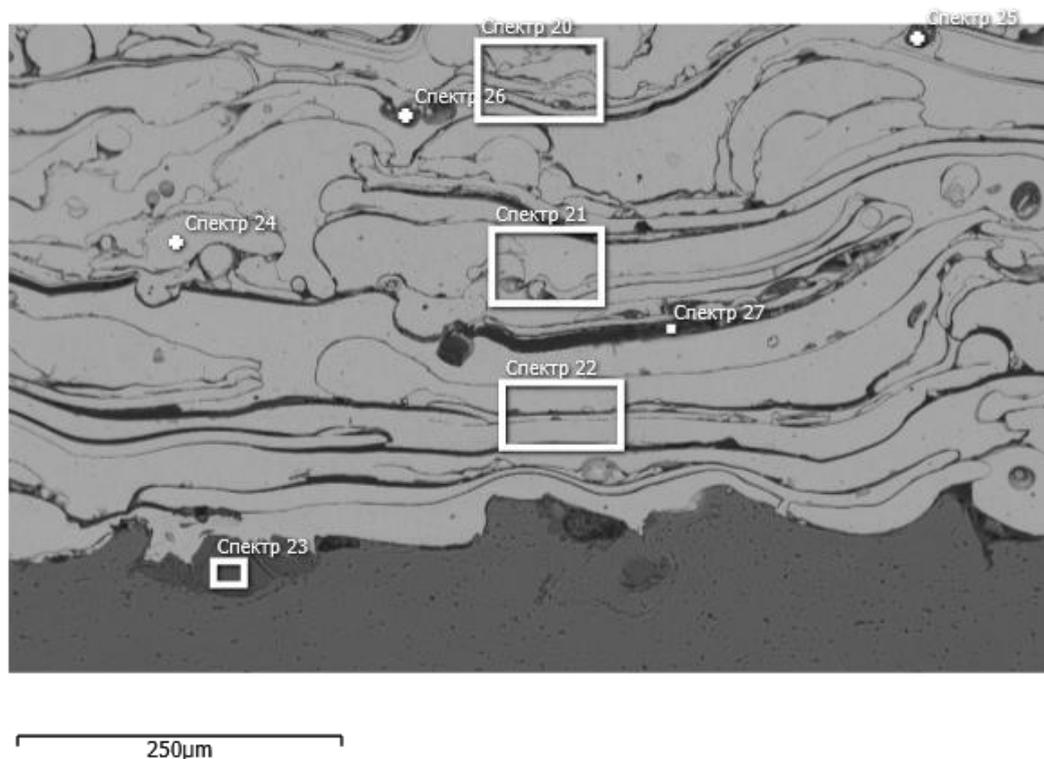


Рисунок 3.12 – Химический состав напыленного слоя

Таблица 3.13 – состав металла в поперечном разрезе образца

Название области	C	O	Al	Si	Fe	Cu	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8
Область 20	11,4	3,89	0,57	2,43	91,43		100,00
Область 21	10,34	4,76	0,43	1,43	88,45		100,00
Область 22	17,54	7,54	0,38	1,33	75,64		100,00
Область 23		48,37		46,34	0,21		100,00
Область 24	1,54	0,22	0,32	0,12	97,80		100,00
Область 25	37,42	29,69	26,34	4,64	1,69	0,22	100,00
Область 26	5,59	1,03	1,08	0,49	91,81		100,00
Область 27	83,24	15,92		0,30	0,55		100,00

Многослойное изображение EDS 3



Рисунок 3.13 – Карта распределения элементов напыленного слоя

4 Исследования процессов газопламенного напыления

4.1 Исследование тепловых процессов формирования напыленного слоя

Тепловые условия во многом определяют прочность сцепления основного и напыленного металла. Повышение температуры контакта положительно сказывается и на механической составляющей процесса сцепления и на вероятности образования физического контакта слоев (создании адгезионной связи).

Для исследования температуры поверхности основного металла была проведена серия экспериментов по описанной технологии с режимами по данным таблицы 2.1. Нумерация образцов и расстояния от сопла металлизатора до поверхности образца указаны в таблице 4.1. Толщина формируемого покрытия так же указана в таблице.

Таблица 4.1 - Данные и результаты проводимых исследований

Номер образца	Расстояние, мм	Материал образца	Толщина покрытия, мм
1	50	Сталь 20	8
2	100	Сталь 20	6
3	150	Сталь 20	4
4	50	12X18H9T	8
5	100	12X18H9T	7
6	150	12X18H9T	4
7	50	Сталь 20	7
8	100	Сталь 20	6
9	150	Сталь 20	4
10	50	12X18H9T	7
11	100	12X18H9T	6
12	150	12X18H9T	4

Внешний вид образцов (1-3) из стали 20, напыленных без предварительного подогрева, представлен на рис. 4.1.



а)

б)



в)

а) - расстояние от металлизатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлизатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлизатора до образца 150 мм

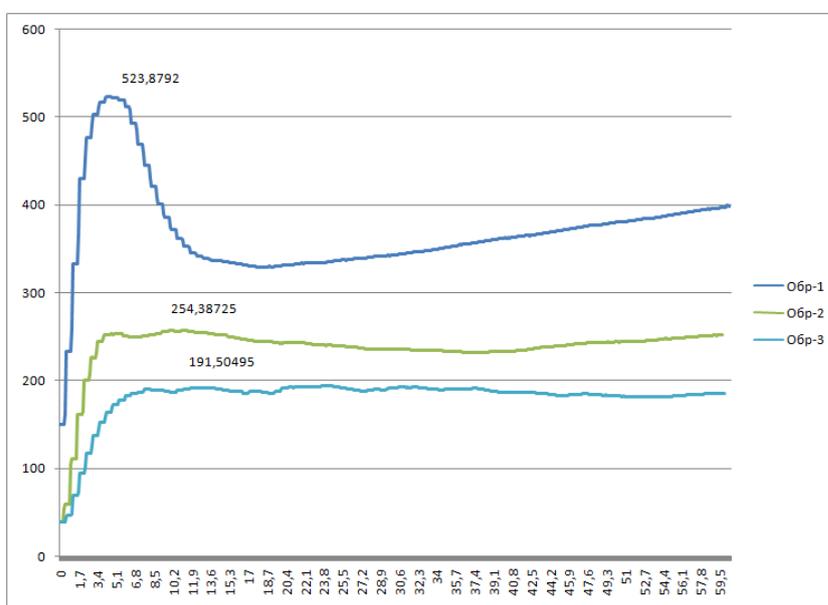
Рисунок 4.1 – Образцы из стали 20, напыленные без предварительно подогрева

Образцы напыленные при расстоянии от сопла металлизатора до основного металла 50мм имеют литую, монолитную структуру, что является следствием высокой температуры напыляемого металла и отсутствием нормального факельного распыления металла. Однако, температура поверхности основного металла при этом не нагревается выше 525°С

(рис.4.2). Своего максимума поверхность образца достигала практически за 5 секунд, резко падала до 320 °С и затем плавно поднималась до 400 °С.

Увеличение расстояния от металлатора до образца до 100 мм приводит к снижению максимальной температуры поверхности до 254 °С. Температура при этом во всем интервале напыления практически не изменяется. Увеличение расстояния до 150мм еще больше уменьшает температуру поверхности. При этом максимальная температура составляет 192 °С.

Толщина напыляемого слоя с увеличением расстояния до металлатора уменьшается с 8мм при расстоянии 50мм до 4мм при 150мм.



а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

Рисунок 4.2 – Термический цикл образцов из стали 20, напыленных без предварительного подогрева

Использование в качестве основного металла стали 12Х18Н9Т (рис.4.3.) практически не изменяет температуру поверхности при расстоянии до металлатора 50мм (рис.4.4.). Увеличение расстояния до 100мм

приводит к снижению максимальной температуры до 390 °С, что на 136 °С выше, чем при использовании в качестве основного металла стали 20. При расстоянии 150мм максимальная температура процесса составляет 315 °С, что выше на 124 °С. Повышение температуры поверхности при использовании высоколегированной хромоникелевой стали связано с более низкой теплопроводностью и температуропроводностью этих сталей по сравнению с углеродистыми.

Толщина покрытия и внешний вид мало отличается от предыдущих образцов.



а)

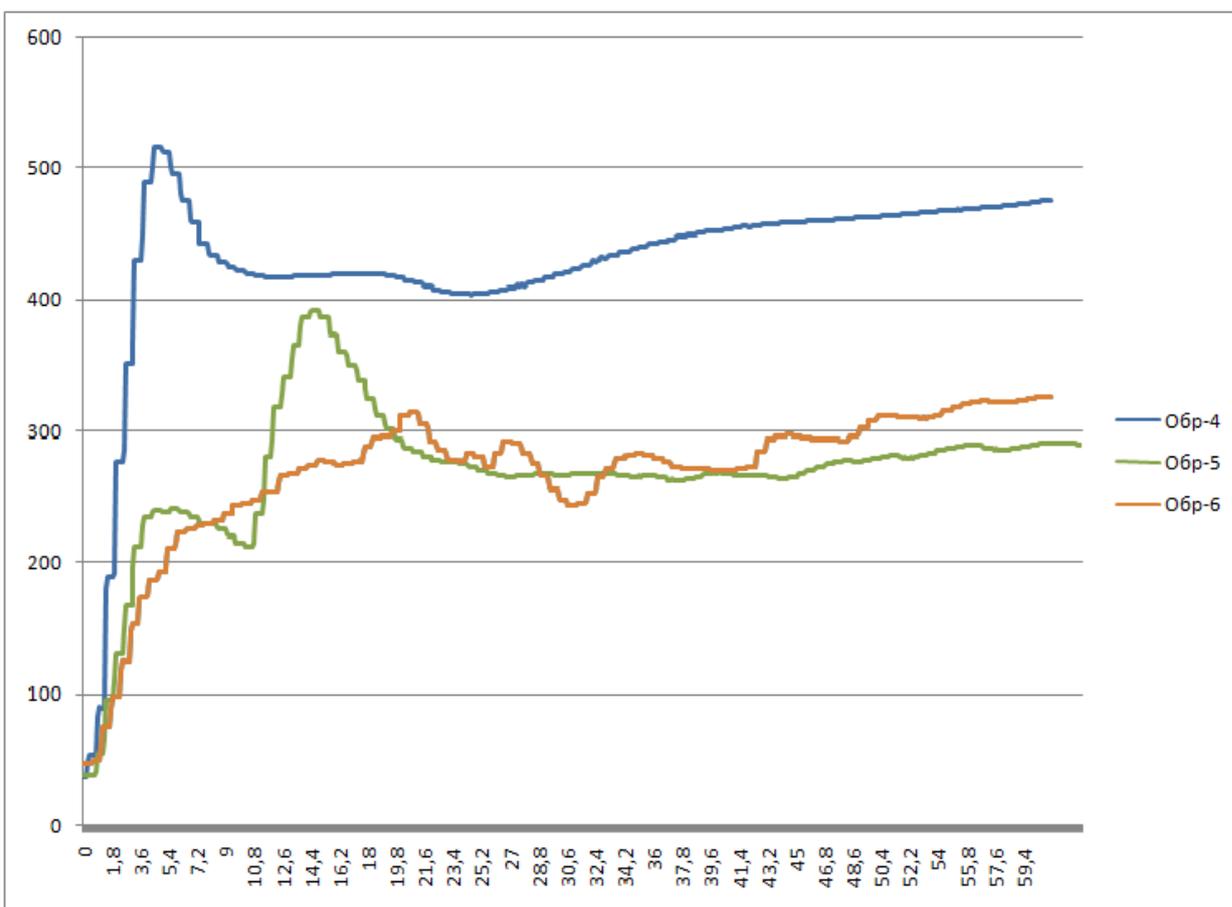
б)



в)

а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

Рисунок 4.3 – Образцы из стали 12Х18Н9Т, напыленные без предварительно подогрева



а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

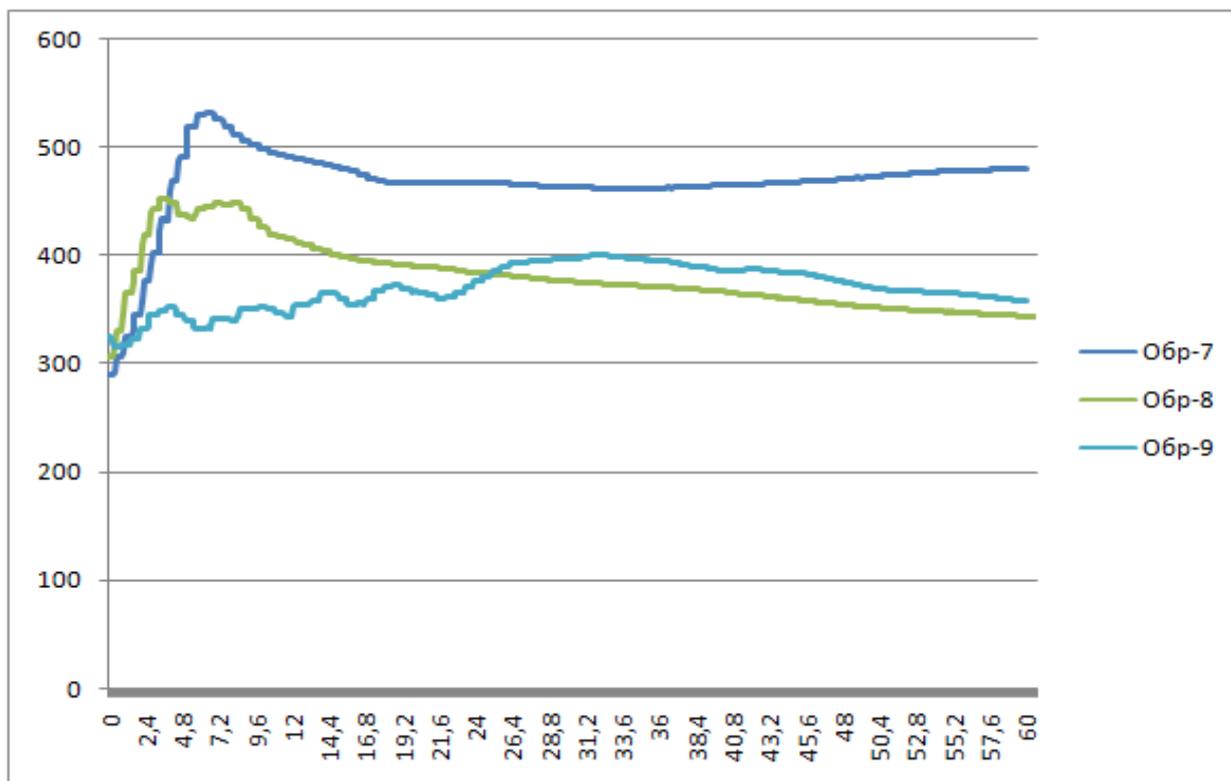
Рисунок 4.4 – Термический цикл образцов из стали 12Х18Н9Т, напыленных без предварительно подогрева

Целью предварительного подогрева является повышение температуры контакта, что улучшает повторяемость геометрии поверхности основного материала и создает предпосылки создания физического контакта, что однозначно повышает прочность сцепления основного и напыленного металла.

Предварительный подогрев основного металла до 350 °С при прочих равных параметрах процесса газопламенного напыления способствовал увеличению температуры поверхности контакта. При чем при расстоянии от

металлизатора до образца 50мм температура увеличилась незначительно, при 100мм и 150мм увеличилась на 150-180 °С (рис.4.5).

Толщина покрытия при этом практически не изменилась (рис.4.6).



а) - расстояние от металлизатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлизатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлизатора до образца 150 мм

Рисунок 4.5 – Термический цикл образцов из стали 20, напыленных с предварительным подогрев 350 °С



а)

б)

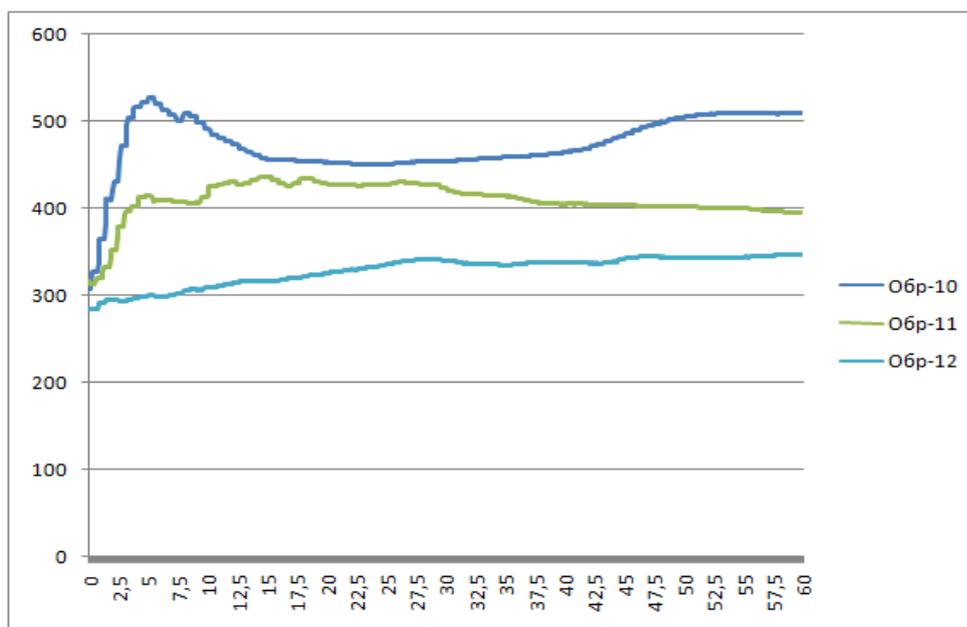


в)

а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

Рисунок 4.6 – Образцы из стали 20, напыленные с предварительным подогрев 350 °С

Применение в качестве основного металла стали 12Х18Н9Т с предварительным подогревом позволило так же повысить температуру контактирующей поверхности (рис.4.7.). толщина покрытия при этом изменилась незначительно (рис.4.8).



а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

Рис. 4.7 – Термический цикл образцов из стали 12Х18Н9Т, напыленных с предварительным подогревом



а)

б)



в)

а) - расстояние от металлатора до образца 50 мм; б)- расстояние от металлатора до образца 100 мм; в) - расстояние от металлатора до образца 150 мм

Рисунок 4.8 – Образцы из стали 12Х18Н9Т, напыленные с предварительным подогрев 350°С

Исследования влияния применяемых горючих газов на температуру контактирующего слоя при режимах табл.4.2 и табл.4.3 показало, что ацетилен не значительно повысил температуру (рис 4.9.) . Однако, стабильность процесса напыления была более высокая.

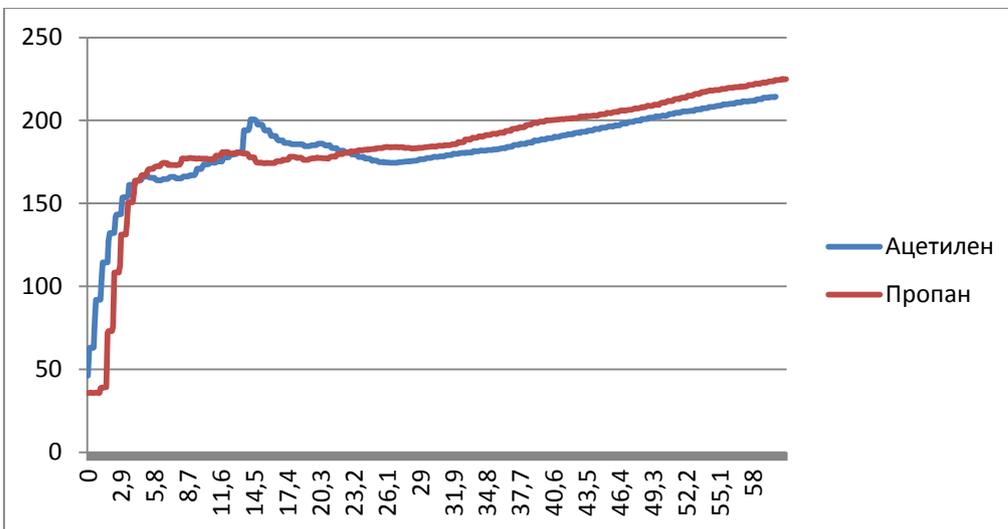
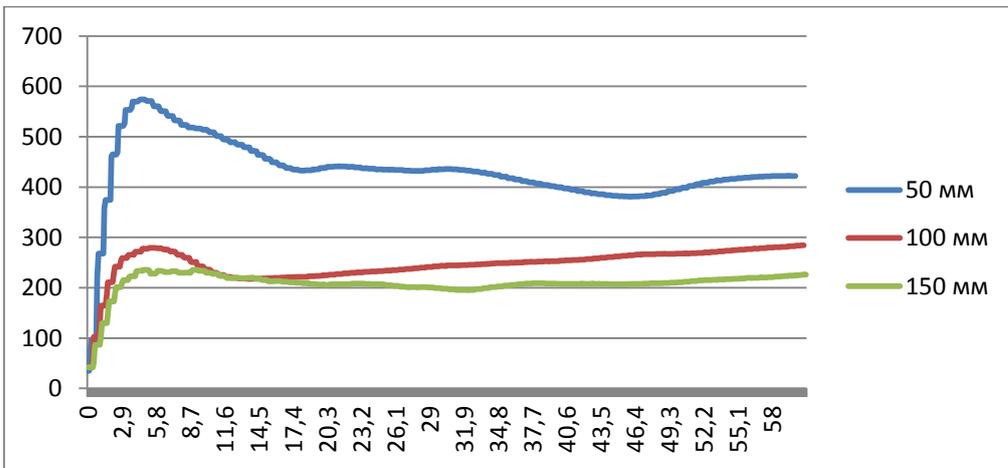
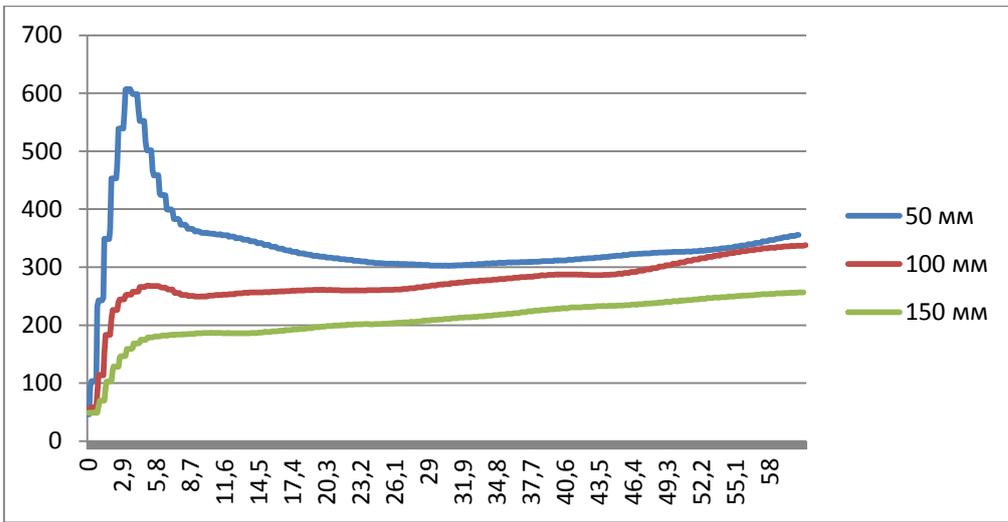


Рисунок 4.9 – Термический цикл образцов из стали 20

Таким образом, исследования температуры поверхности контакта основного и напыленного слоя при газопламенном напылении с применением пропана в качестве горючего газа показали, что температура поверхности зависит от расстояния от металлатора до основного металла. Без предварительного подогрева температура поверхности недостаточная для образования физического контакта между основным и напыленным слоем. Предварительный подогрев позволяет увеличить вероятность образования адгезионной связи и повысить прочность механического сцепления.

При применении промежуточных слоев из легкоплавких и среднеплавких металлов (цинк, олово, алюминий), при установленных температурах поверхности предварительным подогревом, возможно контактное плавление и формирование паяного соединения между основным и промежуточным металлом и между промежуточным и напыляемым металлом.

Применение ацетилена вместо пропана при выбранных режимах напыления не обеспечило значительного повышения температуры контакта основного металла и напыляемого слоя.

4.2 Исследование влияния температуры подогрева на прочность сцепления основного и напыленного металла при газопламенном напылении

Прочность сцепления при испытаниях первых серий экспериментов оценивалась по усилию вырыва центрального стержня из приспособления с напыленным слоем (рис.4.10).



Рисунок 4.10 – Образец для испытания прочности сцепления с напыленным слоем на верхней плоскости

Проведенная серия испытаний образцов из стали 20 и стали 12Х18Н9Т напыленных без подогрева с различным расстоянием от сопла металлизатора до основного металла, показала что прочность сцепления была незначительной менее 0,5МПа (рис.4.11). Варьирование расстоянием не дало значительного прироста прочности (рис.4.12).



Рисунок 4.11 – Образец для испытания прочности сцепления с напыленным слоем при расстоянии от сопла до образца 50мм



Рисунок 4.12 – Образец после испытания прочности сцепления с напыленным слоем

Предварительный подогрев до 350 °С позволил повысить прочность сцепления до 0,65МПа. Однако, схема определения прочности сцепления не обеспечивала повторяемость результатов исследований и их адекватность. Поэтому в дальнейшем применялась схема с отрывом напыляемого слоя описанная выше.

Прочность сцепления образцов при различных температурах подогрева с пескоструйной обработкой никельшлаком с фракцией 0.5-1.5 показана в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Зависимость прочности сцепления от температуры подогрева

№ образца	Материал образца	Подсло й	Подогрев	Усилие отрыва,Н (Приложение 2)	Прочность сцепления; МПа
19	20	-	-	2480	3
20	20	-	350°С 60 мин	3000	3,9
27	20	-	450 °С 60 мин	3200	5
28	20	-	550 °С 60 мин	2350	3,17

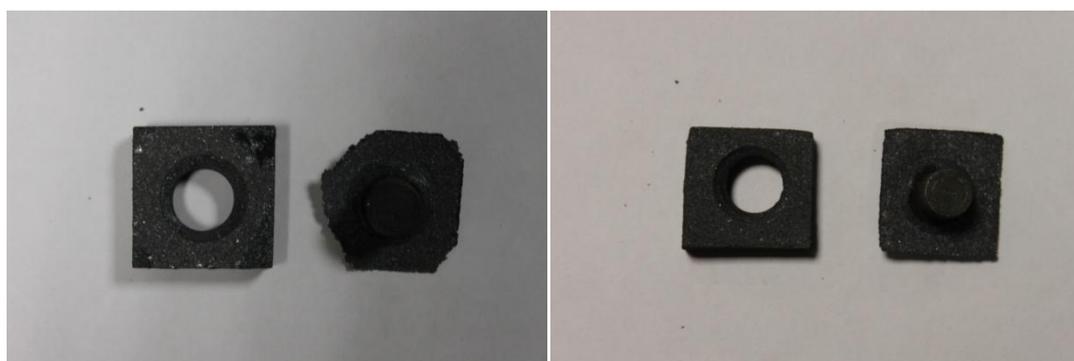
Как следует из данных проведенных исследований подогрев до 450 °С позволяет повысить прочность сцепления практически в 2 раза. При более высоких температурах наблюдается снижение прочности сцепления, что вероятно связано с повышением окисляемости углеродистой стали при температурах выше 450 °С. Визуальный осмотр разрушенных образцов подтвердил наличия окисленного слоя по линии разрушения образцов. Внешний вид образцов представлен на рис. 4.13.

Напыление высоколегированных хромоникелевых сталей по режимам табл.2.2 на образцы для испытания прочности сцепления по схеме отрыва напыленного металла без подогрева и с подогревом до 350 °С не дало положительных результатов. Напыленное покрытие сразу же отслоилось после напыления (рис.4.14).



а)

б)

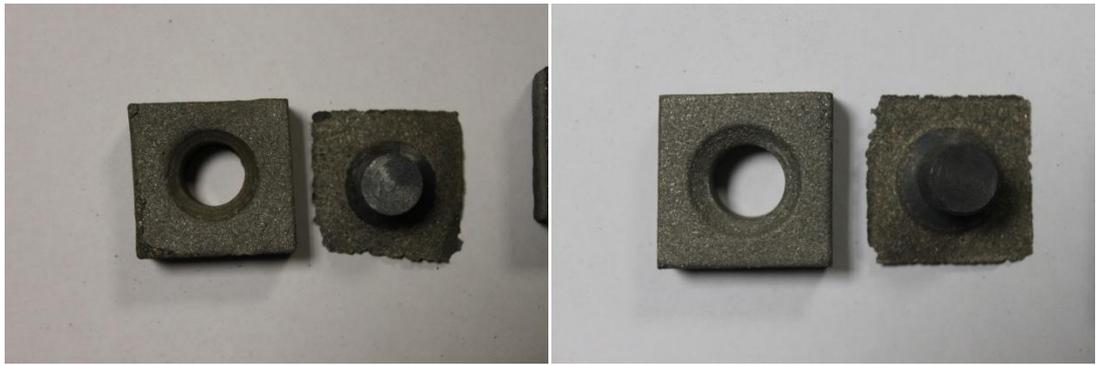


в)

д)

а) - без подогрева; б) - 350°С; в) - 450°С; в) - 550°С

Рисунок 4.13 – Напыленные образцы из стали 20 после испытания прочности сцепления



а)

б)

а) - без подогрева; б) - 350°C

Рисунок 4.14 – Напыленные образцы из стали 12Х18Н9Т

Таким образом, предварительный подогрев позволяет повысить прочность сцепления основного и напыляемого металла. Наиболее оптимальная температура подогрева 350-450°C. При напылении валов термообработанных по режиму закалка + высокий отпуск такой подогрев не должен привести к структурным изменениям вала и к его разупрочнению.

4.3 Исследование влияния состава промежуточного слоя на прочность сцепления основного и напыленного металла при газопламенном напылении

В качестве промежуточных слоев использовали медь, никель, алюминий и нихром. Толщина промежуточного слоя обычно не превышала 500мкм.

Первые серии экспериментов проводимые при напылении по режиму таблицы 2.1 и с испытанием прочности сцепления по схеме вырыва стержня. Нанесение подслоя меди напылением позволило незначительно повысить прочность сцепления (рис.4.15) до 0,75 МПа. Разрушение при этом проходило по границе подслоя и основного металла. Причем исходя из внешнего вида разрушения физического контакта между основным металлом

и медью не наблюдалось (рис.4.16.). Для обеспечения адгезионной связи или образования подслоя за счет контактного плавления необходим подогрев до более высоких температур.

Нанесение подслоя алюминия обеспечило повышение прочности до 1-1,2МПа (рис.4.17). Разрушение происходило по границе алюминия и основного металла. На стержне наблюдались включения алюминиевой фазы, что говорит об образовании физического контакта между алюминием и основным металлом (рис.4.18). Не высокие значения прочности сцепления объясняются большой площадью непропаев на границе стали и алюминия более 70% и низкой прочностью переходного слоя между этими металлами.

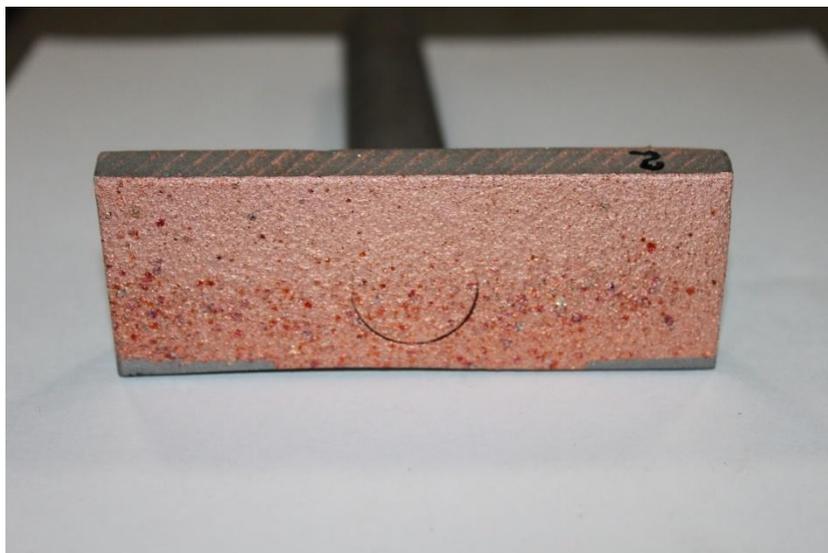


Рисунок 4.15 – Образец для испытания прочности сцепления с напыленным промежуточным медным слоем

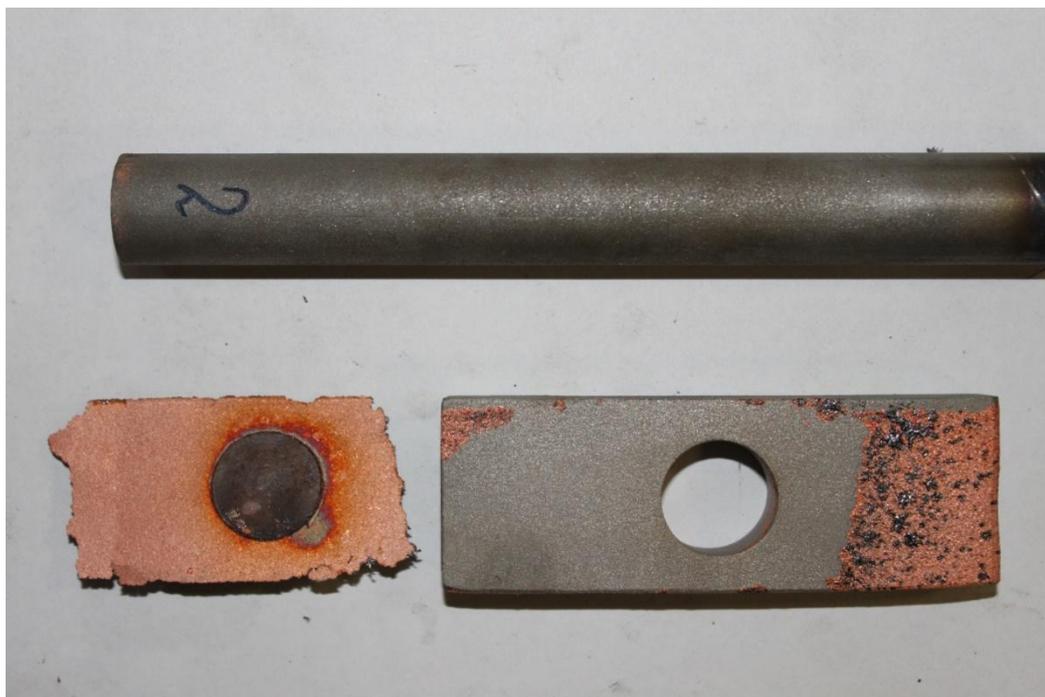


Рисунок 4.16 – Образец после испытания прочности сцепления с
напыленным промежуточным медным слоем

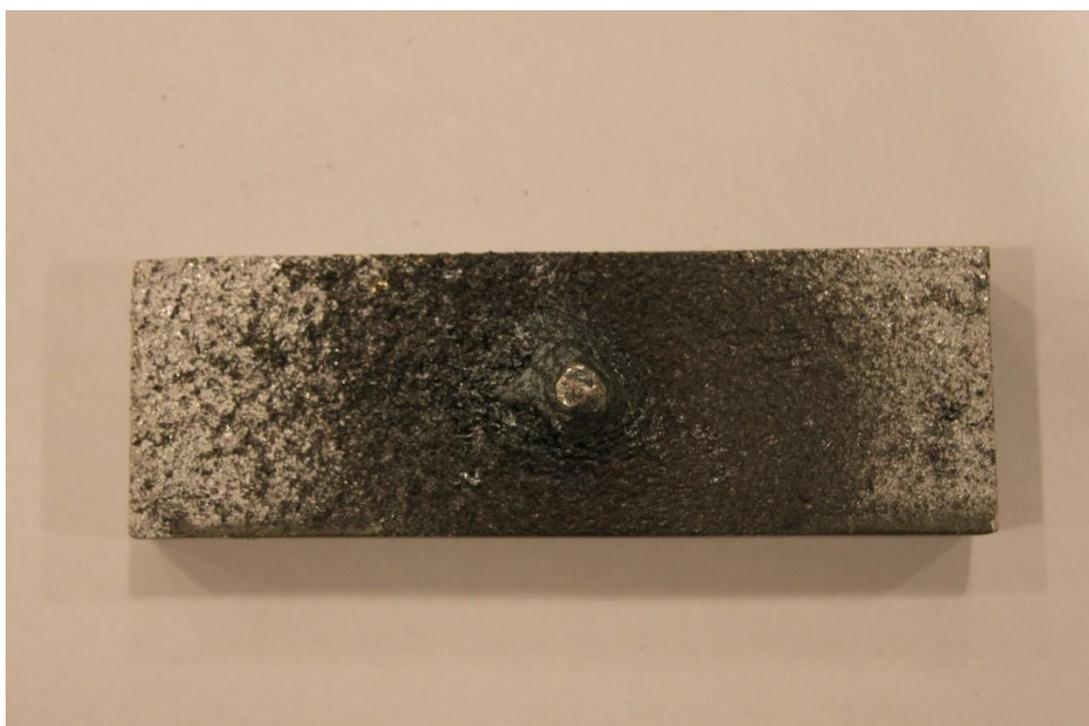


Рисунок 4.17 – Образец для испытания прочности сцепления с
напыленным промежуточным алюминиевым слоем



Рисунок 4.18 – Стержень после испытания прочности сцепления с
напыленным промежуточным алюминиевым слоем

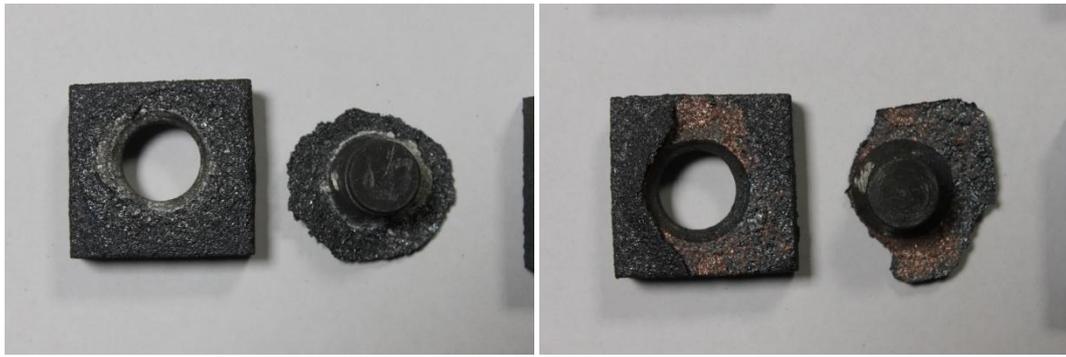
Напыление образцов по режимам таблицы 2.2. и таблицы 2.4. позволило повысить прочность сцепления. Результаты испытаний по схеме отрыва напыленного слоя представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Зависимость прочности сцепления от состава промежуточного слоя при напылении на сталь 20

№ образца	Материал образца	Подсло й	Подогрев	Усилие отрыва, Н (Приложение2)	Прочность сцепления МПа
19	20	-	-	2480	3
20	20	-	350°C 60 мин	3000	3,9
21	20	Al	350°C 60 мин	4150	8,5
22	20	Cu	350°C 60 мин	2700	5,6
23	20	Ni	350°C 60 мин	4100	4,4
24	20	NiCr	350°C 60 мин	3600	3,8

Как следует из данных таблицы 4.3. наиболее высокая прочность сцепления наблюдается при применении алюминиевого подслоя. Достаточно высокие значения прочности сцепления и при использовании меди. Такая зависимость объясняется более низкими температурами плавления промежуточных слоев из алюминия и меди и вероятным их подплавлением при напылении. Применение никеля и незначительно повысило прочность сцепления, а нихрома немного понизило. Никелевые сплавы имеют более высокую температуру плавления, а наличие хрома в никелевых сплавах повышает их окисляемость при напылении.

Визуальный контроль разрушенных образцов показал наличие алюминия и меди на поверхностях основного и напыленного металла, что вероятно говорит о неплохой связи алюминия и меди с основным и напыляемым металлом (рис.4.19).



а)

б)



в)

г)

а) – промежуточный слой алюминий; б) – промежуточный слой медь;
 в) – промежуточный слой никель; д) – промежуточный слой нихром

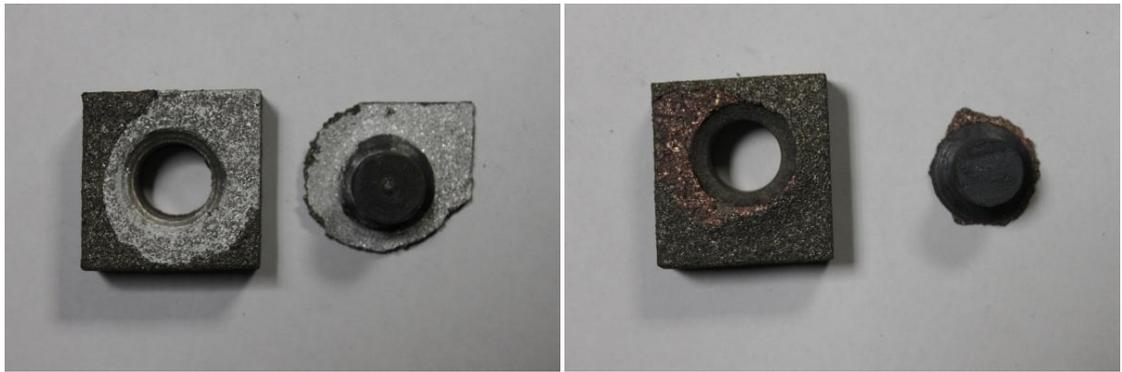
Рисунок 4.19 – Напыленные образцы из стали 20 после испытании прочности сцепления с промежуточными слоями

Напыление на сталь 12Х18Н9Т по режимам табл.2.2. позволили получить на плоских образцах для испытания прочности сцепления по схеме отрыва напыленного слоя покрытия только с подслоями алюминия и меди. В образцах напыленных без промежуточного слоя и со слоями на основе никеля и нихрома наблюдалось отслоение покрытия без проведения испытаний. Прочность сцепления с алюминиевым подслоем была на уровне 7,5МПа, что ниже чем при напылении на сталь 20 (таблица 4.4). Применение подслоя на основе меди наоборот повысило прочность сцепления более чем на 50%.

Таблица 4.4 - Зависимость прочности сцепления от состава промежуточного слоя при напылении на сталь 12Х18Н9Т

№ образца	Материал образца	Подсло й	Подогрев	Усилие отрыва; Н Приложение 2	Прочность сцепления; МПа
13	12Х18Н9Т	-	-	-	-
14	12Х18Н9Т	-	350°С 60 мин	-	-
15	12Х18Н9Т	Al	350°С 60 мин	3250	7,5
16	12Х18Н9Т	Cu	350°С 60 мин	2300	9
17	12Х18Н9Т	NiCr	350°С 60 мин	-	-
18	12Х18Н9Т	Ni	350°С 60 мин	-	-

Визуальный контроль образцов после испытания показал, что разрушение при наличии промежуточного слоя алюминия и меди прошло по промежуточному слою, о чем говорит наличие включений алюминия и меди в основном и напыленном металле (рис.4.20). Кроме того, дополнительное упрочнение промежуточного слоя легированием может еще повысить прочность сцепления покрытия с основным металлом.



а)

б)



в)

д)

а) – промежуточный слой алюминий; б) – промежуточный слой медь;
в) – промежуточный слой никель; д) – промежуточный слой нихром

Рисунок 4.20 – Напыленные образцы из стали 12Х18Н9Т после
испытании прочности сцепления с промежуточными слоями

4.4 Исследование влияния характера подготовки поверхности основного металла на прочность сцепления

Целью проводимых исследований являлось установление влияния характера подготовки поверхности основного металла на прочность сцепления основного и напыленного металла.

Предварительная оценка прочности сцепления напыленных образцов из стали 20 по режимам табл. 2.2. с предварительной пескоструйной

обработкой кварцевым песком фракции 0,2-0,6 и никельшлаком с фракцией 0.5-1.5 показала, что поверхность с повышенной шероховатостью и возможно рельефом (применение рваной резьбы) может значительно повлиять на прочность сцепления (табл.4.5).

Таблица 4.5 - Зависимость прочности сцепления от характера подготовки поверхности основного металла

№ образца	Материал образца	Характер подготовки поверхности	Подогрев	Усилие отрыва,Н Приложение 2	Прочность сцепления; МПа
7	20	Пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5	-	2480	3
8	20	Пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5	350°C 60 мин	3000	3,9
27	20	Пескоструйная обработка кварцевым песком 0,2-0,6	-	1700	1.36
28	20	Пескоструйная обработка кварцевым песком 0,2-0,6	350°C 60 мин	2800	3.5

При дальнейших испытаниях сравнивалась прочность сцепления образцов диаметром 70мм после токарной обработки, после пескоструйной обработки никельшлаком, образцы с рваной резьбой и с рваной резьбой и пескоструйной обработкой (табл. 4.6; рис.4.21). Образцы напылялись на сталь 20 по режимам данным в таблице 2.2. Проведенные исследования показали, что применение пескоструйной обработки позволяет повысить прочность сцепления покрытия и основного металла, еще более высоких

значений можно добиться, применяя рваную резьбу. Максимальная прочность сцепления достигается при применении комбинированной обработки: рваная резьба и пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5 . Предварительный подогрев при этом так же повышает прочность сцепления практически на 50%. Более низкие значения прочности сцепления по сравнению с предыдущими данными объясняются большими размерами образцов и неравномерным слоем напыленного покрытия.

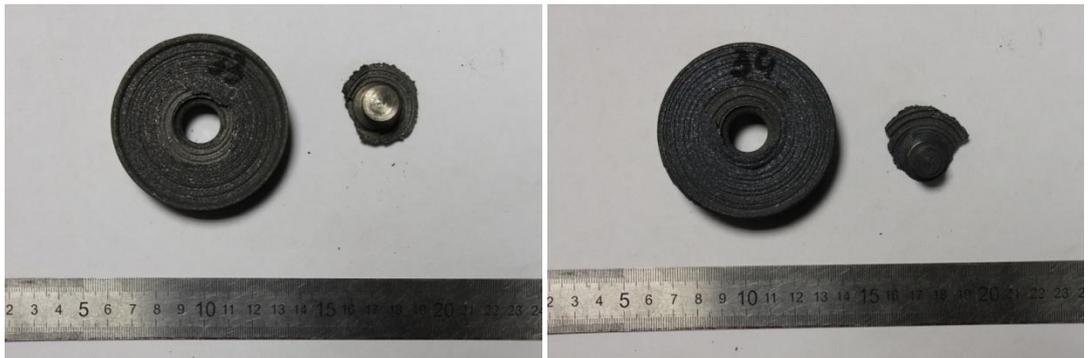
Таблица 4.6 -Зависимость прочности сцепления от характера подготовки поверхности основного металла диаметром 70мм

№ образца	Материал образца	Характер подготовки поверхности	Подогрев	Усилие отрыва; Н Приложение 2	Прочность сцепления сцепления МПа
30	20	Токарная обработка	350°С 60 мин	1380	Менее 1
31	20	Рваная резьба	-	1480	2.1
32	20	Рваная резьба	350°С 60 мин	1400	3.3
33	20	Рваная резьба, пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5	-	1500	4.4
34	20	Рваная резьба, пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5	350°С 60 мин	2490	7.4
35	20	Пескоструйная обработка никельшлаком 0.5-1.5		1153	1.2



а)

б)



в)

д)

а) - рваная резьба; б) - рваная резьба с подогревом; в) -
комбинированная подготовка; д) - комбинированная с подогревом

Рисунок 4.21 – Напыленные образцы из стали 20 после испытании
прочности сцепления с различным характером подготовки поверхности

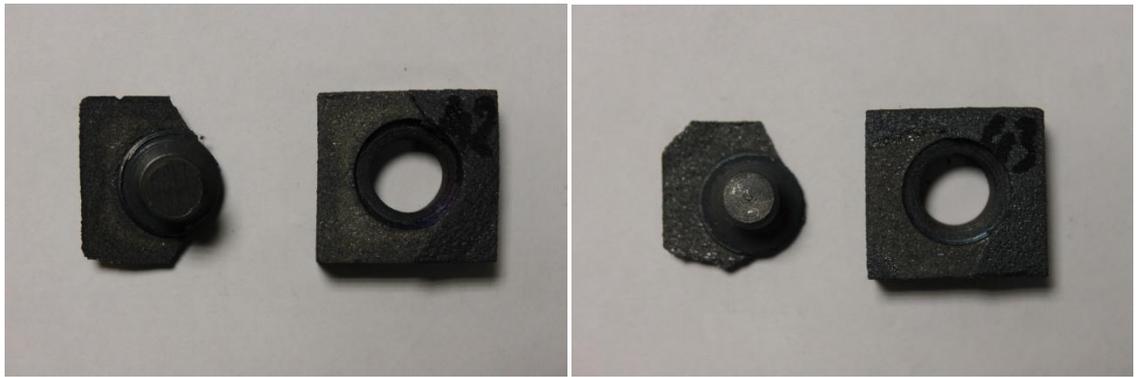
Таким образом, повышение шероховатости напыляемой поверхности за счет абразивной обработки позволяет повысить прочность сцепления основного металла и напыленного слоя. Нарезание рваной резьбы позволяет повысить значения прочности сцепления не менее, чем на 50%. Наиболее высокие значения прочности сцепления покрытия с основным металлом можно получить при комбинированной обработке поверхности: нарезание рваной резьбы плюс абразивная обработка.

4.5 Исследование прочности сцепления основного и напыленного металла при газопламенном напылении с использованием ацетилена

Режимы напыления соответствовали данным таблиц 2.3 и 2.5. Результаты испытаний представлены в таблице 4.7 Внешний вид образцов показан на рис.4.22. Сравнивая результаты испытаний с применением пропана и ацетилена стоит отметить, что прочность сцепления с подогревом без подслоя повысилась практически на 50%, а без подогрева наоборот понизилась. Применение алюминиевого подслоя при напылении с ацетиленом позволило повысить прочность сцепления по сравнению с напылением с пропаном на 50% и достичь значений на уровне 12,8МПа. Медный, никелевый и никромовый подслои не повысили прочность сцепления по сравнению с образцами напыленными без подслоя с использованием ацетилена. Однако, прочность сцепления при применении никелевого подслоя была выше, чем при напылении с пропаном.

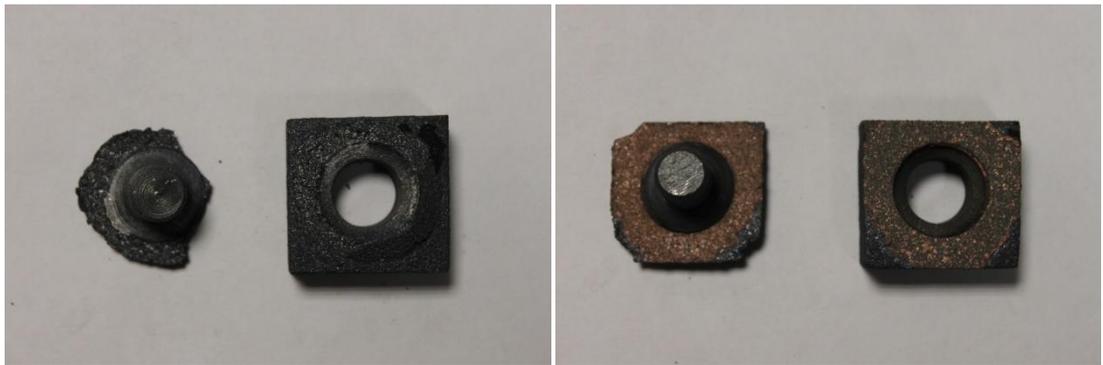
Таблица 4.7 - Значения прочности сцепления при напылении на сталь 20 с применением ацетилена

№ образца	Материал образца	Подсло й	Подогрев	Усилие отрыва Н Приложение 2	Коэффициент сцепления МПа
42	20	-	-	850	2
43	20	-	350°C 60 мин	2400	6,1
44	20	Al	350°C 60 мин	3290	12,8
45	20	Cu	350°C 60 мин	2650	4,2
46	20	NiCr	350°C 60 мин	1870	2,5
47	20	Ni	350°C 60 мин	3000	5,2



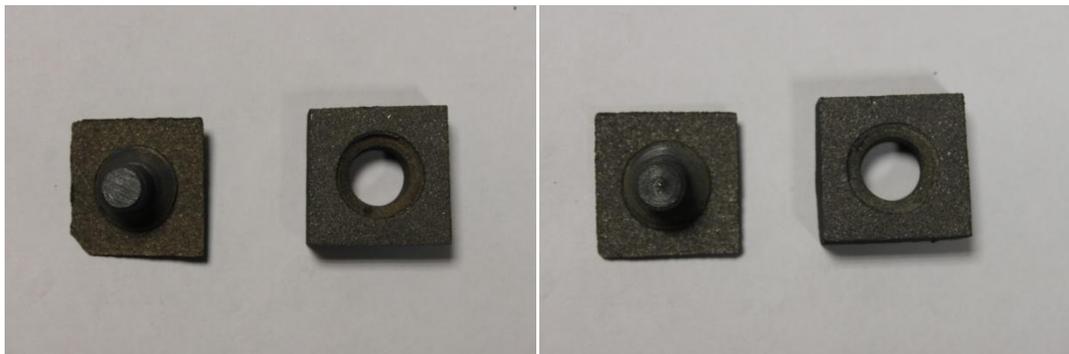
а)

б)



в)

д)



е)

ж)

а) - без подогрева; б) - с подогревом до 350°C; в) - с промежуточными
слоем алюминия; д) - меди; е) - никеля; ж) - нихрома

Рисунок 4.22 – Напыленные образцы с применением ацетилена из
стали 20 после испытании прочности сцепления

Таким образом, применения ацетилена в качестве горючих газов позволяет повысить незначительно прочность сцепления основного металла и напыленного слоя. Наибольшее приращение прочности сцепления наблюдается при применении алюминиевого промежуточного подслоя.

4.6 Исследование процессов газопламенного напыления с применением цилиндрических образцов

Моделирование процессов напыления валов из углеродистых и легированных сталей проводили с использованием труб диаметром 57 мм. При напылении изменялось состояние поверхности труб. Режимы напыления соответствовали данным таблицы 2.2. Абразивная подготовка, зачистка шлифовальными кругами, не всегда обеспечивала качественное формирование покрытия на углеродистых и легированных образцах.

При напылении на трубы из стали 20 в 4 прохода с абразивной подготовкой поверхности с расстоянием до изделия 80мм был получен напыленный слой толщиной 1,5мм. Во время охлаждения от края трубы на поверхности напыленного слоя, появились продольные трещины, в центральной части дефектов не обнаружено (рис 4.23).



Рисунок 4.23 – Цилиндрические образцы напыленные без подогрева с расстояния 80мм

Увеличение расстояния до сопла металлизатора до 150мм позволило напылить образец примерно той же толщины без явно видимых дефектов (рис.4.24). Черновая механическая обработка подтвердила удовлетворительное качество напыления.

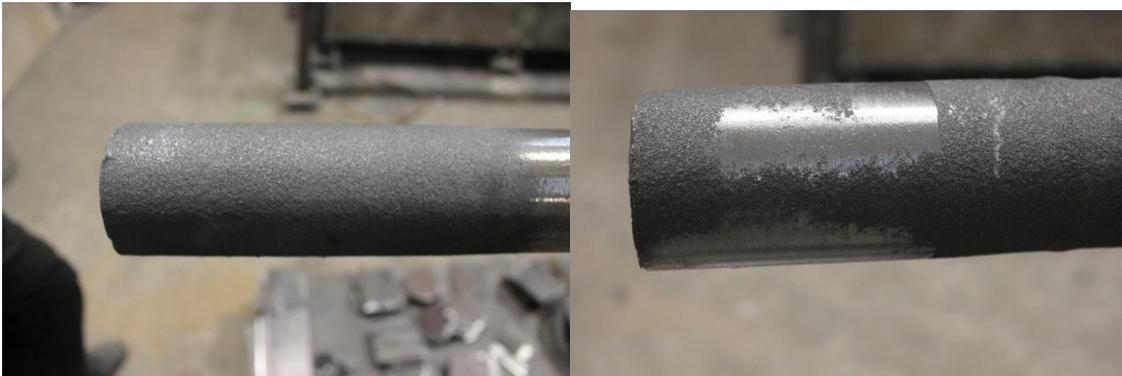


Рисунок 4.24 – Цилиндрические образцы напыленные без подогрева с расстояния 150мм

При напылении на трубы из углеродистых сталей удовлетворительное качество поверхности наблюдалось при применении пескоструйной обработки поверхности и применения рваной резьбы. Отслоение при токарной обработке в этом случае не наблюдается. Повышенная толщина напыленного покрытия зачастую является причиной отслоения покрытия от основного металла.

При напылении высоколегированных сталей необходим предварительный подогрев и указанная выше подготовка поверхности (рис.4.25). Без предварительного подогрева при обработке образцов наблюдалось отслоение напыленного слоя. При напылении высоколегированных сталей причиной отслоения так же зачастую является повышенная толщина покрытий.

Учитывая рекомендации ГОСТ 28844-90 для снижения внутренних напряжений в напыленном слое и уменьшения вероятности его отслоения желательно иметь максимальную толщину газопламенного покрытия не выше 1,5мм.



а)



б)



в)

а) - образец перед напылением; б) - напыленный образец; г) - образец после токарной обработки

Рисунок 4.25 – Цилиндрические образцы из стали 12Х18Н9Т напыленные с подогревом и рваной резьбой:

4.7 Исследование структуры и химического состава напыленного и промежуточных слоев

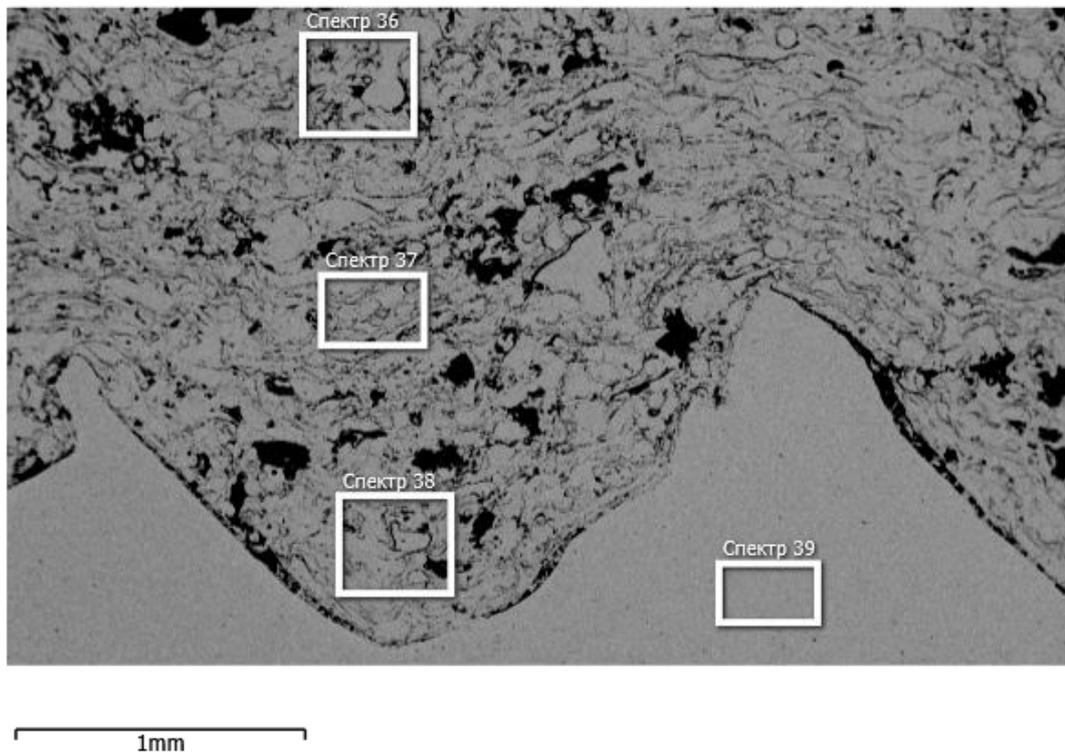
Микрорентгеноструктурный анализ позволил оценить макро и микроструктуру напыленных образцов и определить химический состав покрытий и промежуточных слоев. Анализ проводили на образцах вырезанных из трубных напыленных заготовок. На всех заготовках предварительно нарезалась рваная резьба. Режимы напыления соответствовали данным таблицы 2.2. и таблицы 2.4. Структура и химический состав напыленных образцов представлен в Приложении 1.

При напылении без подогрева как углеродистых, так и высоколегированных хромоникелевых сталей на границе покрытия и основного металла формировался окисленный слой, кое-где на границе присутствовали недозаполненные карманы (рис.4.26). Предварительный подогрев образцов до 350°C улучшает заполняемость, уменьшает условный промежуток между основным и напыленным слоем, уменьшается количество недозаполненных карманов (рис.4.27).

Применение алюминиевого подслоя позволило улучшить заполняемость рваной резьбы. Наблюдается подплавление алюминия при напылении и не наблюдается окисленного слоя между слоями. Между слоями не образуется интерметаллидной прослойки (рис.4.28).

Промежуточное напыление медного подслоя, так же визуальное улучшило качество процесса напыления (рис.4.29). Никелевый и хромовый слой значительно не изменил макроструктуры покрытия.

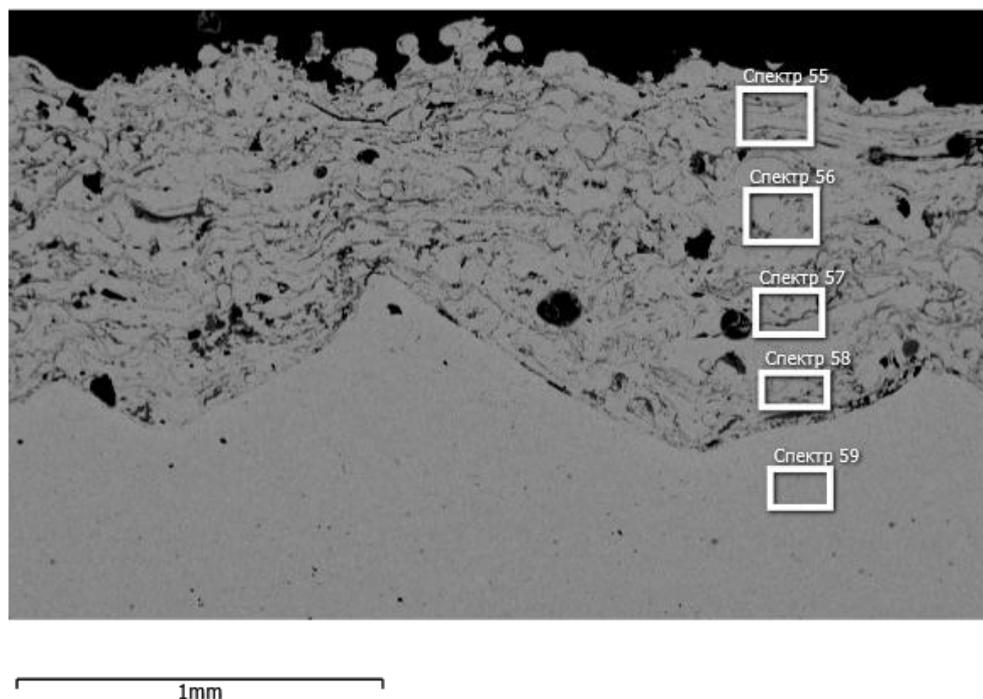
Электронное изображение 9



Название спектра	O	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Сумма	Папка проекта
Спектр 36		0.30	1.05		26.00	60.87	11.78	100.00	К-274/Образец 16/Участок 1
Спектр 37	4.86		0.78		23.28	59.47	11.60	100.00	К-274/Образец 16/Участок 1
Спектр 38	5.13	0.46	0.85		23.18	59.13	11.25	100.00	К-274/Образец 16/Участок 1
Спектр 39			0.40	0.64	18.60	70.34	10.03	100.00	К-274/Образец 16/Участок 1

Рисунок 4.26 – Структура и химический состав покрытий при напылении цилиндрических образцов без подогрева с рваной резьбой из стали 12Х18Н9Т

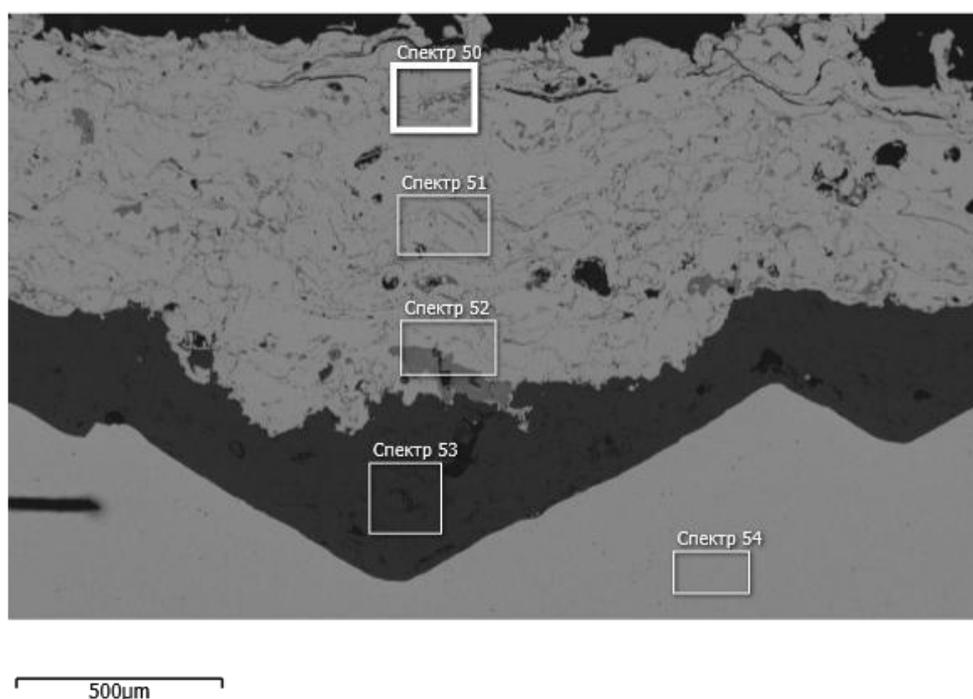
Электронное изображение 13



Название спектра	O	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Сумма
Спектр 55	4.51	0.98		23.60	59.39	11.52	100.00
Спектр 56	4.65	0.89		23.72	59.44	11.30	100.00
Спектр 57	4.57	0.94		23.79	59.45	11.24	100.00
Спектр 58	5.62	0.90		23.78	58.43	11.28	100.00
Спектр 59		0.36	0.51	18.68	70.08	10.37	100.00

Рисунок 4.27 – Структура и химический состав покрытий при напылении цилиндрических образцов с подогревом до 350°С с рваной резьбой из стали 12Х18Н9Т

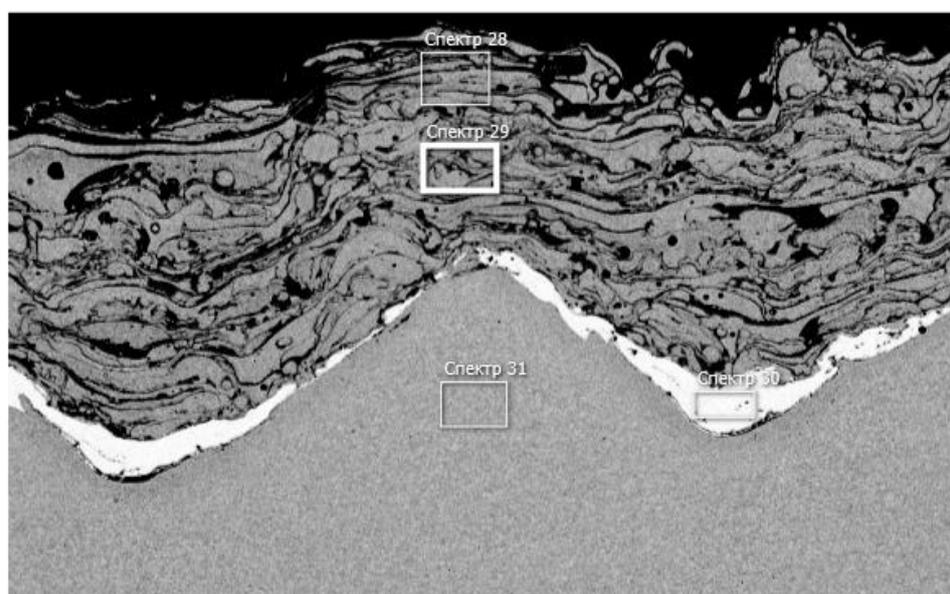
Электронное изображение 12



Название спектра	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Сумма
Спектр 50	6.03		1.02		24.61		57.65	10.68	100.00
Спектр 51	4.73	0.37	0.97		24.29		58.47	11.16	100.00
Спектр 52	10.89	0.47	1.45		25.80	2.96	49.24	9.19	100.00
Спектр 53	4.27	95.35					0.38		100.00
Спектр 54			0.38	0.45	18.70		70.20	10.28	100.00

Рисунок 4.28 – Структура и химический состав покрытий при напылении цилиндрических образцов с рваной резьбой по алюминиевому подслою из стали 12X18H9T

Электронное изображение 7



Название спектра	O	Si	Fe	Cu	Сумма	Папка проекта
Спектр 28	4.13	1.48	94.39		100.00	К-274/Образец 12/Участок 1
Спектр 29	6.66	1.28	92.06		100.00	К-274/Образец 12/Участок 1
Спектр 30		0.23		99.77	100.00	К-274/Образец 12/Участок 1
Спектр 31		0.29	99.71		100.00	К-274/Образец 12/Участок 1

Рисунок 4.29 – Структура и химический состав покрытий при напылении цилиндрических образцов с рваной резьбой по медному подслою из стали 20

Микрорентгеноструктурный анализ подтвердил эффективность применения предварительного подогрева и промежуточных слоев из алюминия и меди для повышения качества формирования напыленных покрытий. При указанных мероприятиях уменьшается площадь дефектов на границе слоев и улучшается заполняемость рельефа поверхности основного металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В следствии проведенных опытных работ, направленных на изучение различных методов повышения прочности связи напыленного покрытия и основного металла можно прийти к выводу, что:

- увеличение шероховатости поверхности основного материала посредством создания сложных рельефов поверхностей: рваная резьба; рваная резьба с последующей абразивной обработкой; рваная резьба с последующей накаткой.

- повышение температуры поверхности основного металла за счет предварительного подогрева;

- создание промежуточных слоев из меди, никеля, алюминия и их сплавов.

Проведенные исследования тепловых условий напыления показали, что температура основного металла при напылении углеродистых сплавов на режимах обеспечивающих стабильное формирование напыленного слоя не превышает 254°C , а при напылении на сталь 12X18H9T- 390°C , что недостаточно для формирования адгезионной связи между основным и напыляемым металлом. Применение ацетилена вместо пропана незначительно повысило температуру основного металла.

Предварительный подогрев повышает температуру основного металла до 450°C , что позволяет повысить повторяемость геометрии рельефа поверхности основного металла. Наиболее высокая прочность сцепления основного металла с напыляемым слоем наблюдается при предварительном подогреве в интервале $350-450^{\circ}\text{C}$. Для газопламенного напыления с учетом проведенных исследований и литературных данных можно рекомендовать предварительный подогрев на уровне 300°C . При напылении небольших изделий можно применять общий подогрев, а при напылении значительных

поверхностей локальный подогрев. Причем наилучших результатов можно добиться при одновременном подогреве и напылении поверхностей изделий.

Прочность сцепления основного металла с покрытием можно значительно повысить (до 50%) увеличивая шероховатость поверхности основного металла.

Для газопламенного напыления валов из углеродистых и легированных сталей можно рекомендовать нарезание рваной резьбы или более сложного профиля с последующей абразивной обработкой.

Применение промежуточных слоев из алюминия значительно повышает прочность сцепления (до 2 раз) напыленного слоя с основным металлом, за счет уменьшения дефектов формирования на границе слоев. Микрорентгеноспектральный анализ подтвердил эффективность применения алюминиевого подслоя. При этом на границе алюминиевого слоя не наблюдается присутствие интерметаллидов. Применение медного подслоя так же значительно повышает прочность сцепления напыленного металла и основного. Применение никеля и нихрома в качестве промежуточных слоев незначительно повышает прочность сцепления.

Для напыления валов на основе проведенных исследований можно рекомендовать промежуточные слои из алюминия и меди. Повысить прочность сцепления можно, применяя вместо этих металлов их сплавы. При применения алюминиевых сплавов – это системы алюминий-медь, алюминий-кремний. При применении медных сплавов – это кремнистые бронзы, алюминиевые бронзы.

Для снижения внутренних напряжений в напыленном слое и уменьшения вероятности его отслоения желательно соблюдать требования ГОСТ 28844-90 по максимальной толщине газопламенного покрытия на уровне 1,5мм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Газотермическое напыление: учебн. пособие / Л.Х. Балдаев, В.А. Вахалин, Г.И. Ганноченко и др.- Маркет ДС, 2007. - 344с.
- 2 Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением: монография / И. О.Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. — Барановичи:РИО БарГУ, 2012. — 183с.
- 3 Восстановление деталей машин газотермическими способами: Учеб.пособие / Д.И. Станчев, А.М. Кадырметов, В.И. Ключников, К.А. Яковлев.—Воронеж: ВГЛТА, 2003. – 83 с.
- 4 Азизов Р.О., Разработка износостойких газопламенных покрытий с повышенной прочностью сцепления: дис. канд. техн. наук /Р.О. Азизов. Мн.:1986.-176 с.
- 5 Хасуй А. Техника напыления. Пер. с японского. М. 1975.-288с
- 6 Кравченко И.Н. Эффективные технологические методы нанесения покрытий газопламенным напылением/ И.Н. Кравченко, В.М. Корнеев, И.Е.Пупавцев, А.А. Коломейченко // Вестник. 2015. № 1. С. 36-40–27.
- 7 Хромов В.Н., Корнев В.Н., Барабаш В.В. Выбор режимов газопламенного напыления порошко-выми материалами с использованием водородно- кислородного пламени // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. № 7. С. 30–33.
- 8 Al-Cu-Fe (Aluminum-Copper- Iron) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2005. – Vol. 26, № 1. – P. 59–64.
- 9 Al-Cu-Fe (Aluminum-Copper- Iron) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2010. – Vol. 31, № 5. – P. 449–452.
- 10 Калмыков, К.Б. Фазовые равновесия в системе Al-Cu-Fe при температуре 853К в области, богатой алюминием / К.Б. Калмыков и др. // Вестник Московского университета. – 2009. – серия 2. Химия, – Т.50. – стр. 122–128.

- 11 Al-Cu-Fe (Aluminum-Copper- Iron) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2010. – Vol. 31, №5. – P. 449–452.
- 12 Елагин, В.И. Легирование деформируемых алюминиевых сплавов переходными металлами / В.И. Елагин. – М. : Metallurgiya, 1975. – 248 с.
- 13 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2009. – Vol. 30, № 1. – P. 85–88.
- 14 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2009. – Vol. 30, № 4. – P. 375–377.
- 15 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2005. – Vol. 26, № 1. – P. 70–71.
- 16 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2006. – Vol. 27, № 5. – P. 489–490.
- 17 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2008. – Vol. 29, № 2. – P. 180–184.
- 18 Isothermal Sections in the (Fe, Ni)-Rich Part of the Fe-Ni-Al Phase Diagram / Igor Chumak et al. // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2008. – Vol. 29, № 4. – P. 300–304.
- 19 Al-Fe-Ni (Aluminum-Iron-Nickel) / V. Raghavan // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2009.
- 20 Уткин, Н.И. Metallurgiya cvetnykh metallor / Н.И. Уткин. – М. : Metallurgiya, 1985. – 440 с.
- 21 Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа / О. Кубашевски.; пер. с англ. – М. : Metallurgiya, 1985. – 184 с.
- 22 Техника электронной микроскопии: Пер. с англ. / Под ред. Д. Кея. М.: Мир, 1965. 407 с.
- 23 Технический анализ. / К.И. Годовская., Л.В. Рябина [и др.] М. : Высшая школа, 1967. 202 с.
- 24 Дымов А.М. Технический анализ. М.: Metallurgiya, 1964. 198 с.

25 Скотт В., Лав Г. Количественный электронно-зондовый микроанализ: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 352 с.

26 Гончаренко Ю. Д., Евсеев Л. А. Применение растровой электронной микроскопии, оже-электронной спектроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии для обнаружения и исследования структуры и элементного состава электроизоляционного покрытия. Известия РАН, серия физическая, т. 62, № 3, 1998. С. 495-502.

27 Brutsch R., Gaillet D. Scanning electron microscopy analysis of CRUD-material in the PSI Hotlab // Plenary Meeting of the European Working Group HOTLAB: European Hot Laboratories Research Capabilities and Needs (Halden, Norway, 6-8 September, 2004). Editors: B. C. Oberlander and H. K. Jenssen. Kjeller, Norway, 2005. P.114-120.

28 Гончаренко Ю. Д., Евсеев Л. А. Особенности применения методов РЭМ и ВИМС для изучения элементного состава рыхлых отложений на металлической подложке // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2002, №10. С.61-65.

29 Криштал М.М., Ясников И.С., Полуниин В.И., Филатов А.М., Ульянников А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.

30 Ubhi H.S., Bowen A.W. Analysis and representation of electron backscattered diffraction texture data-examples from heat treated Al-Li alloy sheet // Material Science Technic. 1996, №12. С.880-886.

31 Dingley D.J., Randle V. Microtexture determination by electron backscatter diffraction // Journal of Material Science. 1992, vol 17, №27. С.4545-4566.

32 Бокий Г.Б. Кристаллохимия. М.: Наука, 1971. 400 с.

33 Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справ.изд./Баннх О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. М: Металлургия, 1986. 440 с.

- 34 Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами/В.Р. Рябов. – Киев: Наук. Думка, 1983 – 264 с.
- 35 Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. М.: Metallurgizdat, 1962-210 с.
- 36 Рябов, В.Р. Алитирование стали/ В.Р. Рябов – М.: «Металлургия», 1973
- 37 Специальные стали: учебник для вузов. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. М. : Metallurgiya, 1985. 408 с.
- 38 Денисов П.Ю. Взаимодействие сплавов алюминия с материалом пресс-форм и функциональными покрытиями: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук/ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Тюменский государственный нефтегазовый университет" (ТюмГНГУ). Специальность 05.02.01 – Материаловедение (машиностроение) Дата защиты 23.12.2005 .