

**Глава 9. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИПЕРЗВУКОВОЙ
МЕТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛЬНЫХ ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Трусов Д.И.
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, E-mail: mbelotser@gmail.com*

Введение

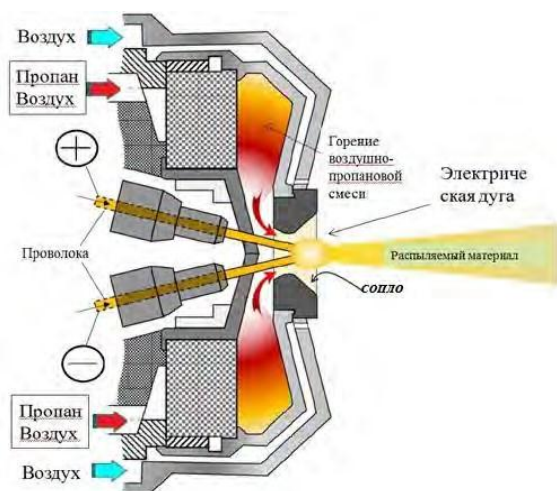
В связи с высокой стоимостью большинства методов активированного газотермического напыления порошковых материалов, особенно актуальным являются исследования, направленные на разработку активированных методов формирования покрытий из монолитных и композиционных проволочных материалов [1,2]. Там, где не требуется наносить слои из керамики, жаропрочных композитов, а реставрации подлежат детали из сталей, чугунов, цветных металлов и их сплавов, то есть при восстановлении деталей машин и механизмов общемашиностроительного профиля, рационально использовать газопламенное напыление проволок или электродуговую металлизацию (ЭДМ). Это относится, прежде всего, к реставрации и упрочнению деталей узлов трения (осей валиков, коленчатых валов, подшипников скольжения, направляющих) и посадочных мест под подшипники в корпусах и на валах. Если себестоимость процесса нанесения 1 кг покрытия электродуговой металлизацией принять за 1, то себестоимость газопламенного напыления проволочными материалами будет 1,2, а минимальная себестоимость газопламенного и плазменного напыления порошков составит соответственно 2,9 и 3,6.

Наиболее эффективным, на сегодняшний день, является технология гиперзвуковой металлизации [3], отличающаяся от традиционной электрометаллизации использованием непрерывного источника энергии для нагрева газа, распыляющего расплавленные в дуге проволоки. Нагретый до температуры около 2000 °С газ, истекая через сопло Лавала, приобретает скорость 900–1100 м/с, что позволяет разогнать частицы распыленного материала до скоростей порядка 500 м/с.

Для традиционной электродуговой металлизации (ЭДМ) используют источники постоянного электрического тока, обеспечивающие рабочий ток напыления от 350 до 800 А при напряжении от 17 до 45 В. Основными технологическими параметрами ЭДМ являются состав, диаметр и скорость подачи распыляемых проволок, мощность дуги, расход распыляющего газа, дистанция напыления, скорость перемещения пятна напыления.

В отличие от классической схемы ЭДМ, при активированной электродуговой металлизации (гиперзвуковой металлизации – ГМ) распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси (рисунок 1) [4]. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К. Скоростной напор потока при ГМ составляет $23,5 \cdot 10^4$ кг/м·с², что втрое больше, чем при плазменном напылении. Это позволяет частицам расплавленного металла двигаться в потоке со скоростью свыше 500 м/с и формировать покрытия, имеющие вдвое выше прочность сцепления с подложкой, чем при ЭДМ.

Кроме того, в условиях высокоскоростного напыления происходит изменение коэффициента сосредоточенности материала в струе в сторону его увеличения, поскольку угол расхождения двухфазных сверхзвуковых струй меньше, чем дозвуковых и составляет 5–7°. Как следствие – уменьшается диаметр пятна напыления, возрастает коэффициент использования материала. Ионизация межэлектродного промежутка снижает ток дуги на 10–15% при той же производительности, что и у традиционной электрометаллизации. Разработанная малогабаритная камера сгорания пропано-воздушной смеси оригинальной конструкции (рис. 1, а) позволила создать ручной металлизатор (рис. 1, б).



а)

б)

Рисунок 1 – Схема распылительной головки установки гиперзвуковой металлизации (а) и установка ГМ в работе (б)

Свойства формируемых покрытий зависят от электрических параметров металлизации, дистанции напыления, тепловых и динамических параметров распыляющей струи, а также состава газовой смеси, образующей распыляющий факел. В данной главе обобщены результаты исследований процесса формирования стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации, позволившие определить рациональные режимы технологий восстановления – упрочнения деталей транспортных машин и технологического оборудования.

Выбор горючего газа, формирующего распыляющий факел

На первом этапе были выполнены исследования, цель которых состояла в выборе горючего газа, формирующего распыляющий факел. При этом следовало учитывать теплотворную способность газа при его горении на воздухе, температуру пламени, а также количество воздуха, расходуемого на горение и охлаждение камеры. Последнее предусмотрено конструкцией камеры сгорания металлизатора [4].

Рассчитаем массовый и тепловой баланс системы.

Согласно уравнению теплового баланса, тепловой поток, входящий в систему равен тепловому потоку, выходящему из неё.

Обозначим: Q_1 – тепло, отдаваемое теплоносителем или отбираемое хладагентом; Q_2 – тепло, вносимое с реакционной массой; Q_3 – тепловой эффект процесса; Q_4 – тепло, отводимое из аппарата с реакционной массой; Q_5 – тепло, отводимое от стенок рабочей камеры аппарата. Следовательно:

$$Q_1 = Q_4 + Q_5 - Q_2 - Q_3$$

При энергетических расчетах Q_2 и Q_4 определяются по формуле:

$$\Sigma$$

где: G – масса вещества, кг; c – теплоемкость, кДж/(кгК); t – температура, К (масса вещества G определяется из уравнения материального баланса).

Тепловой эффект Q_3 процесса в общем случае рассчитывают исходя из следующей зависимости:

$$\Sigma \quad \Sigma \quad ,$$

где q_k и q_n – сумма теплоты образования исходных веществ и продуктов реакции соответственно.

Тепло, отводимое от стенок рабочей камеры аппарата $Q_{отв}$, где α – коэффициент теплоотдачи; (Δt) – разность температур стенки камеры сгорания аппарата и камеры охлаждения.

Согласно закону Дальтона, горючие составляющие газа вступают в химическое взаимодействие с кислородом, содержащемся в воздухе в определенном количестве, определяемым по стехиометрическим уравнениям, записанных для одного моля каждого вещества.

Общая формула расчету уравнения массового баланса горения углеводородов (алканов) в воздухе будет иметь вид:

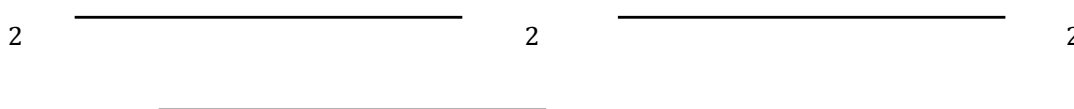


Теоретические объемы воздуха и продуктов горения рассчитываются по формулам, исходя из уравнения массового баланса по формулам

$$\frac{V_{возд}^1}{V_{гор}^1} = \frac{V_{гор}^2}{V_{гор}^1} \quad \begin{matrix} (M^3/M^3); \\ (M^3/M^3); \end{matrix}$$

Где $V_{гор}^1$ и $V_{гор}^2$ – объем воздуха и объем продуктов горения в расчете на 1 м³ горючего газа.

Для нахождения теплоты продуктов горения необходимо рассчитать массовое содержание каждого из элементов.



В результате произведенных расчетов был получен график зависимости теплоемкости горючего газа и теплоемкости, отбираемой воздухом, подаваемым на охлаждение камеры сгорания металлизатора, от состава горючего газа (рис. 2).

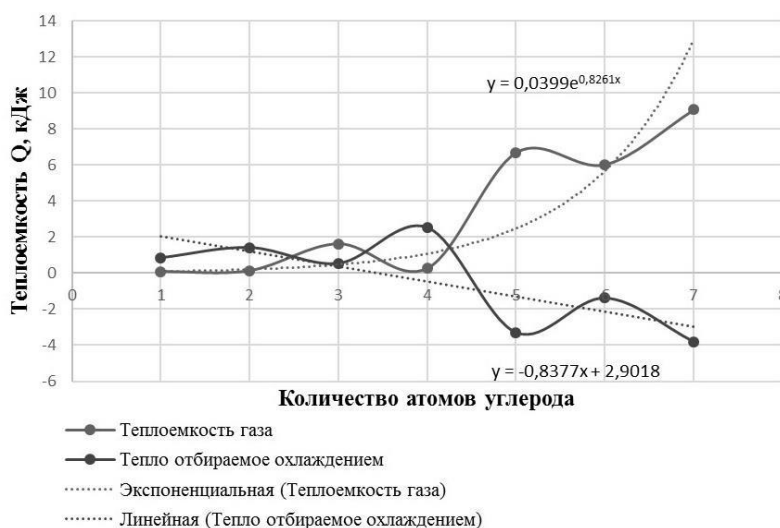


Рисунок 2 – Зависимость величин теплоемкостей горючего газа и охлаждающего воздуха от состава горючего газа

Анализ полученных данных показывает, что среди алканов пропан (C_3H_8) является наиболее оптимальным горючим газом для процесса гиперзвуковой металлизации, поскольку обладает максимальной теплоемкостью, достаточно высокой температурой горения на воздухе и, при этом, не требуется чрезмерного количества воздуха для горения факела и охлаждения камеры.

Существуют газы с более высокими параметрами горения по сравнению с пропаном, например, ацетилен, МАФ, МАПП.

Склонность ацетилена обратному удару и самовоспламеняемость при давлении выше полутора атмосфер нивелирует его преимущества, как заменителя пропана.

МАФ и МАПП схожи по составу с ацетиленом, однако лишены его отрицательных свойств, поскольку в их составе содержится пропан в качестве стабилизатора. Это позволяет напылять покрытия при рабочем давлении выше полутора атмосфер. Температура МАФ в смеси с воздухом на $150\text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем у ацетилена, но на $90\text{ }^\circ\text{C}$ выше, чем у МАПП.

Но, как показывает практика, использование газов – заменителей пропана невозможно без внесения конструктивных изменений в существующую конструкцию аппарата. Повышенная по сравнению с пропаном температура горения требует большего количества воздуха для охлаждения камеры сгорания.

Выбор состава распыляющих газов, обеспечивающих наибольшую плотность покрытий при наименьшем окислении

Для нанесения покрытий использовалась установка гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10 (табл. 1). В качестве материала образцов использована низкоуглеродистая сталь Ст 3. Перед нанесением покрытий производилась струйно-абразивная обработка при рабочем давлении сжатого воздуха $0,6\text{ МПа}$ и расходе стальной колотой дроби марки ДСК 0,3 – 2,0 около $1,2\text{ кг/с}$.

Таблица 1 – Технические характеристики установки АДМ-10

Показатель	Величина
Диаметр применяемой проволоки, мм	1,2 – 2,0
Скорость подачи проволоки, м/мин	0 – 6,3
Рабочий ток дуги, А	До 500
Коэффициент использования материала, не менее	0,85
Расход воздуха при $0,6\text{ МПа}$, $\text{м}^3/\text{ч}$	60
Расход горючего газа (пропан-бутан), кг/мин	0,011

В экспериментах использовались проволоки из сталей 95Х18 и 40Х13 (табл. 2). Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80.

Таблица 2 – Химический состав распыляемых проволок

Марка стали	Концентрация элементов, мас. %									
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	P	S	Cu	Fe
40Х13	0,36-0,45	12,0-14,0	0,60	0,20	0,80	0,80	0,025	0,030	0,30	основа
95Х18	0,9-1,0	17,0-19,0	0,60	0,20	0,80	0,80	0,030	0,025	0,30	основа

Образцы для структурно-фазовых исследований представляли собой пластины $10\times 6\times 5\text{ мм}$ из низколегированных сталей.

Состав распыляющего пропано-воздушного факела аппарата гиперзвуковой металлизации: режим 1 – избыток пропана ($\beta=18-20$); режим 2 – избыток воздуха ($\beta=26-28$); режим 3 – чистый воздух (схема традиционной электродуговой металлизации).

Поскольку основное количество оксидов образуется в результате контакта расплавленных частиц с воздухом, исследовалось влияние расхода распыляющего воздуха на количество кислорода в покрытиях, полученных традиционной металлизацией (режим 3). Установлено что, содержание кислорода в электрометаллизационных покрытиях составляет 2,8–4,2 % в зависимости от расходов сжатого воздуха, причем максимальная концентрация 4,2 % достигается при расходах около 1,4–1,6 м³/мин (рис. 3 и 4). Дальнейшее увеличение расхода распыляющего воздуха не приводит к заметному повышению концентрации кислорода.

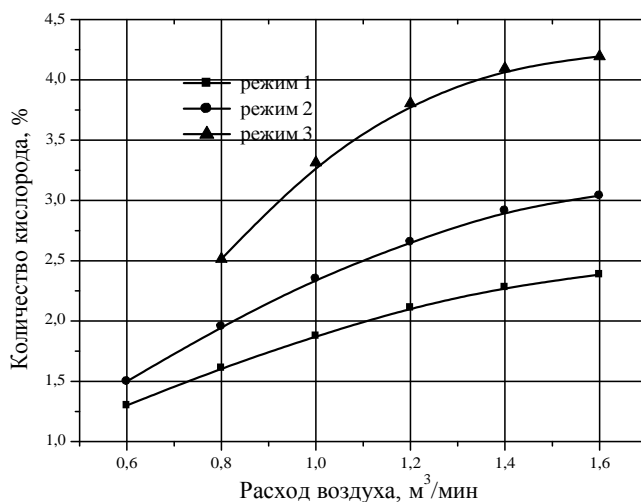
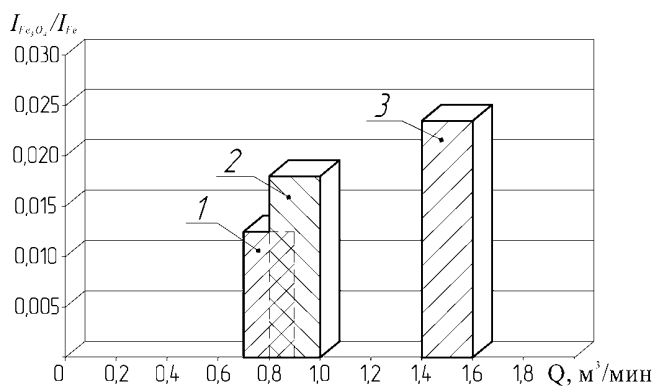


Рисунок 3 – Влияние расхода распыляющего воздуха в струе на количество кислорода в покрытиях, полученных при различных режимах

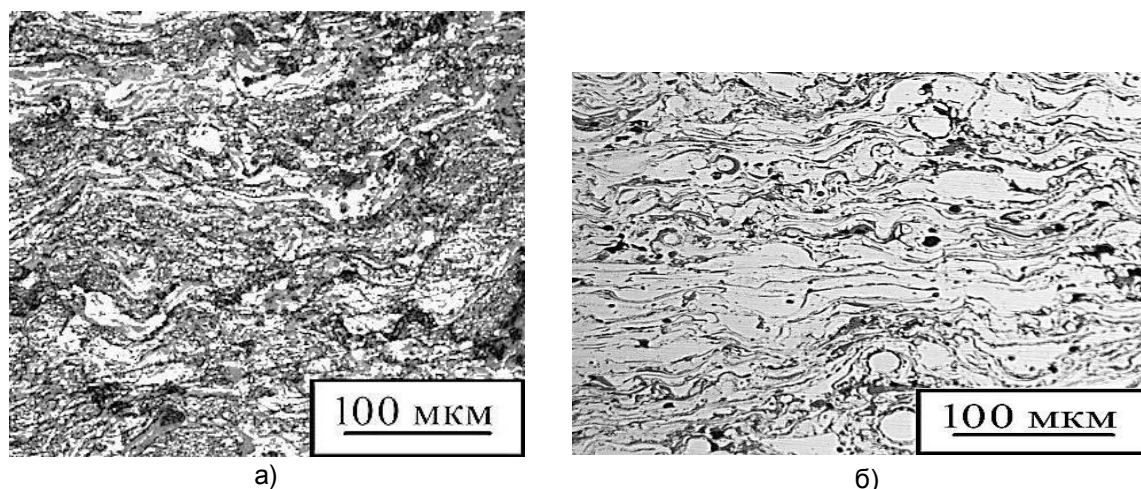


1 – режим 1; 2 – режим 2; 3 – режим 3.

Рисунок 4 – Относительное содержание оксида Fe₃O₄ в напыленных покрытиях в зависимости от режима напыления

С увеличением удельной мощности дуги возрастают потери перегретого металла на испарение, может наблюдаться его разбрызгивание при формировании покрытия. Однако повышение температуры частиц положительно влияет на качество получаемых защитных слоев. Мощность дуги определяется величиной тока и напряжения. В практике гиперзвуковой металлизации используется мощность 5–20 кВт, сила тока 80–500 А и напряжение 18–35 В.

В результате напыления формируется волнистая микроструктура с остаточной пористостью, не превышающей ~ 5 %, и повышенным содержанием оксидов на границах напыленных частиц. Гиперзвуковая металлизация, для которой характерна сверхзвуковая скорость полета расплавленных частиц (≈ 500 м/сек), приводит к формированию сравнительно плотного слоя с дисперсной структурой (рис. 5).



а)

б)

а – 40X13, б – 95X18

Рисунок 5 – Микроструктуры стальных покрытий, полученных методом ГМ

На рисунке 6 представлена зависимость пористости покрытий из стали 95X18 от расхода сжатого воздуха и дистанции напыления. Пористость покрытий резко возрастает при увеличении дистанции напыления свыше 200 мм. Особенно это проявляется при минимально допустимых расходах сжатого воздуха 1–1,5 м³/мин. При увеличении расходов до максимальных пористость монотонно убывает.

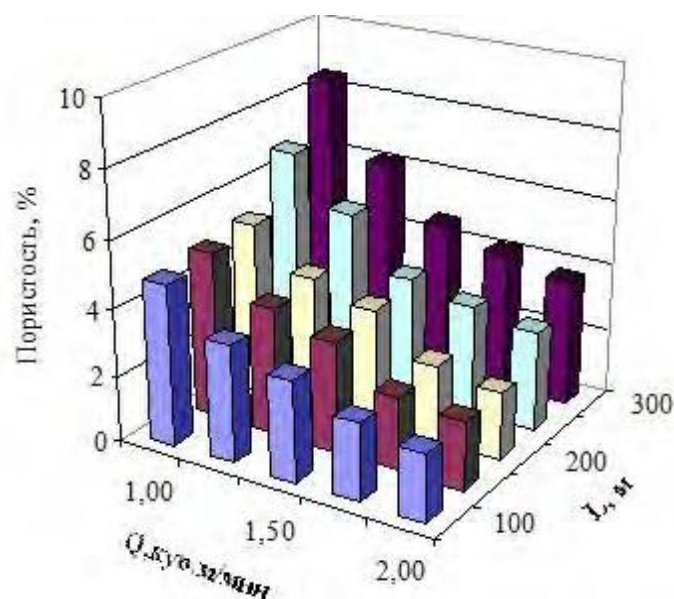


Рисунок 6 – Зависимость пористости покрытий от расхода воздуха (Q) и дистанции напыления (L) (напыляемый материал – проволока 95X18)

Минимальный расход определяется устойчивостью горения горючей смеси, максимальный – расходом горючего газа (пропана) из баллона. Дальнейшее увеличение расходов обеспечит рост качества покрытия, однако это потребует усложнения технологической схемы процесса для обеспечения необходимого расхода пропана, например, подачи пропана с рампы.

В большинстве случаев такое удорожание процесса нецелесообразно. При увеличении дистанции напыления свыше 200 мм снижаются скорость и теплосодержание капель. При ударе по этой причине ухудшаются условия растекания жидкого металла капли по поверхности. Это приводит к повышению пористости покрытия. Малые дистанции, $L=100-150$ мм, технологически сложно обеспечивать в углах и на выступах поверхности.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее плотные покрытия с допустимым количеством оксидов в процессе гиперзвуковой металлизации высоколегированных сталей образуются при использовании пропано-воздушной смеси с избытком пропана ($\beta=18-20$), расходом воздуха в смеси $Q=1,75-2$ м³/мин., дистанциях напыления $L=150-200$ мм.

Определение электрических параметров процесса гиперзвуковой металлизации литых высоколегированных сталей

Используя ранее полученные данные для традиционного процесса ЭДМ [5], был произведен расчет предельных значений технологических режимов напыления проволочных материалов методом гиперзвуковой металлизации, при которых получают качественные покрытия из высоколегированных инструментальных сталей. Основное время металлизации поверхности определяется по формуле:

$$t_o = \frac{L_m \cdot i}{n \cdot s} \quad (1)$$

где n – частота вращения восстанавливаемой детали;
 L_m – дистанция напыления;
 s – подача на один оборот детали;
 i – количество проходов металлизатора.

Частота вращения восстанавливаемой детали определяется по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V_m}{\pi \cdot d_n} \quad (2)$$

где d_n – диаметр напыляемой электродной проволоки;
 V_m – скорость металлизации.

Скорость металлизации определяется по формуле:

$$V_m = \frac{0,785 \cdot d_n^2 \cdot V_{np} \cdot K_m \cdot e}{t \cdot s} \quad (3)$$

где V_{np} – скорость подачи электродной проволоки;
 K_m – коэффициент использования материала.

Подача металлизатора на один оборот детали определяется по формуле:

$$s = 1,3 \cdot d_n \quad (4)$$

Ориентировочная скорость подачи электродной проволоки определяется по формуле:

$$V_{np} = \frac{Q_{pm}}{1,57 \cdot d_n^2} \quad (5)$$

где объем расплавленного металла определяется по формуле:

$$Q_{pm} = \frac{G_{pm}}{\gamma} \quad (6)$$

Масса напыляемого металла определяется по формуле:

$$G_{pm} = \frac{I \cdot \alpha_m}{60} \quad (7)$$

где I – сила рабочего тока металлизации.

Согласно формуле (7), коэффициент металлизации определяется такими величинами как производительность металлизации и сила рабочего тока

металлизации. Эти же параметры, в свою очередь определяются возможностями применяемого оборудования.

Необходимо отметить, что величина рабочего тока примерно пропорциональна выбранной производительности напыления. График для определения производительности по рабочему току приведен на рисунке 7.

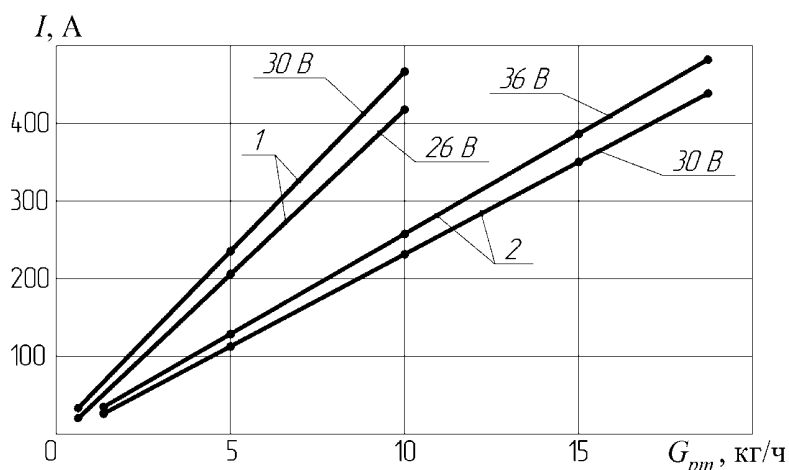
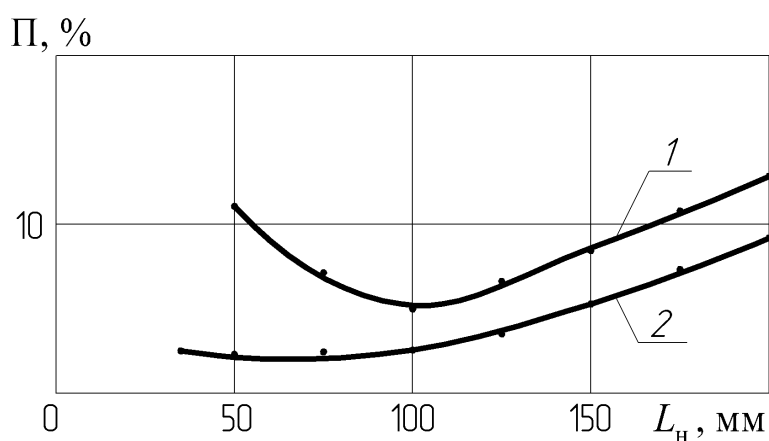


Рисунок 7 – Влияние величины рабочего тока дуги на производительность процесса распыления проволок диаметром 1,6 мм (1) и 2,0 мм (2)

Напряжение в дуге металлизатора устанавливается в зависимости от требований, предъявляемых к покрытию. Если стальное износостойкое покрытие работает в нормальных условиях, то напыление следует проводить на возможно меньшем напряжении. В этом случае коэффициент использования металла при распылении будет наибольшим. Для покрытий из стали, работающих в тяжелых условиях для увеличения адгезии нанесение покрытий рекомендуем производить на повышенном напряжении. Обычно выбор производительности напыления определяется технологической целесообразностью.

На рисунке 8 показаны зависимости величин пористости покрытий полученных методом гиперзвуковой металлизации от дистанции напыления при различных скоростях перемещения металлизатора относительно напыляемой поверхности.



1 – $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,2$ м/с; 2 – $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,6$ м/с

Рисунок 8 – Зависимость пористости стальных покрытий от дистанции напыления

Пористость покрытий, полученных при минимальной скорости перемещения металлизатора, т.е. при нанесении покрытия за один проход, при сокращении дистанции напыления сначала снижается, а затем растет вплоть до величин,

характерных для покрытий, получаемых традиционным методом электрометаллизации.

Характер влияния рабочего тока дуги на пористость покрытия, наносимого гиперзвуковой металлизацией показан на рисунке 9.

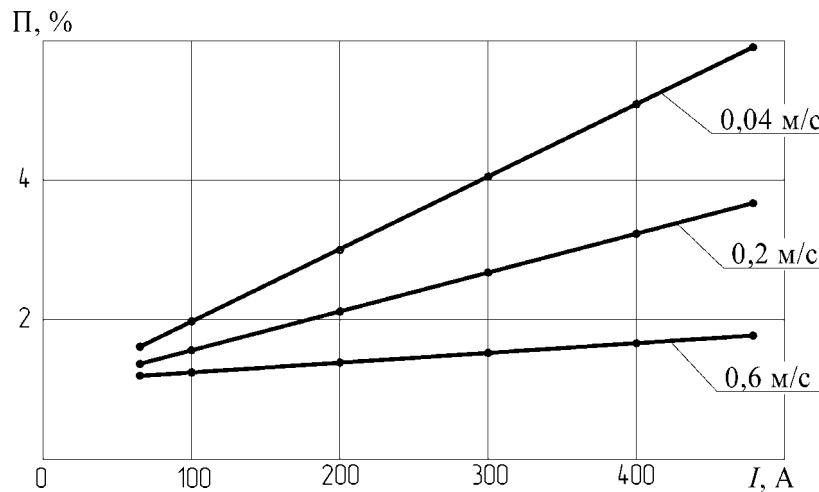


Рисунок 9 – Зависимость пористости покрытий от силы тока при различной скорости перемещения металлатора

Исследование структурно-фазового состояния покрытий, полученных активированным распылением проволок из высоколегированных сталей

Проводился металлографический, рентгеноструктурный и дюрOMETрический анализ покрытий. Перед рентгеновской съемкой и измерением твердости проводилось шлифование образцов покрытий на наждачной бумаге с размером зерна 18–24 мкм. Измерения микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор $P=25$ г (0,24 Н).

Рентгеновская съемка осуществлялась на дифрактометре «ДРОН-3», в монохроматизированном ($CoK\alpha$) излучении. Запись дифракционных линий осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования – $0,1^\circ$, время набора импульсов в точке 10 сек.

Исследования показали, что фазовый состав газотермических покрытий из стали 40X13 после механической шлифовки включает в себя: α -Fe (55 об.%), аустенит γ -Fe (11 об.%), оксиды Fe_3O_4 и FeO (34 об.%) (таблица 3, рисунок 10). Газотермическое покрытие из стали 95X18 имеет следующий фазовый состав: α -Fe (20 об. %), γ -Fe (60 об. %), оксиды Fe_3O_4 и FeO (20 об. %).

Таблица 3 – Фазовый состав и твердость напыленных покрытий

Материал напыляемого покрытия	Фазовый состав	Содержание оксидов, об.%	Твердость HV 10, кгс/мм ²
40X13	α -Fe, γ -Fe, Fe_3O_4 , FeO	34	600
95X18	γ -Fe, α -Fe, Fe_3O_4 , FeO	20	350

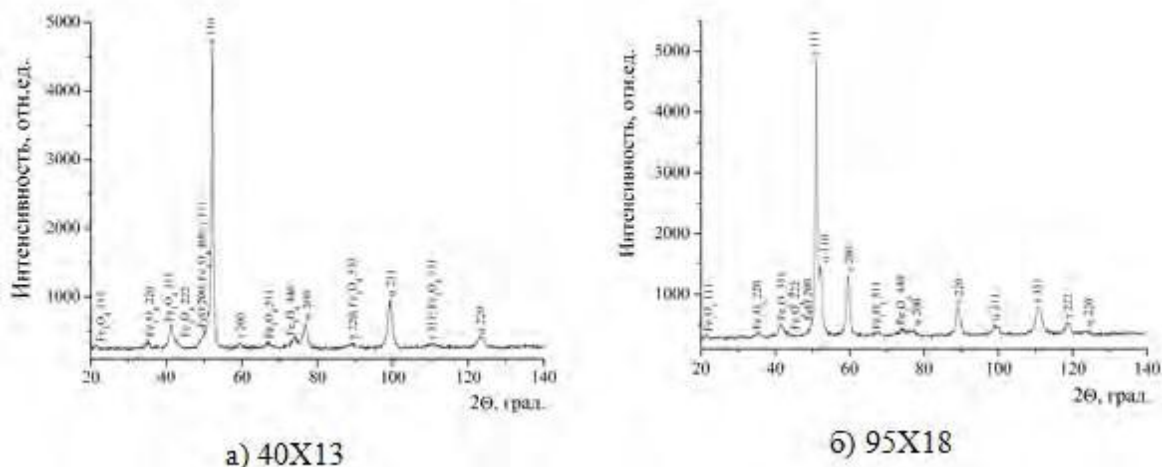


Рисунок 10 – Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CoK}\alpha$) поверхностных слоев стальных газотермических покрытий

Отмечено, что после механической шлифовки в покрытии из стали 95X18, по сравнению с покрытием из стали 40X13, содержится большее количество γ -фазы, что связано с термической стабилизацией аустенита за счет повышенного содержания углерода в напыляемой стали 95X18, а также низкой скоростью охлаждения покрытия в процессе напыления. При этом необходимо иметь в виду, что напыление частиц многослойного покрытия происходит на разогретые частицы предыдущих слоев, имеющих температуру 100-200 $^{\circ}\text{C}$. Такие условия формирования покрытия, обеспечивают замедленное его охлаждение в интервале температур повышенной устойчивости аустенита, что способствует стабилизации остаточного аустенита в напыленном слое. Вследствие более низкой концентрации углерода в стали 40X13 по сравнению со сталью 95X18 мартенситное превращение в покрытии происходит более полно. В связи с этим в покрытии из стали 40X13 регистрируется относительно более низкое содержание остаточного аустенита по сравнению с покрытием из стали 95X18. Вследствие этого покрытие из стали 40X13 имеет значение твердости поверхностного слоя 600 HV 10, а твердость покрытия из стали 95X18 составляет 350 HV 10 (табл. 4). Проведено исследование влияния различных режимов напыления покрытий из высоколегированной стали 95X18 и последующей механической обработки на структурно-фазовое состояние и дюрометрические характеристики. При напылении покрытий изменялась сила сварочного тока в интервале 95 – 265 А (табл. 4).

Таблица 4 – Режимы гиперзвуковой металлизации покрытий из стали 95X18

Режим напыления	Сила сварочного тока, А
Режим А	95
Режим В	165
Режим С	210
Режим D	265

Образцы для структурно-фазовых исследований (10×6×5 мм) вырезались из пластин (100×50×6 мм), изготовленных из стали 45 с напыленным слоем из проволоочной стали 95X18. Перед рентгеновской съемкой и измерением микротвердости и твердости проводилось шлифование образцов покрытия на наждачной бумаге с размером зерна 18–24 мкм. Для снятия поверхностного деформированного слоя выполнялась электрополировка газотермического покрытия. Глубина электрополировки составляла ~ 0,1 мм.

Рентгеновская съемка осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3, в монохроматизированном ($\text{CoK}\alpha$) излучении. Запись дифракционных линий

осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования – 0,1, время набора импульсов в точке 10 сек. Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор P=10кг. Измерение микротвердости проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор P=20 г. По полученным рентгеновским дифрактограммам было рассчитано содержание остаточного аустенита в покрытии после механической шлифовки и после электрополировки для каждого режима напыления (таблица 6). Из анализа дифрактограмм следует, что при различных режимах напыления в покрытиях из высоколегированной стали 95X18 содержится разное количество γ -фазы. В частности, при напылении по режиму А (95 А) в покрытии содержится минимальное количество остаточного аустенита, при этом твердость покрытия составляет 340 HV 10 (таблица 5). При увеличении силы тока до 165 А при напылении (режим В) в покрытии регистрируется максимальное количество γ -фазы.

Твердость полученных покрытий по режиму В составляет 315 HV 10. После газотермического напыления по режиму С (210 А) количество остаточного аустенита в покрытии составляет ~ 55 об. % после механической шлифовки и ~ 64 об. % после электрополировки, твердость покрытия составляет 330 HV 10. В результате напыления при максимальной силе сварочного тока 265 А (режим D) количество γ -фазы увеличивается по сравнению с покрытием полученным по режиму С.

Таблица 5 – Содержание остаточного аустенита и дюрометрические характеристики покрытий из высоколегированной стали 95X18 после различных режимов газотермического напыления

Режим напыления покрытий из стали 95X18	Содержание остаточного аустенита V_{γ} , %		Твердость, HV 10	Микротвердость, HV 0,025
	Мех. шлиф.	Эл. полир.		
Режим А	35	54	340	580
Режим В	68	71	315	440
Режим С	55	64	330	540
Режим D	60	68	320	510

Исследование триботехнических характеристик стальных покрытий

Триботехнические испытания образцов осуществлялись по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с. Сравнительные испытания триботехнических свойств проводились в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла $p=1,5$ МПа). При испытаниях использовалось контртело с размерами 90×40×5 мм, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10). Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг. Испытания проводились до достижения 20000 циклов с промежуточными взвешиваниями. Путь трения составлял ≈ 200 м. Результаты исследований приведены на рисунке 11.

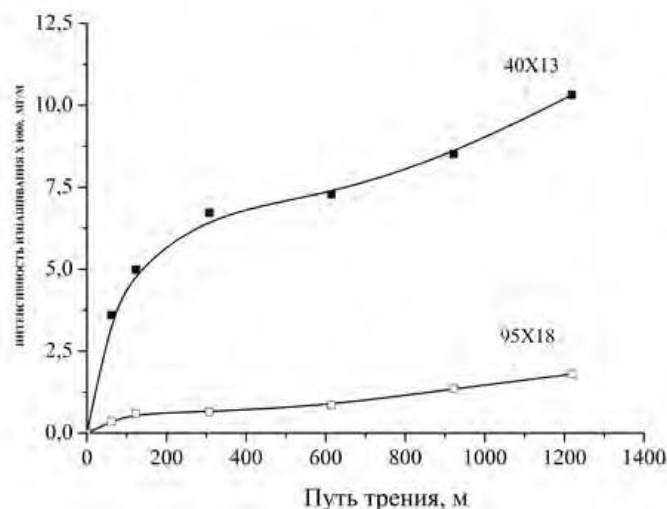


Рисунок 11 – Зависимость массового износа от пути трения для покрытий из сталей 40X13 и 95X18

Интенсивность массового изнашивания газотермического покрытия из стали 40X13 составляет $I_q=4,5 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Покрытие из стали 95X18 характеризуется более высокой износостойкостью по сравнению с покрытием из стали 40X13, и интенсивность массового изнашивания составляет $I_q=1,1 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Такая высокая износостойкость покрытия из стали 95X18 достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое при трении. При этом на поверхности покрытия образуется тонкий слой с пониженным содержанием аустенита, характеризующийся высокой микротвердостью (до $850HV_{0,02}$) и износостойкостью.

Определение режимов гиперзвуковой металлизации при распылении композиционных проволочных материалов, содержащих порошковые наполнители

Использование порошковых проволок (ПП) как электродных материалов для газотермического напыления покрытий позволило широко варьировать химический состав покрытий, резко расширять область их использования, а также во многих случаях получить покрытия со свойствами на уровне лучших плазменных и сверхзвуковых газотермических покрытий, но в 5... 10 раз дешевле. Композиционные проволоки выпускают для формирования покрытий твердостью от 50 до 65 HRCэ, а также коррозионной стойкостью, не уступающей гальваническим хромовым покрытиям.

Основными производителями композиционных порошковых проволок в мире являются следующие компании: SulzerMetco (США), PowderAlloyCorporation (США), PraxairSurfaceTechnologies (США), TAFA (США), Boeing (США), Durum (ФРГ), Kanthal (Швеция). Каждая из приведенных компаний производит достаточно широкую гамму композиционных проволок, хотя необходимо отметить, что многие марки близки по составу. Так, например, композиционная проволока, выпускаемая фирмой Durum марки «DURMATAS-897» (состав: Si – 1,25/ Cr – 14/ Ni – 4,5/ Mn – 5,5/ B – 1,85/ WC – 26/ TiC – 6/ Fe – base), предназначенная для нанесения высокоизносостойких покрытий, близка по составу проволоке марки «SulzerMetco 8297». Покрытия из ПП используют во многих отраслях техники для восстановления и защиты от абразивного и газоабразивного износа при комнатной и повышенных температурах вплоть до 700°C , для ремонта различных деталей машин и агрегатов, работающих в условиях граничного трения [6-11].

Порошковые проволочные материалы выше по стоимости, чем проволоки из высоколегированных сталей, но обладают более высокими эксплуатационными свойствами. Преимущества порошковых проволок обуславливаются не только гетерогенной структурой покрытия после напыления, но и активным взаимодействием компонентов порошковой шихты друг с другом при напылении и с подложкой, что

способствует повышению температуры частиц, раскислению оксидов на поверхности подложки, и как следствие повышение адгезии покрытия к подложке.

Целью исследований являлась оценка влияния размеров порошкового наполнителя на его содержание в напыленных покрытиях.

В качестве распыляемых материалов использованы композиционные проволоки Днепропетровского ЗАО «Спецсплав», фирм «Durum», «SulzerMetco» и ЗАО «Березовский завод сварочных материалов» (Свердловская обл.).

Состав напыляемых проволок:

- ЗАО «Спецсплав» PST – 5 (состав Ni – 4,86%; Cr – 11,8%; W – 3,7%; Nb – 2,21%; Ti – 0,45%; Mo – 0,11%; Al – 0,56%; C – 0,17%; Fe – основа); PST – 350 Т (состав WC – 20%; Cr – 4%; Ni – 0,8%; Ti – 0,2%; Co – 0,6%; V – 0,3%; Mn – 0,5% ; Si – 0,5%; Fe – основа).

- DURMATAS-897 (состав: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/Ti₂C₃ 6/ Fe); DURMATAS-816 (состав: C 4,8/ Cr 28/ Si 1,4/ B /Fe) и

- SulzerMetco 8297 (состав: Si/ Cr 14/ Ni 5/B 1,5/WC 25 + TiC 5 / Fe).

- ЗАО «БЗСМ» ПП-3СМ-111 (состав: C 2,1/ Cr 8/ Ti 2/ B 1,5).

Выбор данных материалов был обусловлен тем, что сплав PST – 5 обладает достаточно высокой коррозионной стойкостью, а сплав PST – 350 Т имеет повышенную износостойкость, обусловленную наличием большого количества карбида вольфрама. Согласно рекламной информации, нанесение покрытий проволоками DURMATAS-897, DURMATAS-816 и SulzerMetco 8297 позволяют формировать покрытия с твердостью 56 – 60 HRC.

В результате измерения твердости, микротвердости покрытий установлено, что покрытия, сформированные распылением проволок производства ЗАО «Спецсплав» не обеспечивают твердости, гарантированной изготовителями. Как правило, твердость покрытий не превышала 32 HRC.

Изучение шлифов поперечных сечений проволок показало, что размеры частиц твердых включений в шихте составляют более 250 мкм, а толщина оболочки – около 350 мкм. Было предположено, что при высокой скорости эвакуации из зоны дуги столь крупные частицы не успевают прогреться и не участвуют в процессе формирования покрытия, образующегося практически только из материала оболочки. Исследования, проведенные с проволоками имеющими наполнитель различных размеров подтвердили это предположение (рис. 12).

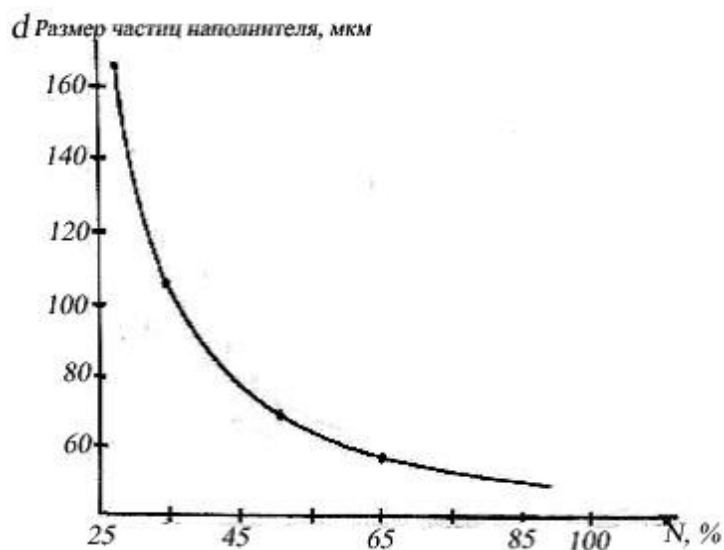


Рисунок 12 – Зависимость количества порошкового наполнителя, попадающего в напыляемое покрытие, от среднего размера его частиц

Анализ приведенных на рисунке 12 данных показывает, что порошковый наполнитель в композиционной проволоке, распыляемой гиперзвуковой металлизацией, должен иметь размеры не более 50 мкм.

Таким образом, показано, что композиционные проволоки ЗАО «Спецсплав» предназначены, в основном, для процессов наплавки, а не напыления.

Нанесение покрытий проволоками, изготовленными «Durum» показало, что материалы DURMATAS-897 (состав: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/Ti₂C₃ 6/ Fe), DURMATAS-815 (состав: C 4,8/ Cr 28/ Si 1,4/ B /Fe) и DURMATAS-760 (состав: C 0,3/ Cr 19/ Si 3,8/ B /SC /Ni) позволяют формировать покрытия с твердостью, близкой к заявленной изготовителем (54 – 61 HRC). Размер частиц наполнителя составляет 20 – 80 мкм.

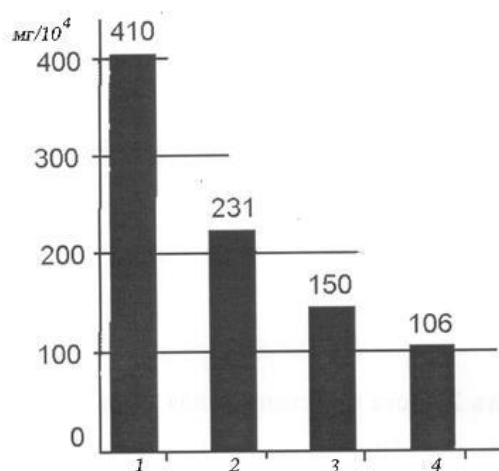
Учитывая многофакторность процесса гиперзвуковой металлизации выбор оптимальных режимов формирования покрытий из ранее не испытанных материалов представляет собой сложную и трудоемкую задачу, для решения которой необходимо проведение многочисленных экспериментов, поэтому была выполнена приближительная оценка необходимых технологических параметров.

На основании анализа результатов исследования зависимости коэффициента использования распыляемого материала от основных технологических параметров процесса (сила тока, напряжение, давление пропана и воздуха), для нанесения покрытий из композиционных проволок «Durum» были выбраны следующие режимы гиперзвуковой металлизации: ток – 120...150А, напряжение – 32...33 V, давление пропана – 0,43 МПа, давление воздуха – 0,45 МПа, дистанция – 150 мм. В качестве материала подслоя использовался сплав X20H80 (20% Cr, 80%Ni).

Первые эксперименты показали, что материалы «Durum» весьма чувствительны к толщине наносимого покрытия. Так, на указанных выше режимах практически не удавалось получить из материала DURMATAS-897 покрытия толщиной более 1,1 мм. После напыления слоя толщиной около 0,9 мм на нем появлялись микротрещины, после напыления 1 мм – они увеличивались в размерах и при достижении толщины 1,1 мм покрытие лопалось.

Материалы DURMATAS-815 и DURMATAS-760 позволяют получать покрытия большей толщины (до 2 мм), однако для этого необходимо уменьшать толщину формируемого за один проход слоя, увеличивать количество проходов и непрерывно контролировать теплонагруженность образца.

Ускоренные триботехнические испытания образцов с покрытиями в режиме трения скольжения в 12% р-ре соляной кислоты, содержащем частицы двуокиси кремния показали (рис. 13), что износостойкость гальванического хромового покрытия уступает напыленным покрытиям из материалов DURMATAS-815 и DURMATAS-897.



1 – покрытие из стали X18H10T; 2 – гальваническое хромовое покрытие; 3 – покрытие DURMATAS-815; 4 – покрытие SulzerMetco 8297 (аналог DURMATAS-897)

Рисунок 13 – Интенсивность изнашивания (мг за 10⁴ циклов) покрытий

На рисунке 14 приведено поперечное сечение образца с гальваническим покрытием вблизи поверхности после испытаний.

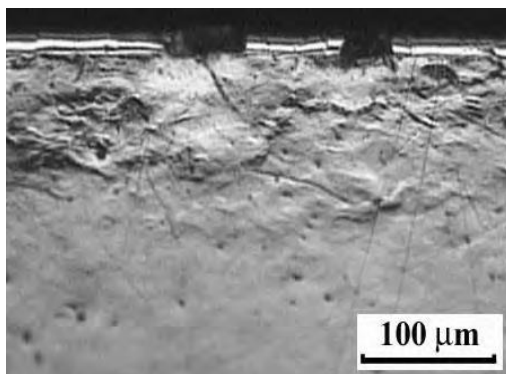


Рисунок 14 – Разрушение электролитического хромового покрытия после 9 часов триботехнических испытаний

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что под твердым покрытием развивается пластическая деформация на глубине 100 – 150 мкм, которая и вызывает разрушение покрытия. Не менее важной причиной, вызывающей разрушение износостойких покрытий, нанесенных на твердую подложку, может служить возникновение высокочастотных упругих возбуждений. При этом в слоистых материалах образуются поперечные трещины в результате возбуждения упругой поверхностной волны. Ее возникновение обусловлено дисперсией – зависимостью скорости волны от ее длины, что характерно для неоднородных материалов.

В работах [12, 13], опубликованных специалистами из Института физики прочности и материаловедения СО РАН отмечалось, что при больших удельных нагрузках гальванические хромовые покрытия, нанесенные на детали узлов трения скольжения, изнашиваются и разрушаются очень быстро. Например, при исследовании отработанных штоков виброгасителей железнодорожных вагонов, при изготовлении которых на полированную стальную поверхность электролитическим методом наносили хромовое покрытие толщиной около 25- 40 мкм, покрытия изнашивались до истечения гарантийного срока службы детали. Предположено, что причиной этого является разрушение покрытия вследствие пластической деформации подложки, которая значительно выше, чем деформация покрытия.

Исследование возможности получения толстослойных покрытий распылением композиционных проволок

Для получения покрытий толщиной 1,5 мм и более из материала DURMATAS-897 были проведены эксперименты, в которых последовательно наносились слои из различных литых и порошковых проволок, а верхний слой формировался из AS-897.

Анализ микроструктуры показал, что:

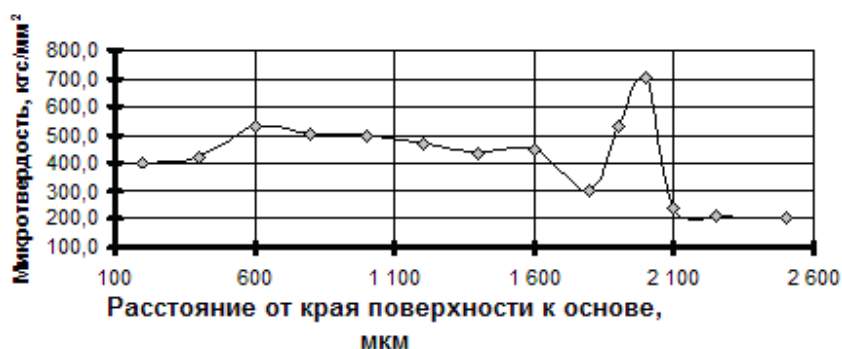
- в верхнем слое из AS-897 трещины отсутствуют;
- плотность напыленных слоев из стали 40X13 и из порошковой проволоки 30X20HM близка к плотности компактного материала;
- в слое AS-897 присутствуют включения и поры, которые трудно различить друг от друга. Как правило, в газотермических покрытиях редко встречаются поры сферической формы, поскольку они образуются на границах деформированных при ударе частиц и имеют вытянутую форму.

Исследование микротвердости напыленных слоев из материала DURMATAS-897 показало следующее (рисунок 15). Первый слой толщиной 100–120 мкм из AS-897, напыленный на подслой из X20H80 имеет наибольшую микротвердость, которая составляет 700–800 кг/мм² или 7000–8000 МПа. Последующие слои имеют твердость значительно ниже, что можно объяснить только влиянием температуры образца, накапливающейся с каждым последующим слоем.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости дискретного выполнения операции напыления и интенсивного охлаждения детали после напыления каждого слоя толщиной не более 120 мкм.

На основании результатов выполненных исследований разработаны технологические рекомендации на процесс формирования стальных покрытий

методом гиперзвуковой металлизации. Разработан комплект ТД № ИЯБМ 01271.0037.000 на технологический процесс формирование покрытий толщиной 0,5–1,5 мм из проволоки 95X18 на изношенную хромированную поверхность цилиндра противодавления с буксой БелАЗ 3540-2917056.



а)



б)

а) покрытие, включающее подслой X20H80 (≈ 200 мкм), слой DURMATAS-897 (≈ 600 мкм), слой смеси AS-897 + 40X13 (≈ 900 мкм);

б) покрытие, включающее подслой X20H80 (≈ 200 мкм) и далее слой DURMATAS-897

Рисунок 15 – Распределение микротвердости по толщине покрытий из материала DURMATAS-897

Выводы

1. Выполнены исследования, позволившие оценить влияние состава распыляющей газовой струи при гиперзвуковой металлизации на основные физико-механические характеристики покрытий, формируемых распылением стальных проволок. Установлено что, содержание кислорода в покрытиях составляет 2,8–4,2 % в зависимости от расходов сжатого воздуха, причем максимальная концентрация 4,2 % достигается при расходах около 1,4–1,6 м³/мин. Проведенные исследования показали, что наиболее плотные покрытия с допустимым количеством оксидов в процессе гиперзвуковой металлизации высоколегированных сталей формируются при использовании пропано-воздушной смеси с избытком пропана ($\beta=18-20$), расходом воздуха в смеси $Q=1,75-2$ м³/мин., дистанциях напыления $L=150-200$ мм.

2. Установлены электрические параметры процесса гиперзвуковой металлизации, необходимая дистанция напыления и скорость перемещения металлизатора, которые обеспечивают качественные покрытия при распылении проволок из высоколегированных инструментальных сталей. Исследовано структурно-фазовое состояние покрытий, полученных активированным распылением проволок из высоколегированных сталей. Отмечено, что в механически шлифованном покрытии из стали 95X18 регистрируется повышенное количество γ -фазы (60 об.%), по сравнению с покрытием из стали 40X13 ($V_{\gamma} \approx 11$ об.%).

3. Исследованы триботехнические характеристики покрытий, полученных гиперзвуковой металлизацией проволок из сталей 95X18 и 40X13. Установлено, что износостойкость покрытия из стали 95X18 в ~ 4 раза выше износостойкости покрытия из стали 40X13, и интенсивность массового изнашивания составляет $I_q=1,1 \cdot 10^{-3}$ мг/м.

4. Показано, что порошковые проволоки с оболочками, выполненными из сталей ферритного класса (произведенные в РФ и Украине), позволяют получать при определенных условиях покрытия с большим содержанием метастабильного аустенита, чем покрытия, полученные распылением проволок DURMATAS-815 и SulzerMetco 8297. Однако, в связи с быстрой эвакуацией крупных частиц наполнителя из зоны дуги, покрытия из этих проволок имеют значительно меньшие величины твердости и износостойкости. Износостойкость покрытий, напыленных материалами DURMATAS-815 и DURMATAS-897 превышает износостойкость гальванического хромового покрытия в 1,5 – 2,1 раза.

5. Установлено, что при гиперзвуковой металлизации композиционных проволок, содержащих большое количество неметаллических наполнителей (карбидов, карбоборидов) необходимо за один проход наносить слои толщиной не более 100–120 мкм и охлаждать слои после каждого прохода до комнатной температуры. Для формирования покрытий толщиной более 0,8 мм необходимо наносить многослойное покрытие, у которого нижележащие слои наносятся стальными проволоками, а верхний слой, полученный распылением композиционной проволоки, должен иметь толщину не более 0,5 мм.

Список литературы:

1. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – 200 с.
2. Белоцерковский, М.А. Активированное напыление покрытий комплексом «ТЕРКО» / М.А. Белоцерковский, В.Э. Барановский // Газотермическое напыление в промышленности-93. – С.-Петербург, 1993. – С. 74-77.
3. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упрочняющие технологии и покрытия.- 2006.- №12- С. 17 – 23.
4. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии. – Минск, 1997, т.4. – С. 670-673.
5. Бороненков, В.Н. Основы дуговой металлизации / В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та : Университетское изд-во, 2012. – 258 с.
6. Pokhmurskaya, A. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires / A. Pokhmurskaya, M. Student, E. Bielanska et al. // Surface & Coating Technology. – 2002. – 151-152. – P. 490-194.
7. Pokhmurskii, V. Triboelektroche miczne wtasciwosci powlok natryskiwa-nych lukowo na stopu aluminium / V. Pokhmurskii, V. Dovhunyk, M. Student et al. // Inzynieria Powierzchni. – 2008. – № 1, – S. 9-13.
8. Студент, М. Високотемпературна корозія електродугових покрив і взпорошкових дровів на базі системи Fe-Cr-B-Al / М. Студент, Ю. Дзьоба, В. Гвоздецький та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 93-97.
9. Похмурский, В.И. Порошковые проволоки серии ФМИ для электродугового напыления покрытий (Обзор) / В.И. Похмурский, М.М. Студент, В.М. Гвоздецкий // Автоматическая сварка, 2011, №9. – С. 18 – 21.
10. Винокуров, Г.Г. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий из порошковых проволок / Г.Г. Винокуров, И.И. Суздалов, М.И. Васильева, И.Ф., Стручков // Вестник ЯГУ, 2005, т.2, №3. – С. 57 – 60.
11. Винокуров, Г.Г. Разработка и применение порошковых проволок для газопламенного напыления / Г.Г. Винокуров, Н.Ф. Стручков // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 6 – стр. 36-37
12. Панин, В. Е. Основы физической мезомеханики / В. Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
13. Клименов, В. А. Исследование характеристик деформации на мезомасштабном уровне и разрушения композитов «газотермическое покрытие» – основа при растяжении / В. А. Клименов, С. В. Панин, В. П. Безбородов // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 1-2. – С. 141–156.