



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, доцент
заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин¹
E-mail: mbelotser@gmail.com

А.В. СОСНОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент
старший научный сотрудник¹

А.С. ПРЯДКО
старший научный сотрудник¹
¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

А.П. ЯЛОВИК
генеральный директор
ОАО «Нефтезаводмонтаж», г. Новополоцк, Республика Беларусь

Д.И. ТРУСОВ
магистрант
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Статья поступила 04.05.2015.

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Основными целями статьи являются обобщение результатов исследований процесса формирования стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации, определение рациональных режимов технологий восстановления и упрочнения деталей транспортных машин и технологического оборудования. Для достижения поставленных целей использовалась установка гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10, напыляемые материалы — проволоки сталей 95Х18Ш и 40Х13. Для повышения прочности сцепления покрытий с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80. В результате исследований было выявлено, что увеличение начальной температуры распыляющего газа повышает коэффициент аэродинамической силы, действующей на частицу расплавленного металла. Увеличение радиуса сопла повышает максимальную скорость частиц путем удлинения участка их разгона. Активирование процесса электродуговой металлизации нагревом распыляющего газа позволяет увеличить скорость полета частиц размером менее 40 мкм, практически не влияя на скорость более крупных частиц. Исследование плотности и адгезии напыляемых покрытий показало, что при увеличении дистанции напыления свыше 200 мм резко возрастает пористость, а прочность сцепления снижается. Таким образом температуру нагрева распыляющего газа в камере сгорания установки гиперзвуковой металлизации целесообразно ограничивать величиной 2 300...2 500 К, а давление — 0,6...0,8 МПа. При гиперзвуковой металлизации количество кислорода в покрытиях в 1,5–2,0 раза меньше в сравнении с методом традиционной электрометаллизации. Определены электрические параметры процесса гиперзвуковой металлизации и скорость перемещения металлизатора, которые обеспечивают качественные покрытия при распылении проволок из легированных сталей.

Ключевые слова: стальные покрытия, гиперзвуковая металлизация, пористость, свойства покрытий

Введение. Постановка задачи. В связи с высокой стоимостью большинства методов активированного газотермического напыления порошковых

материалов, особенно актуальным являются исследования, направленные на разработку активированных методов формирования покрытий из мо-

нолитных и композиционных проволочных материалов [1]. В тех случаях, где не требуется наносить слои из керамики, жаропрочных композитов, где 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 восстановлению и упрочнению деталей узлов трения (осей валиков, колеччатых 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 эффективной, на сегодняшний день, является технология гиперзвуковой металлизации [2, 3], отличающаяся от традиционной электрометаллизации использованием непрерывного источника энергии для нагрева газа, распыляющего расплавленные в дуге проволоки. В процессе 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 [2]. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1 500 м/с при температуре 2 200 К. Скоростной напор потока при ГМ составляет $23,5 \cdot 10^4$ кг/м²·с², что втрое больше, чем при плазменном напылении. Это позволяет частицам расплавленного металла двигаться в потоке со скоростью выше 500 м/с и формировать покрытие, имеющее вдвое выше прочность сцепления с подложкой, чем при ЭДМ. Методом ГМ формируют покрытия с максимальной пористостью от 3 % (для цветных металлов) до 7 % (для стальных композиционных проволок). Прочность сцепления на отрыв напыленных слоев составляет более 45 МПа.

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 статье обобщены результаты исследований процесса формирования стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации, позволившие определить рациональные режимы технологий восстановления — упрочнения деталей транспортных машин и технологического оборудования.

Оборудование и методики исследований. Для нанесения покрытий использовалась установка гиперзвуковой металлизации модели АДМ-10 (таблица 1), напыляемые материалы-проволоки из сталей 95Х18Ш и 40Х13. Для повышения прочности сцеп-

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 МПа, м ³ /ч	60
Расход горючего газа (протан-бутан), кг/мин	0,011

ления покрытий с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава Х20Н80.

В качестве материала образцов использована низкоуглеродистая сталь Ст3. Перед нанесением покрытий производилась струйно-абразивная обработка при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа и расходе стальной колотой дроби марки ДСК 0,3–2,0 около 1,2 кг/с. Для определения скорости полета частиц напыляемого материала использовали измеритель скорости светящихся объектов типа ИССО-1. Изменяя скорость вращения зеркала в приборе, добивались параллельности треков светящихся частиц и контрольных линий, видимых в окуляре прибора, после чего отсчитывали величину скорости по стрелочному индикатору. Для измерения скорости частиц в различных областях конуса распыла использовали медный водоохлаждаемый экран, через продольную щель которого фиксировали с помощью ИССО-1 скорость полета частиц. Данный метод позволял оперативно определять максимальную $v_{ч \max}$ и минимальную $v_{ч \min}$ скорости частиц.

Для изучения фазового состава использовался дифрактометр ДРОН-3 (монохроматизированное (СоK_α) излучение). Запись дифракционных линий осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования — 0,1°, время набора импульсов в точке 10 с.

Пористость покрытий оценивалась на металлографических шлифах с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений «Autoscan». Измерения микротвердости по Виккерсу осуществлялись на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 0,24 Н.

Результаты и их обсуждение. Высокая температура электрической дуги между проволочными электродами значительно ускоряет физико-химические процессы, происходящие при плавлении металла, способствует выгоранию примесей и, тем самым, изменяет химический состав напыляемого металла. Она вызывает также диссоциацию молекул кислорода и азота в атомарное состояние, при котором эти газы, обладая большей химической активнос-

тью, более интенсивно взаимодействуют с расплавленным металлом. Высокая температура, большие скорости нагрева и охлаждения значительно ускоряют процесс кристаллизации, приводя к образованию закалочных структур, трещин и ряду других дефектов. Таким образом, физико-химические процессы, происходящие в зоне дуги и в процессе транспортировки напыляемого металла, в значительной степени определяют качество металлического защитного покрытия.

Теоретический анализ влияния начальных параметров состояния распыляющего газа на термодинамические характеристики двухфазной струи и на степень диспергирования материала проволочных электродов показал, что параметрами, влияющими на величину аэродинамической силы струи, действующей на частицу расплавленного металла, являются давление P_0 и температура T_0 газа в распылительной головке металлатора [4].

Установлено, что увеличение начальной температуры распыляющего газа (рисунок 1) повышает коэффициент аэродинамической силы, действующей на частицу расплавленного металла. Причем с уменьшением диаметра частиц эффективность повышения температуры струи резко возрастает. Повышение давления распыляющего газа приводит к снижению коэффициента лобового сопротивления C_x , что объясняется увеличением степени охлаждения газа при его расширении в сопле Ла-

валя с соответствующим снижением кинематического коэффициента вязкости потока. Наиболее существенно C_x снижается при увеличении начального давления P_0 до 0,6...0,8 МПа, далее почти не изменяясь вплоть до 2,5 МПа. Увеличение давления в распылительной головке ведет к росту аэродинамической силы струи, но при $P_0 > 0,6$ МПа эффективность повышения давления перед критическим сечением сопла снижается.

Следует отметить, что кроме основных параметров распыляющего газа T_0 и P_0 существенное влияние на максимальную скорость частиц оказывают такие геометрические параметры распыляющей системы металлатора, как радиус сопла на срезе и расстояние от очага плавления проволочных электродов до среза сопла X_1 . Увеличение радиуса сопла R_a повышает максимальную скорость частиц путем удлинения участка их разгона (рисунок 2).

Экспериментальные исследования влияния степени нагрева распыляющего газа на средний размер частиц диспергируемого металла показали, что с ростом T_0 до величин 2 300...2 500 К он снижается, достигая значений 10...15 мкм (интервал размеров каждой фракции принимался равным 5 мкм). Дальнейшее повышение T_0 приводит к увеличению доли частиц мелких фракций, однако доля фракции 10...15 мкм все время остается максимальной, определяя средний размер частиц. Анализ показал, что температуру нагрева распыляющего газа целесообразно ограничивать величиной 2 300...2 500 К, так как ее дальнейшее повышение незначительно влияет на средний размер, среднemasовые скорость и температуру частиц.

Таким образом, установлено, что активирование процесса электродуговой металлации нагре-

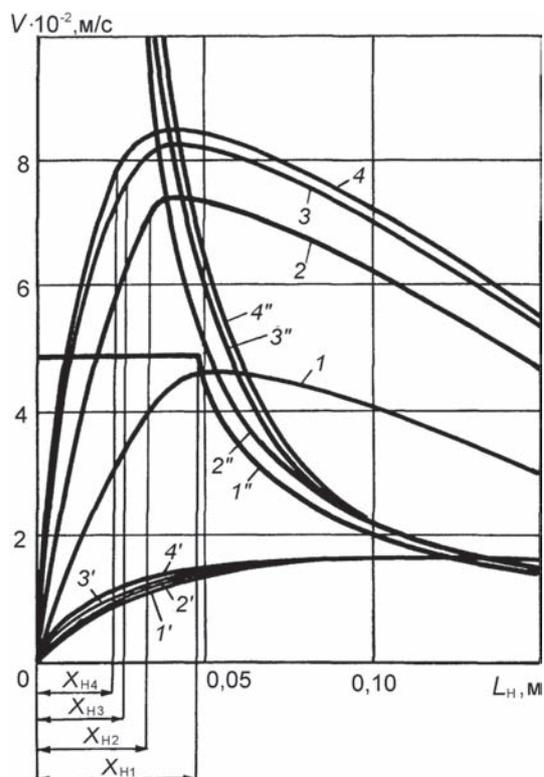


Рисунок 1 — Влияние температуры распыляющего газа (1, 1' — 290 К; 2, 2' — 1 500 К; 3, 3' — 3 000 К; 4, 4' — 5 000 К) на изменение скоростей частиц (1, 2, 3, 4 — 5 мкм; 1', 2', 3', 4' — 100 мкм) и струи (1'', 2'', 3'', 4'') вдоль оси при $P_0 = 0,6$ МПа; $R_a = 3$ мм

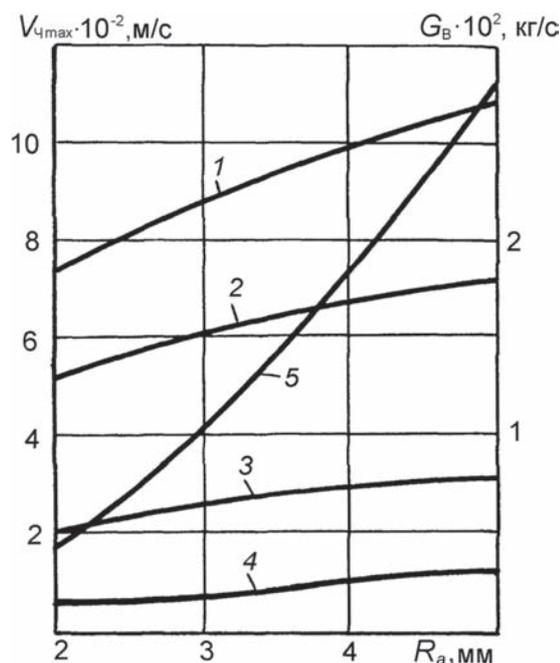


Рисунок 2 — Зависимость максимальной скорости частиц (1 — 5 мкм; 2 — 10 мкм; 3 — 40 мкм; 4 — 200 мкм) и расхода распыляющего газа (5) от радиуса сопла при $T_0 = 3 000$ К и $P_0 = 1,0$ МПа

вом распыляющего газа позволяет увеличить скорость полета частиц размером менее 40 мкм, практически не влияя на скорость более крупных частиц. При этом с уменьшением размера частиц, возрастает степень увеличения их скорости с ростом температуры распыляющего газа. Для частиц диаметром менее 40 мкм основной прирост скорости (80...90 % от максимальной) происходит на начальном участке струи, длина которой для исследованного диапазона значений температуры (до 5 000 К) и давления (до 2,5 МПа) распыляющего воздуха составляет 25...50 мм (при диаметре сопла на срезе 6 мм). Максимальные скорости полета таких частиц достигаются на дистанциях 40...60 мм от очага плавления проволочных электродов. Температуру предварительного нагрева распыляющего газа целесообразно ограничивать величиной 2 300...2 500 К, а давление — 0,6...0,8 МПа, так как дальнейшее повышение этих параметров незначительно влияет на среднюю скорость, размер и температуру частиц.

Состав распыляющего пропано-воздушного факела аппарата гиперзвуковой металлизации был выбран следующим: режим 1 — избыток пропана (объемное соотношение воздуха и пропана $\beta = 17-20$); 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 2,6...4,2 % в зависимости от расходов сжатого воздуха, причем максимальная концентрация 4,2 % достигается при расходе около 1,4...1,6 м³/мин (рисунок 3). Дальнейшее увеличение расхода распыляющего воздуха не приводит к заметному повышению концентрации кислорода.

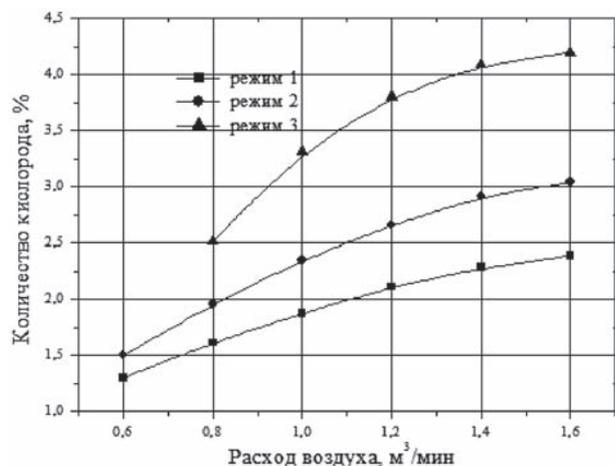


Рисунок 3 — Влияние расхода распыляющего воздуха в струе на количество кислорода в покрытиях, полученных при различных режимах

Наименьшее количество кислорода (1,3–2,3 %) регистрируется в ГМ-покрытиях, напыленных при избыточном количестве пропана в смеси (режим 1). Увеличение воздуха в горючей смеси до практически предельного значения ($\beta = 28$) повышает содержание кислорода, однако степень окисления покрытий остается ниже, чем при традиционной металлизации.

Исследование плотности и адгезии напыляемых покрытий показало, что пористость резко возрастает, а прочность сцепления снижается при увеличении дистанции напыления свыше 200 мм (рисунки 4, 5). Особенно это проявляется при минимально допустимых расходах сжатого воздуха 1–1,5 м³/мин. При увеличении расходов воздуха до максимальных значений, пористость монотонно убывает. 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 необхо-

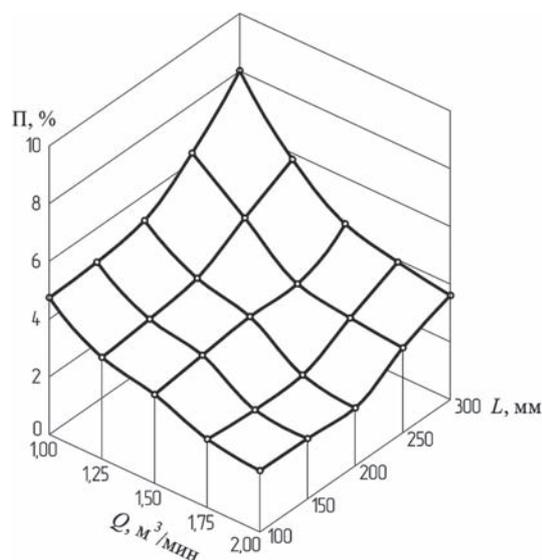


Рисунок 4 — Зависимость пористости стальных покрытий от расхода воздуха (Q) и дистанции напыления (L)

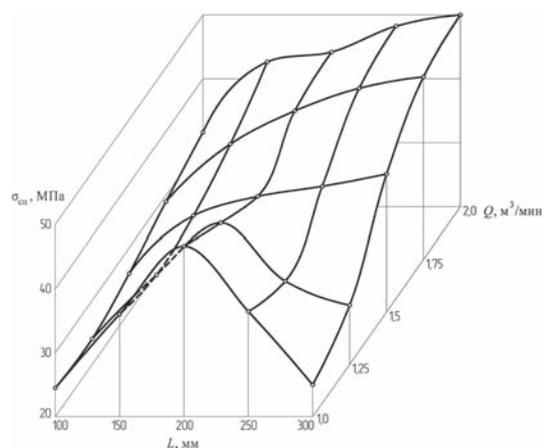


Рисунок 5 — Влияние расхода воздуха и дистанции напыления на прочность сцепления стальных покрытий с основой

димого 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, $L = 100\text{--}150$ 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 ($\beta = 18\text{--}20$), расходом воздуха в смеси $Q = 1,75\text{--}2$ м³/мин, дистанция напыления $L = 150\text{--}70$ мм.

На рисунке 6 показаны зависимости величин пористости покрытий полученных методом гиперзвуковой металлизации от дистанции напыления при различных скоростях перемещения металлатора относительно напыляемой поверхности. Пористость покрытий, полученных при минимальной скорости перемещения металлатора, 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.

Увеличение скорости перемещения металлатора ведет к заметному снижению пористости покрытий, получаемых гиперзвуковой металлизацией на коротких дистанциях ($L_n \approx 80\text{--}100$ мм).

В ходе определения рациональных электрических параметров процесса установлено, что величина рабочего тока при напряжении 26...30 В прямо пропорциональна производительности процесса напыления стальных покрытий (таблица 2).

Результаты исследований, полученные при нанесении стальных покрытий традиционной электродуговой металлизацией, показывают [4], что напряжение в дуге металлатора необходи-

Таблица 2 — Влияние величины рабочего тока дуги на производительность процесса распыления стальных проволок

Сила тока, А	Производительность процесса распыления (кг/ч) стальных проволок различного диаметра (мм)	
	1,6	2,0
60	1,5	1,5
100	3,0	4,5
150	4,0	6,5
200	5,0	8,0
250	6,0	10,0
300	7,0	14,0
350	8,0	15,0
400	9,0	16,0
450	10,0	18,0

мо устанавливаются в зависимости от требований, предъявляемых к покрытию. Если стальное износостойкое покрытие работает при удельных нагрузках, не превышающих 10 МПа, то напыление следует проводить на возможно меньшем напряжении. В этом случае коэффициент использования металла при распылении будет наибольшим. При формировании покрытий из стали, работающих в тяжелых условиях, для увеличения адгезии нанесение рекомендуется производить на повышенном напряжении. Проведенные эксперименты показали, что это справедливо и для процесса гиперзвуковой металлизации.

Исследование влияния рабочего тока дуги на пористость покрытий показало (таблица 3), что при больших значениях тока дуги (250–450 А) увеличение скорости перемещения металлатора V_{nm} относительно восстанавливаемой детали существенно снижает пористость слоя, а при распылении на малом токе (60–100 А) V_{nm} практически не влияет на эту величину.

Анализ результатов экспериментов позволил определить следующие рациональные режимы на-

Таблица 3 — Влияние силы тока на пористость покрытий

Сила тока, А	Пористость покрытий (%) при различной скорости перемещения металлатора (м/с)		
	0,04	0,2	0,6
60	1,8	1,5	1,3
100	2,0	1,7	1,4
150	2,7	1,8	1,4
200	3,0	2,1	1,5
250	3,5	2,3	1,6
300	4,1	2,6	1,6
350	4,5	2,9	1,7
400	5,2	3,3	1,8
450	5,6	3,5	1,8

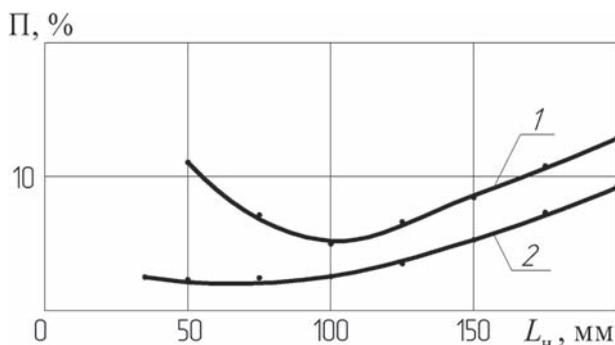


Рисунок 6 — Зависимость пористости стальных покрытий от дистанции напыления: 1 — $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,2$ м/с; 2 — $P_r = 0,6$ МПа; $V_m = 0,6$ м/с

пыления стальных покрытий на детали типа «вал» методом гиперзвуковой металлизации:

- для валов диаметром от 60 до 100 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм — напряжение дуги 26 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 65–70 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм — напряжение дуги 30 В, ток дуги 250 А, частота вращения детали 70–75 об/мин;

- для валов диаметром от 100 до 200 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм — напряжение дуги 28–30 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 75–90 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм — напряжение дуги 30–32 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 90–110 об/мин;

- для валов диаметром от 200 до 300 мм и диаметра распыляемых проволок 1,6 мм — напряжение дуги 30–32 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 90–110 об/мин; для диаметра распыляемых проволок 2 мм — напряжение дуги 34 В, ток дуги 350 А, частота вращения детали 110–120 об/мин.

Выводы. Показано, что температуру нагрева распыляющего газа в камере сгорания установки гиперзвуковой металлизации целесообразно ограничивать величиной 2 300...2 500 К, а давление — 0,6...0,8 МПа, так как дальнейшее повышение этих параметров незначительно влияет на среднюю скорость, размер и температуру частиц распыленных стальных проволок.

Установлено что, содержание кислорода в покрытиях, полученных методом традиционной электрометаллизации, 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. При гиперзвуковой металлизации

количество кислорода в 1,5–2,0 раза меньше. Наиболее плотные покрытия с допустимым количеством оксидов в процессе гиперзвуковой металлизации легированных 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 $L = 150–170$ мм.

Определены электрические параметры процесса гиперзвуковой металлизации и скорость перемещения металлизатора, которые обеспечивают качественные покрытия при распылении проволок из легированных сталей.

Список литературы

1. Белоцерковский, М.А. Активированное газопламенное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Упорочняющие технологии и покрытия. — 2006. — № 12. — С. 17–23.
2. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: междунар. науч. конф., Минск, 30–31 окт. 2008 / редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008. — С. 479–484.
3. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. — 2010. — № 10. — С. 2–5.
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. — 1997. — Т. 4. — С. 670–673.
5. Handbook of Thermal Spray Technology / ed.: Joseph R. Davis ASM. // N.Y. — 2004. — 413 p.

BELOTSERKOVSKY Marat A., Dr. Techn. Sc., Associate Professor

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Parts Strengthening¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

SOSNOVSKIY Aleksey V., Cand. Techn. Sc., Associate Professor

Senior Researcher¹

PRYADKO Aleksandr S.

Senior Researcher¹

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

YALOVIK Aleksandr P.

General Director

JSC “Neftezavodmontazh”, Novopolotsk, Republic of Belarus

TRUSOV Dmitriy I.

Master’s Student

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 04 May 2015.

SELECTING THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF STEEL COATINGS FORMATION BY HYPERSONIC METALLIZATION

The main idea of the article is to generalize the results of studies of the formation of the steel coatings produced by Hypersonic metallization, defining rational modes of recovery and hardening of transport machinery and technological equipment technologies. To achieve this goals the installation of hypersonic metallization model ADM-10 was used, sprayed materials — steel wire 95H18SH (AISI 440-C) and 40H13 (AISI 420). To increase the adhesive strength of coatings with the substrate an intermediate layer of an alloy H20N80 was coated. The studies revealed that increasing of initial temperature of spraying gas enhances the aerodynamic forces acting on a particle of the molten metal. Increasing of the nozzle radius enhances the maximum speed of the particles by extending the distance of dispersing. Activation process of the electric arc metallization by heating of the atomizing gas allows to increase the speed of the particles smaller than 40 microns, essentially without effect on the speed of the larger particles. Studying of density and adhesion of deposited coatings showed that if the spraying distance increases more than on 200 mm and over, the porosity increases sharply, and the bonding strength decreases. Therefore advisable to limit spraying gas temperature and pressure at combustion chamber of the Hypersonic metallization installation to the size of 2 300–2 500 K and 0,6–0,8 MPa respectively. Amount of oxygen in the coating at hypersonic metallization is 1,5–2,0 times less in comparison with the traditional method of electric metallizing. parameters of the hypersonic metallization process and displacement speed of the metalizer which provide quality coatings spray wires of steel alloys were defined.

Keywords: steel coatings, hypersonic metallization, porosity, coating properties

References

1. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S. Aktivirovannoe gazoplammenoe i elektrodugovoe napylenie pokrytii provolochnymi materialami [Activated flame and arc spraying coating with wire materials]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2006, no. 12, pp. 17–23.
2. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E. Tekhnologicheskie osobennosti i oblasti ispol'zovaniya giperzvukovoi metallizatsii. [Technological features and the field of use hypersonic metallization]. *Sbornik nauchn. trudov "Innovatsii v mashinostroenii"*. Redkol.: M.S. Vysotskii [i dr.]. [Collection of scientific papers "Innovations in mechanical engineering". Editorial board: Vysotsky M.S. [et al.]]. Minsk, the Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2008, pp. 479–484.
3. Vityaz P.A., Belotserkovsky M.A., Kamko A.I., Pryadko A.S. Zamena gal'vanicheskogo khromirovaniya na tekhnologiyu giperzvukovoi metallizatsii pri remonte detalei uzlov treniya skol'zheniya [Replacing galvanic chrome plating on the metallization technology of hypersonic the repair parts of friction slip]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya* [Repair, restoration, modernization], 2010, no. 10, pp.2–5.
4. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E. Metody i oborudovanie dlya formirovaniya vysokoenergeticheskikh dvukhfaznykh potokov [Methods and equipment for the formation of two-phase high-energy flows]. *Fizika plazmy i plazmennye tekhnologii* [Plasma physics and plasma technology]. Minsk. 1997, vol. 4, pp. 670–673.
5. Joseph Ed., Davis. R. *Handbook of Thermal Spray Technology*, N.Y., 2004, ASM, 413 p.