

ФОРМИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВЯЗЕЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОЙ ОСНОВЫ К НАНЕСЕНИЮ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Г.В. Куприянов, Р.В. Гладков

Представлен способ повышения адгезионной прочности газодинамических покрытий на железоуглеродистой основе, основанный на обеспечении высокой шероховатости и химической активации, за счет разработанного авторами новой операции подготовки поверхности под напыление.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, газодинамическое покрытие, адгезионная прочность, железоуглеродистая основа, корпусные детали трубопроводы, военная техника.

Способ «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), разработанный Институтом теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской Академии наук находит все большее применение для восстановления различных классов деталей военной и гражданской техники.

Способ ХГДН разработан на основе эффекта закрепления на поверхности твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, при соударении с ней. Процесс нанесения металлопокрытий осуществляется за счет нагрева сжатого газа (воздуха), подачу его в сверхзвуковое сопло и формирование в сопле сверхзвукового воздушного потока, подачу в этот поток порошкового материала, ускорение этого материала в сопле сверхзвуковым потоком воздуха и направление его на поверхность восстанавливаемой детали (рис. 1) [1].

В качестве напыляемых материалов используются порошки металлов и сплавов или их механические смеси с керамическими порошками. При этом путем изменения режимов работы оборудования можно проводить эрозионную обработку поверхности изделия либо наносить металлические покрытия требуемых составов [1].

Способ и средства его реализации характеризуются [1]:

- низкой энергоемкостью процесса напыления;
- высокой производительностью напыления (до 20 кг/час);
- низким температурным воздействием на деталь (поверхность детали не нагревается выше 100...150 °С), отсутствием опасных газов и излучения;
- широким температурным диапазоном эксплуатации оборудования;
- возможностью нанесения многокомпонентных покрытий с переменным содержанием компонентов по его толщине;

- компактностью, мобильностью оборудования.

В тоже время способ ХГДН не нашел широкого применения в ремонтных средствах военной техники [2].

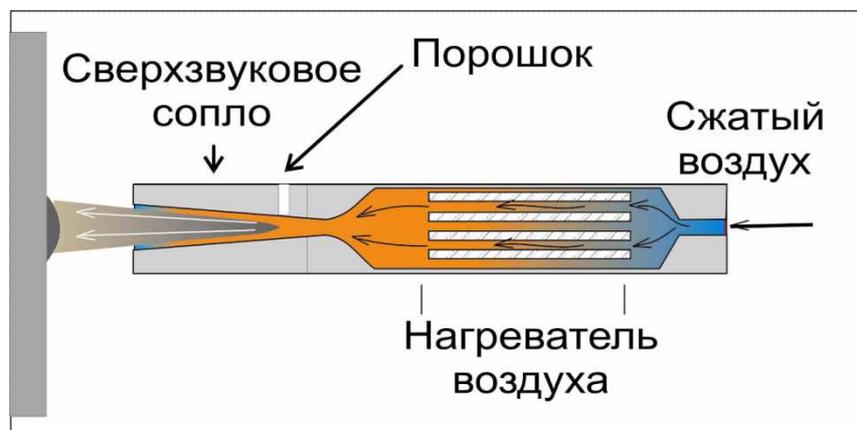


Рис. 1. Процесс нанесения газодинамического покрытия

Работы А.П. Алхимова, В.Ф. Косарева, А.Н. Папырина, Н.И. Нестеровича, А.И. Каширина, А.В. Шкодкина, О.Ф. Ключева, Т.В. Буздыгара и отзывы авторемонтных предприятий показывают, что покрытия, нанесенные способом ХГДН, обладают потенциально высокими характеристиками. Однако область их применения ограничивается величиной адгезии до 20 МПа на деталях из железоуглеродистых сплавов. Этот уровень адгезионной прочности не позволяет обеспечить необходимый ресурс восстановленной детали. Поэтому способом ХГДН восстанавливают определенную часть номенклатуры деталей из алюминиевых и медных сплавов. Условия формирования адгезионных связей газодинамического покрытия на алюминиевых, медных, железоуглеродистых подложках различны, поэтому параметры режимов напыления алюминиевых и медных сплавов невозможно использовать при восстановлении стальных и чугунных деталей.

Из анализа работ [2–4], посвященных изучению процесса формирования адгезионных связей между основой и газодинамическим покрытием, можно заключить, что сцепление между основой и покрытием (адгезия), как и между слоями (когезия), обусловлено силами механического зацепления (за счет шероховатости и механического заклинивания отдельных зерен порошка), слабыми молекулярными силами взаимодействия (типа сил Ван-дер-Ваальса) и в отдельных точках – силами химического взаимодействия (образование единой кристаллической решетки). Вместе с тем мнения относительно главенствующей роли того или иного типа сил продолжают все еще обсуждаться. По мнению А.В. Шкодкина, Т.В. Буздыгара, О.Ф. Ключева, соединение напыленного покрытия с основой осуществляется преимущественно за счет механического взаимодействия напыляемых частиц с выступами и впадинами на поверхности основы, образо-

ванными предварительной абразивной обработкой [3]. Однако А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.Н. Папырин, Л.И. Тушинский и другие отмечают, что кроме механических сил связи в процессе ХГДН возникают силы химического взаимодействия, при этом показано, что при скоростях, зависящих от размера частицы и температуры поверхности основы, на границе раздела может появиться переходный слой в расплавленном состоянии, повышающий прочность сцепления газодинамических покрытий с основой, которая может достигать до 70 МПа [2,4].

При оценке характеристик поверхности по их влиянию на адгезионную прочность основы с покрытием необходим учет различных механизмов сцепления. Величина сил механического зацепления определяется высотой микронеровностей и видом микропрофиля поверхности основы. Структура поверхности металла и её энергетическое состояние, формируемые в процессе подготовки, оказывает существенное влияние на протекание физико-химических процессов взаимодействия покрытия с подложкой и развитие адгезии. Атомы образованной поверхности металла в результате наличия некомпенсированных связей отличаются повышенной реакционной способностью, причем их энергия с уменьшением числа ближайших соседних атомов повышается. В этой связи подготовка поверхности, определяющая макро- и микрогеометрию поверхностного слоя, должна быть направлена на увеличение истинной её площади, а значит, и числа возможных физических и химических связей. Однако такая площадь после абразивно-струйной обработки зависит как от высоты микровыступов, так и от их числа. Увеличение высоты микровыступов приводит к повышению температуры в контакте под напыляемыми частицами на этих микровыступах, что улучшает теплофизические условия протекания активационных процессов [4].

В связи с необходимостью очистки, увеличения шероховатости, химической активации поверхности в работе, опираясь на теорию ударного действия твердых тел [5,6], проведен расчет зависимости глубины проникновения частиц в подложку от массы и скорости. Увеличение скорости абразивных частиц в квадратичной зависимости влияет на кинетическую энергию, что определяет ударно-режущее действие струи (рис. 2).

Из диаграммы видно, что с увеличением скорости частиц растет степень наклёпа, повышается производительность процесса. При изменении скорости со 150 до 400 м/с шероховатость увеличивается в 1,5 – 2 раза (рис. 2). Таким образом, при исходной шероховатости $R_z=18$ мкм, регулируя скорость частиц абразива, возможно контролировать процесс её изменения.

Поверхность железоуглеродистой основы обладает большим разбросом физико - механических свойств. Кроме того, размеры частиц абразива, используемого для ее обработки, могут иметь весьма сложную форму рабочей поверхности. Поэтому полное математическое описание физиче-

ских эффектов, происходящих при ударном способе воздействия, возможно лишь для простейших модельных случаев. В этих моделях используют контактную теорию удара и деформацию основы считают неупругой. Не учитывают и особенности формы частицы [5].

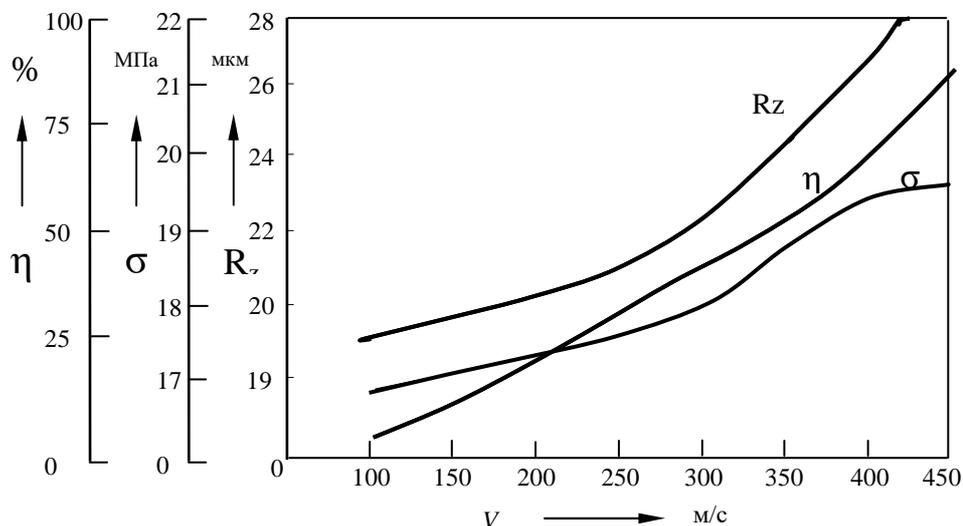


Рис. 2. Зависимость степени наклепа (η , %), прочности сцепления (σ , МПа) и шероховатости поверхности (R_z , мкм) от скорости частиц абразива (V , м/с)

При ударе реальных тел в большинстве случаев осуществляется как упругое, так и пластическое деформирование. Поэтому механическая энергия к концу удара обычно восстанавливается лишь частично вследствие потерь на образование остаточных напряжений и деформаций, на нагрев тел и т.п. Эти частичные потери энергии при технических расчетах характеризуются введением коэффициента восстановления, зависящего от физических свойств материалов

$$k = - \frac{U_1 - U_2}{V_1 - V_2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент восстановления; V_1 и V_2 – скорость частицы и поверхности до удара, м/с; U_1 и U_2 – скорость частицы и поверхности после удара, м/с [5,6].

Пусть по поверхности основы наносится удар частицей электрокорунда силой F_1 , движущейся со скоростью V_1 . При этом кинетическая энергия в момент удара

$$E_k = \frac{mV_1^2}{2}, \quad (2)$$

где E_k – кинетическая энергия частицы, Дж; m – масса частицы, кг; V_1 – скорость частицы, м/с.

Сопротивление поверхности подложки вызывает торможение движущейся частицы. Сила сопротивления внедрению частицы в модели упругого деформирования прямо пропорциональна глубине её проникновения L [5,6]

$$F(L) = k_n L, \quad (3)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий свойства материала поверхности кг/с^2 ; L – глубина проникновения частицы в материал подложки, м.

Тогда потенциальная энергия деформирования подложки

$$E_n = \int_0^x F(L) dL = \frac{k_n}{2} L^2, \quad (4)$$

где E_n – потенциальная энергия частицы, Дж; $F(L)$ – сила сопротивления внедрению частицы, Н; k_n – коэффициент, учитывающий свойства материала поверхности, г/с^2 ; L – глубина внедрения частицы, м.

Максимальные значения силы сопротивления F_{\max} и энергии деформирования $(E_n)_{\max}$ достигаются при наибольшей глубине внедрения L_{\max} – в тот момент когда скорость частицы снизится до нуля [5,6]:

$$F_{\max} = k_n L_{\max}, \quad (5)$$

$$(E_n)_{\max} = \frac{F_{\max} L_{\max}}{2}, \quad (6)$$

или

$$(E_n)_{\max} = \frac{k_n L_{\max}^2}{2}. \quad (7)$$

В модели квазистатического упругого деформирования предполагается, что при ударе частицы о поверхность всегда выполняется условие $E_k + A = E_n$, из которого нетрудно определить наибольшую силу сопротивления поверхности

$$F_{\max} = F_1 + \sqrt{F_1^2 + m k_n V_1^2}, \quad (8)$$

где F_{\max} – максимальная сила сопротивления поверхности, Н; F_1 – сила удара частицы о покрытие, Н; m – масса частицы, кг; k_n – коэффициент, учитывающий свойства материала поверхности, кг/с^2 ; V_1 – скорость частицы, м/с.

Максимальную глубину внедрения частицы можно определить

$$L_{\max} = \frac{F_1}{k_n} + \sqrt{\left(\frac{F_1}{k_n}\right)^2 + \frac{m}{k_n} V_1^2}, \quad (9)$$

где L_{\max} – максимальная глубина внедрения частицы, м; F_1 – сила удара частицы о покрытие, Н; m – масса частицы, кг; k_n – коэффициент, учитывающий свойства материала поверхности, кг/с^2 ; V_1 – скорость частицы, м/с [5,6].

Из последнего соотношения следует, что зависимость $L_{max}(V_1)$ является гораздо более резкой, чем зависимость $L_{max}(m)$. Поэтому для увеличения степени наклепа, шероховатости поверхности, а также более качественной очистки от органических загрязнений при ударе необходимо не увеличивать массу частицы, а повышать её скорость (энергию удара) [5,6].

Рассмотрен способ разгона частиц порошковой смеси воздухом с подогревом последнего от 250 до 750 К [7]. Рабочий газ нагревался до заданной температуры и смешивался в форкамере с частицами, поступающими из дозатора. С повышением температуры воздуха в форкамере растет скорость звука в струе, скорость её истечения и скорость частиц воздушно-порошковой смеси (рис. 3).

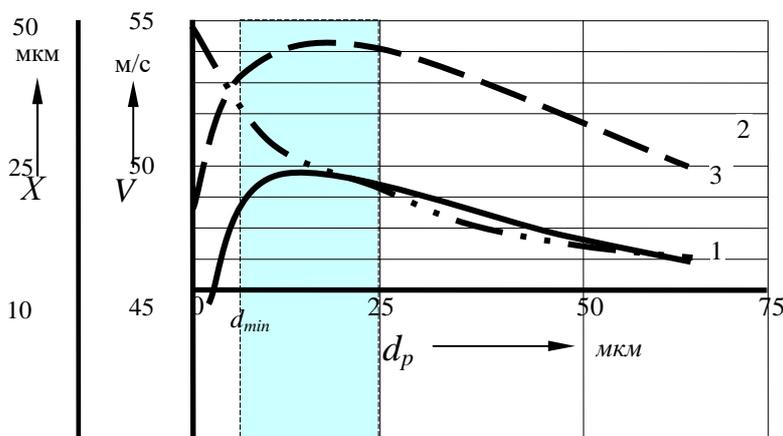


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения (X , мкм) и скорости частиц воздушно-порошковой струи (V , м/с) от диаметра частицы (d_p , мкм) при различных температурах воздуха в форкамере: 1 – $T_g = 300$ К, 2 – $T_g = 500$ К, 3 – $T_g = 750$ К.

Из рис. 3 видно, что наибольшая скорость достигается частицами размером до 25 мкм, однако использование корунда диаметром менее 10 мкм приведёт к заклиниванию абразива в поверхности основы, что значительно снизит адгезионную прочность напыляемого покрытия [7].

Влияние диаметра и скорости частиц (V , м/с) на глубину (X , мкм), и степень наклепанного слоя основы (η , %) показаны в табл. 1, откуда следует, что уменьшение диаметра абразива и увеличение его скорости приводит к значительному росту глубины и степени наклепанного слоя обработанной поверхности (рис. 4).

Таким образом, для увеличения шероховатости, глубины и степени наклепанного слоя абразивно-струйную обработку целесообразно проводить электрокорундом, размер фракций которого 10...25 мкм.

По результатам экспериментальных исследований, в течение первых 60 секунд наблюдается некоторое колебание микронапряжений и повышение плотности дислокаций поверхности трубопровода. Затем величина микронапряжений выходит на постоянный уровень и с течением времени существенно не меняется.

Таблица 1

Влияние диаметра и скорости частиц на глубину (X , мкм) и степень наклепанного слоя (η , %) основы

Диаметр частиц, мкм	Скорость частиц, м/с				
	50	55	50	55	50
25...35	$X=112$ мкм $\eta=43\%$	$X=120$ мкм $\eta=47\%$	$X=126$ мкм $\eta=20\%$	$X=138$ мкм $\eta=24\%$	$X=137$ мкм $\eta=15\%$
10...25	$X=180$ мкм $\eta=52\%$	$X=200$ мкм $\eta=57\%$	$X=214$ мкм $\eta=30\%$	$X=222$ мкм $\eta=32\%$	$X=237$ мкм $\eta=24\%$

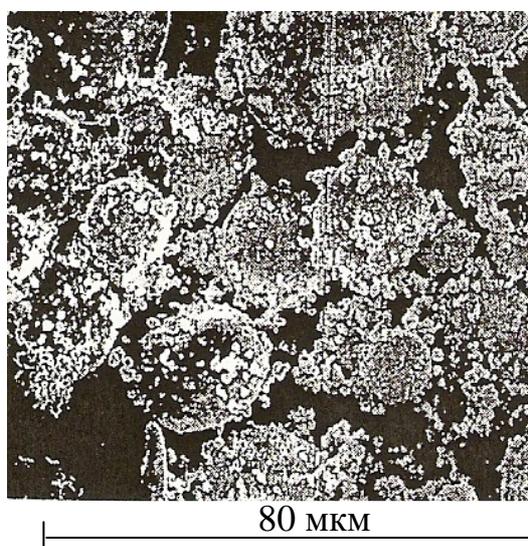


Рис. 4. Внешний вид электрокорунда фракцией до 25 мкм ($\times 600$)

При восстановлении стальных трубопроводов их поверхность обладает значительно большей исходной плотностью дислокаций ($\rho \approx 6 \cdot 10^4$ МПа), чем у отожженной стали. При этом дислокации могут тормозить перемещение друг друга [8].

С повышением плотности дислокаций, выстраиванием их в малоугловые границы тормозная способность увеличивается. Поэтому в объеме металла замедляется перемещение дислокаций, генерируемых на поверхности в точках соударения с ней частиц абразива. Появляются микроучастки с разной плотностью дислокаций, а значит, с разной степенью искаженности кристаллической решетки, т.е. появляются микронапряжения. При взаимодействии следующей порции абразива дополнительно увеличивается плотность генерированных дислокаций. Это облегчает их взаимодействие с образованием новых малоугловых границ.

В результате несколько измельчаются блоки и частично снимаются микронапряжения. Стабилизация уровня микронапряжений через 60 секунд обработки связана с общей стабилизацией процесса и незначитель-

ным абразивным воздействием на предварительно упрочненный материал. Участок стабилизации величины наклепа при обдуве в течение 30-60 секунд и экстремальное значение шероховатости можно объяснить тем, что при абразивно-струйной обработке происходит не только рост микронапряжений, но и частичная их релаксация вследствие глубоких порезов поверхности образца частицами абразива рис. 5 [8].

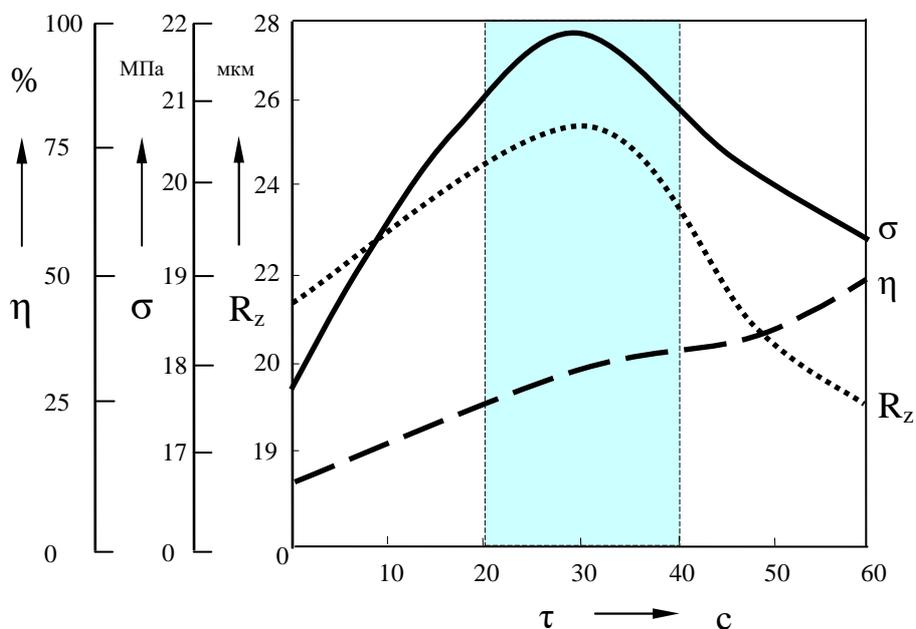


Рис. 5. Влияние продолжительности обработки (τ , с) на степень наклепа (η , %), прочность сцепления (σ , МПа) и шероховатость поверхности (R_z , мкм)

С увеличением продолжительности абразивной обработки шероховатость основы изменяется незначительно, а степень наклепа возрастает вплоть до насыщения. При исследовании влияния степени наклепа на прочность сцепления покрытий в качестве переменной величины при абразивно-струйной обработке принимаем удельный расход абразивного материала q , т.е. массовый расход обрабатывающих частиц на единицу обработанной площади. При этом величину q определяем по эмпирической формуле [8]

$$q = \frac{3\pi d^2 v \tau \rho \beta}{4S}, \quad (10)$$

где d – диаметр сопла пистолета, м; v – средняя скорость частиц, м/с; τ – коэффициент заполнения струи, с; ρ – плотность материала частиц, кг/м³; β – коэффициент использования частиц; S – площадь поверхности обработанного образца, м².

При увеличении удельного расхода абразивного материала адгезионная прочность покрытия, несмотря на некоторое снижение шероховатости поверхности основы, значительно возрастает. Повышение адгезионной

прочности покрытий, напыленных на образцы с деформированной кристаллической решеткой, происходит за счет образования межатомных связей. Некоторое снижение прочности сцепления при стабилизации степени наклепа обусловлено переносом части энергии деформированного слоя, которая расходуется на межатомные связи (рис. 6).

При увеличении степени наклепа до 50% следует ожидать повышение адгезионной прочности более чем в 2 раза. Глубина наклепанного слоя зависит от тех же факторов, что и шероховатость поверхности. Приблизительно её можно оценить с помощью эмпирической зависимости [8]

$$X = \gamma R_z, \quad (11)$$

где X – глубина наклепанного слоя, мкм; γ – коэффициент, зависящий от формы частиц и свойств обрабатываемой поверхности ($\gamma=4,2$); R_z – шероховатость поверхности, мкм.

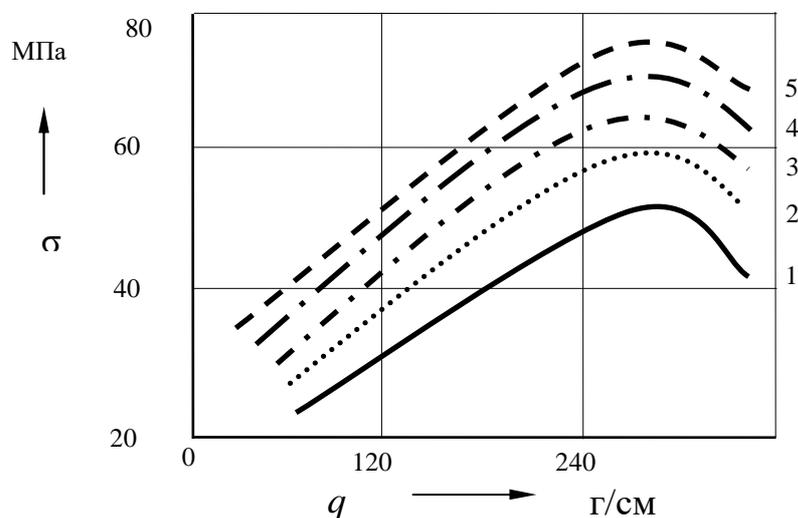


Рис. 6. Зависимость адгезионной прочности от степени наклепа железуглеродистой основы из материалов:
1 – сталь 10, 2 – сталь 30, 3 – сталь 45, 4 – сталь 42ХМФАШ,
5 – сталь Х18Н10Т

Степень наклепа в значительной степени зависит от упругих свойств обрабатываемого материала, а также от кинетической энергии частиц.

Поскольку с ростом числа пиков увеличивается как суммарная площадь участков, так и общая площадь контакта напыляемых частиц с материалом основы, площадь поверхности в значительной степени характеризует не отдельно взятая величина R_a или R_z , а функция числа пиков n и шероховатости R_z .

В табл. 2 показано изменение характеристик шероховатости образцов из конструкционной стали 45 в зависимости от режимов абразивно-струйной обработки.

Для проведения качественного сравнения используем величину функции числа пиков n . С увеличением продолжительности обработки число пиков уменьшается незначительно, в то же время возрастает максимальная глубина внедрения частиц, увеличивается максимальное значение высоты пиков. Для удобства сравнения профиля, получаемого при обработке поверхности различной площади, введем коэффициент интенсивности обработки K , характеризующий длительность обработки единицы площади рабочей поверхности.

Таблица 2

Шероховатость поверхности образцов из конструкционной стали 45 в зависимости от продолжительности абразивно-струйной обработки

Абразивный материал	Продолжительность обработки τ , с	R_a , мкм	R_{max} , мкм	R_z , мкм	Число пиков, n	nR_z
Электрокорунд	10	4,7	23	19	59	1103
	25	5,4	29	22	52	1165
	40	5,9	34	29	50	1460

При увеличении продолжительности абразивно-струйной обработки одновременно с уменьшением числа пиков шероховатость поверхности возрастает, при этом степень пластической деформации обрабатываемой поверхности также повышается (рис. 7). Вместе с тем с увеличением продолжительности обработки и шероховатости поверхности образцов число пиков сокращается, при этом величина n превалирует над R_z , и истинная площадь поверхности уменьшается. Это приводит к снижению прочности сцепления покрытия с основой.

При существенном увеличении длительности обработки, когда коэффициент K больше 60 с, кривые зависимости шероховатости от времени обработки имеют минимум. Это обусловлено увеличением степени наклепа и уносом частиц основы с поверхности при длительном воздействии струи абразивного материала.

Для основы и различных типов покрытий необходимо экспериментальное проведение выбора и оптимизации способа подготовки поверхности для напыления. Кроме того, при оценке характеристик поверхности по их влиянию на прочность сцепления основы с покрытием необходим учет различных механизмов сцепления. Возможность осуществления физико-химических процессов взаимодействия на границе «покрытие – железоуглеродистая основа» связана со структурой поверхности металла и её энергетическим состоянием, формируемым в процессе подготовки поверхности.

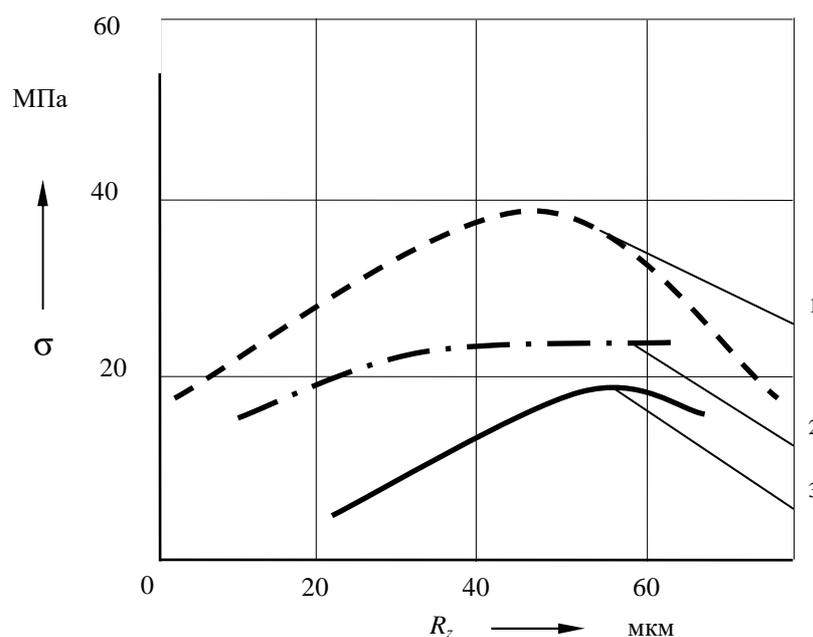


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности от шероховатости подложки: 1 – оксид алюминия на графите; 2 – хромникелевая шпинель на стали X18H10T3 – хромникелевая шпинель на стали Д16АТ

Таким образом, анализ механизма формирования адгезионных связей на этапе подготовки поверхности в системе «холодное газодинамическое покрытие – железоуглеродистая основа» позволяет сделать выводы.

1. Значительное влияние на адгезионную прочность холодных газодинамических покрытий при напылении на железоуглеродистую основу оказывают физико – химические свойства поверхности подложки, определяющими из которых являются шероховатость, глубина проникновения частицы и степень наклепа, чистота поверхности.

2. Существующие методы очистки и активации стальной поверхности обработкой электрокорундом с размером фракций 100...200 мкм не обеспечивают необходимой прочности. Поэтому для увеличения адгезионной прочности холодных газодинамических покрытий на этапе подготовки железоуглеродистой основы необходимо увеличивать скорость частиц абразива, что достигается использованием электрокорунда с размером частиц 10...25 мкм и подогревом рабочего газа до температуры 750 К, а также определением оптимальной продолжительности абразивно-струйной обработки подложки от 20 до 40 секунд.

3. Обоснование механизма формирования адгезионных связей при подготовке железоуглеродистой основы позволило установить технологические факторы, влияющие на адгезионную прочность газодинамических

покрытий: размер фракций частиц абразива (d , мкм), температура рабочего газа воздушно-порошковой смеси (T , К) и продолжительность обработки поверхности абразивом ($t_{об}$, с).

Список литературы

1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Исследования теплообмена сверхзвуковой струи с преградой в условиях ХГДН // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т.7. № 3. С. 389 - 396.

2. Косарев В.Ф. Физические основы холодного газодинамического напыления: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2003. 292 с.

3. Портативное устройство для газодинамического напыления покрытий: пат. 2201472 С2 РФ. № 2003125602/02. Заявл. 21.08.2003. Оpubл. 27.07.2005, 10.

4. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. М.: Мир, 2004. 384 с.

5. Евдокимов И.Н., Ведищев И.А. Физические эффекты при бурении нефтяных и газовых скважин. Эффекты удара. М.: Готика, 2001. 128 с.

6. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела М.: Наука, 1981. 480 с.

7. Куприянов Г.В., Коберниченко А.Б. Некоторые результаты экспериментального исследования процесса формирования адгезионных связей в газодинамических покрытиях // Наука и техника. 2008. № 11. С. 34 – 44.

8. Алмазов В.В., Коберниченко А.Б., Овинников П.Н. Формирование физико-химических свойств поверхности при абразивно-струйной обработке, изменением дисперсности // Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения». Воронеж: Изд-во ВАИУ, 2009. С. 72-77.

*Куприянов Георгий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, kgw1975@mail.ru
Россия, Рязань, Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В. Ф. Маргелова,*

*Гладков Роман Викторович, канд. техн. наук, доцент, gladkov-80@mail.ru
Россия, Рязань, Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В. Ф. Маргелова*

**THE FORMATION OF ADHESION BONDS IN THE PREPARATION OF THE SURFACE
OF THE IRON-THE BASICS FOR THE APPLICATION OF COLD GAS DYNAMIC
COVERS**

G.V. Kupriyanov, R.V. Gladkov

The paper presents a method for increasing the adhesive strength of gas-dynamic coatings on iron-carbon basis, based on the provision of high roughness and chemical activation, due to the developed by the authors of a new operation of surface podgotov-Ki spraying.

Key words: cold gas-dynamic spraying, gas-dynamic coating, adhesive.

Kupriyanov Georgy Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, kgw1975@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan Higher Airborne Command School named after army General V. F. Margelov,

Gladkov Roman Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, gladkov-80@mail.ru, Russia, Ryazan, Ryazan Higher Airborne Command School named after army General V. F. Margelov