

Д. т. н. **И. Н. Кравченко**^{1,2} (✉), к. т. н. **С. В. Карцев**², д. т. н. **С. А. Величко**³,
д. т. н. **Ю. А. Кузнецов**⁴, д. т. н. **А. Г. Пастухов**⁵

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия

² ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва», Саранск, Республика Мордовия, Россия

⁴ ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

⁵ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В. Я. Горина», Белгород, Россия

УДК 621.793/795:621.793.74

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ

Исследовано влияние подготовки поверхности детали на прочность сцепления покрытия с основой. Предложен новый способ подготовки поверхности для плазменного напыления, позволяющий снизить удельные затраты и трудоемкость восстановления изношенных деталей, а также повысить качество покрытий. Отличительной особенностью предложенного способа является воздействие на обрабатываемую поверхность термоабразивной струи с одновременным нагревом этой поверхности, что обеспечивает высокую прочность сцепления покрытия с поверхностью детали.

Ключевые слова: плазменное напыление, прочность сцепления, качество покрытия, струйно-абразивная обработка, термоабразивный инструмент.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка поверхности деталей перед плазменным нанесением покрытий имеет важнейшее значение в активизации процессов образования связей между напыляемыми частицами и основой [1–7]. При этом нестабильность свойств обработанной поверхности является следствием несоблюдения необходимых режимов обработки, что часто приводит к получению покрытий с низкими адгезионными свойствами.

В настоящее время применяют следующие способы подготовки поверхности основы перед нанесением покрытий: струйно-абразивный, механический (накатка, нарезка «рваной резьбы» и т. п.), термический (предварительный подогрев поверхности), химический (избирательное травление), электроискровая обработка

и поверхностное легирование для повышения химической активности основы [8–11]. Наиболее распространенным и перспективным способом является струйно-абразивная обработка [12–16], заключающаяся в воздействии на обрабатываемую поверхность струи твердых частиц, движущихся с высокой скоростью. В результате на поверхности образуется новый микрорельеф с пластически деформированным слоем.

Основными параметрами, определяющими свойства обработанной поверхности детали, являются [17–20]: вид, размер, форма применяемых частиц, их расход на единицу обрабатываемой поверхности, скорость соударения с основой и угол атаки. При струйно-абразивной обработке применяют корунд, стальной порошок, кварцевый песок, чугунную или стальную дробь, «рубленую» дробь или кусочки стальной проволоки диаметром 0,3–1,2 мм, карбид кремния, графит и др. Материал частиц, используемых для подготовки поверхности, выбирают в зависимости от его плотности, твердости, ударной вязкости, размера и формы частиц, а также стоимости. При этом исходят из следующих соображений:



И. Н. Кравченко
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

необходимо выбирать такой материал, частицы которого, ударяясь об обрабатываемую поверхность, не разбиваются и не деформируются. Оптимальный размер частиц любого материала должен составлять порядка 350–550 мкм; частицы должны иметь угловатую форму.

При использовании корунда, кварцевого песка и графита следует учитывать их низкую сцепляемость с поверхностью, поскольку часть материала остается на обрабатываемой поверхности из-за содержащихся в нем легко разрушаемых минералов. Энергетические параметры струи абразива, воздействующие на материал детали, можно регулировать изменением диаметра сопла и диаметра инжектора воздуха струйного пистолета, расхода сжатого воздуха, расстояния от среза сопла до обрабатываемой поверхности и длительности обработки [21].

Цель данной работы — оптимизация режимов струйно-абразивной обработки, рекомендуемых при подготовке поверхностей деталей перед плазменным напылением, для получения прочно сцепленных покрытий высокого качества.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали способ струйно-абразивной обработки поверхности детали [22] на примере ножа колодезного бура (рис. 1). Для подготовки поверхности под плазменное напыление использовали чугунную крошку размерами 60–125 мкм и крошку из карбида кремния размерами 63–100 мкм [23].

Основное воздействие на обрабатываемую деталь оказывает кинетическая энергия частиц. При этом скорость частиц V , м/с, используемых для струйно-абразивной обработки, определяли из уравнения

$$mV = C_x \frac{\rho V_r^2}{2}, \quad (1)$$

где m — масса частицы, кг; C_x — коэффициент гидродинамического сопротивления; ρ — плотность воздуха, кг/м³; V_r — скорость газа, определяемая в зависимости от давления и диаметра сопла пистолета, м/с.

При исследовании влияния степени наклепа на прочность сцепления покрытий за переменный фактор струйно-абразивной обработки был принят удельный расход абразивного материала [9, 24], т. е. массовый расход q , г/см², обрабатывающих частиц на единицу обработанной площади, который определяли по эмпирической зависимости

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

где d — диаметр сопла струйно-абразивного пистолета, мм; V — средняя скорость частиц при струйно-абразивной обработке, м/с; α — коэффициент заполнения струи при струйно-абразивной обработке; ρ — плотность материала



Рис. 1. Струйно-абразивная обработка перед напылением ножа колодезного бура

частиц, кг/м³; β — коэффициент использования частиц; S — площадь поверхности обрабатываемой детали, м².

Для оценки величины съема материала при струйной обработке образцы размерами 100×100×3 мм изготавливали из стали марки Ст3. Обработку осуществляли термоабразивным инструментом при давлении 0,6 МПа [8, 25, 26]. В качестве абразива использовали крошку карбида кремния. Дистанцию обработки поддерживали постоянной в пределах 100 мм. До и после обработки образцы взвешивали на лабораторных весах, что позволило определить величину съема металла [27, 28].

Для количественной оценки получаемой степени шероховатости применяли способ регистрации профиля обработанной поверхности на диаграммной ленте профилографа-профилометра с последующей обработкой результатов в соответствии с ГОСТ 19300–86 и ГОСТ Р 8.651–2009 по методикам, принятым в машиностроении [29–31]. Профилограф-профилометр использовали для получения калибровочных зависимостей характеристик шероховатости от режимов струйно-абразивной обработки.

При выборе конструкции сопла в соответствии с рекомендациями [32] использовали характеристики работы аппарата струйно-абразивной обработки, приведенные в табл. 1, 2.

Зависимость количества выбрасываемой дроби от диаметра сопла приведена ниже:

Диаметр сопла, мм.....	4	6	8	10	11	12
Количество дроби, кг/ч..	560	1000	1500	1900	2500	3400

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактическая площадь поверхности после струйно-абразивной обработки определяется как высотой микровыступов, так и их числом. Увеличение высоты микровыступов приводит к росту температуры в контакте, что улучшает теплофизические условия для протекания акти-

Таблица 1. Зависимость расхода сжатого воздуха от диаметра сопла струйного пистолета

Давление сжатого воздуха, МПа	Расход сжатого воздуха, м³/мин, при диаметре сопла струйного пистолета, мм							
	4	5	6	7	8	9	10	11
0,5	0,90	1,42	2,04	2,77	3,62	4,58	5,65	6,84
0,6	1,05	1,62	2,32	3,16	4,12	5,22	6,44	7,99

Таблица 2. Зависимость производительности сопла струйного пистолета от его диаметра и давления сжатого воздуха

Давление сжатого воздуха, МПа	Производительность сопла струйного пистолета, см³/мин, при его диаметре, мм			
	5	6	8	10
0,4	460	570	660	810
0,5	550	660	840	1000
0,6	640	800	1000	1140

вационных процессов. Кроме того, увеличение шероховатости поверхности улучшает ее сцепляемость с напыляемым материалом с точки зрения «заклинивания» расплава в микровыступах шероховатости. Увеличение числа пиков повышает суммарную площадь участков приваривания, а также общую площадь контакта напыляемых частиц с материалом детали.

При использовании одного и того же абразивного материала при одном и том же сопле струй-

ного пистолета с ростом давления сжатого воздуха увеличивается производительность процесса обдувки. С повышением размера частиц абразивного материала производительность обдувки возрастает, однако увеличивается расстояние между выступами или впадинами шероховатой поверхности. Поэтому целесообразно использовать смесь, состоящую из мелких и крупных зерен. При давлении воздуха от 0,4 до 0,6 МПа скорость частиц чугунной крошки диаметром 0,34–0,71 мм изменяется в пределах 40–60 м/с.

Для материалов с разной твердостью влияние режимов обработки на шероховатость поверхностей различное. Шероховатость R_z при диаметре частиц 0,35 и 0,70 мм приведена в табл. 3, из которой видно, что размер частиц сильно влияет на высоту микронеровностей.

Для заданных расхода воздуха, плотности и размера частиц существует некоторое критическое расстояние от среза сопла струйного пистолета до обрабатываемой поверхности, превышение которого ведет к резкому снижению скорости частиц (рис. 2). Критическое расстояние увеличивается с ростом расхода сжатого воздуха, размеров и плотности частиц. На очень близких расстояниях эффективность обработки уменьшается из-за экранирующего влияния отраженных от поверхности сжатого воздуха и частиц. При разных расстояниях от сопла струйного пистолета до обрабатываемой поверхности шероховатость при общем возрастании изменяется по-разному, что указывает на необходимость экспериментального подбора расстояния в каждом конкретном случае.

С увеличением продолжительности обработки шероховатость основы изменяется незначительно, а степень наклепа растет пропорционально длительности обработки вплоть до насыщения.

Прочность сцепления покрытия с основой при увеличении удельного расхода абразивного материала (степени наклепа) значительно возрастает (рис. 3), несмотря на некоторое снижение шероховатости поверхности основы. На наш взгляд, прирост прочности сцепления наклепанных образцов следует отнести на счет образования межзатомных связей. Некоторое снижение прочности сцепления при стабилизации степени наклепа можно объяснить тем, что деформированный слой полностью отдает ту часть энергии, которая идет на межзатомные связи, и поступление энергии прекращается, а уменьшение шероховатости приводит к снижению прочности сцепления. Увеличение удель-

Таблица 3. Шероховатость R_z материала основы при скорости частиц абразивного материала 50 м/с

Диаметр частиц, мм	R_z , мкм, материала основы (твердость HV)		
	30Х4Г (350–450)	18ХГС (220–270)	Г13Н4 (170–230)
0,35	27	31	34
0,70	43	47	52

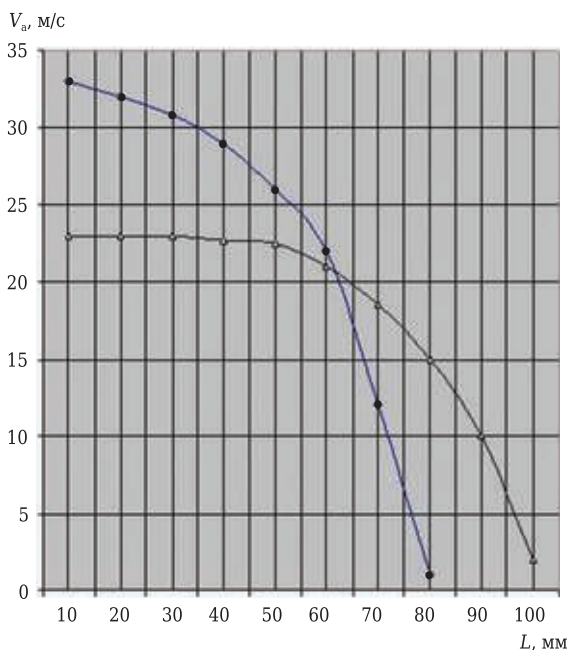


Рис. 2. Зависимость средней скорости частиц абразива V_a от расстояния до среза сопла струйного пистолета L : ● — частицы корунда (1,0–1,6 мм); △ — чугунная крошка (0,5–1,0 мм)

ного расхода абразивного материала приводит к росту прочности сцепления покрытий.

Влияние диаметра и скорости частиц на глубину и степень наклепа основы (табл. 4) показывает, что глубина наклепанного слоя L зависит от тех же факторов, что и шероховатость поверхности, и может быть приближенно оценена эмпирической зависимостью вида

$$L = \gamma \cdot Rz, \quad (3)$$

где γ — коэффициент, зависящий от формы частиц абразива и свойств обрабатываемой поверхности ($\gamma = 4,2$).

Из табл. 3, 4 видно, что для получения оптимальных параметров основы (Rz , L , η) обработку материалов основы твердостью 170–230 HB необходимо вести частицами диаметром до 0,7 мм, а основы твердостью 350–450 HB — частицами диаметром 0,7–1,2 мм.

При определении изменения прочности сцепления покрытия с основой в зависимости от технологических факторов процесса напыления возникает необходимость получения заданного уровня шероховатости поверхности, предназначенной под плазменное напыление. Рассматриваемые характеристики шероховатости (высота и количество микровыступов) довольно просто регулируются, поскольку определяются в основном размером абразивных зерен и длительностью обработки. Профилограммы образцов, имеющих разную степень шероховатости, показаны на рис. 4.

На рис. 5, 6 показаны результаты, полученные после обработки диаграмм профилографа-профилометра. Общие данные об изменении характеристик шероховатости образцов из стали Ст3 в зависимости от режимов струйно-абразивной обработки показаны в табл. 5. Следует отметить, что величина n , полученная с помощью измерений на профилографе-профилометре, возможно, будет несколько меньше действительного количества пиков, поскольку наиболее мелкие пики и провалы не регистрируются. Однако

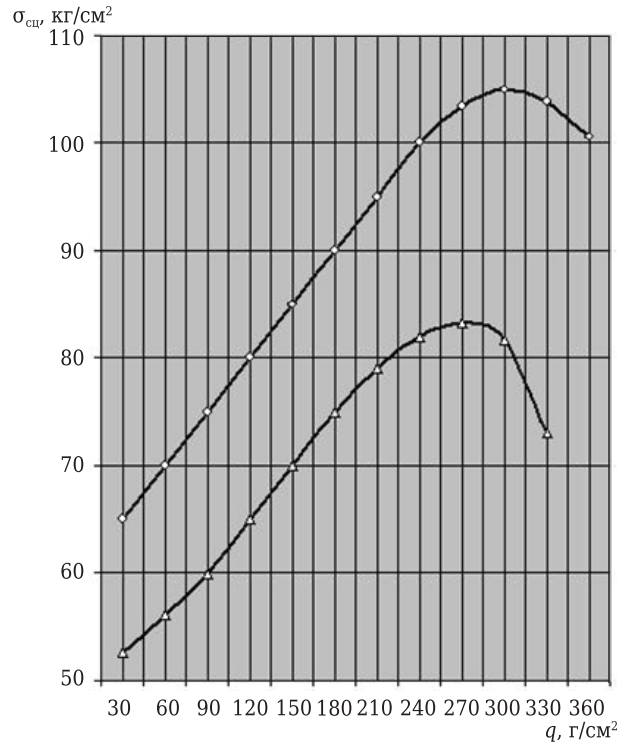


Рис. 3. Зависимость прочности сцепления $\sigma_{сц}$ от удельного расхода абразивного материала q : $\circ$ — основа 30X4Г; $\triangle$ — основа Г13Н4

для качественных сравнений полученная величина n имеет определенный интерес. Для обоих видов обрабатываемого материала n умень-

Таблица 4. Влияние диаметра и скорости частиц на глубину L и степень наклепа η

Диаметр частиц, мм	Скорость частиц, м/с					
	50	55	50	55	50	55
	при твердости основы, HB					
	350–450		220–270		170–230	
0,35	$L = 112$ мкм	$L = 120$ мкм	$L = 126$ мкм	$L = 138$ мкм	$L = 137$ мкм	$L = 150$ мкм
	$\eta = 43\%$	$\eta = 47\%$	$\eta = 20\%$	$\eta = 24\%$	$\eta = 15\%$	$\eta = 17\%$
0,70	$L = 180$ мкм	$L = 200$ мкм	$L = 214$ мкм	$L = 222$ мкм	$L = 237$ мкм	$L = 247$ мкм
	$\eta = 52\%$	$\eta = 57\%$	$\eta = 30\%$	$\eta = 32\%$	$\eta = 24\%$	$\eta = 26\%$

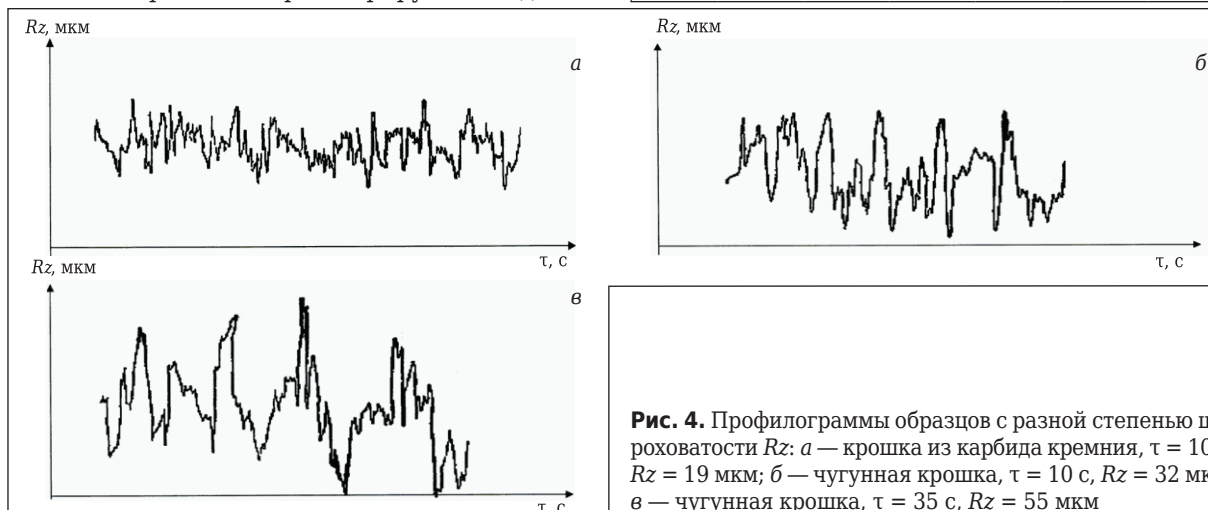


Рис. 4. Профилограммы образцов с разной степенью шероховатости Rz : а — крошка из карбида кремния, $\tau = 10$ с, $Rz = 19$ мкм; б — чугунная крошка, $\tau = 10$ с, $Rz = 32$ мкм; в — чугунная крошка, $\tau = 35$ с, $Rz = 55$ мкм

шается с увеличением τ (см. рис. 6). Видно, что при использовании чугунной крошки значение n изменяется в 1,8 раза интенсивнее, чем при обработке крошкой из карбида кремния. При этом после 30 с обработки крошкой из карбида кремния значение n выходит на некоторый постоянный уровень, чего не наблюдается при обработке чугунной крошкой.

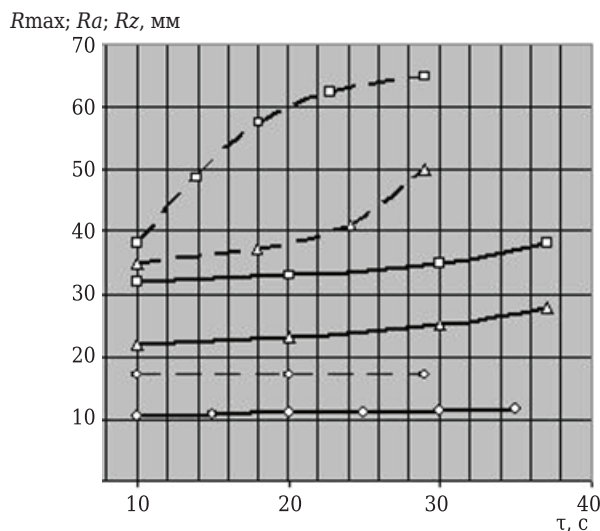


Рис. 5. Зависимости Rz поверхности от длительности струйно-абразивной обработки τ и вида обрабатываемого материала: $\bigcirc$ — Ra ; $\triangle$ — Rz ; $\square$ — R_{max} ; ---- — чугунная крошка; — — крошка из карбида кремния

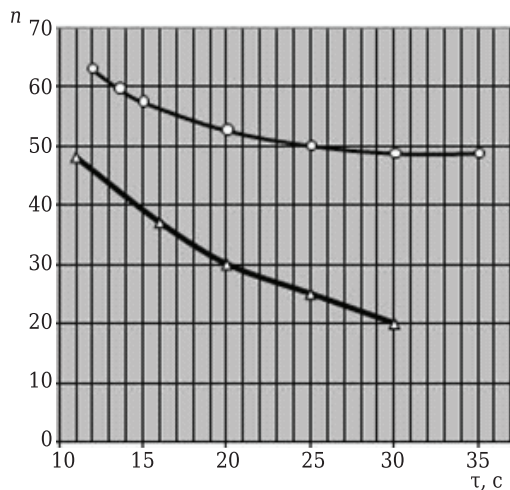


Рис. 6. Зависимость n на длине 2,5 мм от τ и вида обрабатываемого материала: $\bigcirc$ — чугунная крошка; $\triangle$ — крошка из карбида кремния

Для удобства сравнения развитости профиля, получаемого при обработке поверхностей разной площади, введем коэффициент интенсивности обработки K , величина которого характеризует длительность обработки единицы площади рабочей поверхности.

Одновременно с сокращением n при увеличении τ шероховатость поверхности возрастает, что характеризуется повышением степени пластической деформации обрабатываемой поверхности. При значительном увеличении τ , когда K более 60 с, кривые зависимости Rz от τ имеют минимальные значения (см. рис. 4). Это можно объяснить появлением наклепа и уносом материала с поверхности при длительном воздействии струи абразива.

Фактическая площадь поверхности образца после струйно-абразивной обработки, которая, как мы предполагаем, более обоснованно характеризуется функцией $Rz \cdot n$, монотонно возрастает с увеличением τ и размера абразивных зерен. При этом темп ее роста при использовании чугунной крошки гораздо ниже, чем при использовании крошки из карбида кремния (рис. 7).

Из табл. 5 следует, что это обусловлено резким сокращением n (более чем в 1,5 раза) при определенном росте высоты микровыступов. При более высоких значениях K произойдет некоторая стабилизация значений функции $Rz \cdot n$, т. е. стабилизация фактической площади поверхности под напыление.

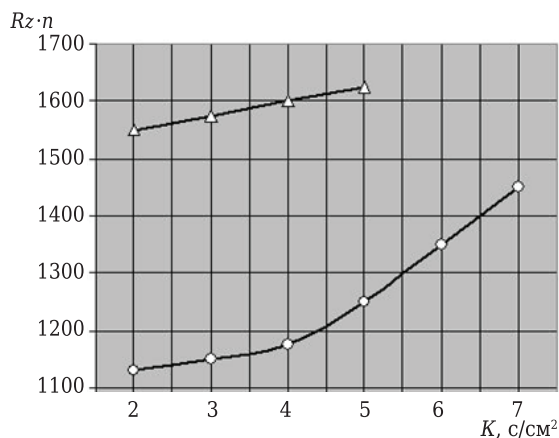


Рис. 7. Зависимость фактической площади поверхности под напыление $Rz \cdot n$ от K : $\triangle$ — чугунная крошка; $\bigcirc$ — крошка из карбида кремния

Таблица 5. Характеристики шероховатости поверхности образцов из конструкционной стали в зависимости от режимов струйно-абразивной обработки

Материал абразива	τ , с	Ra , мкм	R_{max} , мкм	Rz , мкм	n	$Rz \cdot n$
Крошка из карбида кремния	10	4,7	23	19	59	1103
	25	5,4	29	22	52	1165
	40	5,9	34	29	50	1460
Чугунная крошка	10	8,8	35	32	48	1535
	20	9,2	56	37	34	1258
	30	9,5	71	51	31	1593

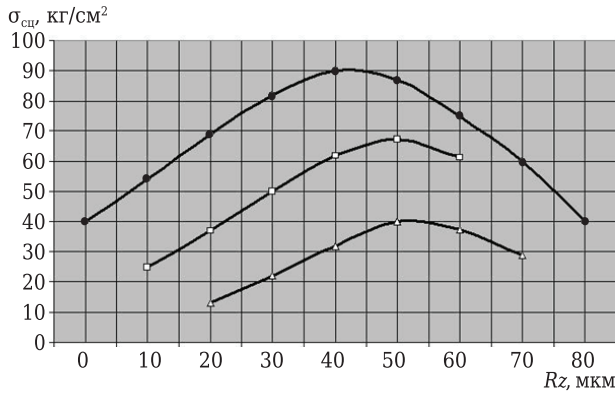


Рис. 8. Зависимость прочности сцепления $\sigma_{сц}$ покрытия с основой от Rz поверхности (Ст3): ● — сплав на основе хрома; □ — сплав на основе никеля; △ — сплав на основе железа

Такой подход позволяет объяснить экстремальный характер зависимостей, показанных на рис. 8. Возрастание прочности сцепления происходит в результате увеличения площади фактического контакта поверхности образца с покрытием и, следовательно, от числа единичных связей между ними. С увеличением τ наряду с ростом Rz поверхности образцов число пиков n на поверхности сокращается, при этом на данном этапе величина второй функции (n) превалирует над первой (Rz), что приводит к сокращению фактической площади поверхности. Отсюда следует наблюдаемое снижение прочности сцепления покрытия с основой.

При абразивно-струйной обработке струя абразива направляется нормально к обрабатываемой поверхности, что дает минимум съема материала детали [27] и позволяет не принимать во внимание изменение размеров детали. При изменении угла обработки утонение настолько возрастает, что пренебрежение учетом съема материала детали приводит к браку. Поэтому при малых углах обработки необходимо давать припуск на обработку.

На рис. 9, а показана кривая съема металла от τ при угле наклона струи абразива к поверхности образца $\varphi = 45^\circ$. При обработке более 40 с резко возрастает интенсивность съема металла, что можно объяснить возникновением наклепа поверхности образцов. Это ведет к уменьшению вязкости, и поверхность становится более хрупкой и податливой для съема металла. Следовательно, обработку единицы площади детали целесообразно вести не более 40 с.

Результаты исследований влияния угла струйной обработки отчетливо показывают (рис. 9, б), что при углах от 35 до 45° наблюдается заметное снижение съема материала. Это дает возможность рекомендовать их при обработке на малых углах. При уменьшении угла струйной обработки пятно обработки вытягивается и приобретает форму эллипса. Площадь пятна обработки при этом увеличивается.

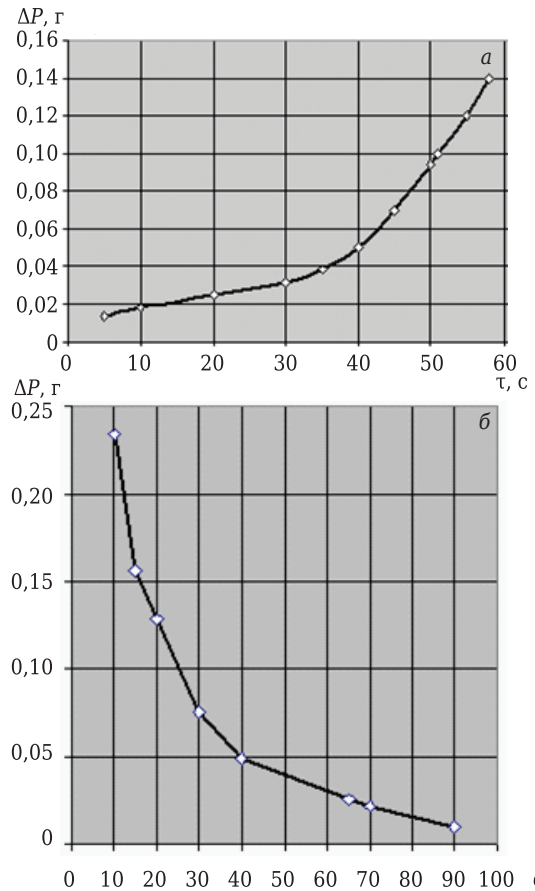


Рис. 9. Зависимости съема металла ΔP от τ при $\varphi = 45^\circ$ (а) и от угла струйной обработки φ при $\tau = 60$ с (б)

На рис. 10 показана зависимость средней величины съема металла по поверхности пятна обработки детали с единицы площади $\Delta P/F$ от угла φ . Наиболее опасным с точки зрения съема металла является угол $\varphi = 65^\circ$, при котором съем металла по сравнению с углом $\varphi = 90^\circ$ возрастает более чем в 8 раз.

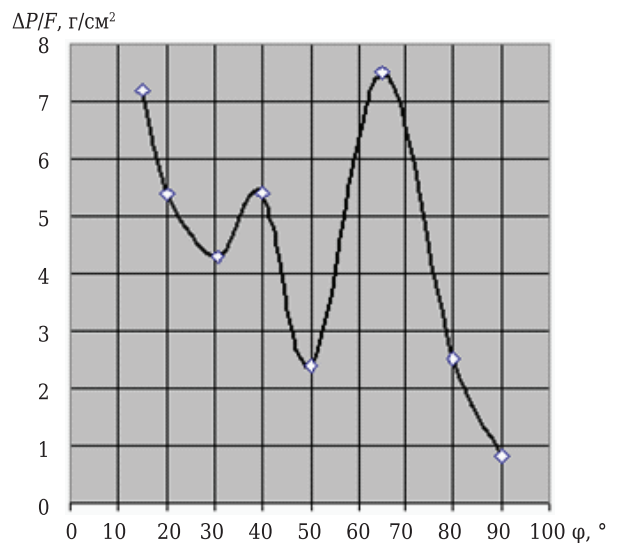


Рис. 10. Зависимость $\Delta P/F$ от угла φ

Следует отметить, что нанесение покрытия следует производить непосредственно после обработки поверхности. При этом перерыв по возможности должен быть минимальным и не превышать 2 ч, так как длительная выдержка активированной поверхности сопровождается активным ее окислением, снижающим прочность сцепления покрытия с основой.

Для основы и разных типов покрытий необходимо экспериментально выбирать и оптимизировать способ подготовки поверхности для напыления. Кроме того, при оценке влияния характеристик поверхности на прочность сцепления с покрытием следует учитывать возможные механизмы сцепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют заключить, что для подготовки

поверхности детали под плазменное напыление рациональным способом является абразивная обработка термоабразивным инструментом.

Для получения прочно сцепленных покрытий при упрочнении и восстановлении изношенных деталей плазменным напылением рекомендованы следующие режимы абразивно-струйной обработки поверхностей: дистанция от сопла струйного пистолета до обрабатываемой поверхности 35–40 мм, продолжительность обработки единицы площади поверхности детали не более 40 с, угол наклона струйного пистолета по отношению к поверхности детали 40–45°.

Для достижения оптимальных параметров основы (R_z , L , η) струйно-абразивную обработку материалов твердостью 170–230 *HV* необходимо проводить абразивными частицами диаметром до 0,7 мм, а материалов твердостью 350–450 *HV* — частицами диаметром 0,7–1,2 мм.

Библиографический список

1. **Хасуи, А.** Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мори-гаки ; под ред. И. С. Степана, Н. Г. Шестеркина ; пер. с яп. В. Н. Попова. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.
2. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1987. — 192 с.
3. **Кудинов, В. В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. — М. : Металлургия, 1992. — 432 с.
4. **Лашенко, Г. И.** Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лашенко. — Киев : Экотехнология, 2003. — 64 с.
5. **Соснин, Н. А.** Плазменные технологии : руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 406 с.
6. **Калита, В. И.** Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В. И. Калита, Д. И. Комлев. — М. : Лидер М, 2008. — 388 с.
7. **Кравченко, И. Н.** Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, С. В. Карцев [и др.]. — М. : ИНФРА-М, 2021. — 202 с. DOI: 10.12737/1083289.
8. **Пузряков, А. Ф.** Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности / А. Ф. Пузряков, И. Н. Кравченко, И. К. Соколов [и др.]. — М. : Эко-Пресс, 2013. — 300 с.
9. **Балдаев, Л. Х.** Газотермическое напыление / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.]. — 2-е изд. — М. : Старая Басманная, 2015. — 539 с.
10. **Ковтунов, А. И.** Влияние температуры подогрева основного металла на прочность сцепления покрытия при газопламенном напылении / А. И. Ковтунов, И. С. Нестеренко, Ю. Ю. Юриков // Инновационные внедрения в области технических наук : сб. науч. тр. — М. : Эвенсис, 2018. — С. 12–15.
11. **Шарая, О. А.** Инженерия поверхности упрочненных деталей / О. А. Шарая, А. Г. Пастухов, И. Н.

- Кравченко. — М. : ИНФРА-М, 2020. — 124 с. DOI: 10.12737/1031713.
12. **Проволоцкий, А. Е.** Струйно-абразивная обработка деталей машин / А. Е. Проволоцкий. — Киев : Техника, 1989. — 279 с.
13. **Проволоцкий, А. Е.** Механизация отделки деталей с использованием струйно-абразивной обработки / А. Е. Проволоцкий // Механизация и автоматизация производства. — 1990. — № 5. — С. 7–10.
14. **Баранов, М. Н.** Прочностные показатели обрабатываемого материала при струйно-абразивной обработке / М. Н. Баранов, М. Г. Исупов, Г. П. Исупов // Вестник машиностроения. — 2009. — № 5. — С. 62–66.
15. **Андилахай, А. А.** Теоретические и экспериментальные исследования динамики струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай, Ф. В. Новиков // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 20. — С. 206–212.
16. **Захаров, О. В.** Струйно-абразивная обработка крупногабаритных деталей / О. В. Захаров, Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2016. — № 3. — С. 79–81.
17. **Андилахай, А. А.** Теоретический анализ параметров струйно-абразивной обработки деталей / А. А. Андилахай // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ». — 2009. — № 1. — С. 15–22.
18. **Новиков, Ф. В.** Теоретический анализ параметров силовой напряженности струйно-абразивной обработки / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Науч. тр. Донецк. нац. техн. ун-та. Сер. Машиностроение и машиноведение. — 2010. — Вып. 7 (166). — С. 46–53.
19. **Ширшов, В. С.** Исследование влияния параметров подготовки поверхности металлоконструкций на прочность сцепления покрытия с основой / В. С. Ширшов // Сварочное производство. — 2012. — № 7. — С. 23–26.
20. **Новиков, Ф. В.** Определение параметров силовой напряженности процессов механической обработки деталей из цветных металлов / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай, О. С. Кленов // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. — 2013. — № 26. — С. 174–181.

21. Пат. 92238 РФ, МПК Н 01 J 1/02. Плазматрон для плазменной наплавки / Карцев С. В. — № 2009123241/22 ; заявл. 18.06.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.
 22. Пат. 2737909 РФ, МПК В24С 1/00. Способ подготовки поверхности для нанесения износостойких покрытий / Карцев С. В., Ерофеев М. Н., Карцева И. В., Кравченко И. Н. — № 2020121911 ; заявл. 02.07.2020 ; опубл. 04.12.2020, Бюл. № 34.
 23. *Muneer, S. M.* Wear characterization and microstructure evaluation of silicon carbide based nanocomposite coating using plasma spraying / *S. M. Muneer, M. Nadeera* // *Materials Today : Proceedings*. — 2018. — Vol. 5, № 11, part 3. — P. 23834–23843. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.175.
 24. Пузряков, А. Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А. Ф. Пузряков. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 360 с.
 25. Кравченко, И. Н. Особенности подготовки поверхности деталей для нанесения износостойких плазменных покрытий / И. Н. Кравченко, Т. А. Чеха, А. О. Федоров, А. Ф. Слизов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2020. — № 2. — С. 27–32. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-2-27-32.
 26. Кравченко, И. Н. Очистка поверхностей деталей при их восстановлении / И. Н. Кравченко, А. Ф. Слизов, В. М. Корнеев, Ю. В. Катаев // Сельский механизатор. — 2019. — № 8. — С. 38–40.
 27. Исупов, М. Г. Прогнозирование съема металла при струйно-абразивной обработке / М. Г. Исупов // Изв. вузов. Машиностроение. — 2004. — № 6. — С. 37–46.
 28. Исупов, М. Г. Расчет съема металла при струйно-абразивной обработке / М. Г. Исупов // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. — 2005. — Т. 5, № 1 (23). — С. 84–88.
 29. Машиностроение. Энциклопедия / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов [и др.] ; под общ. ред. В. В. Клюева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 464 с.
 30. Строганов, А. И. Влияние шероховатости стальной подложки на прочность сцепления с плазменным покрытием / А. И. Строганов, А. С. Дробышевский, А. Б. Гоц // Порошковая металлургия. — 1982. — № 10. — С. 91–95.
 31. Красный, В. А. Оценка влияния шероховатости поверхности на повышение прочности сцепления износостойкого напыляемого покрытия / В. А. Красный, В. В. Максarov // Металлообработка. — 2014. — № 5 (83). — С. 47–51.
 32. *Kravchenko, I. N.* Use of hot hydrocarbons in a plasma installation for application of wear-resistant coatings / *I. N. Kravchenko, S. V. Kartsev, Yu. A. Kuznetsov* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2020. — Vol. 61, № 4. — P. 399–403. DOI: 10.1007/s11148-020-00492-2.
- Кравченко, И. Н.** Применение горячих углеводородов для плазменной установки при нанесении износостойких покрытий / И. Н. Кравченко, С. В. Карцев, Ю. А. Кузнецов // Новые огнеупоры. — 2020. — № 7. — С. 51–56. ■

Получено 12.01.21

© И. Н. Кравченко, С. В. Карцев, С. А. Величко,
Ю. А. Кузнецов, А. Г. Пастухов, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

NANOTECH 2021 --- Всемирный конгресс по нанотехнологиям и материаловедению

26—27 июля 2021 г.,

Дубай, ОАЭ



Тематика конгресса:

- Передовые наноматериалы, наночастицы, материаловедение и нанотехнологии
- Молекулярные нанотехнологии и передовые биоматериалы и биоустройства
- 2D- и 3D-материалы, «умные материалы»
- Полимеры и аналитическая химия
- Применение нанотехнологий в науке и в разных отраслях, в защите окружающей среды
- Наноструктуры, наноустройства и наносенсоры
- Материаловедение и химия материалов, нанофизика, наука и инженерия полимеров
- Нанотехнологический риск и безопасность
- Материалы для экологически чистых технологий и передовой керамики, композитные материалы

www.nanotechnologyexpo.conferenceseries.com