

УДК 621.793.74

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ<sup>1</sup>

©2024 г. В.И. Калита, Д.И. Комлев, А.А. Радюк, А.Б. Михайлова, К.Ю. Демин, Б.А. Румянцев

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
(ИМЕТ РАН), Москва  
E-mail: vkalita@imet.ac.ru

Поступила в редакцию 19 октября 2023 г.

После доработки 16 марта 2024 г. принята к публикации 24 апреля 2024 г.

Исследованы изменения микроструктуры и микротвердости плазменного покрытия из аустенитной стали Fe-23,7Cr-11,9Mn-3,2Ni-0,57C-0,52Si на цилиндрической стальной подложке после фрикционной обработки (ФО) двумя инструментами из быстрорежущей стали P18M5 при давлении 30 МПа, сдвиговых напряжениях 4 МПа и температуре до 1225 °С. Операцию ФО выполнили при вращении образца с покрытием и дополнительном перемещении инструментов вдоль образующей подложки. Мощность процесса ФО характеризуется сдвигающим усилием инструментов на покрытие и линейной скоростью подложки с покрытием при ее вращении. Максимальная температура покрытия определяется отношением выполненной работы к обработанной площади покрытия. При повышенном термосиловом воздействии инструментов на покрытие и на его границу с подложкой в результате пластической деформации формируются полосы, разрушающие исходную структуру покрытия в состоянии после напыления, с дроблением оксидов на поверхности напыленных частиц. Окисление поверхности покрытия при ФО с одновременным его деформированием приводит к формированию слоев, в которых содержится до 29 об.% равномерно распределенных оксидов округлой формы. Микротвердость покрытия после ФО повышается с 2,95 до 6,1 ГПа в результате уплотнения материала покрытия и сваривания напыленных частиц между собой.

*Ключевые слова:* плазменное покрытие; цилиндрическая подложка; фрикционная обработка; аустенитная сталь FeCrMnNiCSi; мощность процесса; микроструктура; микротвердость.

Покрытия, создаваемые методом плазменного напыления, формируются из дискообразных частиц толщиной 1–10 мкм. Физический контакт между такими частицами не достигает 100%, что определяет макро- и микропористость покрытия. Прочная связь между напыленными частицами в сравнении с монолитным материалом реализуется только на 22% площади их соприкосновения между собой даже при небольшой пористости (6,8%). Количественно это установлено по экспериментальным значениям модуля упругости, которые сравнивали с модулем упругости монолитного материала [1]. Оксиды, образующиеся на поверхности частиц, в ходе

их деформации на подложке также уменьшают когезию покрытия. После напыления плазменное покрытие попадает в класс материалов, относящийся к разделу порошковой металлургии, что определяет способы повышения прочностных свойств этих покрытий. Проблема повышения механических свойств газотермических покрытий в настоящее время является главной из нерешенных задач. В последнее десятилетие для повышения механических свойств покрытий на плоских подложках исследователи успешно применяют фрикционную обработку (ФО). В этом случае плоская подложка с покрытием обрабатывается торцом цилиндрического инструмента при его вращении и линейном перемещении вдоль покрытия. Систематизацией данных исследований получены следующие параметры ФО и их численные

<sup>1</sup>Работа выполнена в рамках инициативной темы исследований ИМЕТ РАН 075-01176-23-00.

средние значения для инструмента: число оборотов  $1000 \text{ мин}^{-1}$ ; скорость линейного перемещения вдоль покрытия  $200 \text{ мм/мин}$ ; время действия инструмента над участком покрытия  $16 \text{ с}$ ; длина пути над каждой точкой покрытия  $7 \text{ м}$ ; линейная скорость (на торце инструмента)  $800 \text{ мм/с}$ ; диаметр торца инструмента  $20 \text{ мм}$ ; давление инструмента на покрытие  $100 \text{ МПа}$  [2—6]. Все эти исследования ФО выполнены для покрытий на плоских подложках, в то же время известно, что  $50\%$  покрытий, для которых требуется упрочнение, напыляются на цилиндрические подложки. Предварительные эксперименты показали, что схемы ФО на плоских поверхностях не могут быть реализованы на цилиндрических изделиях.

Наша работа выполнена с целью исследования структуры и микротвердости плазменного покрытия из аустенитной стали на цилиндрической поверхности подложки после ФО, определения оптимальных значений параметров ФО и установления их взаимосвязи.

**Исходные параметры:**  $h_0$  — толщина покрытия после напыления;  $B_p^\Sigma$  — ширина трека;  $d_p$  — диаметр подложки;  $\sigma_t$  — нормальное удельное давление инструментов на покрытие;  $S_t$  — площадь двух торцов инструментов;  $v_1$  — линейная скорость образца подложки с покрытием при вращении;  $v_t$  — линейная скорость перемещения инструментов вдоль образующей цилиндрической подложки. **Параметры для расчета:**  $P_t$  — усилие от двух инструментов на покрытие,  $P_t = \sigma_t S_t$ ;  $t$  — длительность ФО,  $t = B_p^\Sigma / v_t$ ;  $S_p^\Sigma$  — площадь трека. **Экспериментальные параметры:**  $F_t$  — усилие сдвига двух инструментов на покрытие;  $T_p$  — температура поверхности покрытия;  $T_t$  — температура торцов инструментов;  $n$  — число проходов. **Расчетные параметры:**  $\mu$  — коэффициент трения между инструментами и покрытием при ФО,  $\mu = F_t / P_t$ ;  $\tau$  — напряжение сдвига от инструментов на покрытие,  $\tau = F_t / S_t$ ;  $N$  — мощность ФО,  $N = F_t v_1$ ;  $A$  — работа, выполненная на треке за время  $t$ :  $A = Nt$ ;  $A / S_p^\Sigma$  — погонная энергия ФО;  $\eta$  — коэффициент аккумуляции теплоты в покрытии. **Параметры для описания ФО:**  $\sigma_{02(p)}$  — предел текучести материала покрытия;  $\varepsilon_p$  — локальная степень деформации материала покрытия;  $\sigma_{02(t)}$  — предел текучести материала торцов инструмента;  $\varepsilon_t$  — локальная степень деформации торца инструмента;  $Ox_p$  — оксид, сформированный на

поверхности покрытия;  $Ox_t$  — оксид, сформированный на поверхности инструмента.

**Материалы и методика исследования.** Для напыления основного слоя покрытия использовали порошок фракции  $20\text{—}71 \text{ мкм}$  стали  $65\text{X}25\text{Г}13\text{Н}3$  (состав (мас.%)  $\text{Fe-}23,7\text{Cr-}11,9\text{Mn-}3,2\text{Ni-}0,57\text{C-}0,52\text{Si}$ ), полученный распылением расплава (ООО Полема, г. Тула). Стальное покрытие создавали напылением на универсальной плазменной установке УПУ-3д Ржевского завода Электромеханика. Использовали плазмотрон ПП-25, плазмообразующий газ  $\text{Ar-N}$  с общим расходом  $32 \text{ л/мин}$ , дуговой разряд при силе тока  $350 \text{ А}$  и напряжении  $50 \text{ В}$ . Дистанция напыления  $H = 170 \text{ мм}$ . Дополнительно к основному слою покрытия на этой установке напыляли два слоя никелевого покрытия: один на подложку (подслой), а другой на поверхность основного покрытия из стали  $65\text{X}25\text{Г}13\text{Н}3$ . Для напыления никеля использовали порошок ПНЭ-1, содержащий не менее  $99,5 \text{ мас.}\% \text{ Ni}$  (ГОСТ 9722—97, фирма «Норильский никель», размер частиц  $40\text{—}56 \text{ мкм}$ ). Характеристики режимов напыления: плазмообразующий газ  $\text{Ar-N}$  с общим расходом  $32 \text{ л/мин}$ , дуговой разряд в плазмотроне при силе тока  $350 \text{ А}$  и напряжении  $45 \text{ В}$ . Дистанция напыления  $H = 170 \text{ мм}$ . К плазмотрону пристыкована насадка для защиты напыляемых частиц от атмосферы воздуха и обеспечения более эффективного их нагрева в плазменной струе [7].

Покрытие напыляли на цилиндрическую подложку из стали  $45$  диаметром  $30$  и длиной  $300 \text{ мм}$ . Подложку перед напылением обрабатывали оксидом алюминия со средним размером частиц  $750 \text{ мкм}$ . Подложка вращалась со скоростью  $250 \text{ мин}^{-1}$  и перемещалась относительно плазмотрона с линейной скоростью  $16 \text{ мм/с}$ . Процесс ФО покрытия осуществляли на токарном станке  $1\text{E}61\text{ПМ}$ , который оснащен приспособлением для механического воздействия на покрытие двух инструментов из стали  $\text{P}18\text{M}5$ . Контактная поверхность инструментов имела форму поверхности покрытия, размеры торцов  $7 \times 11 \text{ мм}$ . Для компенсации нагрузки на образец инструменты располагали один напротив другого, их перемещение к покрытию обеспечивалось пневматическими цилиндрами.

В предварительных экспериментах по ФО никелевого покрытия установлен следующий

оптимальный режим: вращение подложки с покрытием со скоростью 900 мин<sup>-1</sup>; давление инструментов на покрытие 30 МПа; длительность обработки 24 с. При таком режиме достигается максимальная температура поверхности покрытия 1220 °С. Очевидно, что ФО, имеющая практическое значение, должна выполняться с перемещением инструментов вдоль образующей цилиндрической подложки. Была рассчитана скорость перемещения инструментов (0,24 мм/с), при которой максимальная длительность воздействия инструментов в центральной части трека близка к значению 24 с. Реальная скорость вращения подложки относительно инструментов во время ФО была в пределах 877—882 мин<sup>-1</sup> со средним значением линейной скорости образца с покрытием при вращении  $v_1 = 1,38$  м/с. При расчете сдвигающего усилия инструментов на покрытие  $F_t$  исходили из величины момента сил  $M = F_t r$ , где  $r$  — радиус подложки. Момент сил рассчитывали с использованием разности экспериментальных значений силы тока в цепи двигателя токарного станка при воздействии инструментов на покрытие и при отсутствии воздействия (далее по тексту: при нагрузке инструментов и без нагрузки на покрытие). Необходимое давление  $p$  в пневматических цилиндрах рассчитывали, учитывая усилия двух инструментов на покрытие ( $P_t = \sigma_t S_t$ ) и площадь  $S$  цилиндров, т.е.  $p = P_t / 2S$ . Отношение  $F_t / P_t$  в первом приближении дает значение коэффициента трения  $\mu$  при ФО, который в данных экспериментах повышался с увеличением давления инструментов на покрытие в пределах 0,042—0,133. Используя формулы, приведенные в расчетных параметрах, вычисляли суммарную мощность  $N$  двух инструментов при ФО и работу  $A$  за время эксперимента. Максимальное значение температуры покрытия зависит от отношения выполненной работы к площади трека:  $A / S_p^{\Sigma}$ . Коэффициент аккумуляции теплоты в покрытии рассчитывали как отношение:  $\eta = Q / A$ , где  $Q$  — теплота, аккумулированная покрытием,  $Q = cm\Delta T$  (здесь  $c$  — теплоемкость материала покрытия;  $m$  — масса покрытия;  $\Delta T$  — увеличение температуры покрытия при ФО). Поверхностный нагрев покрытия приводит к потерям тепловой энергии в инструменты, подложку и окружающее пространство. Сдвиговые напряжения от инструментов на покрытие рассчитывали по

формуле:  $\tau = F_t / S_t$  (здесь  $S_t$  — площадь двух инструментов).

Покрытия для треков 0—5 и 8 напыляли на гладкую поверхность подложки, треки 6 и 7 — на резьбовую поверхность с углом при вершине 120° и номинальной глубиной соответственно 200 и 400 мкм (экспериментальные значения соответственно 184 и 371 мкм). Предполагали, что резьбовой профиль подложки может в ряде случаев увеличить сдвиговую прочность покрытия относительно подложки. Длительность напыления основного покрытия рассчитывали для толщины покрытия 100 мкм в монолитном состоянии на плоской поверхности подложки и 200 мкм на резьбовой поверхности. Расчетная толщина никелевых слоев — 14 мкм. Общая экспериментальная толщина покрытия после напыления на гладкой поверхности подложки была 175 мкм, на подложке с резьбой — до 240 мкм. Для экономии ресурсов ограничивали ширину треков значением 20 мм, в этом случае длительность пребывания инструмента над покрытием можно описать в виде трапеции, боковые стороны которой начинаются и заканчиваются нулевым временем воздействия инструмента на покрытие, время воздействия инструментов на верхней полке трапеции постоянно и равно 29 с, что соответствует ~5 мм ширины центральной части трека. В предыдущем исследовании установлено, что качество поверхности покрытий при ФО повышается при предварительной приработке инструментов на покрытие, в настоящем исследовании такую приработку выполнили на треке 1 (табл. 1). При такой приработке поверхность торцов инструментов окисляется, что предотвращает адгезионное взаимодействие инструмента с покрытиями на рабочих треках. Обработку треков 0 и 2 выполнили по базовому режиму за один проход ( $n = 1$ ). Предполагали, что ФО треков можно делать в несколько проходов, в том числе повышая давление инструментов при каждом последующем проходе (треки 3—5). На дополнительном треке 8 процесс ФО выполнили новыми инструментами, чтобы уменьшить влияние износа инструментов на перемещение части покрытия и подложки в конечную часть трека и формирование там буртика. Температуру покрытия измеряли пирометром мод. Кельвин-400/1600 ЛЦСД с фокусным расстоянием 600 мм с размером зоны

замера 3 мм (производство ООО Тимол, Россия). Лазерный указатель пирометра ориентировали на покрытие с координатой на уровне задней поперечной кромки инструмента (фиг. 1, кромка К4). Содержание С, О и N (мас.%) определили на приборах CS-600 и ТС-600 фирмы LECO: в порошке для напыления С 0,488, О 0,053, N 0,03; в покрыти

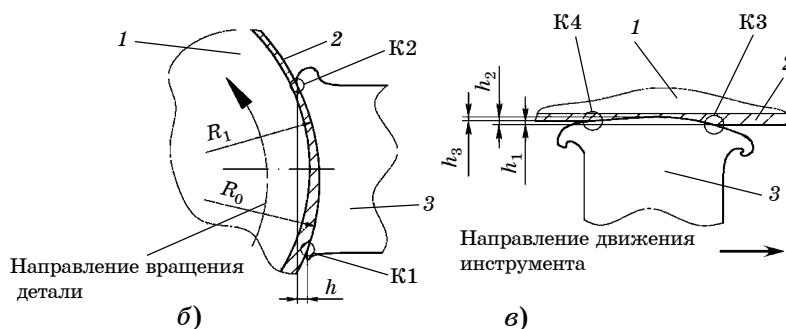
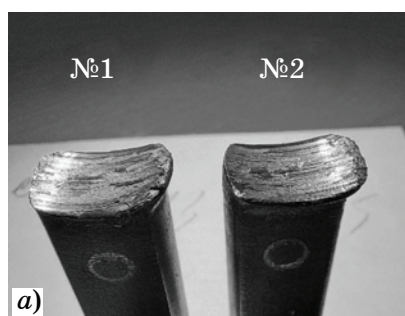
тии в состоянии после напыления С 0,429, О 0,825, N 0,09. При таком содержании кислорода в покрытии расчетное содержание оксида  $Fe_3O_4$  в нем составит 3 мас.%. Макро- и микроструктуру покрытия анализировали оптической микроскопией на микроскопе Jenavert на шлифах, перпендикулярных подложке.

Таблица 1

Параметры ФО и характеристики покрытий из стали 65Х25Г13Н3

Трек	$n$	$\sigma$ , МПа	$t$ , с	$h_0$	$B_p^\Sigma$ , мм	$\mu$	$N$ , кВт	$A$ , кДж	$A/B_p^\Sigma$ , кДж/мм <sup>2</sup>	$T$ , °С	$\eta$ , %	$\tau$ , МПа
0	1	30	70	175	20,4	0,094	0,63	44	0,027	1056	1,7	2,79
1	5	3	50			0,042	0,07	3,5	0,003	118		0,30
		7	55			0,083	0,14	7,7	0,006	190		0,62
		15	52	175	17,8	0,073	0,24	12,7	0,011	373		1,08
		30	52			0,105	0,70	36,3	0,031	638		3,11
		30	51			0,115	0,77	39,2	0,034	980	1,2	3,42
2	1	30	62	175	15,5	0,142	0,94	58,5	0,041	1189	1,5	4,23
3	2	7	60			0,145	0,25	14,7	0,011	387		1,08
		30	55	175	15,5	0,094	0,63	34,6	0,027	1056	0,9	2,79
4	2	15	71			0,104	0,35	24,8	0,015	668		1,55
		30	48	175	18,3	0,105	0,7	33,5	0,031	1093	1	3,11
5	3	7	62			0,166	0,28	17,3	0,012	416		1,24
		30	61	175	21	0,115	0,77	46,9	0,034	1225	—	3,42
		30	64			0,110	0,73	47	0,032	910		3,27
6	1	30	65	245	19,3	0,110	0,73	47,7	0,032	1116	2,4	3,27
7	1	30	55	235	17,6	0,133	0,87	48	0,038	1123	1,2	3,90
8	1	45	180	175	41	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Треки 0, 6 и 7 обрабатывались с подачей аргона в зону ФО.



Фиг. 1. Инструменты после ФО: а — внешний вид; б — схема сечения в плоскости вращения образца с покрытием; в — схема сечения в плоскости движения инструментов вдоль образующей подложки; 1 — обрабатываемый образец; 2 — покрытие; 3 — инструмент; К1—К4 — кромки

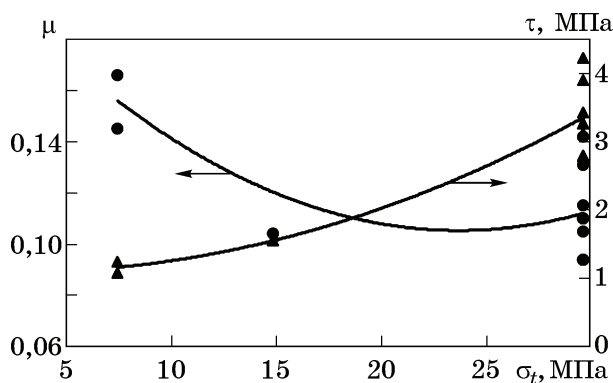


**Результаты исследования.** Внешний вид инструментов после ФО и их сечения в шлифах представлены на фиг. 1, а—в. Торцы инструментов №1 и №2 при взаимодействии с покрытием изменяют свою форму, на кромках появляются участки деформированного материала инструмента, выходящие за пределы исходно торца. По шлифам торцов инструмента установлено наличие слоев с оксидной фазой общей толщиной 236 мкм. Верхний слой состоит из оксида (толщина 166 мкм), следующий слой состоит из смеси оксида и стали инструмента (62 мкм), третий слой — это смесь стали + 30 об.% точечных включений оксидов. Форму и размеры торцов проанализировали на 10 инструментах после ФО (пример см. на фиг. 1). На фиг. 1, б представлена схема сечения инструмента и покрытия в плоскости вращения образца, а на фиг. 1, в — вдоль оси вращения образца. У инструмента четыре кромки, из которых две (К1 и К2) лежат в плоскости вращения образца с покрытием, а две другие (К3 и К4) — в плоскости движения инструментов вдоль образующей подложки. На кромку К1 набегает покрытие при вращении детали, эта кромка изнашивается в большей степени, чем кромка К2. Средняя разница в величине износа кромок К1 и К2  $h = 0,2$  мм. Изменение геометрии торца инструмента, видимо, определяется более низкой температурой покрытия на кромке К1, чем на К2, и следовательно меньшим сопротивлением покрытия при действии на него кромок К2 инструмента. Такая конфигурация торца инструмента позволяет ему с большей эффективностью деформировать покрытие.

Известно, что при ФО покрытий на плоских подложках торец инструмента наклонен под углом до  $3^\circ$  к поверхности покрытия. В отсутствие такого наклона покрытие не уплотняется и не упрочняется. В процессе изнашивания инструмента изначально заданный радиус рабочего торца, равный радиусу образца с покрытием  $R_0 = 15,12$  мм, уменьшается до размера  $R_1 = 14,97$  мм, а положение его центра смещается в направлении, встречном направлению вращения детали, на 0,7 мм. В плоскости движения инструментов (фиг. 1, в) вдоль образующей подложки износ  $h_1$  передней кромки К3 больше, чем кромки К4 (задняя относительно направления поперечного движения). В исходном состоянии по торцу инструмента кромки К3

и К4 соединяются прямой линией, а после ФО эта линия становится выпуклой в сторону покрытия. Можно предположить, что торцы инструмента при ФО при таких изменениях формы имеют меньшее сопротивление при движении по покрытию. Торец инструмента при ФО имеет обтекаемую форму как у корпуса лодки при ее движении по воде. По кромкам торцов инструмента формируются валики вытесненного из рабочей зоны материала инструмента, крайние точки которых находятся на расстоянии от обрабатываемого покрытия и, вероятно, не оказывают на нее значительного силового воздействия в процессе обработки, но снижают сопротивление при движении инструмента по покрытию. Точка, соответствующая передней кромке К3 инструмента в начале обработки, смещается на величину  $h_2 = 0,5$  мм, что заведомо больше, чем глубина вдавливания инструмента в покрытие и толщина самого покрытия. По-видимому, это — следствие деформации инструмента в процессе ФО. Задняя кромка К4 также удалена от центральной части на величину  $h_3 = 0,14$  мм.

При приработке инструментов на треке 1 удельное давление повышали с 7 до 30 МПа, при этом коэффициент трения  $\mu$  увеличивался в 2,7 раза (с 0,042 до 0,115, см. табл. 1). При ФО треков 0, 2—7 с увеличением удельного давления до 30 МПа коэффициент трения  $\mu$  снижается с 0,142 до 0,094, уменьшая темп прироста сдвиговых напряжений между торцами инструмента и покрытием (фиг. 2). На треке 5 проведены три последовательные ФО с перерывами по времени для охлаждения образца между проходами. Первый проход выполнили при давлении 8 МПа, а последующие — при 30 МПа. Отмечена



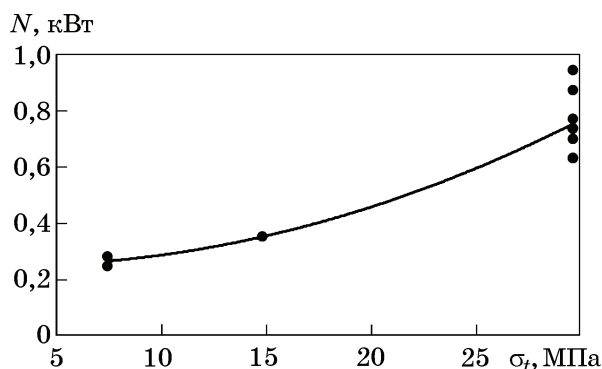
Фиг. 2. Зависимость коэффициента трения  $\mu$  и сдвигового напряжения  $\tau$  от нормального удельного давления  $\sigma_t$  инструментов при ФО

тенденция снижения коэффициента трения на треках 3 и 5 при последующих проходах, что, видимо, связано с выравниванием поверхности покрытия при предыдущих проходах и формированием на поверхности треков оксидных пленок. Повышение нормального давления инструментов увеличивает мощность ФО в результате увеличения напряжений сдвига, действующих в покрытии (фиг. 2 и 3). В данных экспериментах линейная скорость перемещения подложки с покрытием относительно инструментов была постоянной и поэтому не оказывала влияния на изменение мощности ФО.

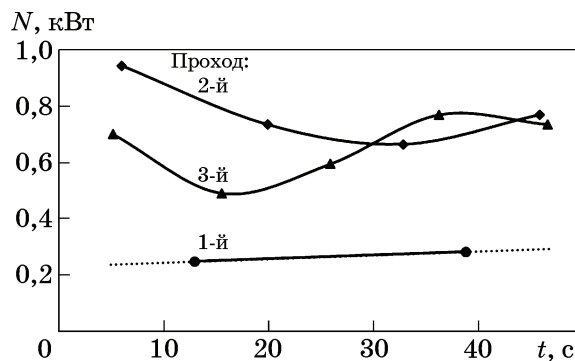
Для трех проходов на треке 5 мощность ФО зависела от давления (фиг. 4) и коэффициента трения, который изменялся во время ФО. При 1-м проходе мощность повышалась незначительно, для 2-го прохода выявлена тенденция снижения мощности, а на 3-м проходе видны колебания ее значений. Малое значение мощности на 1-м проходе определяется низким значением давления инструментов на покрытие (режим приработки инструментов и покрытия). Значения мощности во время 2-го прохода в среднем 0,78 кВт и для 3-го прохода 0,66 кВт. Тенденция снижения мощности ФО на 3-м проходе, видимо, объясняется уменьшением коэффициента трения, хотя его средние значения во время 2-го и 3-го проходов различаются незначительно: соответственно 0,115 и 0,110. При давлении 30 МПа во время 3-го прохода по уже обработанной поверхности величина мощности в начальный момент равна мощности окончания процесса во 2-м проходе; как и для других треков подтверждается влияние состояния поверхности предыдущего прохода. Поэтому максимальная температура покрытия на 3-м проходе (910 °С) была ниже, чем на 2-м проходе (1225 °С, см. табл. 1, трек 5).

Максимальная температура обрабатываемой поверхности на момент окончания ФО зависит от погонной энергии ФО: выполненной работы на площади трека,  $A/S_p^\Sigma$  (фиг. 5). Превышение отношением  $A/S_p^\Sigma$  определенного значения приводит к снижению темпа прироста температуры покрытия, что ранее наблюдали при увеличении скорости вращения инструмента с 1000 до 3000 мин<sup>-1</sup> над плоской подложкой при ФО [4].

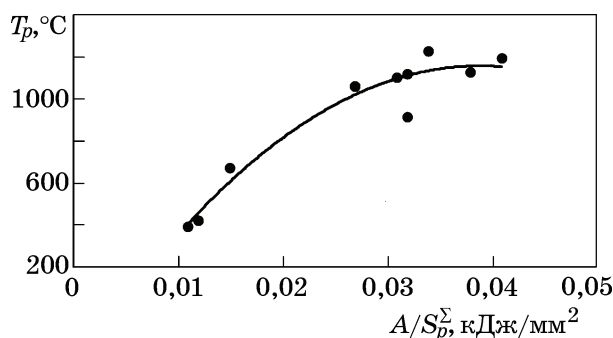
При ФО покрытия фиксируется низкий коэффициент аккумуляции теплоты (0,9—



Фиг. 3. Зависимость мощности ФО ( $N$ ) от нормального давления  $\sigma_t$  инструментов

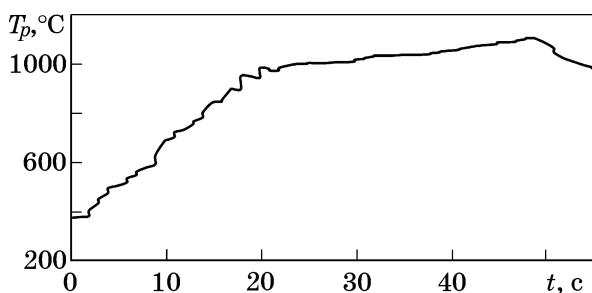


Фиг. 4. Изменение мощности ФО от длительности данного процесса для трех последовательных проходов на треке 5 (удельное давление для 1-, 2- и 3-го проходов соответственно равно 8; 30 и 30 МПа)

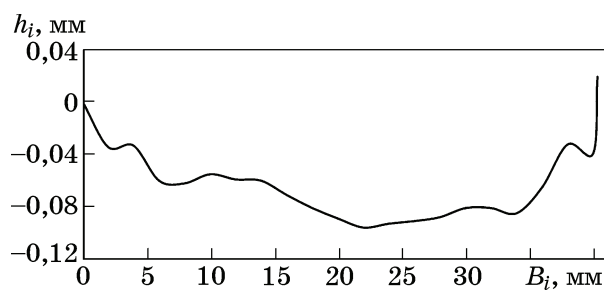


Фиг. 5. Зависимость максимальной температуры покрытия  $T_p$  от величины отношения работы, выполненной при ФО, к площади трека

1,7%), что определяется небольшой массой покрытия по сравнению с совокупной массой подложки, инструментов и массой окружающей атмосферы (см. табл. 1). Следует отметить, что тепловые потоки в подложку необходимы для повышения ее температуры, в этом случае снижается уровень остаточных напряжений в покрытии в результате уменьшения разности температур покрытия и верхних слоев подложки в момент охлаждения образца после ФО. В центральной части треков длительность процесса ФО



Фиг. 6. Изменение температуры покрытия  $T_p$  от длительности эксперимента для покрытия трека 4 при 2-м проходе ФО



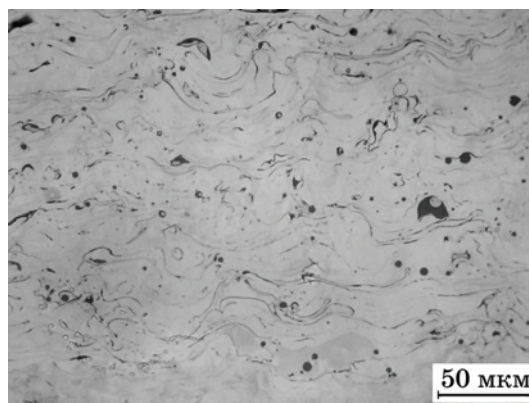
Фиг. 7. Уменьшение толщины покрытия  $h_i$  по ширине трека 8

постоянна, однако при продолжении ФО до ее окончания температура покрытий незначительно повышается (фиг. 6), видимо, из-за дальнейшего повышения температуры торцов инструментов. Толщина покрытия трека 8 после напыления (175 мкм) в ходе ФО уменьшается в среднем на 69 мкм до среднего значения 116 мкм (фиг. 7). Уменьшение толщины покрытий больше в центральной части ширины трека, где значение отношения  $A/S_p^\Sigma$  максимально из-за большей длительности процесса ФО (фиг. 7).

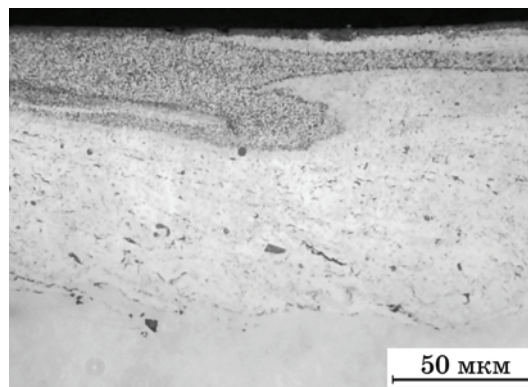
**Микроструктура.** При анализе микроструктуры покрытий после ФО выявлено несколько типов структур. Нулевой тип структуры — это оксид, который сформировался во время ФО на свободной поверхности покрытия в результате окисления прежде всего слоя никеля. Ниже располагается структура первого типа, она формируется при интенсивной ФО, является результатом одновременно протекающих двух процессов: окисления верхнего слоя покрытия и перемешивания продуктов окисления с ниже находящимся материалом. На данном этапе исследований в структуре покрытия не разделяли вновь образующиеся оксиды при ФО и оксиды, которые формировались при плазменном напылении. Микроструктуру первого типа можно описать следующим образом: равномерно распределенные оксиды округлой формы в стальной матрице. Такие структуры относятся к керметам с размером упрочняющих частиц 0,1—10 мкм. Формирование структуры первого типа полезно для повышения износостойкости покрытия благодаря снижению коэффициента трения и увеличению твердости. Ниже слоя с микроструктурой первого типа находится микроструктура второго типа, она отличается от последней меньшей объемной долей оксидной фазы. Микроструктура покрытия после

плазменного напыления обозначена нами как микроструктура третьего типа (фиг. 8).

Длительность пребывания инструментов на отдельных участках трека определяет температуру в этих зонах и степень окисления поверхности. Толщина оксида на поверхности покрытия больше в центральной части трека. В средней части трека зафиксирована деформированная структура с образованием полос деформации в покрытии и на границе с подложкой, углы наклона которых

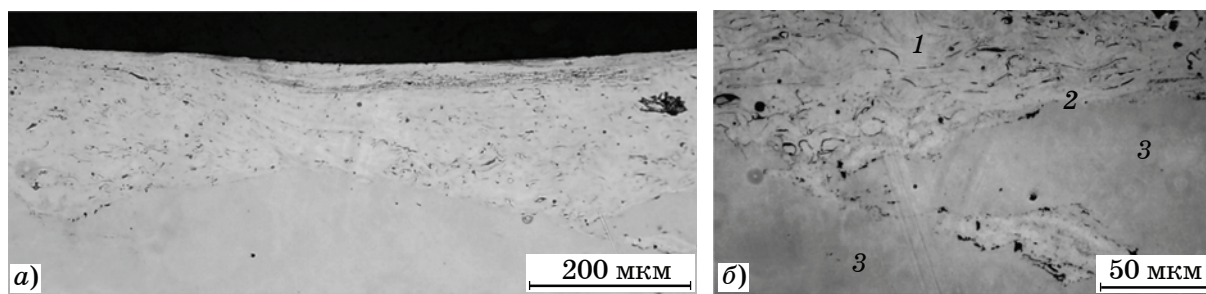


Фиг. 8. Микроструктура в поперечном сечении стального покрытия в состоянии после плазменного напыления

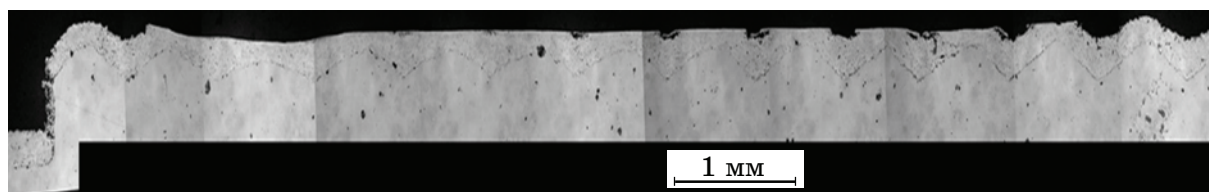


Фиг. 9. Микроструктура покрытия трека 5 после 3-го прохода: полосы деформации в покрытии и на границе с подложкой (она в нижней части снимка). Направление вращения обряда с покрытием слева направо





Фиг. 10. Покрытие трека 6: *a* — макроструктура; *б* — микроструктура; 1 — покрытие; 2 — граница покрытия с подложкой (частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  темного цвета, остатки от абразивной обработки); 3 — подложка



Фиг. 11. Макроструктура трека 7 (движение инструмента справа налево). Свободная поверхность покрытия выравнивается по мере повышения температуры ФО

к границе покрытия с подложкой  $10\text{--}30^\circ$ . Такая структура формируется в результате торможения торцами инструментов верхних слоев покрытия относительно нижележащих (фиг. 9). Вопрос о степени деформации материала покрытия при ФО, видимо, следует считать одним из основных для повышения адгезии и когезии покрытия, поскольку она определяет установление физического контакта между соседними напыленными частицами.

При ФО покрытий на резьбовых профилях подложки установили деформацию покрытия и профиля резьбы на 43,6% для профиля высотой 184 мкм и 51% для профиля высотой 371 мкм. Гребни и впадины резьбы деформируются за счет снижения высоты резьбы, такая осадка — результат уменьшения объемов впадин, вплоть до полного сжатия их стенок в нижней части профиля резьбы (фиг. 10). Макроструктура трека 7 подтверждает деформацию и покрытия, и резьбового профиля (фиг. 11). Большие степени деформации покрытий на резьбовых подложка на этих треках, видимо, определили лучшую проработку покрытия и, как следствие, отсутствие трещин в начале и конце треков в противоположность трекам на гладких подложках. Можно предположить, что резьбовой профиль дополнительно ограничивает действие остаточных напряжений на покрытие, возникающих в покрытии при охлаждении вследствие наличия градиентного распределения температуры между покрытием и подложкой.

**Микротвердость.** Замеренная при нагрузке 0,1 Н (10 гс)<sup>2</sup> микротвердость исходного порошка для напыления (4,39 ГПа) не реализуется в покрытии в состоянии после напыления. Получены данные: 2,80 ГПа при нагрузке на индентор 2 Н (200 гс) и 3,10 ГПа при нагрузке 0,1 Н (10 гс) из-за недостаточной когезии между напыленными частицами, что подтверждается раскрытием границ между частицами около отпечатков. Микротвердость после ФО замеряли на треках 2, 5, 6, 7. Для каждого трека выполнено семь замеров при нагрузке на индентор 0,2 Н (20 гс) и семь замеров при нагрузке 2 Н (200 гс). Результаты приведены в табл. 2. Замеры проводили равномерно по толщине покрытия, поскольку предполагали зависимость твердости от высоты замера по толщине покрытия. Значения микротвердости при нагрузке на индентор 20 гс выше значений микротвердости при нагрузке на индентор 200 гс, средние значения отношения  $H_{200}/H_{20}$  для образцов треков 2, 5, 6 и 7 соответственно равны: 0,89; 0,74; 0,92 и 0,92.

Поскольку тенденции изменения значений микротвердости по высоте покрытия были одинаковы и не зависели от нагрузки на индентор, значения микротвердости при нагрузках 20 и 200 гс складывали, чтобы установить более точную зависимость твердо-

<sup>2</sup>В тексте приведены округленные значения нагрузок на индентор в граммах-силы после их приведения в СИ (пример точного пересчета: 0,098 Н (10 гс), 1,962 Н (200 гс) и т.д.).



Микротвердость стального покрытия после ФО при нагрузках на инденторе 0,2 и 2 Н (соответственно 20 и 200 гс)

Точка замера	Микротвердость, ГПа, на треке											
	2		5		6, верх		6, низ		7, верх		7, низ	
	20 гс	200 гс	20 гс	200 гс	20 гс	200 гс	20 гс	200 гс	20 гс	200 гс	20 гс	200 гс
1	3,56	3,30	7,59	4,17	5,02	4,43	2,56	2,46	4,30	4,73	3,67	3,06
2	5,84	5,30	7,87	5,56	4,74	5,10	5,28	5,15	7,32	5,44	5,13	4,84
3	6,23	5,63	9,54	5,73	5,62	5,38	6,28	5,39	7,87	9,30	5,49	4,57
4	5,94	5,32	6,77	5,77	6,49	5,15	6,66	5,15	5,75	5,32	5,53	3,94
5	7,13	4,97	6,13	5,51	6,60	5,56	6,33	5,76	6,66	5,27	5,02	4,52
6	5,53	4,26	6,77	5,87	5,57	5,56	5,09	5,52	7,94	5,39	2,84	4,44
7	2,34	3,67	4,33	3,27	4,36	2,79	2,07	3,10	4,98	5,52	2,03	2,32
Среднее:	5,22	4,64	7,00	5,13	5,48	4,85	4,90	4,65	6,40	5,85	4,24	3,95

сти от координаты толщины покрытия. Очевидно, что на основной части толщины покрытия значения микротвердости близкие, но следует отметить более высокие ее значения в области третьего замера. Следует также отметить близкие значения микротвердости покрытия для треков 2, 6 и 7: соответственно 4,93; 4,97 и 5,11 ГПа, что объяснимо, поскольку они деформировались при одинаковом давлении 30 МПа и в одном температурном интервале горячей деформации (1116—1189 °С). Значения микротвердости для точек 1 и 7 получены в зонах смешения слоев стали и никеля, поэтому они (значения) ниже, чем в центральной части стального покрытия. Эти значения не учитывались при коррекции значений микротвердости на основной части толщины покрытия из марганцовистой стали на треках 2, 6 и 7. В этом случае средние значения микротвердости равны соответственно 5,21, 5,62, 5,63. Покрытие трека 5 деформировали за три прохода, причем 3-й проход выполнен при температуре 910 °С (теплая деформация), при которой стали аустенитного класса упрочняются за счет повышения плотности структурных дефектов (дислокаций), в этом случае фиксируется и более высокое среднее значение микротвердости (6,1 ГПа).

**Обсуждение результатов.** При ФО покрытий на плоских подложках исследователи в качестве аналога используют сварку трением, для которой основными параметрами процесса являются: давление между соединяемыми деталями; линейная скорость вращения одной из деталей и длительность сварки. Хотя процесс ФО покрытий на плоских подложках частично имеет тот же механизм

воздействия инструмента на покрытие, как при сварке трением, инструмент в виде цилиндрической фрезы выполняет своим торцом локальную пластическую деформацию покрытия, приводящую к повышению температуры до 800—1400 °С [4]. Инструмент при ФО находится над каждой точкой покрытия в среднем в течение 10 с, как и при сварке трением [8]. Вероятно, в процессе ФО слои покрытия по его толщине под торцом инструмента деформируются между собой в разной степени, что приводит к разрушению оксидного слоя на поверхности напыленных частиц, созданию между ними контактов по ювенильным металлическим поверхностям, к сварке напыленных частиц в твердой фазе. Механические свойства покрытий после ФО повышаются, при растяжении у покрытия появляются пластические свойства, исходные газотермические покрытия без ФО разрушаются в упругой области [2, 3].

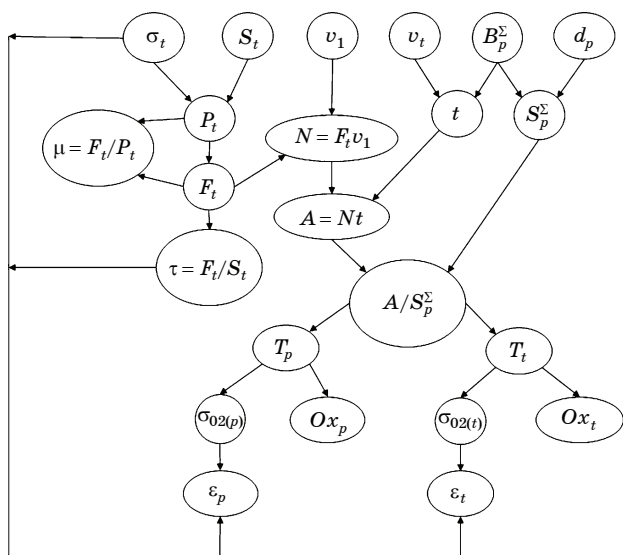
При ФО плазменного покрытия на цилиндрической подложке часть процесса идет, как и при ФО покрытий на плоской подложке. Под действием нормальных напряжений от инструментов на покрытие на цилиндрической подложке при ФО формируются касательные напряжения в результате вращения образца с покрытием через коэффициент трения:  $\tau = \mu\sigma$ . Сдвиговые напряжения повышаются с увеличением напряжений от инструментов с учетом некоторого снижения коэффициента трения в процессе ФО, что установлено ранее и при сварке трением [8] (см. фиг. 2). С учетом этих факторов мощность ФО повышается с увеличением давления инструментов (см. фиг. 3). С увеличением длительности эксперимента возможно

снижение мощности ФО вследствие уменьшения коэффициента трения из-за повышения температуры поверхности покрытия и ее окисления; оксиды имеют более низкий коэффициент трения по сравнению с металлами из-за меньшего адгезионного схватывания (см. фиг. 4). Известно, что при испытаниях на износостойкость выделяют два компонента воздействия контртела на изнашиваемую поверхность: деформационную и адгезионную [9]. Соотношение этих компонентов, а также присутствие оксидов на покрытии и на торцах инструментов определяют текущее значение коэффициента трения при ФО на цилиндрической подложке. Темп повышения максимальной температуры покрытий снижается после достижения определенного уровня приложенной мощности, что ранее наблюдали и при обработке покрытий на плоских подложках при увеличении скорости вращения инструментов [4] (см. фиг. 5).

Отличие ФО покрытия на цилиндрической поверхности заключается в многократном (циклическом) воздействии инструментов при относительно малой длительности их воздействия на покрытие за один оборот подложки — 20% времени оборота. На покрытие действуют одновременно напряжения сжатия (в нашем случае до 30 МПа) и сдвиговые напряжения (до 10 МПа). Во время развития процесса ФО начинается с нагрузки на покрытие парой инструментов. У этой пары температура контактных поверхностей повышается до 1123 °С. В начальный момент ФО даже при средних значениях удельных давлений 30 МПа поверхностный рельеф покрытия, имеющий малую площадь, будет одновременно пластически деформироваться и изнашиваться, поскольку данные давления на порядок выше значений, используемых в испытаниях на износостойкость, и в 3 раза выше линейные скорости (1,38 м/с). При температурах порядка 1000 °С предел текучести материала покрытий на основе железа и никеля ниже удельного давления 30 МПа при ФО [10]. Материал покрытия при этих температурах пластически деформируется, пористость устраняется. Достаточно большая площадь торца инструмента позволяет деформировать покрытие на сжатие нормальными напряжениями от инструмента. Как известно, даже такой материал покрытия с низкой пластичностью, как керамика, при высоких температурах деформируется пластически.

При ФО покрытий на плоских подложках под рабочей поверхностью инструмента покрытие деформируется без доступа кислорода, что увеличивает прочностные свойства покрытия, но процесс сопровождается одной из основных проблем этого способа упрочнения покрытия — изнашиванием инструмента вследствие его адгезионного взаимодействия с покрытием. При ФО покрытия на цилиндрической подложке механизм взаимодействия торца инструмента с покрытием другой: на покрытии при его движении между двумя инструментами формируется оксид. Поверхностный оксид покрытия взаимодействует с материалом торцов инструментов; на них также появляются оксиды. Оксиды покрытия и торцов инструментов — факторы, ограничивающие адгезионное взаимодействие в системе контакта. В отсутствие этих оксидов наблюдали сваривание инструментов и покрытия с последующим разрушением последнего при проведении ФО в инертной среде. Оксидные слои на покрытии и торцах инструментов позволяют многократно деформировать одни слои покрытия относительно других благодаря торможению инструментами верхних слоев покрытия относительно ниже расположенных. Эта деформация обеспечивает разрушение оксидов на поверхности напыленных частиц, сформировавшихся при напылении, и формирование ювенильных поверхностей для сваривания напыленных частиц между собой. Сдвиговые деформации не приводят к исчезновению оксидов, но они способствуют равномерному их распределению внутри покрытия. Керметные материалы, упрочненные оксидами, хорошо работают на износ за счет низких значений коэффициента трения и высокой твердости.

Известно, что при обработке покрытия на плоской подложке плоскость инструмента располагается под углом 1—3° к поверхности покрытия, в отсутствие такого угла покрытие не уплотняется [2]. При таких углах наклона торца инструмента (1—3°) и его диаметре 10 мм передняя кромка инструмента приподнята на 175—524 мкм, что соответствует толщине обрабатываемых покрытий. Такой наклон торца инструмента позволяет пластически деформировать покрытие, а в отсутствие такого наклона покрытие сохраняет исходную пористость [2]. При ФО покрытия на цилиндрической поверхности данный эффект реализуется с изнашиванием



Фиг. 12. Схема взаимодействия параметров при ФО покрытия на цилиндрической подложке

двух передних кромок (К1 и К3 на фиг. 1). В этом случае инструменты также набегают на покрытие под углом и пластически его деформируют. При такой конфигурации торца инструменты пластически деформируют материал покрытия при температурах свыше 1000 °С и значениях удельного давления 30 МПа.

Взаимодействие параметров ФО покрытий на цилиндрической подложке систематизировано на схеме фиг. 12. Исходя из заданной геометрии образцов с покрытиями, из известных данных для ФО покрытий на плоских поверхностях и результатов своих предварительных экспериментов, выбраны значения базовых параметров:  $B_p^\Sigma$ ,  $d_p$ ,  $\sigma_t$ ,  $S_t$ ,  $v_1$ ,  $v_t$  (фиг. 12). Рассчитываются величины  $P_t$ ,  $t$ ,  $S_p^\Sigma$ . Значение  $F_t$  устанавливается экспериментально, что позволяет подсчитать величины  $\mu$ ,  $\tau$ ,  $N$ ,  $A$ ,  $A/S_p^\Sigma$ . Отношение  $A/S_p^\Sigma$  определяет значения температур поверхности покрытия ( $T_p$ ), торцов инструментов ( $T_t$ ). Эти температуры и величины  $\sigma_t$  и  $\tau$  определяют процессы деформации и окисления покрытия и торцов инструментов ( $\sigma_{0,2(p)}$ ,  $\varepsilon_p$ ,  $\sigma_{0,2(t)}$ ,  $\varepsilon_t$ ,  $Ox_p$ ,  $Ox_t$ ) и изменение коэффициента трения по сравнению с его значением на начальном этапе ФО (см. фиг. 12).

**Выводы.** 1. Упрочнение плазменного стального покрытия (Fe-23,7Cr-11,9Mn-3,2Ni-0,57C-0,52Si) на цилиндрической подложке выполнено фрикционной обработкой за один—три прохода при давлении инструментов из быстрорежущей стали P18M5 от 7,6 до 30,3 МПа и длительности процесса до 70 с.

2. Мощность процесса фрикционной обработки определяется сдвигающим усилием инструментов на покрытие и линейной скоростью подложки с покрытием при вращении. Максимальные температуры покрытия достигали 1123 °С и определялись отношением выполненной работы к обработанной площади покрытия.

3. Предложен механизм взаимодействия инструментов с пластифицированным покрытием и предложена схема взаимодействия параметров процесса для реализации такого механизма. Торцы инструментов частично погружаются в покрытие, формируя в нем полосы пластической деформации, в которых напыленные частицы деформируются с разрушением оксидов на их поверхности. После фрикционной обработки микротвердость стального покрытия повысилась с 2,95 до 6,1 ГПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mutter, M. Systematic investigation on the influence of spray parameters on the mechanical properties of atmospheric plasma-sprayed YSZ coatings / M. Mutter, G. Mauer, R. Mücke, O. Guillon, R. Vaßen // J. Thermal Spray Technol. 2018. V.27. №4. P.566—580.
2. Peat, T. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing / T. Peat, A. Galloway, A. Toumpis, P. McNutt, N. Iqbal // Appl. Surf. Sci. 2017. V.396. P.1635—1648.
3. Tanigawa, H. Modification of vacuum plasma sprayed tungsten coating on reduced activation ferritic/martensitic steels by friction stir processing / H. Tanigawa, K. Ozawa, Y. Morisada, S. Noh, H. Fujii // Fusion Eng. Design. 2015. V.98. P.2080—2084.
4. Fitseva, V. The role of process temperature and rotational speed in the microstructure evolution of Ti-6Al-4V friction surfacing coatings / V. Fitseva, S. Hanke, J.F. dos Santos, P. Stemmer, B. Gleising // Mater. Design. 2016. V.110. P.112—123.
5. Damodaram, R. Friction surfacing : A tool for surface crack repair / R. Damodaram [et al.] // Surf. Coat. Technol. 2021. V.422. Art.127482.
6. Wen Wang. High-performance bulk pure Al prepared through cold spray-friction stir processing composite additive manufacturing / Wen Wang, Peng Hana, Yinghui Wang, Ting Zhanga, Pai Penga, Ke Qiaoa, Zhi Wang, Zhihao Liua, Kuaishhe Wang // J. Mater. Res. Technol. 2020. V.9. №4. P.9073—9079.
7. Калита, В.И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В.И. Калита, Д.И. Комлев. — М. : Изд. дом Библиотека, 2008. 400 с.
8. Вилль, В.И. Сварка металлов трением / В.И. Вилль. — Л. : [б.и.], 1970. 175 с.
9. Фукс, И.Г. Введение в трибологию / И.Г. Фукс, И.А. Буяновский. — М. : Нефть и газ, 1995. 278 с.
10. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. — М. : Металлургия, 1976. 488 с.