

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Предложен способ улучшения эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из конструкционных сталей и сплавов. Поставленная задача была реализована методом нанесения на их поверхность защитных покрытий, которые увеличивают твердость, износостойкость, повышают антикоррозионные свойства.

Ключевые слова: покрытие, газопламенный, конструкционные стали, магнитно-электрическое шлифование, микрорельеф поверхности.

Введение

Одним из способов улучшения эксплуатационных свойств деталей, изготовленных из конструкционных сталей и сплавов, является нанесение на их поверхность защитных покрытий, которые увеличивают твердость, износостойкость, повышают антикоррозионные свойства [1–3].

Состояние исследований и актуальность работы

Используются различные виды покрытий, в частности ПГ-19Н-01, ПГ-10Н-01, ПГАН-33 (на основе Ni-Cr и других добавок, таких как Si, B, Fe, Mo) [4–6]. Известны также покрытия на основе Ni-Al, Al-Co, Al-Mg-Cu, Al_2O_3 , $Al_2O_3+Cr_2O_3$ и др. [4–7].

Существует ряд методов нанесения покрытий, в частности газотермический, плазменно-детонационный, метод газопорошковой лазерной наплавки [8–11]. При этом в ряде случаев необходима финишная обработка поверхности покрытия. В качестве методов обработки используются оплавление покрытия электронным пучком или плазменной струей [12–13], электроконтактная обработка [14], шлифование и ряд комбинированных методов обработки.

Одним из наиболее доступных и технологичных способов является напыление покрытия ПГ-СР4 газопламенным методом на основу из конструкционной стали 45. Однако при этом качество поверхности полученного покрытия невысокое и требуется дополнительная обработка. В качестве обработки выбран метод магнитно-электрического шлифования (МЭШ) как наиболее доступный в условиях промышленного производства.

В основе МЭШ лежат процессы, связанные с механическим резанием зернами абразива, электроэрозийным и термическим воздействием электрического (технологического) тока на поверхность упрочняющего покрытия под влиянием внешнего магнитного поля.

Целью данной работы является разработка и исследование процесса магнитно-электрического шлифования для создания микрорельефа поверхности газотермического покрытия на производственных образцах деталей.

Методика приготовления образцов и методы анализа

Нанесение покрытий проводили газопламенным способом. Газопламенное напыление образцов производили на установке ТРУ-БПИ [15]. В качестве горючего газа применяли метилацетиленовую фракцию (МАФ) ТУ-38.102.12-89, в качестве транспортирующего – воздух. Расход МАФ составлял 1,0–1,2 м³/ч, расход кислорода (ГОСТ 5583-79) 4,0–4,5 м³/ч, расход воздуха – 0,2 м³/ч, дистанция напыления – 180–220 мм. Химический состав материала защитного покрытия ПГ-СР4: Ni – основа, Cr ~ 17%; C 0,8; Fe ~ 0,7; Si ~ 3,5; B ~ 3%.

Толщина напыленного защитного покрытия ПГ-СР4 составляет 0,5–2,0 мм. Твердость покрытий находится в пределах 55–62 HRC. Топография поверхностного слоя покрытия, полученного газопламенным напылением самофлюсующимся порошком марки ПГ-СР4, показана на рис. 1. Видно, что поверхность защитного покрытия до обработки имеет пористую структуру. Пористость покрытия находится в пределах 25–30%, а шероховатость поверхности – 160–320 мкм.

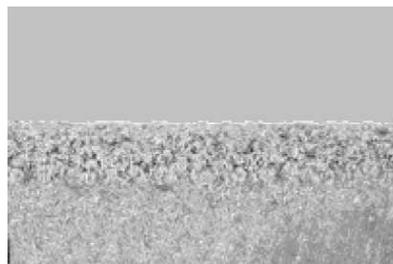


Рис. 1. Поверхностный слой газотермического защитного покрытия без оплавления ($\times 60$)

Наблюдение микрорельефа поверхности упрочняющего покрытия до и после обработки МЭШ исследуемых образцов осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа модели РЭМ-100У (Сумское НПО «Электрон»). Исследования проводили как при нормальном падении пучка на поверхность образца, так и при наклоне образца на 30°. Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ. Изображение в растровом электронном микроскопе формировалось при сканировании узким электронным лучом (диаметр пучка – 50–500 А) участка поверхности упрочняющего покрытия.

Влияние режима МЭШ на шероховатость поверхности оценивали по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели АБРИС-ПМ7. Измерения шероховатости поверхности проводили по методикам, изложенным в ГОСТ 2789-93.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Поверхность, полученная путем газопламенного напыления покрытия ПГ-СР4, показана на рис. 2. Ее микрорельеф определяется неоднородностью распределения элементов покрытия.

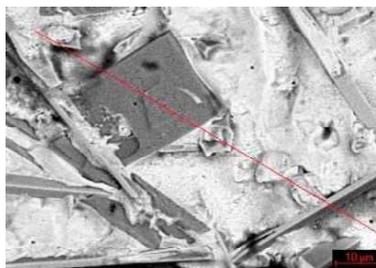


Рис. 2. Поверхность, сформированная газопламенным напылением (× 200)

После обработки образца посредством МЭШ с режимами, приведенными в табл. 1, получена поверхность, топография которой изображена на рис. 3. Обозначения, используемые в таблице, следующие: n – частота вращения круга; S – скорость продольной подачи; I – сила технологического тока; t – глубина резания; B – значение вектора магнитной индукции, направленного вдоль обрабатываемой поверхности.

Таблица 1 – Начальный режим обработки МЭШ

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
3	2000	120	5	0,005	0,10	3,80

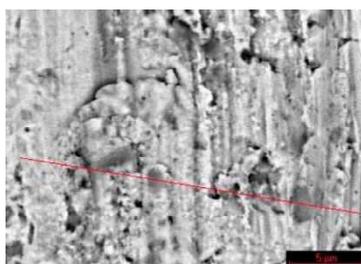


Рис. 3. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 1 (× 200)

Основную роль при образовании рельефа для данного режима обработки играют процессы механического резания зернами абразива. На поверхности отчетливо видны следы, оставленные зернами абразива, поверхность не оплавлена, по краям пор наблюдается частичное затекание в них никеля. Шероховатость поверхности составляет 3,8 мкм.

При увеличении глубины резания и значения магнитной индукции (табл. 2) рельеф поверхности формируется также в основном за счет резания зернами абразива. Топография поверхности изображена на рис. 4.

С увеличением глубины резания в зоне обработки реализуются большие мощности за счет увеличения площади контакта зерен абразивного круга с поверхностью покрытия. Также возрастает сила резания и возникают растягивающие напряжения, в результате чего на поверхности покрытия образуются микротрещины. При данных режимах обработки наблюдается более интенсивное сглаживание пор. Вершины бороздок, которые оставлены зернами абразива, незначительно оплавлены. Наблюдаются также следы электроэрозионного воздействия, но их количество невелико. При увеличении скорости подачи круга и значения магнитной индукции (табл. 3) количество энергии, выделяющейся в виде теплоты в зоне обработки, резко возрастает, что приводит к изменению характера рельефа поверхности (рис. 5).

Таблица 2 – Режим обработки МЭШ при увеличении глубины резания

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
4	2000	120	5	0,005	0,15	1,26

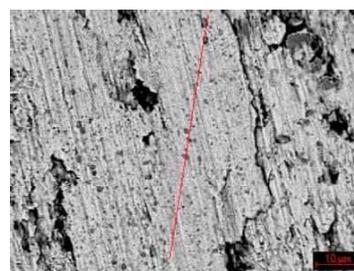


Рис. 4. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 2 (× 200)

Таблица 3 – Режим обработки МЭШ при увеличении скорости подачи

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
5	2000	2800	5	0,005	0,20	1,20

Следы от механического воздействия зерен абразива сглажены. Затекание материала покрытия в поры происходит более интенсивно. С увеличением продольной подачи и значения магнитной индукции электроэрозионное действие технологического тока уменьшается.

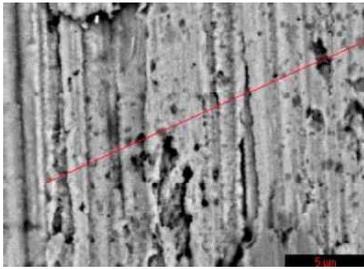


Рис. 5. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 3 ($\times 200$)

При режимах, связанных с увеличением силы технологического тока (табл. 4), формируется рельеф поверхности, представленный на рис. 6.

Таблица 4 – Режим обработки МЭШ при увеличении силы тока

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
6	2000	2800	15	0,05	0,15	0,57

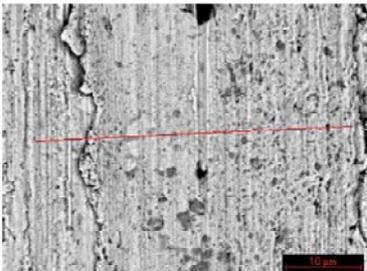


Рис. 6. Топография поверхности покрытия 11-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 4

При обработке МЭШ на режиме, показанных в табл. 4, с увеличением технологического тока до 15 А значительно повышается температура в зоне обработки. Поверхность оплавляется, материал покрытия претерпевает структурные изменения. Металл, находящийся в жидкопластическом состоянии, удаляется из зоны под действием механической силы резания зернами абразива.

Резкий нагрев поверхности приводит к появлению микротрещин на поверхности пористого покрытия. Рельеф поверхности имеет незначительное число царапин, остающихся от зерен абразивного материала круга. Количество лунок, образованных в результате электроэрозионного разрушения поверхности, возрастает.

С целью предотвращения образования микротрещин и лунок были выбраны режимы, в которых сила тока, скорость продольной подачи и глубина резания уменьшены. Но для поддержания достаточной мощности в зоне обработки была увеличена частота вращения круга (табл. 5). Соответствующий рельеф поверхности представлен на рис. 7.

Таблица 5 – Режим обработки МЭШ при увеличении частоты и уменьшении силы тока и глубины резания

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
7	3000	1400	10	0,025	0,15	0,46

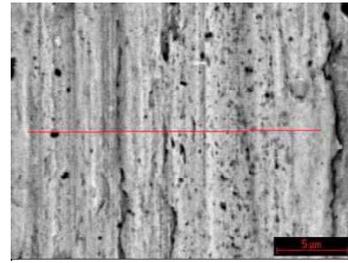


Рис. 7. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 5 ($\times 200$)

При обработке поверхности газотермического защитного покрытия на режиме, приведенном в табл. 5 на поверхности (рис. 7), видно более равномерное распределение микронеровностей, ширина электроэрозионных лунок не превышает 1 мкм. Шероховатость поверхности находится в пределах 0,46 мкм. Однако присутствуют микротрещины.

Уменьшение шероховатости поверхности было достигнуто при дальнейшем увеличении частоты вращения, повышении силы тока, значения магнитной индукции.

Соответствующий режим обработки указан в табл. 6, а топография поверхности – на рис. 8.

Таблица 6 – Режим обработки МЭШ, соответствующие минимальной шероховатости поверхности

№ рис.	n , мин ⁻¹	S , мм/мин	I , А	t , мм	B , Тл	R_a , мкм
8	4000	2800	15	0,05	0,30	0,34

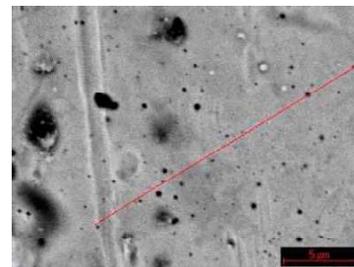


Рис. 8. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимом, указанным в табл. 6 ($\times 200$)

Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод, что технологические параметры МЭШ оказывают влияние на формирование микрорельефа защитного покрытия, причем основное воздействие оказывают электрофизические параметры процесса.

Рассмотрим влияние технологического тока. Как было отмечено выше, основными факторами при этом являются электроконтактное и электроэрозионное разрушения материала поверхности. Электроэрозионное воздействие приводит к испарению материала в локальной области, соответствующей месту попадания искры на поверхность. В данном месте возникает лунка, имеющая диаметр 0,1–0,5 мкм и глубину до 0,3 мкм. Наиболее отчетливо лунки наблюдаются на рис. 8. Этот

эффект приводит к повышению производительности процесса обработки, но качество обработки поверхности снижается. Поэтому целесообразным является снижение интенсивности процессов данного типа. В то же время электроконтактные явления приводят к повышению температуры в зоне обработки, и именно они обеспечивают оплавление неровностей на поверхности, оставляемых зернами абразива.

Рассмотрим выступ, который образован при резании зерном абразива (рис. 9). При последующем анализе, который позволяет выявить общие закономерности процесса, считаем материал однородным с удельным сопротивлением R , плотностью ρ , удельной теплоемкостью c и коэффициентом теплопроводности λ .

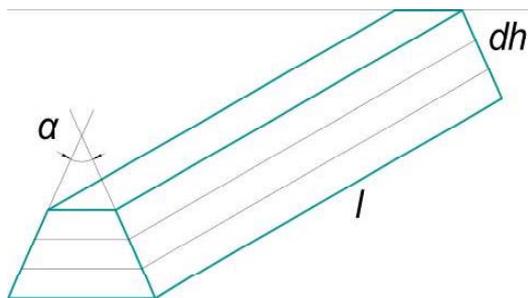


Рис. 9. Форма выступа, сформированного под действием зерна абразива

Предположим также, что в поперечном сечении профиль выступа представляет собой трапецию. Угол, под которым сходятся продолжения боковых сторон трапеции, равен α .

Сопротивление элемента выступа dR высотой dh определяется по формуле 1 [2]:

$$dR = \rho \cdot \frac{dh}{2lhtg(\alpha/2)}, \quad (1)$$

где h – расстояние от точки O по вертикали вниз; l – длина выступа.

Полное сопротивление выступа рассчитываем по формуле 2 [2]:

$$R = \frac{\rho}{2ltg(\alpha/2)} \cdot \ln \left| \frac{h_2}{h_1} \right|. \quad (2)$$

Количество теплоты, выделяемое в элементе высотой dh при протекании электрического тока I в течение времени dt , определяется с учетом (1) по закону Джоуля-Ленца по формуле 3 [2]:

$$dQ = I^2 \rho \cdot \frac{dh}{2lhtg(\alpha/2)}. \quad (3)$$

Количество теплоты, которое отдает элемент в окружающую среду за счет теплообмена с воздухом через боковую поверхность, рассчитываем следующим образом по формуле 4 [2]:

$$dQ_{отд} = kl \cdot \frac{dh}{\cos(\alpha/2)} \cdot (T - T_{oc}) \cdot dt, \quad (4)$$

где k – коэффициент теплоотдачи между материалом поверхности и окружающей средой.

Составляя уравнение теплового баланса для элемента высотой dh на основе выражений (2) и (3), выразим скорость изменения температуры в зависимости от его положения h (формула 5) [2]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\gamma c} \cdot \left(\frac{I^2 \rho}{b^2 h^2} grad T - \frac{k(T - T_{oc})}{h \sin(\alpha/2)} \right), \quad (5)$$

где $b = 2ltg(h/2)$ [2] – параметр, определяемый геометрией образца.

Анализируя формулу (5), приходим к выводу, что скорость изменения температуры быстро уменьшается при увеличении расстояния h от вершины выступа (угол α). Наибольшее количество теплоты выделяется именно при вершине выступа, а поскольку отвод теплоты вглубь выступа замедлен, то данный процесс обеспечивает повышение температуры при его вершине до температуры плавления. Очевидно, чем больше величина силы тока, тем большая часть выступа будет оплавлена. Также следует отметить, что чем меньше угол при вершине конуса, тем более эффективен процесс электроконтактного оплавления. На основании рассмотрения можно сделать вывод о том, что для достижения высокого качества обработки МЭШ токопроводящий абразивный круг должен содержать зерна из диэлектрического материала. Форма и размер зерен должны обеспечивать, с одной стороны, уменьшение электроэрозионного воздействия, а с другой – формирование выступов с профилем, наиболее подверженным оплавлению.

Рассмотрим влияние магнитного поля на формирование микрорельефа в зоне обработки. В связи с этим следует отметить два основных эффекта, которые реализуются при наложении магнитного поля в направлении, параллельном обрабатываемой поверхности и перпендикулярном току. Первый связан с возникновением в магнитном поле силы Лоренца, которая стремится изменить направление скорости заряженных частиц (формула 6) [4]:

$$F = qBv \sin \alpha, \quad (6)$$

где v – скорость частиц; α – угол между вектором скорости и направлением магнитного поля.

Наиболее существенное влияние сила Лоренца оказывает на электроны, движущиеся в канале искрового разряда, возникающего в воздухе между токопроводящим кругом и обрабатываемой поверхностью. В результате действия силы Лоренца канал искрового разряда отклоняется в сторону, и вследствие того, что электроны обладают различными скоростями, они будут двигаться по окружностям разного радиуса (рис. 10).

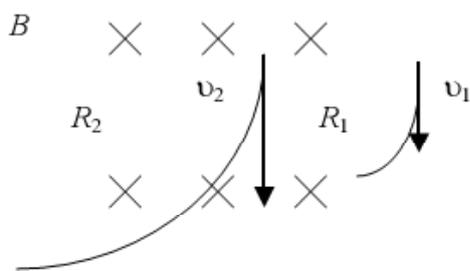


Рис. 10. Влияние силы Лоренца на расширение искрового канала

В этом случае поверхностная плотность энергии искрового разряда при его воздействии на поверхность уменьшается вследствие увеличения площади, образующая лунка будет иметь меньшие глубину и диаметр, что приведет к уменьшению шероховатости.

Второй эффект связан с возникновением дополнительного давления в зоне обработки. Так как основа материала покрытия ПГ-СР4 обладает свойствами ферромагнетика, вблизи поверхности материала (и особенно неровностей с малым радиусом кривизны) происходит искривление силовых линий магнитного поля. Плотность энергии магнитного поля определяется по формуле 7 [4]:

$$w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} \quad (7)$$

и имеет размерность давления.

При этом повышение температуры в зоне обработки до значений, превышающих точку Кюри, приводит к переходу материала в парамагнитное состояние. Таким образом, на границе «воздух-расплав» и на границе «расплав-ферромагнитная основа» возникает дополнительное давление, направленное вглубь материала и приводящее к растеканию расплава по его поверхности. Из анализа экспериментальных данных также следует, что увеличение значения магнитной индукции предотвращает появление микротрещин на обрабатываемой поверхности (рис. 5 и 8). Наложение магнитного поля на область обработки также приводит к возникновению факторов, определяющих шероховатость поверхности.

Вариацией указанных выше параметров было достигнуто удовлетворительное качество обработки поверхности.

Выводы

1. Установлено, что микрорельеф поверхности защитного покрытия ПГ-СР4, нанесенного методом газопламенного напыления на поверхность Стали 45, существенно зависит от параметров обработки МЭШ.
2. Установлено, что наряду с величинами, определяющими режимы резания, особую роль приобретают электродинамические характеристики процесса.
3. Повышение технологического тока на 5 ампер ($\Delta I = 5 A$) приводит к оплавлению неровностей на поверхности заготовки.

Список литературы

1. Азаренков Н. А. Структура и свойства защитных покрытий и модифицированных слоев / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк. – Харьков, 2007. – 560 с.
2. Ионно-лучевая и ионно-плазменная обработка материалов / [К. К. Кадыржанов, Комаров К. К., Погребняк К. К. и др.]. – М.: МГУ, 2005. – 640 с.
3. Физико-химическое состояние покрытия из стали 316L, нанесенного на подложку из малоуглеродистой стали SS-400 / А. Д. Погребняк [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 24, № 47. – С. 44–52.
4. Структура и свойства твердого сплава, нанесенного на твердую подложку с помощью импульсно-плазменной технологии / [А. Д. Погребняк, М. В. Ильяшенко, О. П. Кульментьева и др.] // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 7. – С. 111–118.
5. Погребняк А. Д. Формирование гибридных покрытий TiN/Cr/Al₂O₃ на подложку из стали AISI 321 / А. Д. Погребняк, Ю. А. Кравченко // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. – 2006. – № 11. – С. 1–23.
6. Structure and Properties of Coatings Ni base deposited using a plasma jet before and after electron beam irradiation / A. D. Pogrebnyak [et al.] // Vacuum. – 2007. – Vol. 81, № 10. – P. 1243–1251.
7. Структура и свойства покрытия из Ni-Cr-B-Si-Fe/WC-Co, нанесенного на подложку из стали и меди / [А. Д. Погребняк, С. Н. Братушка, В. В. Углов и др.] // ФИП. – 2008. – Т. 6, № 1–2. – С. 92–97.
8. Эффект облучения электронным пучком на структуру и свойства никелевого сплава, нанесенного плазменной струей / А. Д. Погребняк [и др.] // ЖТФ. – 2004. – Т. 30, № 2. – С. 164–167.
9. Структура и свойства порошкового покрытия на основе Ni-Cr после нанесения концентрированными потоками энергии / [Погребняк А. Д., Кравченко Ю. Н., Васильюк В. В. и др.] // ФХОМ. – 2005. – № 11. – С. 35–41.
10. Погребняк А. Д. Модификация свойств материалов и осаждение покрытий с помощью плазменных струй / А. Д. Погребняк, Ю. Н. Тюрин // УФН. – 2005. – Т. 3, № 5. – С. 514–543.
11. Влияние химического состава на трибологические свойства хромоникелевых покрытий, полученных методом газопорошковой лазерной наплавки / А. В. Макаров [и др.] // Изв. Челяб. науч. центра. – 2009. – Вып. 2 (44). – С. 28–33.
12. Погребняк А. Д. Эффект облучения электронными и ионными пучками на физико-механические свойства титановых сплавов / А. Д. Погребняк, Е. А. Базыль, Н. В. Свириденко // Успехи физики металлов. – 2004. – Т. 5. – С. 257–281.
13. Дуплексная обработка никелевого сплава, нанесенного на подложку из стали 3 / А. Д. Погребняк [и др.] // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, вып. 1. – С. 71–78.
14. Токарев А. О. Электроконтактная обработка газотермических покрытий / А. О. Токарев // Трение, износ, смазка. – 2008. – Т. 10, № 2. – С. 34–40.
15. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование : учеб. для вузов / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

Одержано 05.11.2015

Пономаренко А.М., Губар Є.Я., Фенько І.І., Васильченко В.Ю. Використання магнітно-електричного шліфування для створення мікрорельєфу поверхні газотермічного покриття

Запропоновано спосіб покращення експлуатаційних властивостей деталей, виготовлених з конструкційних сталей та сплавів. Поставлена задача була реалізована методом нанесення на їх поверхню захисних покриттів, які збільшують твердість, зносостійкість, підвищують антикорозійні властивості.

Ключові слова: покриття, газополум'яний, конструкційні сталі, магнітно-електричне шліфування, мікрорельєф поверхні

Ponomarenko A., Gubar' E., Fen'ko I., Vasil'chenko V. Using magnetic electric grinding to create surface microrelief thermal coatings

The method for improving the performance properties of the parts made of structural steels and alloys is proposed. The objective was realized by surface coatings that increase hardness, wear resistance, corrosion resistance.

Key words: coating, flame, structural steel, magnetic-electric grinding, surface microrelief.
