

УДК 621.9.048.4.06

## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ

*Докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В., канд. техн. наук СОКОРОВ И. О.,  
аспиранты НЕРОДА М. В., ЦИОНЕНКО Н. М.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Барановичский государственный университет*

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 антикоррозийные свойства [1–3].

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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. [4–7].

Существует ряд методов нанесения покрытий, в частности газотермические, 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], электродконтатная 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, электроэрозионным и термическим воздействием электрического (технологического) тока на поверхность упрочняющего покрытия под влиянием внешнего магнитного поля.

**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 м<sup>3</sup>/ч, расход кислорода (ГОСТ 5583–79) 4,0–4,5 м<sup>3</sup>/ч, расход воздуха – 0,2 м<sup>3</sup>/ч, дистанция напыления – 180–220 мм. Химический состав материала защитного покрытия ПГ-СР4: Ni – основа, Cr ~ 17 %; С ~ 0,8; Fe ~ 0,7; Si ~ 3,5; В ~ 3 %.

Толщина напыленного защитного покрытия ПГ-СР4 составляет 0,5–2,0 мм. Твердость покрытий находится в пределах 55–62 НРС. 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.

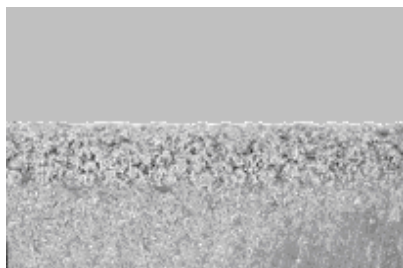


Рис. 1. Поверхностный слой газотермического защитного покрытия без оплавления,  $\times 60$

Наблюдение микрорельефа поверхности упрочняющего покрытия до и после обработки МЭШ исследуемых образцов осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа модели LEO1455VP (Минск, БГУ). Исследования проводили как при нормальном падении пучка на поверхность образца, так и при наклоне образца на  $30^\circ$ . Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ. Изображение в растровом электронном микроскопе формировалось при сканировании узким электронным лучом (диаметр пучка – 50–500 Å) участка поверхности упрочняющего покрытия.

Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности оценивали по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели АБРИС-ПМ7. Измерения шероховатости поверхности проводили по методикам, изложенным в ГОСТ 2789–73.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Поверхность, полученная путем газопламенного напыления покрытия ПГ-СР4, показана на рис. 2. Ее микрорельеф определяется неоднородностью распределения элементов покрытия.

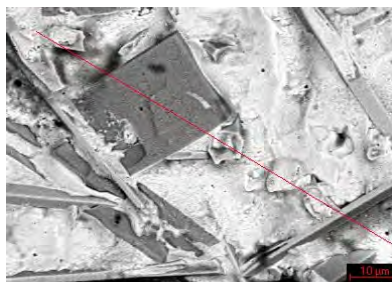


Рис. 2. Поверхность, сформированная газопламенным напылением

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

Начальные режимы обработки МЭШ

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
3	2000	120	5	0,005	0,100	3,800

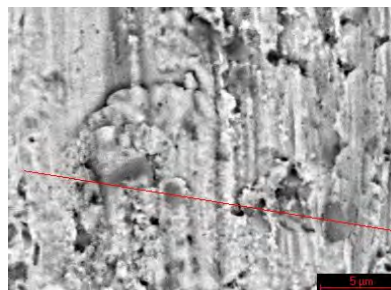


Рис. 3. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 1

Основную роль при образовании рельефа для данных режимов 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 зерна-

ми 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

**Режимы обработки МЭШ при увеличении глубины резания**

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
4	2000	120	5	0,05	0,15	1,26

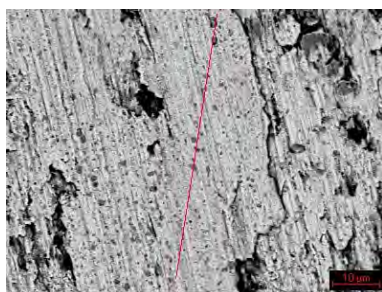


Рис. 4. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 2

Таблица 3

**Режимы обработки МЭШ при увеличении скорости подачи**

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
5	2000	2800	5	0,05	0,20	1,20

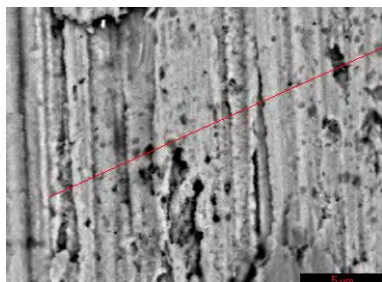


Рис. 5. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 3

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.

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

Таблица 4

**Режимы обработки МЭШ при увеличении силы тока**

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
6	2000	2800	15	0,05	0,15	0,57

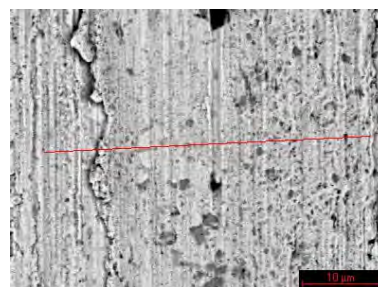


Рис. 6. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 4

При обработке МЭШ на режимах, 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

**Режимы обработки МЭШ при увеличении частоты и уменьшении силы тока и глубины резания**

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
7	3000	1400	10	0,025	0,150	0,460

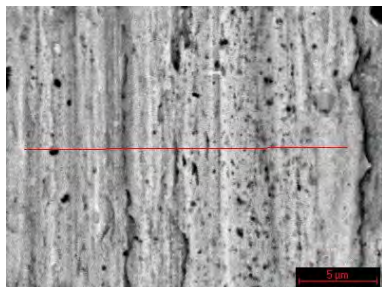


Рис. 7. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 5

При обработке поверхности газотермического защитного покрытия на режимах, приведенных 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.

Соответствующие режимы обработки указаны в табл. 6, а топография поверхности – на рис. 8.

Таблица 6

Режимы обработки МЭШ, соответствующие минимальной шероховатости поверхности

№ рис.	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$s$ , мм/мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
8	4000	2800	15	0,05	0,30	0,34

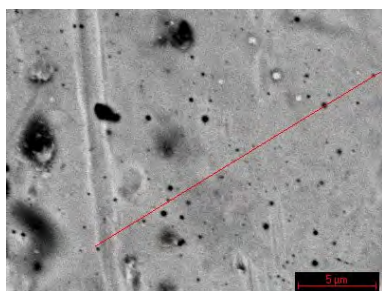


Рис. 8. Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ с режимами, указанными в табл. 6

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  $\rho$ , плотностью  $\gamma$ , удельной теплоемкостью  $c$  и коэффициентом теплопроводности  $k$ .

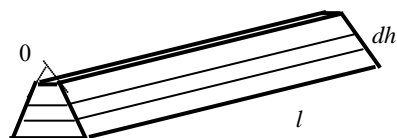


Рис. 9. Форма выступа, сформированного под действием зерна абразива

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

Сопротивление элемента выступа высотой  $dh$  определяется по формуле

$$dR = \rho \frac{dh}{2lh \operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (1)$$

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

Полное сопротивление выступа рассчитываем по формуле

$$R = \frac{\rho}{2l \operatorname{tg}(\alpha/2)} \ln \left| \frac{h_2}{h_1} \right|.$$

Количество теплоты, выделяемое в элементе высотой  $dh$  при протекании электрического тока  $I$  в течение времени  $dt$ , определяется с учетом (1) по закону Джоуля – Ленца

$$dQ = I^2 \rho \frac{dh}{2lh \operatorname{tg}(\alpha/2)} dt. \quad (2)$$

Количество теплоты, которое отдает элемент в окружающую среду за счет теплообмена с воздухом через боковую поверхность, рассчитаем следующим образом:

$$dQ_{\text{отд}} = kl \frac{dh}{\cos(\alpha/2)} (T - T_{\text{oc}}) dt, \quad (3)$$

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  $h$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\gamma c} \left( \frac{I^2 \rho}{b^2 h^2} - \kappa \operatorname{grad} T + \frac{k(T - T_{\text{oc}})}{h \sin(\alpha/2)} \right), \quad (4)$$

где  $b = 2l \operatorname{tg}(\alpha/2)$  – параметр, определяемый геометрией образца.

Анализируя (4), приходим к выводу, что скорость изменения температуры быстро уменьшается при увеличении расстояния  $h$  от вершины выступа. Наибольшее количество теплоты выделяется именно при вершине выступа, а поскольку отвод теплоты в глубь 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 сто-

роны, 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:

$$F = qv \sin \alpha,$$

где  $v$  – скорость частиц;  $\alpha$  – 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

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB},$$

В результате происходит расширение искрового канала (рис. 10).

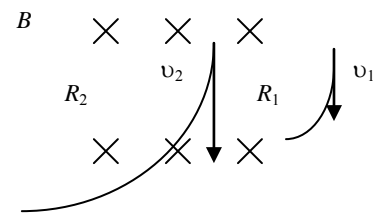


Рис. 10. Влияние силы Лоренца на расширение искрового канала

В этом случае поверхностная плотность энергии искрового разряда при его воздействии на поверхность уменьшается вследствие увеличения площади, а образующаяся лунка будет иметь меньшую 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

$$w = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

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 в глубь 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).

## ВЫВОДЫ

Установлено, что микрорельеф поверхности защитного покрытия ПГ-СР4, нанесенного методом газопламенного напыления на поверхность стали 45, существенно зависит от параметров обработки МЭШ. При этом наряду с величинами, определяющими режимы резания, особую роль приобретают электродинамические характеристики процесса. Так, повышение технологического тока приводит к оплавлению неровностей на поверхности заготовки. Наложение магнитного поля на область обработки также приводит к возникновению факторов, определяющих шероховатость поверхности. Вариацией указанных выше параметров было достигнуто удовлетворительное качество обработки поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

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 [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-плазменных технологий / А. Д. Погребняк [и др.] // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, вып. 7. – С. 111–118.

5. **Погребняк, А. Д.** Формирование гибридных покрытий TiN/Cr/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 [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 после нанесения концентрированными потоками энергии / А. Д. Погребняк [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.: Metallurgia, 1992. – 432 с.

Поступила 03.01.2011