

УДК 538.17

*М.В. Нерода, Н.М. Ционенко*

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ШЛИФОВАНИИ

Установлено влияние режимов обработки при магнитно-электрическом шлифовании на распределение элементов в поверхностном слое защитного упрочняющего покрытия ПГ-СР4, полученного путем газопламенного напыления.

### Введение

Актуальным направлением в физике конденсированных сред является разработка методов получения и модификации свойств защитных покрытий [1 – 4], которые могут повышать твердость, износостойкость, сопротивление усталости, жаропрочность, коррозионную стойкость изделий [5–8]. В последнее время ведутся исследования по созданию нанокompозитных покрытий [9]. Активно изучаются и свойства комбинированных и гибридных покрытий [10–12]. В связи с этим целесообразным является рассмотрение методов, связанных с обработкой защитных покрытий, используемых в промышленном производстве (таких как ПГ-СР2, ПГ-СР4, имеющих низкую себестоимость и простоту методов нанесения).

Наиболее эффективными в ряде случаев являются комбинированные методы обработки, к числу которых относится магнитно-электрическое шлифование (МЭШ) [13–15]. В его основе 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

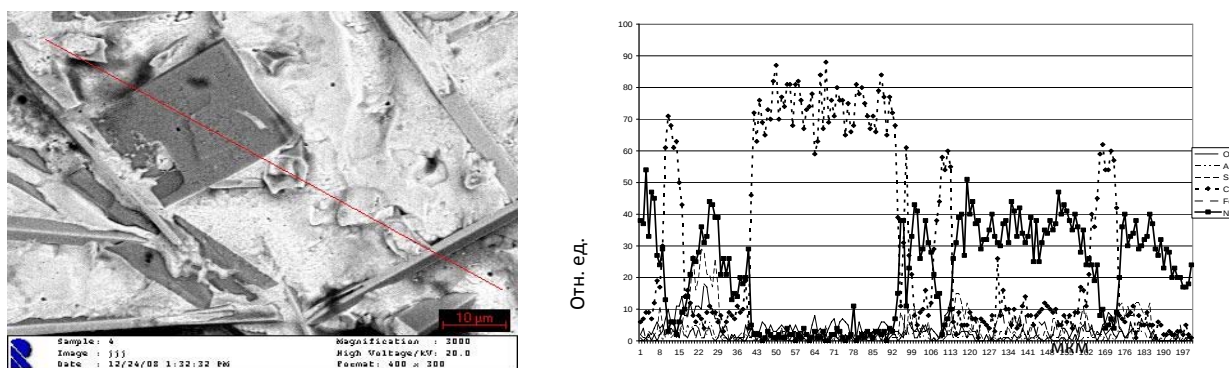
Напыление образцов проводили газопламенным методом на основу из конструкционной стали СТ45. Газопламенное напыление образцов производилось на установке ТРУ-БПИ [16]. В качестве горючего газа применялась метилацетиленовая фракция (МАН) ТУ-38.102.12-89, в качестве транспортирующего – воздух. Расход МАН составлял 1-1,2 м<sup>3</sup>/ч, расход кислорода (ГОСТ 5583-79) 4-4,5 м<sup>3</sup>/ч, расход воздуха 0,2 м<sup>3</sup>/ч, дистанция напыления 180–220 мм. Толщина напыленных защитных покрытий ПГ-СР4 составляет 0,5...2 мм. Пористость покрытия до обработки находится в пределах 25...30 %, а шероховатость поверхности была 160...320 мкм. Химический состав материала защитного покрытия ПГ-СР4: Ni – основа, Cr~17 %; C~ 0,8 %; Fe ~ 0,7 %; Si ~3,5 %; B~3 %. Твердость покрытий находится в пределах 55..62 HRC.

Топография поверхности упрочняющего покрытия до и после обработки МЭШ исследуемых образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа модели LEO1455VP. При этом регистрировался сигнал отраженных и вторичных электронов одновременно или поочередно. Исследования проводились 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 Å) участка поверхности упрочняющего покрытия.

Рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием энергодисперсионного SiLi – полупроводникового детектора фирмы «Röntec». Для обеспечения удовлетворительного для статической обработки числа импульсов в пиках спектр записывался не менее 300 сек. Количественный анализ осуществлялся с использованием программного анализа спектров, проводимого на основе сравнения с эталонными образцами и уровнем тормозного излучения. Оценку изменения химического состава в поверхностном слое упрочняющих покрытий после обработки МЭШ проводили по спектральным графикам распределения химических элементов.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Поверхность образца после газопламенного напыления покрытия ПГ-СР4 и распределение химических элементов на ней показаны на рисунке 1.

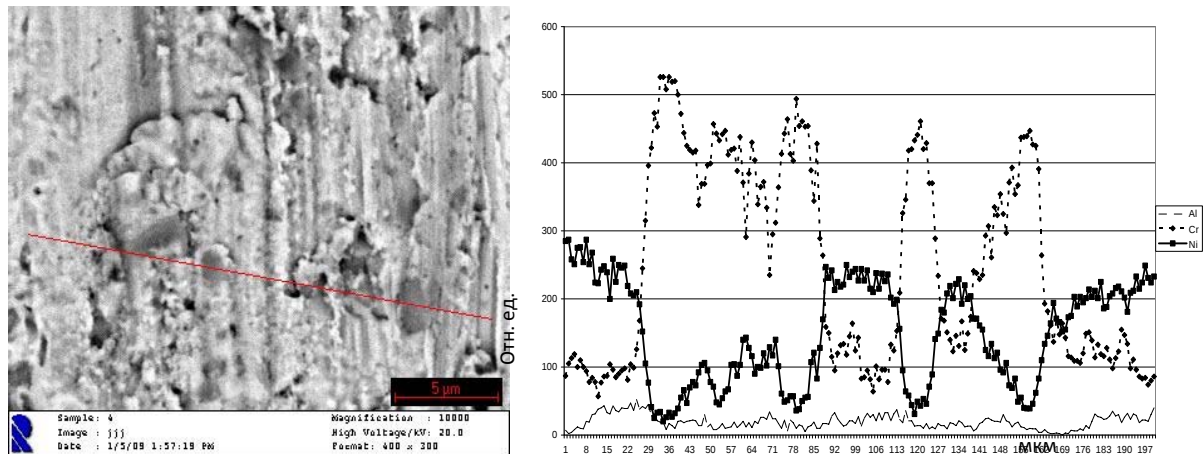


**Рисунок 1 – Поверхность покрытия и распределение химических элементов на поверхности после напыления**

Микрорельеф поверхности определяется неоднородностью распределения элементов покрытия. При кристаллизации на поверхности образуются кристаллы хрома размером порядка 5 мкм (а в отдельных случаях до 40 мкм), имеющие правильную кубическую форму, которые расположены на поверхности покрытия случайным образом. Возникают также кристаллы игольчатой формы, в сечении достигающие размеров 5×5 мкм и длиной в среднем 60 мкм. Они расположены в основном в плоскости, параллельной поверхности образца, но их ориентация в данной плоскости носит случайный характер. Никель, являющийся основой покрытия, кристаллизуется на поверхности в виде мелкодисперсной структуры, а размеры зерен составляют порядка 0,5...1,5 мкм.

Такой характер поверхности может определяться особенностями теплоотвода при нанесении покрытий. Процесс охлаждения вблизи основы является быстрым вследствие значительной теплопроводности стали, что приводит к уменьшению размеров зёрен кристаллов хрома. При нанесении последующих слоев вследствие образования пористой структуры процесс кристаллизации замедляется. На поверхности он имеет наименьшую скорость, что и способствует росту кристаллов хрома больших размеров. Распределение остальных элементов в никелевой основе можно считать равномерным.

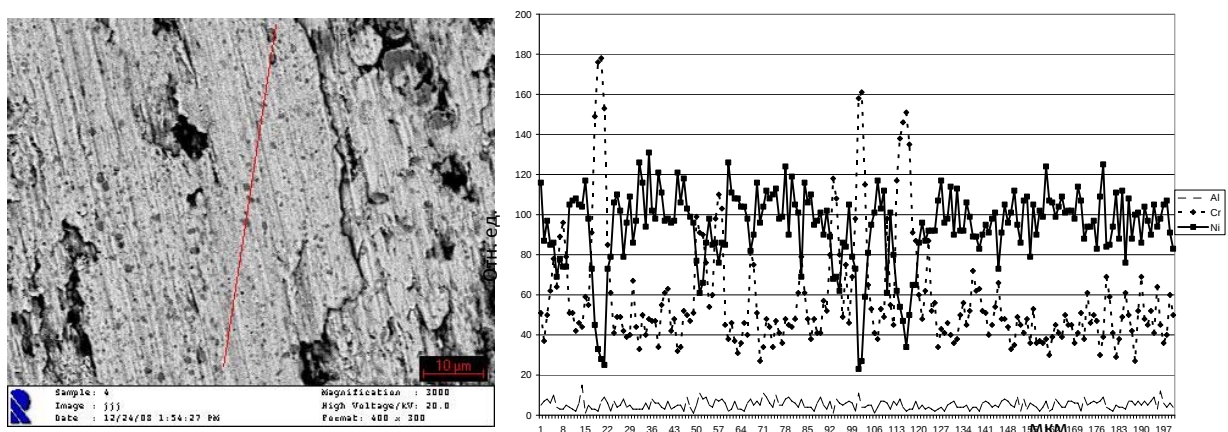
При режимах обработки: частота вращения круга  $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ ; скорость продольной подачи  $S = 120 \text{ мм/мин}$ ; сила технологического тока  $I = 5 \text{ А}$ ; глубина резания  $t = 5 \text{ мкм}$ ; значение вектора магнитной индукции  $B = 0,1 \text{ Тл}$  (направлен вдоль обрабатываемой поверхности перпендикулярно плотности тока) – получены изображения поверхности и распределения химических элементов, представленные на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Топография поверхности и распределение химических элементов покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ при начальных режимах**

При малой глубине резания происходит лишь частичное срезание крупных кристаллов хрома, в то время как тонкие кристаллы, имеющие игольчатую форму, удаляются практически полностью. Наблюдается повышение содержания алюминия Al до 7...10 %. Это объясняется дополнительным легированием поверхностного слоя покрытия элементами, содержащимися в связке абразивного круга. При этом основную роль играет диффузия, возникающая при контакте круга и обрабатываемой поверхности, и заполнение алюминием пор на поверхности при механическом резании.

При увеличении глубины резания  $t$  до 50 мкм и значения магнитной индукции  $B$  до 1,5 Тл существенно изменяется рельеф поверхности и распределение химических элементов на ней (рисунок 3).

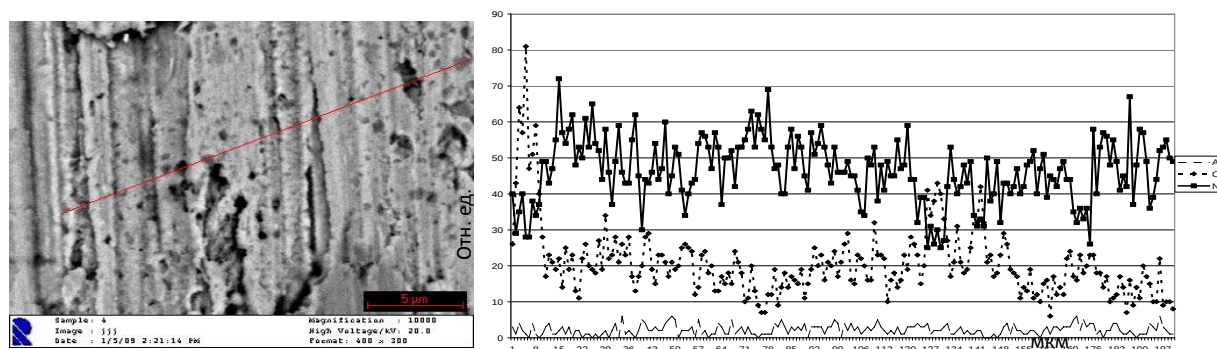


**Рисунок 3 – Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ и распределение химических элементов в поверхностном слое при увеличении глубины резания и значения магнитной индукции**

При обработке с глубиной резания порядка 50 мкм происходит полное удаление крупных кристаллов хрома, возникающих на поверхности. Наблюдается равномерное распределение мелких кристаллов хрома размерами порядка 1...2 мкм в никелевой основе. При данном режиме обработки процентное содержание хрома на поверхности уменьшается по сравнению с предыдущим режимом до 20 %. Связь кристаллов хрома с никелевой основой возрастает вследствие увеличения диффузии с ростом температу-

ры при обработке. Об этом свидетельствует уменьшение угла наклона линий, соответствующих границам кристаллов на графике распределения химических элементов на поверхности. Анализируя данные изменения распределения химических элементов в поверхностном слое, можно отметить, что содержание алюминия Al составляет до 5...6 %, и обусловлено процессами диффузии и припеканием связки круга к поверхности покрытия.

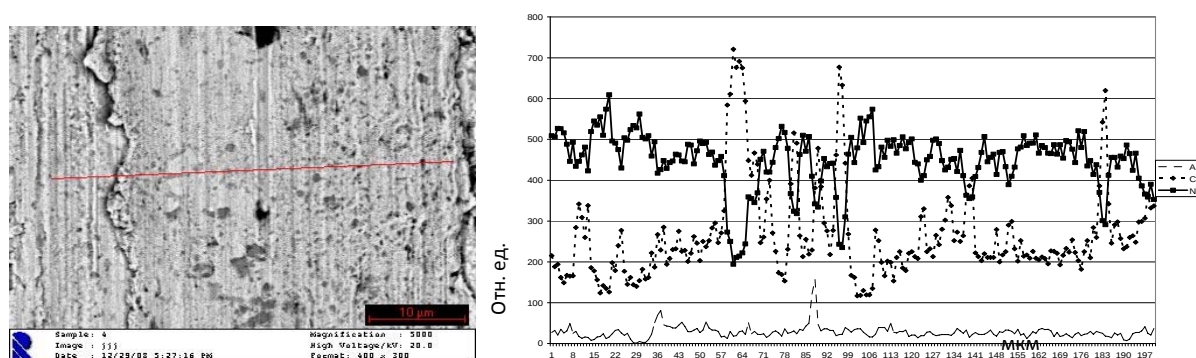
Увеличение скорости продольной подачи  $S$  до значения 2 800 мм/мин и магнитной индукции  $B$  до 0,2 Тл приводит к изменению топографии поверхности и распределения элементов на ней, что показано на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ и распределение химических элементов в поверхностном слое при увеличении скорости продольной подачи и магнитной индукции**

В поверхностном слое (рисунок 4) преобладают Ni (66 %) и хром Cr – (23 %). Наблюдается также дробление зерен хрома и образование мелкодисперсной структуры (~0,5 мкм). Содержание алюминия Al уменьшается до 2...5 %. Это связано с уменьшением времени контакта участков круга и обрабатываемой поверхности при увеличении скорости резания, что в свою очередь уменьшает вклад диффузии.

Увеличение силы тока  $I$  до 15 А и уменьшение магнитной индукции  $B$  до 0,15 Тл приводит к изменению структуры поверхности защитного покрытия (рисунок 5).



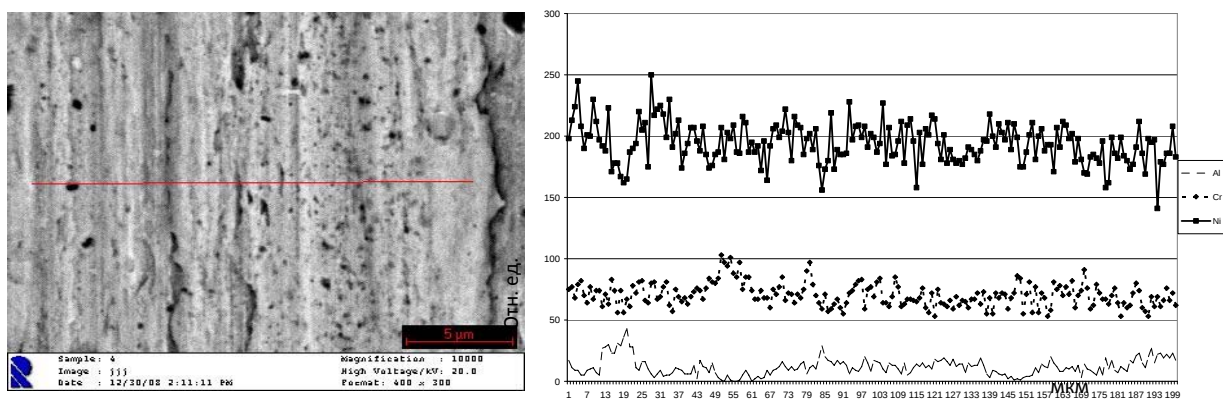
**Рисунок 5 – Топография поверхности покрытия после обработки МЭШ и распределение химических элементов при увеличении силы тока**

При данном режиме обработки происходит изменение распределения химических элементов в поверхностном слое покрытия, что может быть связано с увеличением температуры в зоне обработки. Наблюдается неравномерность распределения хрома и никеля, причем размеры кристаллов хрома различны: от 0,5 мкм до 3 мкм. При этом отчетливо видны области скопления крупных кристаллов. Это связано с условиями

кристаллизации, которые способствуют образованию крупных кристаллов при высоких температурах, с одной стороны, и дроблению кристаллов под воздействием магнитного поля – с другой. Слияние кристаллов происходит в областях, где концентрация хрома локально увеличена, а дробление – где кристаллы хрома в большей степени погружены в никелевую основу.

При высоком значении силы тока  $I$  наблюдается увеличение содержания алюминия в поверхностном слое покрытия до 15...20 %. Это связано с диффузией элементов связки токопроводящего абразивного круга на поверхность защитного покрытия, происходящей более интенсивно при высоких температурах.

Выбор режима обработки в соответствии с параметрами: частота вращения круга  $n = 3\,000\text{ мин}^{-1}$ ; скорость продольной подачи  $S = 1\,400\text{ мм/мин}$ ; сила технологического тока  $I = 10\text{ А}$ ; глубина резания  $t = 25\text{ мкм}$ ; значение вектора магнитной индукции  $B = 0,15\text{ Тл}$  – приводит к равномерному распределению химических элементов на поверхности защитного покрытия (рисунок 6).



**Рисунок 6 – Топография поверхности покрытия после обработки МЭШ и распределение химических элементов в поверхностном слое при режимах, обеспечивающих равномерное распределение элементов**

Увеличение скорости вращения круга обеспечивает повышение температуры в зоне обработки, что в комбинации с уменьшением скорости подачи создает благоприятные условия для диффузии алюминия на обрабатываемую поверхность. Уменьшение технологического тока обеспечивает большую равномерность распределения алюминия по поверхности. Уменьшение глубины резания приводит к повышению концентрации хрома на поверхности защитного покрытия. Увеличение магнитной индукции приводит к дроблению кристаллов хрома и образованию мелкодисперсной структуры с высокой объемной долей границ раздела фаз, что повышает твердость поверхности покрытия. При повышении температуры происходит взаимная диффузия атомов никеля и хрома вблизи границ зерен кристаллов, что приводит к частичному растворению наиболее мелких кристаллов хрома в никелевой основе. Указанные факторы обеспечивают повышение прочности соединения кристаллов различных фракций, то есть к повышению износостойкости образца.

### **Выводы**

Исходя из вышеприведенных данных, можно сделать вывод, что технологические параметры МЭШ оказывают влияние на распределение химических элементов в поверхностном слое газотермического защитного покрытия, причем основное влияние оказывают электрофизические и магнитные параметры процесса. Использование абразивного инструмента на токопроводящей алюминиевой связке осуществляет до-

полнительное легирование поверхности газотермического защитного покрытия. После обработки МЭШ распределение основных химических элементов на поверхности газотермического защитного покрытия становится более равномерным, что способствует увеличению его износостойкости и долговечности, а также коррозионной стойкости. При этом повышается качество поверхности: уменьшается шероховатость, снижается пористость покрытия и отсутствуют микротрещины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдман, Л. Основы анализа поверхности и тонких плёнок / Л. Фельдман, Д. Майер. – М. : Мир, 1989 – 342 с.
2. Левашов, Е.А. Многофункциональные наноструктурированные плёнки / Е.А. Левашов, Д.В. Штанский // Успехи химии. – 2007. – № 76(5). – С. 501–509.
3. Решетняк, Е.Н. Синтез наноструктурных плёнок: достижения и перспективы / Е.Н. Решетняк, В.Е. Стрельницкий // Харьковская нанотехнологическая ассамблея «Наноструктурные материалы». – 2007. – Т. 1 – С. 6–16.
4. Носкова Н.И. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы / Н.И. Носкова, А.Р.Мулюков. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 278 с.
5. Штанский, Д.В. Адгезионные, фрикционные и деформационные характеристики покрытий Ti-(Ca, Zr)-(C, N, O, P) для ортопедических и зубных имплантатов / Д.В. Штанский [и др.] // ФТФ. – 2006. – Т. 48, Вып. 7. – С. 1231–1238.
6. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе : справочник / Р.А. Андриевский, И.И. Спивак. – Челябинск : Метеллургия, 1983. – 386 с.
7. Береснев, В.М. Структура, свойства и получение твёрдых нанокристаллических покрытий, осаждаемых несколькими методами / В.М. Береснев [и др.] // УФМ. – 2007. – Т. 3. С. 1–78.
8. Кадыржанов, К.К. Ионно-лучевая и ионно-плазменная обработка материалов / К.К. Кадыржанов. – М. : МГУ, 2005. – 640 с.
9. Погребняк, А.Д. Структура и физико-химические свойства комбинированных нанокompозитных защитных покрытий / А.Д. Погребняк [и др.] // ФИП. – 2007. – Т. 5, № 3–4. – С. 186–196.
10. Береснев, В.М. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия: структура и свойства / В.М. Береснев [и др.] // ФИП. – 2007. – Т. 5. – № 1–2. – С. 4–27.
11. Погребняк, А.Д. Эффект облучения электронным пучком на структуру и свойства Ni сплава, нанесённого плазменной струёй / А.Д. Погребняк [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 4. – С. 79–86.
12. 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. Рентг. Синхр. и нейтр. исследов. – 2006. – № 11. – С. 1–23.
13. Niaroda, M. Technological and physical features of magnetic-electric grinding process / M. Niaroda, V. Blagodarny // INFOTECH 2007, Moderní informační a komunikační technologie ve vzdělávání, Moravské vysoké škola. – Olomouci, 2007. – DÍL 2. – P. 734–737.
14. Узунян, М.Д. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов / М.Д. Узунян, Ю.С. Краснощек. – М. : Машиностроение, 1988. – 80 с.
15. Дмитриченко, Э.И. Влияние электрофизических режимов магнитно-электрического шлифования на производительность при обработке покрытий / Э.И. Дмитриченко, М.В. Нерода // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие

технологии: мат. междунар. науч.-технич. конф. Могилев : ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», 2004. – Ч.1. – С. 163–165.

16. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. для вузов./ В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

***M.V. Njaroda, N.M. Tsyankenka. The Distribution of Chemical Elements on the Surface of Protecting Covers as Result of Magnetic-and-Electrical Polishing***

The influence of parameters of magnetic-and-electrical polishing on the element's distribution of protecting cover PG-SR4 near the surface is established.

Рукапіс паступіў у рэдкалегію 18.04.2011 г.