

шестерни, которая приводит во вращение крайний ротор режущего аппарата. При вращении шестерни часть масла с частицами механических примесей попадает внутрь цилиндрической вставки. В цилиндрической вставке, маслу сообщается вращательное движение, и под действием центробежных сил частицы механических примесей отбрасываются к стенке цилиндрической вставки и оседают на ней. Для облегчения поступления масла внутрь цилиндрической вставки, между ступицей шестерни и торцом вставки выполнена кольцевая щель для выхода масла, через которую масло выходит из цилиндрической вставки, освобождая место для поступления нового масла. В диске шестерни выполнены четыре отверстия для входа масла в полость цилиндрической вставки. Отверстия выполнены в диске под углом, направленным противоположно направлению вращения шестерни.

На основании теоретического описания процесса центробежной очистки масла в режущем аппарате мелиоративной многороторной косилки были определены основные параметры очистителя такие как: высота рабочей камеры цилиндрической вставки; радиус внутренней поверхности цилиндрической вставки; ширина кольцевой щели для выхода масла, диаметр отверстий для входа масла и угол наклона отверстий для входа масла. Теоретическое исследование процесса центробежной очистки масла позволило получить формулу для нахождения критического диаметра гарантированно улавливаемых частиц механических примесей при центробежной очистке масла. Рассмотрев модель движения масла, учитывающую давление во всех характерных зонах его движения, была обоснована зависимость, позволяющая определить производительность центробежного очистителя.

Были проведены следующие лабораторные исследования: определение концентрации и дисперсного состава механических примесей в масле режущего аппарата мелиоративной многороторной косилки; изучение физико-механических свойств масла, применяющегося в режущих аппаратах мелиоративных многороторных косилок, такие как кинематическая вязкость масла, плотности масла, прочность соединения смеси; изучение процесса центробежной очистки масла от механических примесей с помощью центробежного очистителя масла.

Для подтверждения лабораторных исследований были проведены производственные испытания. Получены средние значения толщины зубьев шестерен перед началом испытаний и после проведения испытаний, а также значения концентрации механических примесей в масле режущих аппаратов косилок.

На основании данных полученных в результате проведения производственных испытаний был выполнен расчет экономической эффективности от внедрения центробежного очистителя масла для мелиоративных многороторных косилок.

#### **Список использованных источников**

1. Режущий аппарат роторной косилки: пат. 6876 Респ. Беларусь, МПК А01D 34/00 / Е.И. Мажугин, А.Л. Борисов, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. – №u20100403; заявл. 23.04.10; опубл. 30.12.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 6. – С. 145.
2. Режущий аппарат роторной косилки: пат. 8949 Респ. Беларусь, МПК А01D 34/00 / Е.И. Мажугин, А.Л. Борисов, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. – №u20120270; заявл. 02.11.12; опубл. 30.06.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1. – С. 145.

УДК 621

#### **ЭВОЛЮЦИЯ СТРОЕНИЯ, СОСТАВА И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИХ МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ (МДО)**

*Горанский Г.Г.<sup>1</sup>, Комаров А.И.<sup>2</sup>, Ваганов В.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»*

<sup>2</sup> *Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

**Введение.** Значительная номенклатура стальных деталей, работающих в условиях износа, высоких температур и химически активных сред (например, изделия вентильной группы,

детали насосов и компрессоров, детали оборудования химической и пищевой промышленности), нуждается в увеличении ресурса работы. Это может достигаться МДО предварительно нанесенных на стальные поверхности алюминиевых покрытий. При реализации данной технологии на рабочей поверхности стальной детали в итоге формируется высокоплотное, твердое покрытие  $Al_2O_3$  с хорошей адгезией и коррозионной стойкостью [1-3]. При этом уровень свойств сформированного МДО покрытия в значительной степени зависит от строения и свойств алюминиевого подслоя, которые обусловлены методом и режимами его нанесения [4].

Существующие методы нанесения на стальную основу алюминиевых покрытий из компактных материалов (совместная прокатка, сварка взрывом, наплавка, осаждение из расплава) и порошков (металлизация, электрофорез, электростатическое или детонационное напыление, алитирование) отличаются высокой стоимостью, необходимостью применения дорогостоящего оборудования, требуют проведения дополнительных технологических операций (предварительная подготовка контактных поверхностей, создание многокомпонентных порошковых смесей, специальная термообработка, защитные среды, промежуточная прокатка или гидростатическое обжатие) [5].

Как правило, в зоне контакта алюминиевого слоя со стальной основой в связи с термическим воздействием формируются различного типа интерметаллиды  $Fe_nAl_m$ , существенно снижающие прочность адгезии. Для газотермических покрытий характерна высокая пористость, окисление частиц порошка и, как следствие, также низкая адгезия [6]. В большинстве случаев на границе раздела покрытие – основа присутствуют значительные внутренние напряжения, ограничивающие уровень адгезии и вызывающие отслаивание покрытий при последующем нагружении.

Избежать этих недостатков позволяет метод холодного газодинамического напыления (ХГДН). ХГДН характеризуется сверхзвуковыми скоростями соударения напыляемых частиц с основой и минимальным термическим воздействием на материал основы [7], что позволяет:

- обеспечить высокие адгезию, когезию и однородность покрытия при минимальной пористости в широком диапазоне толщин;
- избежать структурных или фазовых превращений в материале основы и, тем самым, возможной деградации его свойств;
- устранить риск образования в изделиях внутренних напряжений, способных привести к короблению и растрескиванию, что особенно важно для изделий сложной конфигурации и крупногабаритных.

Учитывая отмеченные факторы, можно ожидать, что совмещение технологий холодного газодинамического напыления алюминиевого слоя и его последующего микродугового оксидирования позволит обеспечить повышенные свойства рабочих поверхностей стальных изделий.

**Цель** настоящей работы – исследование структурно-фазового состояния и свойств, полученных на поверхности стали при различных режимах ХГДН алюминиевых композиционных слоев и сформированных на них микродуговым оксидированием керамических  $Al_2O_3$  покрытий.

**Методика.** В качестве метода нанесения на стальные детали алюминиевых подслоев, предназначенных к последующей трансформации в  $Al_2O_3$  при МДО, использован метод холодного газодинамического напыления (ХГДН). Уровень свойств окончательного покрытия из  $Al_2O_3$  в значительной степени зависит от строения и свойств алюминиевого подслоя, которые обусловлены типом напыляемого Al порошка, а также режимами напыления.

На подложки из стали Сталь 30 методом ХГДН наносили экспериментальные образцы покрытий из порошков А-10-01, А-20-01, А-30-01 (порошковые композиции Al –  $Al_2O_3$  с содержанием  $\alpha-Al_2O_3$  в смесях соответственно 15, 20 и 25% от общего веса распыляемой шихты).

Структурно-фазовое состояние покрытий, полученных ХГДН и последующим МДО, исследовалось методами рентгеноструктурного и металлографического анализов, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Рентгеноструктурные исследования образцов покрытий

проводились на автоматизированном комплексе на базе дифрактометра ДРОН-3М в  $\text{CuK}\alpha$ -излучении с применением вторичной монохроматизации рентгеновского пучка, металлографические – с использованием микроскопов ХМ300 и МИМ-8.

Указанные образцы подвергнуты микродуговому оксидированию (МДО) с целью формирования на поверхности стальной основы монокристаллических  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  покрытий. При МДО использовались пластинчатые образцы размером  $20 \times 20 \times 3$  мм с напыленным на одну из поверхностей алюминиевым газодинамическим покрытием толщиной 350 мкм. МДО сформированных ХГДН слоев выполнялось на установке с тиристорным регулированием, обеспечивающей анодно-катодную поляризацию образцов с частотой 50 Гц при напряжении 280–320 В и плотности тока  $40 \text{ А/дм}^2$ . Отношение величин катодного и анодного токов  $I_k / I_a \approx 1$ . Продолжительность процесса МДО составляла 60 (режим 1) и 90 мин (режим 2). В качестве электролита использовался водный раствор гидроксида калия КОН и жидкого натриевого стекла  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  с концентрацией компонентов 2 и 4 г/л соответственно. Температура электролита в процессе МДО 25–35 °С. Схема процесса приведена на рисунке 1.

При плотности токов  $i_{k-a} < 5 \text{ А/дм}^2$  и  $I_k / I_a > 1$  возможен выход на режим микродуги, а при  $i_{k-a} > 10 \text{ А/дм}^2$  и  $I_k / I_a < 1$  существует опасность сквозного электрического пробоя покрытия. Толщина оксидного слоя и скорость оксидирования обусловлены плотностью анодного тока  $i_a$  и отношением величин катодного и анодного токов  $I_k / I_a$ . Чем больше  $i_a$  и меньше  $I_k / I_a$ , тем выше скорость и меньше глубина оксидирования.

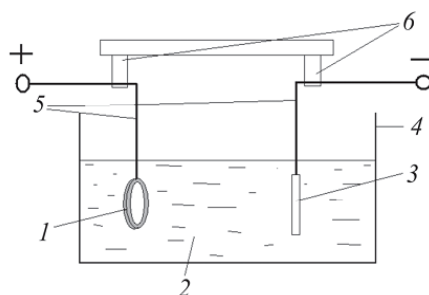


Рисунок 1 – Схема установки МДО:

1 – упрочняемый образец (анод); 2 – электролит; 3 – катод из нержавеющей стали;  
4 – ванна, наполненная электролитом; 5 – токоподвод; 6 – крепление электродов

Следует отметить увеличение скорости оксидирования напыленных Al подслоев по сравнению с компактным алюминием более чем в 1,5 раза в связи с проникновением электролита в поры покрытия. По сути, процесс идет как снаружи, так и изнутри Al подслоя, т.е. в пограничном слое.

**Результаты исследований.** Типичная структура и дифрактограмма газодинамического композиционного покрытия Al –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , использованного как основа для последующего МДО представлены на рисунках 2 и 3.

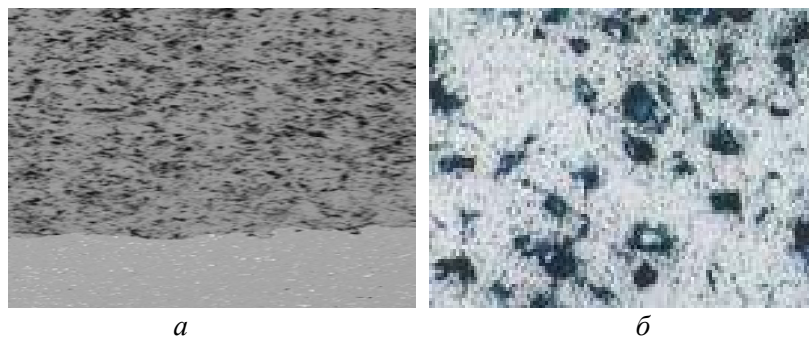


Рисунок 2 – Напыленное газодинамическое композиционное покрытие Al –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (а) и включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в нем (б)

В таблице 1 приведены твердость и содержание  $Al_2O_3$  в покрытии в зависимости от содержания  $Al_2O_3$  в напыляемой композиции, а в таблице 2 – механические свойства и пористость алюминиевых покрытий различной толщины.

Как следует из анализа представленных данных, рост толщины полученных на стальной основе по указанным режимам покрытий сопровождается некоторым увеличением их пористости. В случае тонких (18–80 мкм) покрытий она находится в интервале 1-3%. При толщинах, превышающих 160 мкм, пористость стабилизируется на уровне 2-6%.

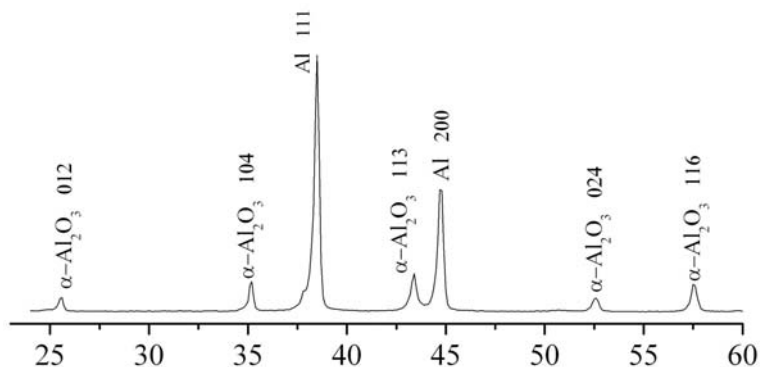


Рисунок 3 – Дифрактограмма напыленного газодинамического покрытия Al  $Al_2O_3$  до МДО

Таблица 1 – Твердость ХГДН покрытия Al- $Al_2O_3$  и его состав в зависимости от содержания  $Al_2O_3$  в напыляемой композиции

Содержание $Al_2O_3$ в напыляемой композиции, вес. %	20	25
Содержание $Al_2O_3$ в покрытии, вес. %	11	17
Твердость покрытия HV	42	46

Таблица 2 – Механические свойства и пористость алюминиевых покрытий различной толщины, напыленных порошком А-20-01 по режиму 3

Толщина, мкм	18	56	81	158	216	298	374	426
Адгезия, МПа	122	104	92	81	68	70	63	68
Твердость, МПа	940-1100	860-940	860-940	820-880	790-860	790-830	790-830	790-830
$\epsilon_k$ , %	42	37	29	24	22	23	22	24
Пористость, %	0-1	0-3	0-3	2-4	2-4	2-6	2-6	2-6

Исследуемые механические характеристики покрытий неоднозначно изменяются с ростом их толщины. Видно, что адгезия при увеличении толщины покрытия от 18 мкм до 216 мкм интенсивно снижается (от 122 до 68 МПа). При дальнейшем росте толщины вплоть до 426 мкм заметного изменения адгезии практически не происходит, ее значение находится на уровне 63–70 МПа. Подобная зависимость от толщины алюминиевого слоя наблюдается для критической деформации переходной зоны с покрытием до разрушения  $\epsilon_k$ , значения которой для толщин 18–56 мкм изменяется от 42 до 37%, тогда как для превышающих 200 мкм, составляет 22–24%. Твердость в этом диапазоне толщин сохраняется постоянной и составляет 790–830 МПа.

Стабилизация механических свойств газодинамического покрытия при толщине свыше 200 мкм может быть объяснена ростом в нем внутренних напряжений сжатия, возникающих в связи с сильной деформацией и наклепом частиц алюминия при ХГДН. Эти результаты согласуются с данными [8].

МДО осуществляется за счет окисления Al подслоя, т.е. постоянно идет процесс уменьшения его толщины с одновременным формированием двух новых слоев: основного рабочего слоя, контактирующего непосредственно с Al, и наружного – технологического. Толщины этих слоев изменяются в зависимости от времени обработки. Так для приведенных выше режимов МДО,

общая толщина покрытий через 1 и 1,5 часа составляла соответственно  $\sim 100$  и  $\sim 180$  мкм. При этом соотношение толщин наружного  $\delta_{нар}$  и основного  $\delta_{осн}$  слоев  $\delta_{нар} / \delta_{осн} = 0,308$  и  $0,369$  соответственно через 1 и 1,5 часа. Наружный слой имеет пористость до 6-8%, тогда как основной – 2-3%. Строение покрытий  $Al_2O_3$  после МДО дано на рисунках 4, 5.

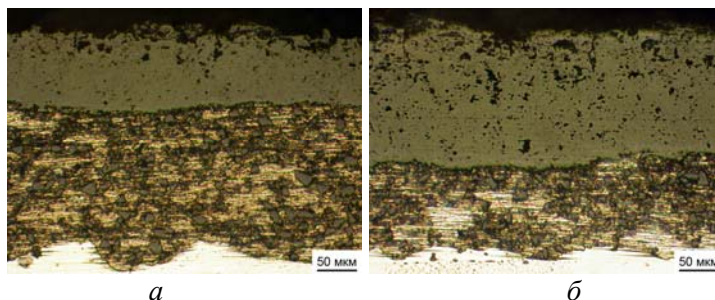


Рисунок 4 – Строение покрытия  $Al_2O_3$  после МДО: *а* – 1 час, *б* – 1,5 час

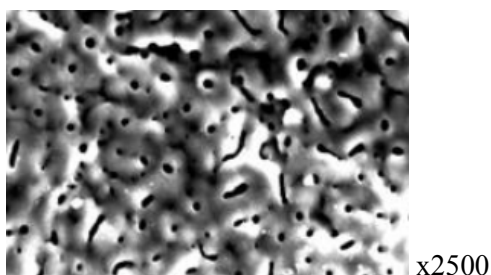


Рисунок 5 – Наружный вид покрытия  $Al_2O_3$  после МДО:  
Средний диаметр пор  $d_{cp} = 0,7$  мкм, число пор  $N = 2,3 \cdot 10^8$  см $^{-2}$ , пористость  $\Pi = 3,6$  %

Основной (рабочий) и наружный (технологический) слои имеют разный состав. Дифрактограммы наружного и рабочего слоев покрытий  $Al_2O_3$  после МДО в течение 1 и 1,5 часа приведены на рисунках 6, 7.

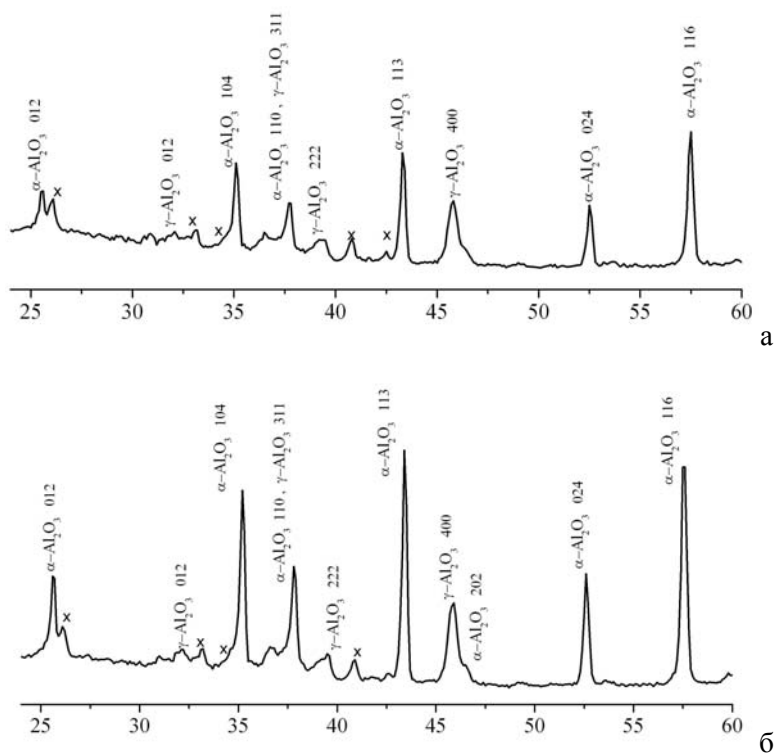


Рисунок 6 – Дифрактограммы наружного (*а*) и рабочего (*б*) слоев покрытия  $Al_2O_3$  после МДО в течение 1 часа

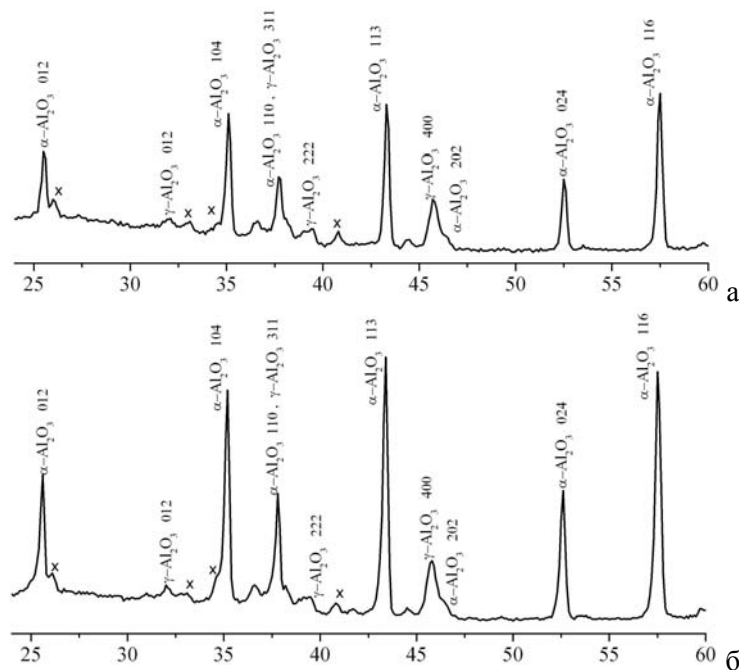


Рисунок 7 – Дифрактограммы наружного (а) и рабочего (б) слоев покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после МДО в течение 1,5 часа

Наружный и основной слои обогащены элементами электролита, что проявляется присутствием такой фазы как муллит. Его содержание выше в наружном слое, чем в основном, и снижается в обоих слоях по мере возрастания длительности МДО. Содержание корунда  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  всегда выше на глубине, т.е. в основном слое, тогда как содержание  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  всегда больше у поверхности - в наружном. При увеличении времени МДО содержание  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  возрастает в обоих слоях, тогда как содержание  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  соответственно падает. Различный состав и пористость покрытия объясняют распределение его микротвердости по глубине (рисунок 8). Представленные результаты исследования структуры, фазового состава и микротвердости изготовленных покрытий обобщены в таблице 3.

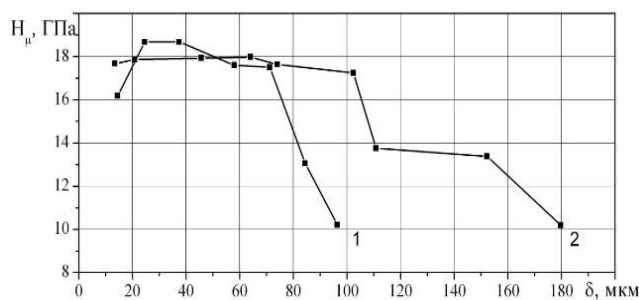


Рисунок 8 – Микротвердость  $\text{Al}_2\text{O}_3$  покрытия после МДО на расстоянии  $\delta$  от алюминиевого подслоя: время МДО 1 и 1,5 часа (кривые 1 и 2 соответственно)

Таблица 3 – Свойства и состав покрытия из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  после МДО

τ, час	Слой покрытия	Пористость, %	Толщина, мкм	Микротвердость $H_\mu$ , ГПа	Фазовый состав, %		
					муллит	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$
1	наружный технологический	6-8	22-26	10,2-14,6	16	39	45
	основной рабочий	2-3	76-80	16,2-18,9	10	52	38
1,5	наружный технологический	6-8	42-48	10,2-15,4	10	53	37
	основной рабочий	2-3	118-126	17,2-17,8	8	62	30

**Заключение.** Исследованы структурно-фазовое состояние и свойства покрытий, сформированных на стали холодным газодинамическим напылением порошков алюминия и последующим микродуговым оксидированием нанесенного подслоя. Показано, что полученные методом ХГДН покрытия обладают высоким уровнем адгезии, вязкости и твердости, что обеспечивается однородностью и низкой пористостью структуры алюминиевой основы и равномерностью распределения в ней частиц корунда, усвоенных из напыляемого порошка.

Установлено, что созданное методом МДО алюминиевого подслоя, изготовленного ХГДН на поверхности стальных образцов, керамическое  $\alpha$ - $Al_2O_3$  покрытие толщиной до 180 мкм характеризуется однородной структурой основного слоя. Преимущественное содержание в этом слое высокопрочной фазы  $\alpha$ - $Al_2O_3$  обеспечивает высокий (до 19 ГПа) уровень микротвердости и прочности адгезии, низкую пористость.

Достигнутые результаты позволяют утверждать, что созданные МДО  $Al_2O_3$  покрытия на стали способны выдержать интенсивное нагружение в процессе трения.

Представленные результаты получены в рамках НИР, финансируемой Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований в соответствии с договором Т17 КИГ-01 от 22.05.17.

### Список использованных источников

1. Витязь П.А. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильюшенко, В.Т. Сенють, А.И. Комаров и др. – Минск: Беларуская навука. – 2013, 380 с.
2. Витязь П.А. Создание износостойких упрочняющих покрытий микродуговым оксидированием непосредственной и последующей модификацией углеродными наноматериалами / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова // Перспективные технологии: монография / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – гл. 6, с.114–148.
3. Витязь П.А. Особенности формирования износостойких слоев на поверхности модифицированного фуллеренами МДО-покрытия при трении / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова, Т.А. Кузнецова // Трение и износ. – 2011, т. 32, № 4, с. 313 – 325.
4. Кулаков К.В. Технология восстановления деталей из алюминиевых сплавов газодинамическим напылением с упрочнением микродуговым оксидированием: дис. ... кан. техн. наук / К.В. Кулаков. – Орел, 2006. – 142 л.
5. Рябов В.Р. Применение биметаллических и армированных сталеалюминовых соединений/В.Р. Рябов. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
6. Витязь П.А. Теория и практика нанесения покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильюшенко, А.И. Шевцов, Е.Д. Манойло – Минск: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
7. Косарев В.Ф. Физические основы холодного газодинамического напыления: дис. ... доктора физ.-мат. наук / В.Ф. Косарев. – Новосибирск, 2003. – 292 л.
8. Тушинский Л.И., Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В., Мочалина Н.С. Структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления/ Л.И. Тушинский, А.П. Алхимов, В.Ф. Косарев, А.В. Плохов, Н.С. Мочалина // Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13, №1. – С. 141 – 145.

УДК 621

### ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $\alpha$ - $Al_2O_3$ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ, СФОРМИРОВАННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ (МДО) $Al$ ПОДСЛОЕВ

*Горанский Г.Г.<sup>1</sup>, Комаров А.И.<sup>2</sup>, Ваганов В.В.<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»*

*<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

**Введение.** Значительная номенклатура стальных деталей, работающих в условиях износа, высоких температур и химически активных сред (например, изделия вентильной группы, детали насосов и компрессоров, детали оборудования химической и пищевой промышленности), нуждается в увеличении ресурса работы. Это может достигаться МДО предварительно нанесенных на стальные поверхности алюминиевых покрытий. При реа-