

УДК 621.793

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

А.О. ГРИЩЕНКО, магистр техн. наукстарший преподаватель кафедры «Технология машиностроения»²

E-mail: nasya93-93@mail.ru

И.И. ТАРАН

старший научный сотрудник лаборатории газотермических методов упрочнения деталей машин

НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: igoritaran@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь*Поступила в редакцию 15.10.2024.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИНСТРУМЕНТОВ С АБРАЗИВСОДЕРЖАЩИМ ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Исследована возможность формирования абразивосодержащих покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена методом газопламенного напыления. С помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии показано, что в процессе газопламенного напыления частицы не достигают температурного интервала термоокислительной деструкции и основная структура СВМПЭ сохраняется. Определена зависимость прочности сцепления абразивосодержащих покрытий от скорости их охлаждения и состава пропано-воздушной смеси. Определены режимы напыления покрытий, содержащих частицы абразива от 0,3 до 1,2 мм, и покрытий с абразивом от 10 до 100 мкм. Полученные покрытия целесообразно использовать при изготовлении различного абразивного инструмента. Установлено, что введение в напыляемую абразивно-полимерную шихту наноразмерного наполнителя в виде порошка алмазосодержащей шихты ША-А позволяет повысить механические характеристики покрытий.

Ключевые слова: газопламенное напыление полимеров, частицы абразива, прочность сцепления покрытий, наноразмерный модификатор

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-88-96>

Введение. Цель исследований. Инструменты с полимерным покрытием, содержащим частицы абразива, используются для обработки широкого спектра материалов, включая сельскохозяйственные продукты (корнеплоды, зерна злаков), дерево и древесноподобные материалы, пластик, стекловолокно, мягкие металлы, эмалированные и окрашенные поверхности [1–4].

Композиты инструментального назначения на полимерной основе составляют половину от общего количества производимых абразивных изделий. Отличительной положительной особенностью технологии их получения является возможность производства при значительно (в 1,5–3 раза, а в некоторых случаях на порядок) более низких температурах, чем на металлической или керамической основах. Помимо того, абразивный ин-

струмент на полимерной основе за счет присущих высокомолекулярным соединениям (по сравнению с металлическими и керамическими связками) эластичности и упругости обладает более выраженной способностью к самозатачиванию [5].

Как правило, при абразивной обработке инструментом с закрепленным абразивом изделий из металла, резины, дерева и полимеров используются композиции на основе фенолформальдегидных, эпоксидных смол и вулканитов, которые являются многокомпонентными, содержат токсичные отвердители и другие модифицирующие добавки, поэтому технология их получения и переработки многостадийная и характеризуется относительно низкой производительностью [3, 5].

В странах ЕС в пищевой и перерабатывающей отраслях используются инструменты для

абразивной обработки, получаемые нанесением специальной «пищевой» эпоксидной смолы с абразивным наполнителем, цена которой составляет около 1 долл. США за грамм. Так, стоимость кругов абразивной обработки картофелечистки С/У РР-30 фирмы La Minerva (Италия) составляет 420 долл. США за единицу, а срок их службы не превышает 4 месяцев.

Одним из перспективных полимерных конструкционных материалов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) [6]. Сверхвысокая молекулярная масса этого инженерного термопласта определяет комплекс уникальных физико-механических свойств, резко отличающихся от свойств других марок полиэтилена. Благодаря сочетанию таких свойств, как износостойкость, стойкость к растрескиванию и ударным нагрузкам, морозостойкость, низкий коэффициент трения, а также способности сохранять эти свойства в широком интервале температур, СВМПЭ может применяться в экстремальных условиях эксплуатации в различных областях [7]. Высокие показатели СВМПЭ сохраняются и при использовании его в качестве напыляемого материала для формирования покрытий различного функционального назначения [8].

На наш взгляд, одним из наиболее эффективных путей решения проблемы создания недорогого инструмента для абразивной очистки и шлифования, обладающим высокими абразивными свойствами и возможностью многократного восстановления рабочей поверхности, является использование технологии газопламенного напыления композиций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, содержащего абразивные частицы.

Таким образом, целью исследований, результаты которых представлены в данной работе, является разработка технологического процесса газопламенного напыления композиционного покрытия «СВМПЭ — частицы абразива» на поверхность металлической основы с обеспечением высоких показателей механической обработки у получаемого инструмента.

Оборудование и методики экспериментов.

В экспериментах использовался аппарат ГН модели ОИМ 050 (рисунок 1) конструкции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси [9] при рабочем давлении пропана 0,16–0,18 МПа, воздуха 0,35–0,40 МПа.

Для составления смеси использовали порошки электрокорунда белого марки 25А зернистостью (по ФЕРА) F320, карбида кремния черного марки 54С с размером частиц 0,6–0,8 и 1,0–1,2 мм, а также порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4120 UHMWPE фирмы Celanese (Германия) с молекулярной массой $4,4 \cdot 10^6$ г/моль, рассеянный на фракции, мкм: 50–63; 63–100; 100–120; 120–160; 160–200; 200–315; 315–400; 400–500 на приборе ситового анализа модели 029.



Рисунок 1 — Термораспылитель ОИМ 050 в работе
Figure 1 — Thermal sprayer OIM 050 in operation

Объемное содержание абразива в смеси изменялось от 10 до 50 %.

Перед нанесением покрытия одну поверхность — пластину из стали Ст.3 размером $50 \times 20 \times 5$ мм — подвергали дробеструйной обработке колотой чугунной дробью ДЧК 1,4 с режимами: давление сжатого воздуха — 0,6 МПа; расход сжатого воздуха — $0,7 \text{ м}^3/\text{мин}$; угол атаки — $70\text{--}90^\circ$; расстояние до обрабатываемой поверхности — $60\text{--}80$ мм; время обработки — не менее 40 с.

Прочность сцепления полимерных покрытий СВМПЭ измеряли методом нормального отрыва с помощью адгезиметра Elcometer 506 (Великобритания).

Прочность при ударе покрытий определялась по ГОСТ 4765-73 на приборе «Константа У-2М». Сущность метода состоит в определении стойкости покрытия к разрушению или отслаиванию при деформации, вызванной падающим грузом на большой площади. Метод основан на определении максимальной высоты, при падении с которой груз определенной массы не вызывает механических повреждений покрытия (сколов, отслоений, трещин), видимых с использованием 4-кратной лупы.

Исследования степени кристалличности (СК) осуществляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на установке TGA/DSC 1HT/1600 319 DTA Mettler Toledo (Швейцария) в диапазоне температур $30\text{--}500^\circ\text{C}$ со скоростью нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. Степень кристалличности q определяли на ДСК-спектрах по удельной теплоте плавления кристаллической фазы полимера $Q_{\text{плав}}$ (Дж/г) по формуле:

$$q = (Q_{\text{плав}} / \Delta H_{\text{пл}}) \cdot 100,$$

где $\Delta H_{\text{пл}}$ — теплота плавления кристаллитов СВМПЭ, которая составляет 288 Дж/г в соответствии с [10].

Экспериментальные исследования и полученные результаты. При постановке задач исследования необходимо было учитывать широкий диапазон размеров абразивных зерен, которые могут применяться в полимер-абразивных материалах и покрытиях. Например, в аппаратах для механической скарификации (скарификация — нарушение целостности оболочки семян с целью облегчения их прорастания) используются абразивные зерна размером от нескольких до 200 микрон [11]. При обработке изделий из дерева используют инструмент с абразивными зернами от 80 до 300 мкм [12], а для очистки корнеплодов применяют абразивный инструмент с зернами от 300 мкм до 1,2 мм [13].

На первом этапе исследований была выполнена оценка сохранения структуры СВМПЭ, напыленного с большим количеством абразива (40 об.%). Необходимость этого вызвана тем, что нагретые в факеле пламени керамические частицы после падения на подложку довольно продолжительное время отдают тепло в окружающий их полимер, что может вызвать структурные изменения в полимерной матрице.

На рисунке 2 приведены спектры ДСК исходного порошка СВМПЭ (в состоянии поставки) и газопламенного покрытия. Результаты спектрального анализа сведены в таблице 1. Из представленных данных видно, что температура плавления исходного порошка СВМПЭ $T_{пл}$ составляет 142 °С в интервале плавления $\Delta T_{пл} = 17,8$ °С. В этом интервале происходят процессы частичного плавления, причем вначале плавлению подвергаются наиболее дефектные кристаллические области, затем происходит расплавление менее дефектных кристаллитов. Температура начала окисления $T_{окисл}^0$ исходного порошка СВМПЭ составляет 184 °С, а максимальная скорость окисления при $T_{окисл}^{max} = 206$ °С. На участке термогравиметрии наблюдается четкий пик прироста массы расплава полимера за счет поглощения кислорода из воздуха. На спектре материала композиционного покрытия такого пика не наблюдается, т. е. в процессе газопламенного напыления уже происходит интенсивное окисление.

Термоокислительная деструкция исходного порошка СВМПЭ начинается при температуре 380 °С и заканчивается при 420 °С. В данном температурном интервале потеря массы Δm составляет 35 масс. %, которая сопровождается деструкцией макромолекул с выделением газообразных продуктов CO_2 , CO , H_2O . Для материала покрытия интервал термоокислительной деструкции смещается

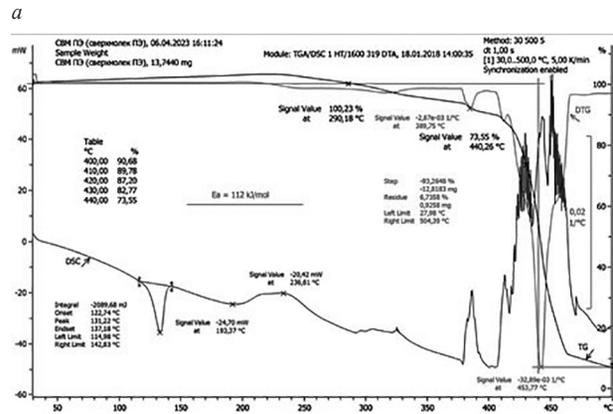
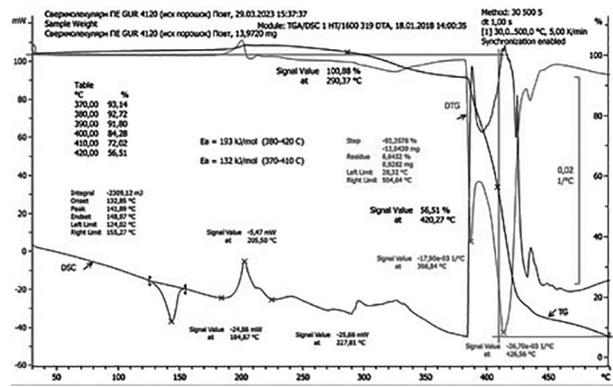


Рисунок 2 — ДСК-термограммы СВМПЭ: *a* — исходный порошок; *b* — покрытие
 Figure 2 — Differential scanning calorimetry thermograms of UHMWPE: *a* — initial powder; *b* — coating

ется в сторону высоких температур и составляет 400–440 °С, при этом потеря массы снижается в 2 раза и составляет 17 масс. %.

В процессе газопламенного напыления при оптимальных дистанциях напыления 150–200 мм и давлении воздуха 0,3 МПа температура частиц порошка СВМПЭ повышается до 180–200 °С [9]. В соответствии с полученными данными ДСК-анализа, частицы не достигают температурного интервала термоокислительной деструкции и основная структура СВМПЭ сохраняется.

В отличие от других способов газотермического напыления, метод газопламенного напыления (ГН) позволяет изменять состав расплавленного газового факела, увеличивая или уменьшая в горючей смеси количество окислителя. Как правило, в процессе ГН используется факел, получаемый при горении смеси стехиометрического состава (соотношение β — соотношение объемов воздуха и пропана, равное 22–24:1). Однако наши исследования показали существенное влияние

Таблица 1 — Сравнительные результаты ДСК-исследования исходного порошка СВМПЭ и газопламенного покрытия
 Table 1 — Comparative results of differential scanning calorimetry study of initial UHMWPE powder and gas-flame coating

Материал образца	$T_{пл}$, °С	$\Delta T_{пл}$, °С	$T_{окисл}^0$, °С	$T_{окисл}^{max}$, °С	$\Delta m, \% / \Delta T_{деструк}$, °С	$Q_{плав}$, Дж/г	$q, \%$
СВМПЭ исх. порошок	142,0	17,8	184,3	206,3	35,14 / 380–420	163,5	56,8
СВМПЭ покрытие	131,2	16,2	193,4	236,6	17,13 / 400–440	152,6	53,0

содержания воздуха в горючей смеси (распыляющей струе газа) на адгезию полимерных покрытий [14]. С увеличением соотношения β происходит интенсификация процесса возникновения в полимере кислородсодержащих групп (-ОН, -СООН). Для термопластичных полимеров их окисление приводит к увеличению энергии взаимодействия «полимер — металл». Кроме этого, с увеличением степени окисления полимерного расплава увеличивается размер надмолекулярных образований, что свидетельствует об уменьшении вязкости и силе поверхностного натяжения расплава. Данное обстоятельство способствует увеличению энергии взаимодействия полимера с подложкой за счет повышения процесса смачивания.

Следующий момент, который необходимо учитывать при газопламенном напылении композиций на основе полимеров — это скорость охлаждения сформированного покрытия. Установлено, что на степень кристалличности полимеров существенно влияет скорость охлаждения покрытия [15], при этом отмечается, что полимер в покрытии, нанесенном с медленным охлаждением, характеризуется относительно высокой степенью кристалличности.

Определено [14], что при медленном охлаждении покрытий, полученных из кристаллизующихся полимеров, последние характеризуются надмолекулярной структурой, состоящей из линейных агрегатов (пачек) в виде однородных по величине кольцевых сферолитов с размером 8–12 мкм. При высоких скоростях охлаждения образование надмолекулярной структуры полимера завершается на стадии сворачивания макромолекул в сферические глобулы с неоднородным по размеру составом, а в покрытии присутствуют как небольшие (5–10 мкм), так и мелкие (2–4 мкм) образования глобулярного типа. Кроме этого, у быстро охлажденных покрытий выявлено наличие большого

количества макротрещин, проходящих, вероятнее всего, по границам раздела между отдельными глобулами. Таким образом, увеличение степени кристалличности, вызываемое медленным охлаждением, в данном случае приводит к повышению прочности сцепления полимерного покрытия.

На следующем этапе были проведены исследования, позволившие оценить зависимость прочности сцепления абразив-содержащих покрытий от скорости их охлаждения и состава пропано-воздушной смеси, а также определить соотношение размеров частиц полимера и абразива. Последнее было обусловлено тем, что при использовании абразивов крупных фракций (более 500 мкм) отмечено снижение производительности процесса напыления и качества покрытий. Поэтому на данном этапе использовали частицы карбида кремния 54С.

Рациональные значения соотношений размеров частиц полимера и абразива определялись при соотношении воздуха и пропана в смеси 26:1 и скорости охлаждения покрытия не более 5 град/с.

Определялась работоспособность абразив-полимерного слоя и производительность напыления, оцениваемая как масса покрытия, нанесенная за 8 с и переведенная в кг/ч.

Для сравнительной оценки работоспособности абразив-полимерных покрытий пластины с покрытиями устанавливались в модернизированную машину трения СМЦ-2 и прижимались с усилием 150 Н к диску шириной 10 мм, изготовленному из стали Ст.3. Диск вращался со скоростью 300 об/мин и изнашивался о пластину с покрытием. Продолжительность испытаний каждой пластины 300 с. Перед испытаниями и после них диски и пластины с покрытиями взвешивались на лабораторных весах ML-300 (Mettler Toledo) и определялась потеря массы в %. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Работоспособность покрытий, нанесенных частицами полимера и абразива различных размеров
Table 2 — Performance of coatings deposited with polymer and abrasive particles of different sizes

№	Размер частиц абразива D , мм	Размер частиц полимера d , мкм	Соотношение размеров d/D	Потеря массы, %		Производительность напыления, кг/ч
				пластина с покрытием	диск	
1	0,6–0,8	50–63	0,08	0,21	1,42	3,2
2	0,6–0,8	63–100	0,12	0,21	1,41	3,2
3	0,6–0,8	100–120	0,16	0,24	1,33	3,1
4	0,6–0,8	120–160	0,20	0,28	1,32	2,9
5	0,6–0,8	160–200	0,26	0,30	1,08	2,6
6	0,6–0,8	200–315	0,36	0,36	0,95	2,1
7	0,6–0,8	315–400	0,50	0,39	0,74	1,6
8	1,0–1,2	50–63	0,05	0,20	1,39	3,1
9	1,0–1,2	63–100	0,07	0,21	1,38	3,0
10	1,0–1,2	100–120	0,10	0,22	1,36	3,0
11	1,0–1,2	120–160	0,13	0,24	1,33	2,9
12	1,0–1,2	160–200	0,16	0,25	1,30	2,8
13	1,0–1,2	200–315	0,23	0,27	1,28	2,5
14	1,0–1,2	315–400	0,33	0,33	1,10	2,1
15	1,0–1,2	400–500	0,41	0,35	0,91	1,5

Анализ результатов проведенных исследований показал, что при использовании относительно крупных зерен абразивов (0,5–1,2 мм) наилучшей работоспособностью при сохранении достаточно высокой производительности напыления обладают покрытия, полученные напылением смеси, содержащей частицы полимера, размер которых не превышает 0,25 диаметра абразивных частиц.

При исследовании влияния скорости охлаждения покрытий на их прочность сцепления с основой использовали охлаждающую струю воздуха, истекающую из сопла диаметром 7 мм с производительностью 1,5–16 м³/ч. Результаты исследований приведены на рисунке 3. Анализ приведенных результатов показывает, что максимальные значения прочности сцепления имеют покрытия, охлаждаемые со скоростью 1–5 град/с.

На следующем этапе исследований определили оптимальное соотношение рабочих газов в сжигаемой смеси. Охлаждение покрытий осуществляли со скоростью менее 5 град/с. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Анализ приведенных в таблице 3 результатов показывает, что максимальные значения прочно-

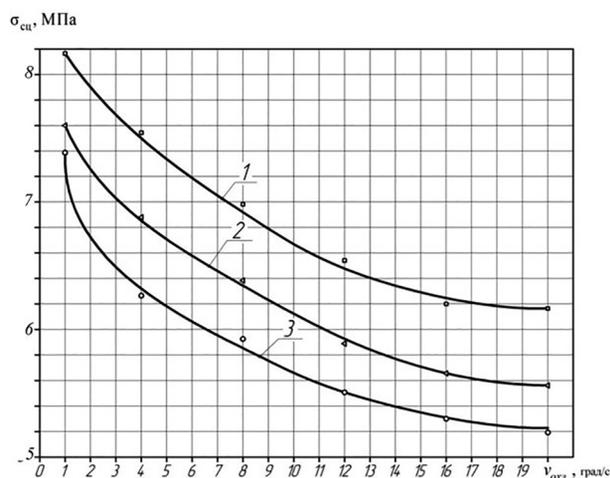


Рисунок 3 — Влияние скорости охлаждения покрытий на прочность сцепления со стальной основой:

1 — $\beta = 26$; 2 — $\beta = 24$; 3 — $\beta = 20$

Figure 3 — Effect of cooling rate of coatings on adhesion strength with steel base: 1 — $\beta = 26$; 2 — $\beta = 24$; 3 — $\beta = 20$

Таблица 3 — Значения адгезии покрытий при различных величинах β

Table 3 — Adhesion values of coatings at different β values

Соотношение окислителя и пропана β	Прочность сцепления покрытий, МПа	
	Покрытие из СВМПЭ	Покрытие из 40% SiC + 60% СВМПЭ
19	6,8	6,4
20	7,4	6,9
22	7,6	7,1
24	7,8	7,3
26	8,0	7,6
27	8,0	7,6
28	7,7	7,2

сти сцепления имеют покрытия, напыленные смесью при соотношении горючего газа и окислителя равном 1:26–27, причем эта закономерность сохраняется и для покрытий, содержащих абразивные частицы.

В результате проведенных исследований были определены режимы газопламенного напыления шихты, состоящей из порошка СВМПЭ и крупных частиц абразива (0,5–1,2 мм), которые позволили формировать покрытия (рисунок 4) для изготовления абразивного инструмента [16].

Разработана технология восстановления абразивных кругов картофелечистки С/У РР-30 фирмы La Minerva (Италия) нанесением композиционного покрытия на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и порошка карбида кремния. Восстановление абразивных кругов (рисунок 5) может быть неоднократным. Стойкость восстановленных кругов более чем в 1,5 раза превышает стойкость кругов, поставляемых фирмой-изготовителем.

Дальнейшие исследования были посвящены определению рациональных режимов формирования покрытий, которые можно было бы использовать в аппаратах для механической скарификации зерен, полировки мягких металлов, дерева, полимеров. Использовали частицы электрокорунда (Al_2O_3) размером от 10 до 40 мкм, порошок карбида бора (B_4C) с размером частиц от 60 до 100 мкм

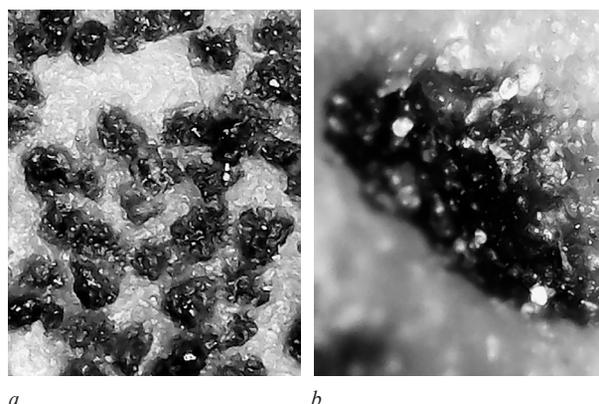


Рисунок 4 — Вид поверхности покрытия с частицами карбида кремния размером 0,5–1,2 мм: а — $\times 100$; б — $\times 600$

Figure 4 — View of coating surface with 0.5–1.2 mm silicon carbide particles: a — $\times 100$; b — $\times 600$



Рисунок 5 — Внешний вид восстановленного абразивного круга

Figure 5 — Appearance of the reconditioned abrasive disk



Рисунок 6 — Вид поверхности покрытия с частицами электрокорунда (a, b) и структура покрытия с 40 об.% карбида бора (c): оптический микроскоп (a, c — $\times 200$), сканирующий электронный микроскоп (b — $\times 1500$)
 Figure 6 — Surface view of coating with electrocorundum particles (a, b) and coating structure with 40 vol.% boron carbide (c): optical microscope (a, c — $\times 200$), scanning electron microscope (b — $\times 1,500$)

и порошок СВМПЭ со средним размером частиц 120 мкм.

Изучение вида поверхности (рисунок 6 a, b) и металлографических шлифов покрытий (см. рисунок 6 c) показало, что абразивные частицы равномерно распределены по объему слоя и отсутствуют дефекты в виде пустот на границе между полимером и частицами абразива.

С целью оценки влияния диаметра частиц наполнителя на адгезию и износостойкость проведены соответствующие испытания образцов покрытий, в которых диаметры частиц корунда d_n изменялись по отношению к диаметру частиц СВМПЭ D_n в пределах от 0,05 до 1,2. Охлаждение покрытий осуществляли со скоростью менее 5 град/с. Содержание корунда составило 30 об.%. Износостойкость напыленных покрытий оценивалась по значениям интенсивности изнашивания I при сухом трении покрытий по закаленной стали, определенной методом искусственных баз по уменьшению толщины покрытия за километр пути [17]. Результаты испытаний приведены на рисунке 7.

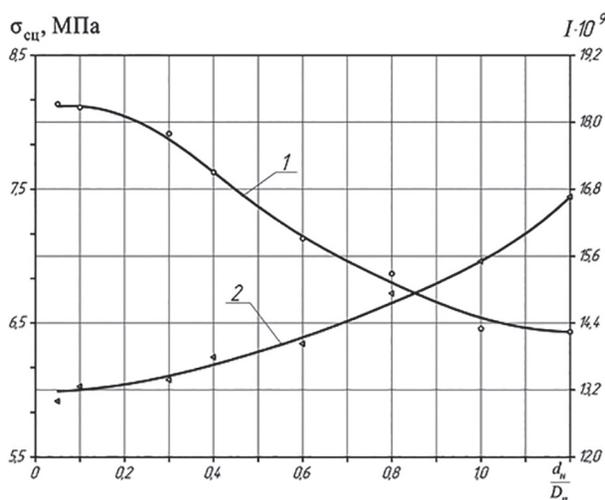


Рисунок 7 — Влияние соотношения размеров частиц абразива d_n и полимера D_n на адгезию (1) покрытий и интенсивность изнашивания (2)
 Figure 7 — Ratio influence of abrasive particle size d_n and polymer D_n on adhesion (1) of coatings and wear rate (2)

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее высокие значения адгезии и износостойкости покрытий обеспечиваются при использовании наиболее мелких фракций абразива. Это можно объяснить тем, что при перемешивании компонентов порошкового состава в лабораторной мельнице происходило конгломерирование частиц полимера СВМПЭ и частиц абразива вследствие трибостатического взаимодействия [18]. Благодаря малым размерам, частицы абразива плакируют более крупные частицы полимера. При попадании таких конгломерированных частиц в пламя термораспылителя при нанесении газопламенного покрытия происходит переход частиц полимера в расплавленное состояние со смачиванием поверхности частиц абразива, обеспечивая достаточно высокую прочность сцепления наполнителя с полимерной основой. Исследования, проведенные методом СЭМ на приборе TESCAN (см. рисунок 6 b), это подтвердили.

Известно, что наполнитель в полимерных покрытиях выполняет роль армирующего элемента, который в зависимости от его природы, состава и степени наполнения повышает прочностные свойства покрытия [10]. Причем наибольший эффект на структуру полимеров оказывают частицы наполнителя нанометрового диапазона. Так, в работе [19] показано, что использование порошков оксидов алюминия α - и γ - Al_2O_3 с диаметром частиц 7–40 нм, оксидов кремния SiO_2 с диаметром частиц 7–25 нм, а также нитрида алюминия AlN с диаметром частиц 35 нм и нитрида кремния Si_3N_4 с диаметром частиц 20 нм в качестве структурирующих модификаторов в количестве до 1 масс.% приводит к увеличению деформационно-прочностных характеристик полимерных композиционных материалов по сравнению с исходным СВМПЭ.

В качестве структурного модификатора полимер-абразивного покрытия было предложено использовать порошок алмазосодержащей шихты ША-А (ТУ РБ 100056180.003–2003) со средним диаметром частиц 10 нм [20].

В таблице 4 приведены составы наносимых покрытий, их значения адгезии к стальной под-

Таблица 4 — Состав покрытий и их физико-механические свойства

Table 4 — Composition of coatings and their physical and mechanical properties

№	Количество наполнителей, об. %		Адгезия, МПа	Интенсивность изнашивания $I \cdot 10^9$	Прочность при ударе, см
	SiC	ША-А			
1	10	0,05	8,1	15,95	65
2	10	0,1	8,4	14,30	85
3	20	0,1	8,5	13,85	100
4	30	0,1	8,7	13,20	100
5	40	0,1	8,7	13,05	100

ложке, прочность при ударе по ГОСТ 4765-73 и интенсивность изнашивания при сухом трении. Соотношение d_n / D_n составило 0,1–0,25.

На основании проведенных исследований был предложен состав полимер-абразивного покрытия, обладающего повышенными механическими свойствами [21].

Заключение. Предложен метод формирования абразивсодержащих покрытий на инструменте, использующий газопламенное напыление композиционной шихты, включающей порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена и частицы абразива.

Данные ДСК-анализа показали, что в процессе напыления частицы не достигают температурного интервала термоокислительной деструкции и основная структура СВМПЭ сохраняется.

Определена зависимость прочности сцепления абразивсодержащих покрытий от скорости их охлаждения и состава пропано-воздушной смеси. Установлено, что максимальные значения прочности сцепления имеют покрытия, напыленные факелом пламени, образованном горючей смесью при соотношении пропана и воздуха, равном 1:26–27, и охлаждаемые со скоростью менее 5 град/с.

Показано, что при использовании относительно крупных зерен абразивов (0,5–1,2 мм) наилучшей работоспособностью при сохранении достаточно высокой производительности напыления обладают покрытия, полученные напылением смеси, содержащей частицы полимера, размер которых не превышает 0,25 диаметра абразивных частиц.

Предложена и успешно апробирована технология восстановления абразивных кругов карбофелечистки C/Y PP-30 фирмы La Minerwa (Италия) нанесением композиционного покрытия на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и порошка карбида кремния.

Установлено, что введение в напыляемую абразивно-полимерную шихту наноразмерного наполнителя в виде порошка алмазсодержащей шихты ША-А позволяет повысить механические характеристики покрытий.

Список литературы

1. Подашев, Д.Б. Финишная обработка деталей эластичными полимерно-абразивными инструментами / Д.Б. Подашев. — Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. — 246 с.
2. Использование алмазов в абразивных инструментах для авиакосмической промышленности // ROUGH POLISHED. — URL: <https://rough-polished.expert.ru/expertise/96599.html> (дата обращения: 07.11.2023).
3. Технологии производства алмазных инструментов: от сырья до готового продукта // ДОН-КРИСТАЛЛИ. — URL: <https://doncrystal.ru/stati/tehnologii-proizvodstva-almaznyx-instrumentov-ot-syrya-do-gotovogo-produkta.html> (дата доступа: 07.11.2023).
4. Полировальные круги и головки на полимерных связках BRUNI // Абразивы и шлифование. — URL: http://www.abrasiv.ru/?page_id=2482 (дата обращения: 07.11.2023).
5. Пини, Б.Е. Абразивно-полимерные инструменты для механической обработки деталей / Б.Е. Пини, О.В. Крылов, Е.А. Хачикян // Машиностроение и инженерное образование. — 2016. — № 2(47). — С. 18–23.
6. Chih, A. Frictional and mechanical behavior of UHMWPE composite coatings / A. Chih, A. Ansón-Casaos, J.A. Puértollas // Tribology International. — 2017. — Vol. 116. — P. 295–302. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.027>.
7. Валуева, М.И. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) / М.И. Валуева, А.С. Колобков, С.С. Малаховский // Труды ВИАМ. — 2020. — № 3(87). — С. 49–57. — DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-3-49-57>.
8. Напыление сверхвысокомолекулярного полиэтилена для защиты нефтегазового и химического оборудования от воздействия агрессивных сред / В.А. Аверченко, С.И. Головин, Л.Г. Попович [и др.] // Сварочное производство. — 2007. — № 7. — С. 36–40.
9. Methodologies and applications for analytical and physical chemistry / A.K. Hagh, S. Thomas, S. Palit, P. Main // Flame Spraying of Polymers: Distinctive Features of the Equipment and Coating Applications / Y. Korobov, M. Belotserkovskiy. — Oakville: Apple Academic Press, 2018. — Ch. 14. — Pp. 267–283.
10. Дорожкин, В.П. Химия и физика полимеров: учеб. пособие / В.П. Дорожкин, Е.М. Галимова. — 2-е изд. — Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологич. ин-т (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. — 240 с.
11. Разработка операционной технологии предпосевной обработки семян козлятника экспериментальным скарификатором / Э.Р. Хасанов, Р.Р. Камалетдинов, Д.И. Маскулов, Р.З. Мусин // Вестник Башкирского гос. аграрного ун-та. — 2020. — № 1(53). — С.142–148. — DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-53-1-142-148>.
12. Гришкевич, А.А. Результаты исследований, определяющие критические режимы шлифования древесины / А.А. Гришкевич, А.Ю. Юдицкий // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. — 2020. — № 2(234). — С. 336–342.
13. Модель тепловой нагрузки при динамической абразивной обработке пищевых материалов / Г.В. Алексеев, Б.А. Вороненко, Д.В. Харитонов, А.Г. Лей // Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. — 2016. — № 4(70). — С. 56–60. — DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-56-60>.
14. Белоцерковский, М.А. Влияние режимов газопламенного напыления полимерными шнурами на свойства формируемых покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. — 2014. — № 11. — С. 91–96.
15. Каблов, В.Ф. Проблемы современной технологии полимеров / В.Ф. Каблов. — Волгоград: ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2019. — 325 с.
16. Патент ВУ 24049, МПК С 08J 5/14 (2006.01), В 24D 3/20 (2006.01), В 05D 1/08 (2006.01). Способ изготовления абразивного инструмента: № а 20220133: заявлено 25.05.2022: опубл. 30.06.2023 / Белоцерковский М.А., Грищенко А.О., Таран И.И.; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. — URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=43625> (дата обращения: 07.11.2023).
17. Негров, Д.А. Влияние низкочастотной модуляции на механические свойства и триботехнические характеристики полимерных композиционных материалов / Д.А. Негров, В.Ю. Путинцев // Ползуновский вестник. — 2021. —

- № 4. — С. 140–145. — DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018>.
18. Исследование процессов трибоэлектризации порошков // Helpkins. — URL: <https://helpiks.org/4-46539.html> (дата обращения: 08.11.2023).
 19. Охлопкова, А.А. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ / А.А. Охлопкова, Т.А. Охлопкова, Р.В. Борисова // Наука и образование. — 2015. — № 2. — С. 85–90.
 20. Вариков, Г.А. Оптимизация процесса газотермического напыления полимерных покрытий, модифицированных наноалмазами / Г.А. Вариков, К.М. Дрозд, В.И. Жорник // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. — 2019. — Т. 3, № 1. — С. 23–31. — DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-1.23>.
 21. Патент ВУ 24050, МПК С 09D 123/06 (2006.01), С 23С 4/10 (2006.01), С 23С 4/129 (2006.01). Композиционный порошковый состав для газопламенного напыления полимерных покрытий: № а 20220134: заявлено 25.05.2022: опубл. 30.06.2023 / Белоцерковский М.А., Жорник В.И., Дубкова В.И., Таран И.И.; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. — URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=43626> (дата обращения: 08.11.2023).

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: mbelotser@gmail.com

GRISHCHENKO Anastasia O.

Senior Lecturer of the Department “Engineering Technology”²

E-mail: nasya93-93@mail.ru

TARAN Igor I.

Senior Researcher of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Component Hardening of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹

E-mail: igoritaran@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received October 15, 2024.

USING FLAME SPRAYING TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURE OF TOOLS WITH ABRASIVE-CONTAINING POLYMER COATING

The possibility of forming abrasive-containing coatings based on ultra-high molecular weight polyethylene by flame spraying has been studied. Using the method of differential scanning calorimetry, it is shown that in the process of gas-flame spraying, particles do not reach the temperature range of thermal-oxidative destruction, and the basic structure of UHMWPE is preserved. The dependence of the adhesion strength of abrasive-containing coatings on their cooling rate and the composition of the propane-air mixture has been determined. Spraying modes have been determined for coatings containing abrasive particles from 0.3 to 1.2 mm, and coatings with abrasive from 10 to 100 μm. It is advisable to use the resulting coatings in the manufacture of various abrasive tools. It has been established that the introduction of a nanosized filler in the form of powdered diamond-containing charge ShA-A into the sprayed abrasive-polymer mixture makes it possible to increase the mechanical characteristics of coatings.

Keywords: flame spraying of polymers, abrasive particles, adhesion strength of coatings, nanosized modifier

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-4-69-88-96>

References

1. Podashev D.B. *Finishnaya obrabotka detaley elastichnymi polimerno-abrazivnymi instrumentami* [Finishing of parts with elastic polymer-abrasive tools]. Irkutsk, Irkutskiy natsionalnyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet Publ., 2018. 246 p. (in Russ.).
2. *Ispolzovaniealmazov v abrazivnykh instrumentakh dlya aviakosmicheskoy promyshlennosti* [The use of diamonds in abrasive tools for the aerospace industry]. 2015. Available at: <https://rough-polished.expert/ru/expertise/96599.html> (accessed November 7, 2023) (in Russ.).
3. *Tekhnologii proizvodstvaalmaznykh instrumentov: ot syrya do gotovogo produkta* [Diamond tools production technologies: from raw materials to finished product]. Available at: <https://doncristall.ru/stati/tekhnologii-proizvodstva-almaznykh-instrumentov-ot-syrya-do-gotovogo-produkta.html> (accessed November 7, 2024) (in Russ.).
4. *Polirovalnye krugi i golovki na polimernykh svyazkakh BRUNI* [Polishing wheels and heads on polymer bonds BRUNI]. Available at: http://www.abrasiv.ru/?page_id=2482 (accessed November 7, 2023) (in Russ.).

5. Pini B.E., Krylov O.V., Khachikyan E.A. Abrazivno-polimernye instrumenty dlya mekhanicheskoy obrabotki detaley [Scraping-polymeric tools for part machining]. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovanie*, 2016, no. 2(47), pp. 18–23 (in Russ.).
6. Chih A., Ansón-Casaos A., Puértolas J.A. Frictional and mechanical behavior of UHMWPE composite coatings. *Tribology international*, 2017, vol. 116, pp. 295–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.027>.
7. Valueva M.I., Kolobkov A.S., Malakhovskiy S.S. Cverkhvysokomolekulyarnyy polietilen: ryнок, svoystva, napravleniya primeneniya (obzor) [Ultra-high molecular weight polyethylene: market, properties, directions of application (review)]. *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 3(87), pp. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-3-49-57> (in Russ.).
8. Avepchenko V.A., Golovin S.I., Popovich L.G., Puzyakov A.A., Puzpyakov A.F. Napylenie sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena dlya zashchity neftegazovogo i khimicheskogo oborudovaniya ot vozdeystviya agressivnykh sred [Spraying ultra-high molecular weight polyethylene to protect oil and gas and chemical equipment from the effects of aggressive environments]. *Svarchnoe proizvodstvo*, 2007, no. 7, pp. 36–40 (in Russ.).
9. Korobov Y., Belotserkovsky M. Flame spraying of polymers: distinctive features of the equipment and coating applications. *Methodologies and applications for analytical and physical chemistry*, 2018, ch. 14, pp. 267–283.
10. Dorozhkin V.P., Galimova E.M. *Khimiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers]. Nizhnekamsk, Nizhnekamskiy khimiko-tehnologicheskii institut (filial) FGBOU VPO “KNITU” Publ., 2013. 240 p. (in Russ.).
11. Khasanov E.R., Kamaletdinov R.R., Maskulov D.I., Musin R.Z. Razrabotka operatsionnoy tekhnologii predposevnoy obrabotki semyan kozlyatnika eksperimentalnym skarifikatorom [Development of operational technology for preseeding treatment of seeds of goatline with experimental scarificator]. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*, 2020, no. 1(53), pp. 142–148. DOI: <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-53-1-142-148> (in Russ.).
12. Grishkevich A.A., Yuditsky A.Yu. Rezultaty issledovaniy, opredelyayushchie kriticheskie rezhimy shlifovaniya drevesiny [Research results that determine the critical modes of wood grinding]. *Proceedings of BSTU. Issue 1. Forestry. Nature management. Processing of renewable resources*, 2020, no. 2(234), pp. 336–342 (in Russ.).
13. Alekseev G.V., Voronenko B.A., Kharitonov D.V., Leu A.G. Model teplovoy nagruzki pri dinamicheskoy abrazivnoy obrabotke pishchevykh materialov [Model of the heat load under dynamic abrasive processing of food material]. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2016, no. 4, pp. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-56-60> (in Russ.).
14. Belotserkovsky M.A., Chekulaev A.V. Vliyanie rezhimov gazoplamennogo napyleniya polimernymi shnurami na svoystva formiruemykh pokrytiy [Influence of flame spraying modes of polymer cord on the properties of coatings formed]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied sciences*, 2014, no. 11, pp. 91–96 (in Russ.).
15. Kablov V.F. *Problemy sovremennoy tekhnologii polimerov* [Problems of modern polymer technology]. Volgograd, Volzhskiy politekhnicheskii institut (filial) Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta Publ., 2019. 325 p. (in Russ.).
16. Belotserkovsky M.A., Grishchenko A.O., Taran I.I. *Sposob izgotovleniya abrazivnogo instrumenta* [Method for manufacturing abrasive tools]. Patent BY, no. 24049, 2023. Available at: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=43625> (accessed November 7, 2023) (in Russ.).
17. Negrov D.A., Putintsev V.Yu. Vliyanie nizkochastotnoy modulyatsii na mekhanicheskie svoystva i tribotekhnicheskie kharakteristiki polimernykh kompozitsionnykh materialov [Influence of low-frequency modulation on mechanical properties and tribotechnical characteristics of polymer composite materials]. *Polzunovskiy vestnik*, 2021, no. 4, pp. 140–145. DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.018> (in Russ.).
18. *Issledovanie protsessov triboelektrizatsii poroshkov* [Research of processes of triboelectrization of powders]. Available at: <https://helpiks.org/4-46539.html> (accessed November 8, 2023) (in Russ.).
19. Okhlopkova A.A., Okhlopkova T.A., Borisova R.V. Upravlenie protsessami strukturoobrazovaniya v polimernykh kompozitsionnykh materialakh na osnove SVMPE [Control of structure formation processes in polymer composite materials based on UHMWPE]. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 2, pp. 85–90 (in Russ.).
20. Varikov G.A., Drozd K.M., Zhornik V.I. Optimizatsiya protsesa gazotermicheskogo napyleniya polimernykh pokrytiy, modifitsirovannykh nanoalmazami [Optimization of the gas-thermal spray process polymeric coatings modified by nanoalams]. *Journal of civil protection*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2019.3-1.23> (in Russ.).
21. Belotserkovsky M.A., Zhornik V.I., Dubkova V.I., Taran I.I. *Kompozitsionnyy poroshkovyy sostav dlya gazoplamennogo napyleniya polimernykh pokrytiy* [Composite powder composition for flame spraying of polymer coatings]. Patent BY, no. 24050, 2023. Available at: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=43626> (accessed November 8, 2023) (in Russ.).