



# МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 62-752.2.

В.К. ШЕЛЕГ, член-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
заведующий кафедрой «Технология машиностроения»<sup>1</sup>  
E-mail: Sheleh\_V@tut.by

МА МИНЬ

аспирант<sup>1</sup>

E-mail: ku.tau@mail.ru

М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.  
заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин  
НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>2</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

М.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ, канд. техн. наук

ведущий научный сотрудник лаборатории приводных систем и технологического оборудования

НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»<sup>2</sup>

E-mail: levancev@mail.ru

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

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

Поступила в редакцию 26.01.2023.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОЛИМЕРОВ И МЕТАЛЛОВ

*Исследованы процессы получения демпфирующих полимерных (газопламенное напыление порошков) и композиционных металлических покрытий (деформационное плакирование гибким инструментом). Установлено, что покрытия, наносимые газопламенным методом порошками термопластичных полимеров, обеспечивают достаточно высокую эффективность демпфирования, при этом лучшие диссипативные характеристики обеспечиваются при напылении порошком полиэтилентерефталата. Максимальная прочность сцепления (10,5–10,7 МПа) на нормальный отрыв покрытий, нанесенных порошком полиэтилентерефталата достигается в случае использования горючей смеси с соотношением пропана и воздуха 1:26 и последующим охлаждением со скоростью не более 3 град/с. На основании результатов триботехнических испытаний выбран состав спеченного бронзографита для нанесения шумопоглощающих покрытий методом деформационного плакирования. Изучение влияния режимных параметров процесса плакирования на толщину и сплошность сформированного слоя покрытия из бронзографита показало, что соотношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали и линейной скорости вращения щетки должно находиться в пределах 0,23–0,27, значения натяга  $N$  — в диапазоне 0,8–1,5 мм при числе проходов  $n = 8–12$ . Микротвердость плакированного слоя составила  $H_{0,049} = 1700$  МПа, что на 25 % превысило микротвердость материала-донора.*

**Ключевые слова:** газопламенное напыление, порошки полимеров, логарифмический декремент затухания колебаний, деформационное плакирование гибким инструментом, покрытие из бронзографита

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-42-52>

**Введение.** В современном станкостроении проблема снижения шума и вибраций становится чрезвычайно актуальной, поскольку у большинства металлорежущих станков нормированные уровни звукового давления находятся в пределах 84–100 дБ и более [1]. Однако хотя эти уровни и обеспечиваются при изготовлении станков, тем не менее превышают предельно допустимые санитарные нормы согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Наиболее высокие уровни шума зарегистрированы у крупногабаритных токарных, револьверных, фрезерных и шлифовальных станков [1]. Как показали исследования [2–4], основными узлами, определяющими виброакустические характеристики изделий машиностроения, являются зубчатые передачи приводных механизмов. Поэтому поиск путей и отработка конструкторско-технологических решений, направленных на снижение шума и вибраций, генерируемых зубчатыми передачами, являются важными задачами.

Улучшение виброакустических характеристик зубчатых передач обеспечивается изготовлением колес из сплавов с высокими демпфирующими свойствами, а также нанесением покрытий на торцы [4] и/или рабочий профиль зубьев колес [5]. Покрытия на торцах колес из более легких материалов (например, приклеенные куски холста или пластмассы) либо гальванические покрытия из меди, цинка, олова и никеля при первоначальном уровне 90 дБ обеспечивают снижение уровня шума передачи до 81, 80, 78, 76 дБ соответственно [6]. Следует, однако, отметить, что нанесение покрытий на торцы колес дает эффект лишь в области высоких частот, где расположены собственные частоты колебаний обода и диска. Кроме того, несмотря на положительный эффект по снижению шума и демпфированию колебаний, гальванические покрытия обладают слабой адгезией к основе и поэтому быстро отслаиваются. К тому же технологии гальванического осаждения экологически небезопасны.

Покрытия на рабочий профиль зубьев колес наносят преимущественно с целью улучшения их нагрузочной способности [7]. Вместе с тем в процессе работы зацепления покрытие может обеспечить и снижение шума, обусловленного пересопряжением зубьев. Например, медная пленка толщиной до 2 мкм способствует уменьшению уровня шума эвольвентных зубчатых передач в среднем на 15 % [5]. Однако покрытие на рабочем профиле зубьев иногда может приводить к ухудшению работоспособности зубчатых колес [7]. Поэтому при нанесении покрытий на зубья колес чрезвычайно важным является обоснованный выбор состава и технологии нанесения покрытий. К сожалению, до настоящего времени известно сравнительно немного данных об опыте практического использования покрытий на зубьях колес для улучшения виброакустических характе-

ристик зубчатых передач. Остаются открытыми вопросы, касающиеся выбора рационального состава материала покрытия, толщины и количества наносимых слоев, технологий их формирования, что обуславливает необходимость проведения дальнейших исследований.

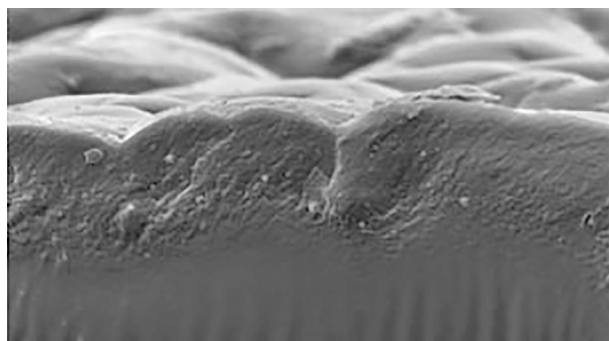
В [8, 9] описаны предварительные эксперименты по нанесению полимерных и металлических покрытий и измерению их демпфирующей способности. Данная статья посвящена детальному изучению выбора материалов покрытий и процессов их нанесения (газопламенное напыление и деформационное плакирование гибким инструментом) с целью определения рациональных технологических режимов.

**Экспериментальные исследования по выбору полимерных материалов и режимов их газопламенного нанесения.** Демпфирующие свойства из неметаллических материалов на основе полимеров, эластомеров, клеев, пластмасс, резин и других изучены достаточно хорошо, показана высокая эффективность их применения. Вместе с тем не получили должного освещения вопросы, связанные с технологией нанесения демпфирующих покрытий на основе полимеров. Практика показывает, что в сравнении с известными покрытиями, полученными с помощью электростатики, погружения в расплав, напыленные покрытия из полимерных порошковых материалов отличаются достаточно высокими значениями прочности сцепления с основой [10–12]. В зависимости от метода подготовки поверхности под нанесение покрытия и режимов напыления, значение адгезии покрытия к основе может быть от 5,0 до 9,2 МПа, что намного превышает значения этого параметра у известных неметаллических покрытий. Это следует учитывать как при выборе материала, так и метода напыления вибропоглощающих покрытий. Однако известных данных пока недостаточно, чтобы обоснованно осуществить такой выбор. Помимо этого, использование авторами работ по полимерным материалам и покрытиям различных методик определения диссипативных характеристик [13, 14] не позволяет выполнить их сравнительный анализ и однозначно установить, какое полимерное покрытие стоит рекомендовать в том или ином случае.

В данном разделе приведены результаты исследований процессов газопламенного формирования покрытий из наиболее распространенных термопластов: полиэтилена высокого давления ПЭВД (ГОСТ 16338-85) марки 10703-20, полиэтилентерефталата ПЭТФ (ГОСТ Р 51695-2000), полиамида марки ПА 6 (ОСТ 6-06-09-93), полученных криогенным измельчением гранул полимеров; сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) торговой марки Hostalen GUR 412. Размер напыляемых частиц 60–200 мкм, толщина напыленного слоя 0,5–1,4 мм.



a



b

**Рисунок 1** — Нанесение полимерного покрытия термораспылителем ОИМ 050 (a) и торцевой срез покрытия из полиэтилентерефталата (b) ( $\times 150$ , микроскоп Levenhuk LabZZ)  
**Figure 1** — Application of a polymer coating with a thermal sprayer OIM 050 (a) and an end section of a coating made of polyethylene terephthalate (b) ( $\times 150$ , Levenhuk LabZZ microscope)

С использованием термораспылителя ОИМ 050 [15] и технологии подготовки поверхности струйно-абразивной обработкой, рекомендованной в [16, 17], полимерные покрытия напыляли на образцы из стали 20 (рисунок 1).

Исследования декремента затухания колебаний образцов выполняли на стенде, кинематическая схема которого основана на нагружении свободного конца консольно закрепленного образца, резком снятии нагрузки и регистрации свободных затухающих колебаний бесконтактным датчиком индукционного типа, связанного с компьютером [15, 18]. Как показало изучение декремента затухания колебаний стальных образцов, полимерные покрытия могут обеспечивать значительное повышение демпфирующих свойств (таблица 1). При этом эффективность демпфирования определяли следующим образом:

$$\mathcal{E}_\delta = \frac{\delta_k \cdot 100\%}{\delta_0} - 100\%,$$

где  $\mathcal{E}_\delta$  — эффективность демпфирования;  $\delta_k, \delta_0$  — декремент затухания образцов с покрытием и без него.

Анализ полученных результатов показывает, что декремент затухания колебаний увеличивается с ростом толщины полимерных покрытий. Скорее всего, основную роль в повышении демп-

фирующей способности с увеличением толщины покрытий играют факторы, связанные как с природой материала полимерного покрытия, так и с явлениями, сопутствующими газопламенному напылению и адгезионному взаимодействию покрытия с основой. Более высокие диссипативные характеристики обеспечиваются при напылении порошком полиэтилентерефталата.

При выборе режимов газопламенного напыления полимерных покрытий следует особое внимание обращать на величину их прочности сцепления с металлической основой и рекомендовать те из них, которые обеспечивают максимальные значения адгезии. Исследования показали, что для всех используемых типов термопластов адгезия покрытий повышается с увеличением дистанции напыления от 50 до 200 мм, а затем наблюдается снижение этого показателя (рисунок 2). Это объясняется тем, что на дистанциях 150–200 мм достигается максимальный нагрев частиц напыляемого порошка, а воздействие факела пламени на напыляемое покрытие меньше, чем на более коротких дистанциях.

Следующий момент, который необходимо было учитывать при газопламенном напылении композиций на основе полимеров, — это скорость охлаждения сформированного покрытия. Установлено, что на степень кристалличности полимеров существенно влияет скорость охлаждения покрытия [19], при этом отмечается, что полимер в покрытии, нанесенном с медленным охлаждением, характеризуется относительно высокой степенью кристалличности.

Определено [20], что при медленном охлаждении полимерных покрытий они имеют надмолекулярную структуру, состоящую из линейных

**Таблица 1** — Зависимость декремента затухания колебаний от толщины полимерных покрытий на образцах из стали 20  
**Table 1** — Dependence of the decrement of attenuation of oscillations on the thickness of polymer coatings on steel samples 20

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Декремент затухания $\delta_k$	Эффективность демпфирования, %
Без покрытия	—	0,0063	—
ПЭВД	0,5	0,0074	17,5
	1,0	0,0082	30,2
	1,4	0,0099	57,1
ПЭТФ	0,5	0,0077	22,2
	1,0	0,0086	36,5
	1,4	0,0103	63,5
СВМПЭ	0,5	0,0071	12,7
	1,0	0,0080	26,9
	1,4	0,0097	53,9
Полиамид ПА 6	0,5	0,0070	11,1
	1,0	0,0078	23,8
	1,4	0,0096	52,4

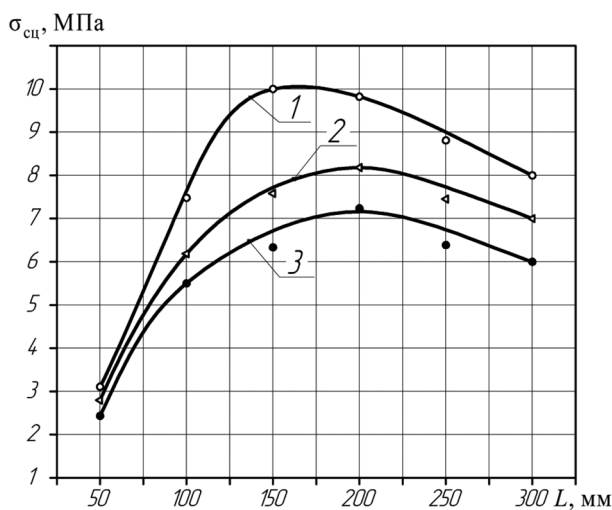


Рисунок 2 — Влияние дистанции напыления на адгезию покрытий, нанесенных порошками: 1 — ПЭТФ; 2 — СВМПЭ; 3 — ПА 6 (при отношении количества окислителя к количеству пропана в факеле пламени  $\beta = 25,5$ )

Figure 2 — Effect of the spraying distance on the adhesion of coatings applied with powders: 1 — PET; 2 — UHMWPE; 3 — PA 6 (with the ratio of the amount of oxidizer to the amount of propane in the flame torch  $\beta = 25.5$ )

агрегатов в виде однородных кольцевых сферолитов размерами 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, приводит к повышению прочности сцепления полимерного покрытия.

Результаты оценки влияния скорости охлаждения на прочность сцепления с основой полимерных покрытий представлены на рисунке 3.

Приведенные на рисунке 3 графики полностью соответствуют результатам [20] и свидетельствуют о том, что максимальная прочность сцепления 10,7 МПа достигается нанесением порошка ПЭТФ при скоростях охлаждения не более 3 град/с.

Описанные в [19] результаты исследований показали существенное влияние содержания воздуха в горючей смеси факела пропано-воздушного пламени на адгезию полимерных покрытий. С увеличением соотношения  $\beta$  (отношение количества окислителя к количеству пропана) происходит интенсификация процесса возникновения в полимере кислородсодержащих групп (-ОН, -СООН и др.). Для термопластичных полимеров их окисление приводит к увеличению энергии взаимодействия «полимер — металл». Кроме этого, с увеличением степени окисления полимерного расплава стано-

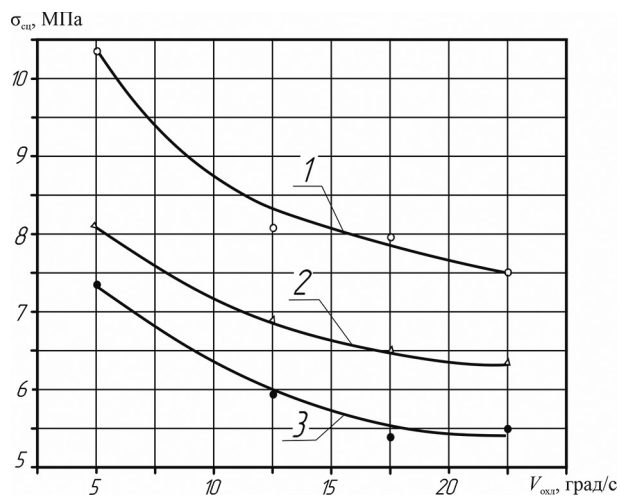


Рисунок 3 — Влияние скорости охлаждения на адгезию покрытий, нанесенных порошками: 1 — ПЭТФ; 2 — СВМПЭ; 3 — ПА 6 (при  $\beta = 25,5$ )

Figure 3 — Effect of the cooling rate on the adhesion of coatings applied with powders: 1 — PET; 2 — UHMWPE; 3 — PA 6 (with  $\beta = 25.5$ )

вится больше размер надмолекулярных образований, что свидетельствует об уменьшении вязкости и силе поверхностного натяжения расплава. Данное обстоятельство способствует увеличению энергии взаимодействия полимера с подложкой за счет интенсификации процесса смачивания.

Результаты, полученные в ходе исследования зависимости величины адгезии покрытий от состава горючей смеси (рисунок 4), показывают, что максимальные значения прочности сцепления покрытий с основой достигаются при напылении факелом, образованным горением смеси с коэффициентом  $\beta = 24-27$ , который больше, чем при горении «нормального» пламени, когда  $\beta = 22-24$  [21].

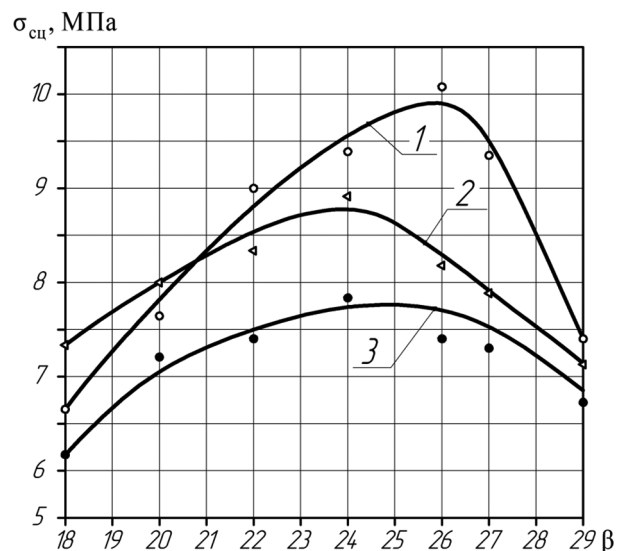


Рисунок 4 — Влияние соотношения между количеством окислителя и горючего газа, подаваемых для горения факела, на адгезию покрытий из: 1 — ПЭТФ; 2 — СВМПЭ; 3 — ПА 6 (скорость охлаждения 4 град/с)

Figure 4 — Effect of the ratio between the amount of oxidizer and combustible gas supplied for flame on the adhesion of coatings made of: 1 — PET; 2 — UHMWPE; 3 — PA 6 (cooling rate of 4 deg/s)

Одним из важнейших факторов, влияющих на адгезию полимерных газопламенных покрытий, является размер частиц наносимого порошка [22, 23]. Однако опубликованные результаты значений адгезии для различных полимерных порошковых покрытий не содержат сведений, касающихся скорости их охлаждения и состава рабочих газов факела, что не позволяет сравнивать их с результатами описываемых исследований.

Выполнены исследования адгезии полимерных покрытий, полученных напылением порошков различных фракций факелом, образованным пропано-воздушной смесью при  $\beta = 26$ , охлаждаемых после нанесения со скоростью 4 град/с. Анализ результатов, приведенных на рисунке 5, показал, что максимальные значения прочности сцепления с основой достигаются напылением порошков размером частиц около 150 мкм (125–175 мкм).

Полученные данные позволяют разрабатывать технологические рекомендации по формированию шумопоглощающих полимерных покрытий из ПЭТФ.

**Выбор материалов и технологии формирования демпфирующих покрытий деформационным плакированием.** Анализ обзора литературы [24, 25] показал, что большинство известных публикаций, касающихся вопросов практического применения способа деформационного плакирования гибким инструментом (ДПГИ), посвящено изучению влияния технологических режимов процесса плакирования на работоспособность покрытий, сформированных из материалов-доноров, представляющих собой литые цветные металлы и сплавы на их основе, такие как медь, латунь, бронза, алюминий, баббит. Однако в настоящее время широкое применение находят компози-

ционные материалы, легированные твердыми и мягкими фазами, в том числе наноразмерного уровня, которые по своим технологическим возможностям значительно превосходят материалы из литых цветных металлов [26, 27]. Результаты использования современных композиционных материалов в качестве доноров для формирования покрытий методом ДПГИ в известных работах не приводятся, чем и объясняется отсутствие соответствующих технологических рекомендаций по обоснованному выбору как композиционного материала-донора, так и режимных параметров процесса плакирования.

Анализ условий и характера фрикционного взаимодействия типовых конструкций пар трения скольжения, включая зубчатые передачи приводных механизмов, сочетающих трение качения в полюсе зацепления и трение скольжения у основания и вершины зуба [28, 29], при относительных перемещениях сопрягаемых поверхностей показывает, что для формирования покрытий на их рабочих поверхностях с целью снижения трения и улучшения демпфирования колебаний целесообразно использовать материалы, обладающие низким коэффициентом трения, устойчивостью к заеданию и схватыванию, малым износом, а также высокими демпфирующими свойствами.

Изучение физико-механических и антифрикционных свойств современных машиностроительных материалов показало, что в качестве основы композиционного материала-донора целесообразно использовать металлические материалы на основе меди и ее сплавов, а также пластичных мягких металлов, типа баббита, которые получили распространение в узлах трения различных машин и механизмов в связи с их высокими антифрикционными свойствами, износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью [26, 27]. Легирование компонентами твердой смазки (графит, сульфиды, сера, селениды, олово, свинец) способствует не только повышению несущей способности материала, но и позволяет противостоять схватыванию поверхностей, увеличивает антифрикционные свойства материала и снижает коэффициент трения до 0,008–0,010. Для получения композиционных материалов наиболее широкое применение получили методы порошковой металлургии, так как они позволяют регулировать элементный и массовый состав композиционных материалов для получения требуемого уровня эксплуатационных свойств. Поскольку наиболее широкое распространение в технике получили материалы на основе меди, которые по сравнению с антифрикционными материалами на основе железа обладают более высокими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью, высокой электропроводностью, то они и были приняты к изучению на предмет использования в качестве доноров.

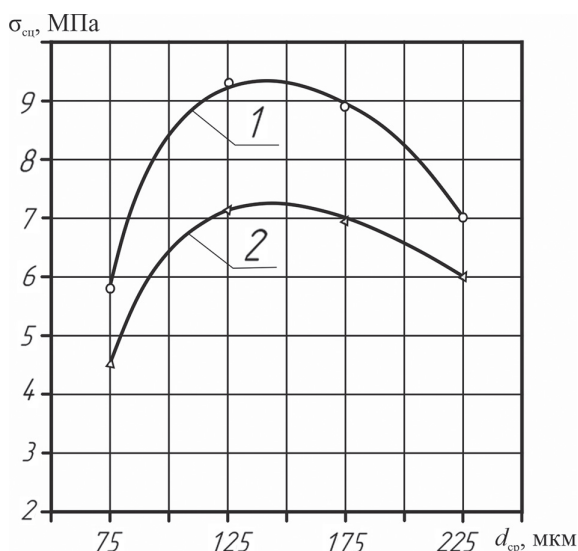


Рисунок 5 — Зависимость прочности сцепления покрытий от среднего размера частиц напыляемого материала: 1 — ПЭТФ; 2 — СВМПЭ

Figure 5 — Dependence of the adhesion strength of coatings on the average particle size of the sprayed material: 1 — PET; 2 — UHMWPE

Триботехнические испытания осуществляли на машине трения возвратно-поступательного типа. В качестве образцов использовали пластины размером 20×60×5 мм из стали 45 (HRC 52–55) с нанесенным из спеченного донора слоем покрытия толщиной 8–10 мкм. В качестве контробразца был цилиндрический ролик из незакаленного серого чугуна СЧ-20 диаметром 10×12 мм, осуществляющий трение по покрытой поверхности пластины плоским торцом. Дорожка трения смазывалась маслом И20А с интенсивностью 60 капель в минуту. Относительная скорость взаимного перемещения 0,1 м/с, удельное давление 2,5 МПа. В ходе испытаний регистрировали коэффициент трения скольжения. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Как видно из представленной таблицы, наиболее низкими значениями величин коэффициента трения скольжения обладают бронзографиты БрО5С25Гр0,5ДМ0,5Н2 ( $f=0,0081$ ) и БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 ( $f=0,009$ ). Сравнительный анализ этих материалов показывает, что бронзографит БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 хотя и имеет чуть более высокое значение коэффициента трения скольжения, однако его предел прочности на сжатие составляет 180 МПа, а бронзографита БрО5С25Гр0,5ДМ0,5Н2 — 160 МПа. При этом повышенное содержание экологически вредного свинца (до 25 %) у последнего может создать серьезные проблемы для его последующего практического применения. Поэтому бронзографит БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 и был выбран в качестве донора для проведения дальнейших исследований.

Следует отметить, что хотя композиционные материалы давно и широко используются в современном машиностроении, исследования, направленные на изучение возможности их применения в качестве доноров при формировании покрытий методом ДПГИ на рабочем профиле зубьев зубчатых колес, несомненно, представляют как научный, так и практический интерес. В известных публикациях, касающихся вопросов использования метода ДПГИ, данных о применении в качестве доноров композиционных материалов пока недостаточно для принятия решения о целесообразности их использования, что предопределило необходимость проведения дополнительных исследований.

Для выполнения экспериментов по оценке влияния конструктивно-технологических параметров процесса формирования антифрикционного вибропоглощающего покрытия из бронзографита БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 на толщину покрытия и сплошность наносимого слоя использовали щетку шириной  $H_{щ} = 20$  мм, диаметром  $D_{щ} = 200$  мм, с ворсом из гофрированной стальной проволоки (ст. 65Г диаметром  $d_{пр} = 0,25$  мм, вылетом ворса  $l = 40$  мм и плотностью его набивки  $k_n = 0,35$ ). В качестве исследуемых образцов использовали валы диаметром 25 мм, длиной 350 мм из стали 45 (HRC 43–45) и параметром шероховатости поверхности  $Ra = 0,63$  мкм. Покрытия наносили на токарно-винторезном станке модели 1К62, оснащенном модулем деформационного плакирования (рисунок 6).

Технологические режимы процесса плакирования варьировались в следующих пределах: линейная скорость вращения детали  $v_d = 0,15–0,35$  м/с, линейная скорость вращения щетки  $v_{щ} = 35–45$  м/с, величина натяга (относительное сближение осей щетки и вала)  $N = 1,0–2,5$  мм, скорость продольной подачи щетки  $w_{щ} = 100–200$  мм/мин. Материал-донор из бронзографита БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5, изготовленный в виде бруска, прижимался к ворсу вращающейся металлической щетки с усилием  $P = 20–40$  Н. Толщину сформированного слоя покрытия контролировали с помощью цифрового микрометра YATO с ценой деления 0,001 мм. Погрешность измерений не превышала  $\pm 0,002$  мм. Изучали влияние режимных параметров процесса плакирования на толщину и сплошность сформированного слоя покрытия.

Анализ полученных данных показал, что при постоянном натяге щетки к поверхности детали  $N = 1,5$  мм и увеличении числа проходов щетки до 8 наблюдается рост толщины слоя покрытия  $h$  до максимального значения 10,0–12,0 мкм (рисунок 7), а затем с увеличением числа проходов до 12 — его уменьшение до 8,0–11,0 мкм. Причем уменьшение толщины в большей степени заметно при соотношении линейных скоростей детали и щетки  $v_d/v_{щ} = 0,009$  (см. рисунок 7, кривая 3) и в меньшей степени — при  $v_d/v_{щ} = 0,003$  (кривая 1).

Наличие экстремума на кривых толщины слоя покрытия  $h$  заметно и при увеличении соотноше-

Таблица 2 — Составы исследованных спеченных материалов на основе меди и их коэффициент трения  
Table 2 — Compositions of the studied sintered materials based on copper and their coefficient of friction

Состав материала	Содержание компонентов, %							Коэффициент трения состава
	Cu	Sn	Pb	Графит	MoS <sub>2</sub>	Ni	Zn	
БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5	83,5	5,0	5,0	1,0	0,5	—	5,0	0,0090
БрО9С20НЗГр0,5ДМ0,5	67,0	9,0	20,0	0,5	0,5	3,0	—	0,0105
БрО5С25Гр0,5ДМ0,5Н2	67,0	5,0	25,0	0,5	0,5	2,0	—	0,0081
БрО5С25Гр0,5ДМ0,5	69,0	5,0	25,0	0,5	0,5	—	—	0,0106
БрО5С5Ц5ДМ0,5	81,5	4,0–6,0	4,0–6,0	—	0,5	—	4,0–6,0	0,0500

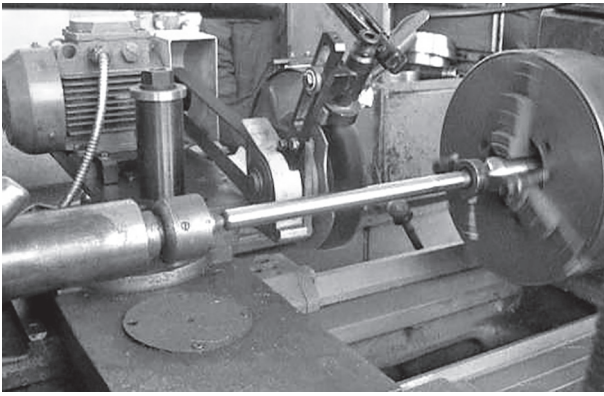


Рисунок 6 — Нанесение покрытия из бронзографита методом деформационного плакирования гибким инструментом на технологическом модуле  
 Figure 6 — Application of a bronze-graphite coating by the method of deformation cladding with a flexible tool on a technological module

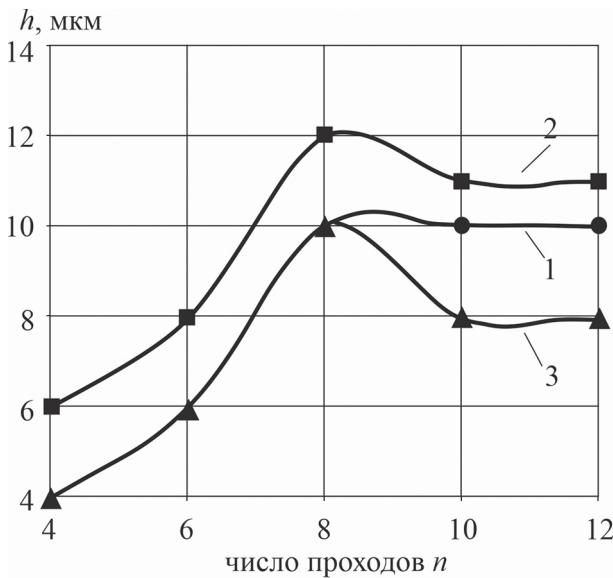


Рисунок 7 — Зависимость толщины плакирующего слоя от числа проходов при натяге  $N = 1,5$  мм и соотношении линейных скоростей детали и щетки  $v_d/v_{щ}$ :  
 1 — 0,003; 2 — 0,006; 3 — 0,009  
 Figure 7 — Dependence of the thickness of the cladding layer on the number of passes with a tension of  $N = 1.5$  mm and the ratio of linear speeds of the part and the brush  $v_d/v_{щ}$ :  
 1 — 0.003; 2 — 0.006; 3 — 0.009

ния линейных скоростей детали и щетки  $v_d/v_{щ}$  (рисунок 8). Так, в диапазоне  $v_d/v_{щ} = 0,006-0,009$  толщина покрытия в зависимости от числа проходов щетки  $n$  составляет 8–12 мкм (см. рисунок 8, кривые 1, 2, 3). При дальнейшем увеличении этого соотношения толщина слоя уменьшается до 6–8 мкм.

Характер зависимости толщины слоя покрытия  $h$  от натяга  $N$  щетки во многом обусловлен количеством проходов щетки  $n$  (рисунок 9). Максимальное значение толщины слоя (от 10 до 12 мкм) наблюдается при натяге  $N = 2$  мм и числе проходов щетки  $n = 4-6$  (см. рисунок 9, кривые 1, 2).

Увеличение количества проходов до 8 обеспечивает минимальную толщину слоя от 6 до 8 мкм (см. рисунок 9, кривая 3). Таким образом, анализ

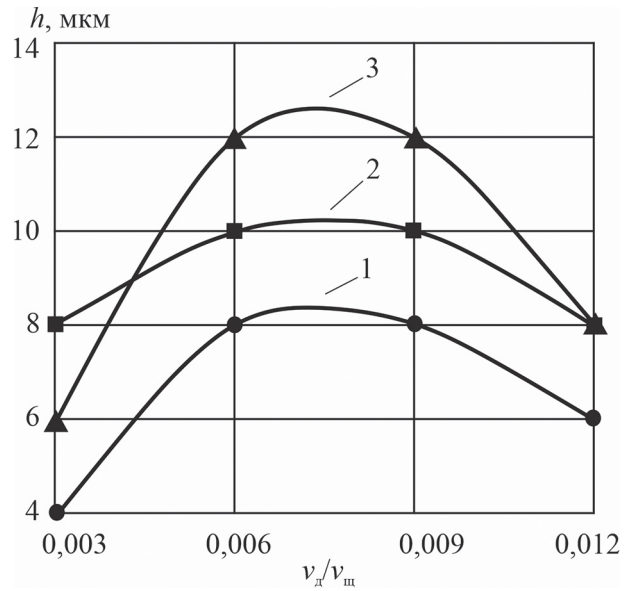


Рисунок 8 — Зависимость толщины  $h$  плакирующего слоя от соотношения линейных скоростей детали и щетки  $v_d/v_{щ}$  при натяге  $N = 1,5$  мм и числе проходов  $n$ : 1 — 4; 2 — 6; 3 — 8  
 Figure 8 — Dependence of the thickness  $h$  of the cladding layer on the ratio of the linear velocities of the part and the brush  $v_d/v_{щ}$  with the tension of  $N = 1.5$  mm and the number of passes  $n$ :  
 1 — 4; 2 — 6; 3 — 8

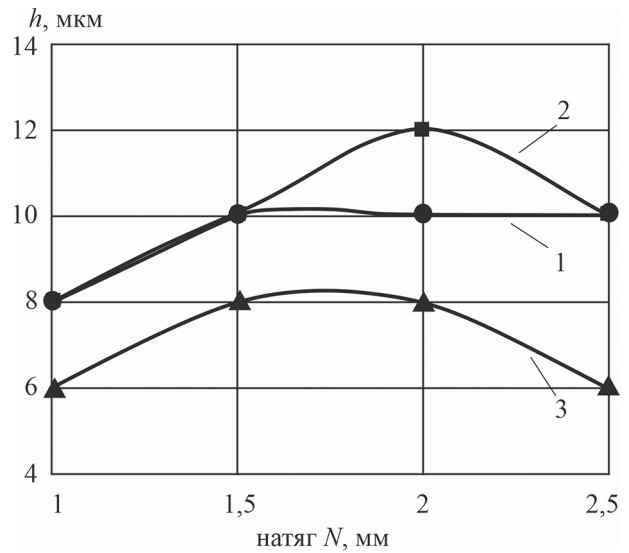
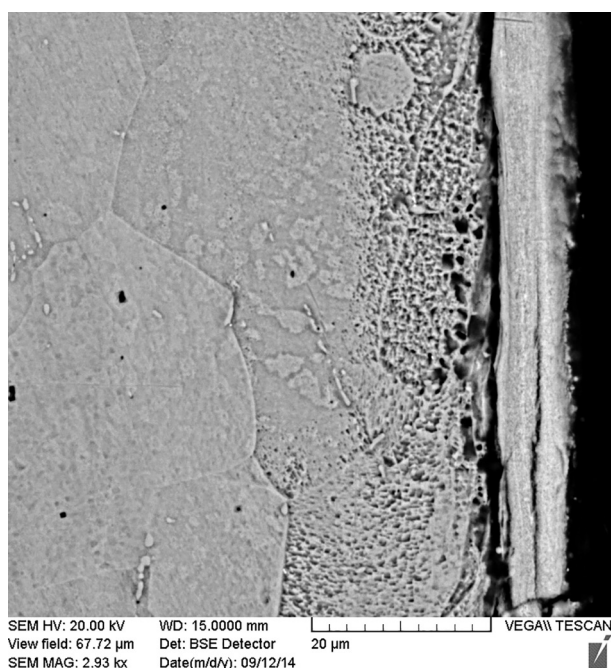


Рисунок 9 — Зависимость толщины  $h$  плакирующего слоя от натяга при соотношении линейных скоростей детали и щетки  $v_d/v_{щ} = 0,006$  и числе проходов  $n$ : 1 — 4; 2 — 6; 3 — 8  
 Figure 9 — Dependence of the thickness  $h$  of the cladding layer on the tension at the ratio of the linear speeds of the part and the brush  $v_d/v_{щ} = 0.006$  and the number of passes  $n$ : 1 — 4; 2 — 6; 3 — 8

результатов проведенных исследований показал, что зависимость толщины слоя покрытия от числа проходов, соотношения линейных скоростей щетки и детали  $v_d/v_{щ}$  и величины натяга щетки характеризуется наличием экстремума, после которого толщина слоя покрытия может снижаться с разной степенью интенсивности. Этот вывод вполне согласуется с выводами, полученными в [24, 25] для покрытий, сформированных из доноров, представляющих собой литые цветные металлы на основе меди, алюминия, бронзы. Причина в том, что при определенных количестве проходов щетки, соотно-



**Рисунок 10** — СЭМ изображение поверхности микрошлифа с покрытием из бронзографита Бр О5С5Ц5Гр1ДМ0,5  
**Figure 10** — SEM image of the surface of a microplate coated with bronze-graphite Бр О5С5Ц5Гр1ДМ0,5 (Br O5S5Ts5Gr1DM0.5)

шениях линейных скоростей щетки и детали  $v_d/v_{щ}$  и величинах натяга происходит не столько перенос ворсом щетки материала покрытия на обрабатываемую поверхность, сколько, наоборот, снятие части ранее сформированного слоя вследствие развивающихся процессов микрорезания [24, 25].

На основании полученных зависимостей выбраны рациональные технологические режимы плакирования, обеспечивающие формирование слоя покрытия из бронзографита БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5: соотношение линейной скорости вращения обрабатываемой детали и линейной скорости вращения щетки  $v_d/v_{щ} = 0,006-0,009$ , натяг  $N = 1,5-2,0$  мм, число проходов  $n = 6-8$ . В ходе последующих экспериментов установлено, что использование выбранных режимов способствует формированию покрытия толщиной 10–12 мкм — это достаточно для обеспечения антифрикционных и демпфирующих свойств зубчатой передачи. Результаты экспериментальной оценки относительной сплошности  $\lambda$  покрытий, сформированных с использованием установленных диапазонов значений  $n$ ,  $N$  и  $v_d/v_{щ}$ , подтвердили, что выбранные оптимальные интервалы варьирования факторов обеспечивают получение сплошного ( $\lambda = 100\%$ ), прочно сцепленного с основой покрытия (рисунок 10).

Металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе поперечных микрошлифов, изготовленных из образцов с покрытием (рисунок 10), показали, что поверхностный слой основы под покрытием имеет существенное увеличение плотности дефектов кристаллической решетки и измельчение структуры. Микротвердость плакированного слоя, определенная при на-

грузке 0,049 Н (5 г), составила  $H_{0,049} = 2100$  МПа, что в 1,8 раза больше исходной микротвердости.

**Выводы.** 1. Показано, что покрытия, наносимые газопламенным методом порошками термопластичных полимеров, обеспечивают достаточно высокую эффективность демпфирования. При этом наибольшие значения диссипативных свойств достигаются в случае напыления порошком ПЭТФ.

2. В ходе экспериментов отмечено, что у термопластов адгезия покрытий повышается с увеличением дистанции напыления от 50 мм и достигает своего максимума на расстоянии 200 мм от сопла. Установлено, что на величину адгезии полимерных покрытий значительное влияние оказывает скорость их охлаждения, а также соотношение количества пропана и воздуха в горючей смеси, образующей факел термораспылителя.

3. Максимальная прочность сцепления на нормальный отрыв покрытий, нанесенных порошком ПЭТФ (10,5–10,7 МПа), достигается при использовании горючей смеси с соотношением пропана и воздуха 1:26 и последующим охлаждением со скоростью не более 3 град/с. Полученные данные позволяют разрабатывать технологические рекомендации по формированию шумопоглощающих полимерных покрытий из ПЭТФ.

4. На основании результатов триботехнических испытаний выбран состав спеченного материала-донора (БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5) для нанесения шумопоглощающих покрытий методом деформационного плакирования на рабочие профили зубчатых колес.

5. Изучение влияния режимных параметров процесса плакирования на толщину и сплошность сформированного слоя покрытия из бронзографита БрО5С5Ц5Гр1ДМ0,5 показало, что соотношение линейной скорости перемещения обрабатываемой детали и линейной скорости вращения щетки  $v_d/v_{щ}$  должно находиться в пределах 0,23–0,27, значения натяга  $N$  должны составлять 1,5–2,0 мм при числе проходов  $n = 6-8$ . Микротвердость плакированного слоя  $H_{0,049} = 2100$  МПа, что в 1,8 раза больше исходной микротвердости донора.

### Список литературы

1. Борьба с шумом на производстве / Е.Я. Юдин [и др.]; под ред. Е.Я. Юдина. — М.: Машиностроение, 1985. — 399 с.
2. Айрапетов, Э.Л. Возбуждение колебаний в прямозубых передачах. Ч. 2. Экспериментальные исследования / Э.Л. Айрапетов, Р.Л. Иофе, О.И. Косарев // Передачи и трансмиссии. — 1994. — № 2. — С. 4–11.
3. Медведев, А.М. Проектирование акустически оптимальной архитектуры редукторных систем станков / А.М. Медведев, Г.В. Литовко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 1, № 2(14). — С. 64–75.
4. Берестнев, О.В. Зубчатые передачи с повышенной податливостью зубьев / О.В. Берестнев, И.В. Жук, А.Н. Неделькин. — Минск: Наука і тэхніка, 1993. — 184 с.
5. Берсудский, А.Л. Повышение работоспособности эвольвентных поверхностей зубчатых колес // Вестн. машиностроения. — 2005. — № 1. — С. 10–13.
6. Берестнев, О.В. Самоустанавливающиеся зубчатые колеса / О.В. Берестнев. — Минск: Наука и техника, 1983. — 312 с.



7. Бречер, Ц. Нагрузочная способность автомобильных зубчатых передач с покрытием, нанесенным путем осаждения из паровой фазы / Ц. Бречер // Докл. Союза германских инженеров. — 2005. — № 1904. — С. 107–125.
8. О применении покрытий для снижения шума металлорежущих станков / В.К. Шелег [и др.] // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29–30 сент. 2021 г. / Брестский гос. техн. ун-т; редкол.: С.Р. Онысько [и др.]. — Брест, 2021. — С. 84–87.
9. Obtaining and research of noise-absorbing aerated polymer coatings / M.A. Belotserkovsky [et al.] // Proceedings of International Conference on Materials Science and Technology (ICMT 2021), Kerala, 12–14 Nov. 2021. — Pp. 226–238.
10. Winnik, M.A. Overview of Polymer Coatings: Lecture 1 [Electronic resource] / M.A. Winnik // Polymer Coatings. — Mode of access: <https://pdfslide.net/documents/lecture-1-overview-of-polymer-coatings-paint-and-other-overview-of-polymer.html?page=1>. — Date of access: 02.03.2022.
11. Цырлин, М.И. Защитные покрытия на основе эпоксиолигомеров, формируемые с использованием низкотемпературной плазмы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / М.И. Цырлин; ИММС НАН Беларуси. — Гомель, 2003. — 23 с.
12. Белоцерковский, М.А. Теоретический анализ процесса формирования металлополимерных систем активированным напылением / М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус // Сварка и родственные технологии. — 2002. — № 5. — С. 84–86.
13. Влияние напыленных полимерных покрытий на затухание колебаний / М.А. Леванцевич [и др.] // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. — 2005. — № 12. — С. 77–79.
14. Евстафьев, В.А. Демпфирование колебаний стержневых систем вибропоглощающими покрытиями: учеб. пособие / В.А. Евстафьев. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011. — 28 с.
15. Шелег, В.К. Технология получения и демпфирующие свойства аэрированных полимерных покрытий / В.К. Шелег, Ма Минь, М.А. Белоцерковский // Наука и техника. — 2021. — Т. 20, № 5. — С. 375–382. — DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382>.
16. Korobov, Yu. Flame spraying of polymers: distinctive features of the equipment and coating applications / Yu. Korobov, M. Belotserkovskiy // Methodologies and Applications for Analytical and Physical Chemistry / A.K. Naghi [et al.]. — 1st ed. — New York, 2018. — Ch. 14. — Pp. 267–283.
17. Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings / E. Leivo [et al.] // Progress in Organic Coatings. — 2004. — Vol. 49, iss. 1. — Pp. 69–73. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.08.011>.
18. Белоцерковский, М.А. Исследование демпфирующих свойств образцов со слоистыми газотермическими покрытиями / М.А. Белоцерковский, И.И. Таран, Ма Минь // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2021. — Вып. 10. — С. 307–310.
19. Белоцерковский, М.А. Влияние режимов газопламенного напыления полимерными шнурами на свойства формируемых покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. — 2014. — № 11. — С. 91–96.
20. Рентгенографические методы изучения полимерных систем / Ю.А. Липатов [и др.]. — Киев: Наук. думка, 1982. — 295 с.
21. Технологическое горение / В.С. Арутюнов [и др.]; под общ. ред. С.М. Алдошина, М.И. Альмова. — М.: РАН, 2018. — 611 с.
22. Вохидова, З.Ш. Физико-химические основы повышения эксплуатационной надежности газопламенных покрытий из термопластичных полимеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04 / З.Ш. Вохидова; Ин-т химии им. В.И. Никитина АН Респ. Таджикистан. — Душанбе, 2010. — 23 с.
23. Белоцерковский, М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М.А. Белоцерковский. — Минск: Технопринт, 2004. — 198 с.
24. Белевский, Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом / Л.С. Белевский. — Магнитогорск: Магнитогор. лицей РАН, 1996. — 230 с.
25. Анцупов, В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов. — Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. — 242 с.
26. Композиционные материалы: справ. / В.В. Васильев [и др.]; под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.
27. Ковтун, В.А. Триботехнические покрытия на основе порошковых меднографитовых систем / В.А. Ковтун, Ю.М. Плещачевский; под науч. ред. П.А. Витязя. — Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1998. — 147 с.
28. Любарский, И.М. Повышение износоустойчивости тяжело нагруженных шестерен / И.М. Любарский. — М.: Машиностроение, 1965. — 132 с.
29. Косарев, О.И. Способы снижения возбуждения вибраций в прямозубом зацеплении / О.И. Косарев // Вестн. машиностроения. — 2001. — № 4. — С. 8–14.

**SHELEG Valerij K.,** Corresponding Member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.  
Head of the Department “Engineering Technology”<sup>1</sup>  
E-mail: [Sheleh\\_V@tut.by](mailto:Sheleh_V@tut.by)

**MA Min**  
Ph. D. Student<sup>1</sup>  
E-mail: [ku.tau@mail.ru](mailto:ku.tau@mail.ru)

**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”<sup>2</sup>  
E-mail: [mbelotser@gmail.com](mailto:mbelotser@gmail.com)

**LEVANTSEVICH Mikhail A.,** Ph. D. in Eng.  
Leading Researcher of the Laboratory of Gearing Systems and Processing Equipment of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”<sup>2</sup>  
E-mail: [levancev@mail.ru](mailto:levancev@mail.ru)

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## STUDY OF APPLICATION PROCESS OF DAMPING COATINGS MADE OF POLYMERS AND METALS

The processes of obtaining damping polymeric coatings (gas-flame spraying of powders) and composite metal coatings (deformation cladding with a flexible tool) are studied. It is established that coatings applied by the gas-flame method with thermoplastic polymer powders provide a sufficiently high damping efficiency, while the best dissipative characteristics are provided when sprayed with polyethylene terephthalate powder. The maximum adhesion strength (10.5–10.7 MPa) for normal separation of coatings applied with polyethylene terephthalate powder is achieved when using a combustible mixture with a propane/air ratio of 1:26 and subsequent cooling at a rate of no more than 3 deg/s. Based on the results of tribotechnical tests, the composition of sintered bronze-graphite was selected for applying noise-absorbing coatings by the deformation cladding method. The study of the influence of regime parameters of the cladding process on the thickness and continuity of the formed coating layer of bronze-graphite showed that the ratio of the linear speed of movement of the workpiece and the linear speed of rotation of the brush should be within 0.23–0.27, the interference value  $N$  — in the range of 0.8–1.5 mm with the number of passes  $n = 8–12$ . The microhardness of the clad layer was  $H_{0.049} = 1,700$  MPa, which exceeded the microhardness of the donor material by 25 %.

**Keywords:** gas-flame spraying, polymer powders, logarithmic decrement of vibration damping, deformation cladding with a flexible tool, bronze-graphite coating

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-42-52>

### References

1. Yudin E.Ya., et al. *Borba s shumom na proizvodstve* [Noise control in production]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 399 p. (in Russ.).
2. Ayrapetov E.L., Iofe R.L., Kosarev O.I. Vozbuzhdenie kolebaniy v pryamozubykh peredachakh. Chast 2. Eksperimentalnye issledovaniya [Excitation of oscillations in straight-tooth gears. Part 2. Experimental studies]. *Peredachi i transmissii*, 1994, no. 2, pp. 4–11 (in Russ.).
3. Medvedev A.M., Litovka G.V. Proektirovanie akusticheskii optimalnoy arkhitektury reduktornykh sistem stankov [Designing the architecture of metal cutting machines' gear systems with acoustically optimal parameters]. *Scholarly notes of Komсомolsk-na-Amure State Technical University*, 2013, vol. 1, no. 2(14), pp. 64–75 (in Russ.).
4. Berestnev O.V., Zhuk I.V., Nedelkin A.N. *Zubchatye peredachi s povyshennoy podatlivostyu zubev* [Gears with increased tooth compliance]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1993. 184 p. (in Russ.).
5. Bersudskiy A.L. Povyshenie rabotosposobnosti evolventnykh poverkhnostey zubchatykh kolev [Improving the efficiency of the involute surfaces of gears]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2005, no. 1, pp. 10–13 (in Russ.).
6. Berestnev O.V. *Samoustanavlivayushchiesya zubchatye kole-sa* [Self-aligning gears]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 312 p. (in Russ.).
7. Brecher Ts. Nagruzochnaya sposobnost avtomobilnykh zubchatykh peredach s pokrytiem, nanesennym putem osazhdeniya iz parovoy fazy [The load capacity of automotive gears with a coating applied by vapor deposition]. *Doklady Soyuzha germanskikh inzhenerov*, 2005 no. 1904, pp. 107–125 (in Russ.).
8. Sheleg V.K., Ma Min, Levantsevich M.A., Kravchuk M.A. O primeneni pokrytiy dlya snizheniya shuma metallorazhshchikh stankov [On the use of coatings to reduce the noise of metal-cutting machines]. *Novye tekhnologii i materialy, avtomatizatsiya proizvodstva*, 2021, pp. 84–87 (in Russ.).
9. Belotserkovskiy M.A., Korobov Yu.S., Sheleg V.K., Ma Min. Obtaining and research of noise-absorbing aerated polymer coatings. *Proc. International Conference on Materials Science and Technology (ICMT 2021)*. Kerala, 2021, pp. 226–238.
10. Winnik M.A. *Polymer coatings. Lecture 1 — Overview of polymer coatings*. Available at: <https://pdfslide.net/documents/lecture-1-overview-of-polymer-coatings-paint-and-other-overview-of-polymer.html?page=1> (accessed 02 March 2022).
11. Tsyrlin M.I. *Zashchitnye pokrytiya na osnove epoksioligomero-v, formiruemye s ispolzovaniem nizkotemperaturnoy plazmy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Protective coatings based on epoxyoligomers formed using low-temperature plasma. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Gomel, 2003. 23 p. (in Russ.).
12. Belotserkovskiy M.A., Fedaravichus A.V. Teoreticheskiy analiz protsesssa formirovaniya metallopolimernykh sistem aktivirovannym napyleniem [Theoretical analysis of the process of formation of metal polymer systems by activated sputtering]. *Svarka i rodstvennyye tekhnologii*, 2002, no. 5, pp. 84–86 (in Russ.).
13. Levantsevich M.A., Belotserkovskiy M.A., Rudko V.M., Levantsevich V.A. Vliyanie napylenykh polimernykh pokrytiy na zatukhanie kolebaniy [Effect of sprayed polymer coatings on vibration damping]. *Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied sciences*, 2005, no. 12, pp. 77–79 (in Russ.).
14. Evstafev V.A. *Dempfirovaniye kolebaniy sterzhnevnykh sistem vibropogloshchayushchimi pokrytiyami* [Vibration damping of rod systems with vibration-absorbing coatings]. Saint Petersburg, Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2011. 28 p. (in Russ.).
15. Sheleg V.K., Ma Min, Belotserkovskiy M.A. Tekhnologiya polucheniya i dempfirovaniye svoystva aerirovannykh polimernykh pokrytiy [Production technology and damping properties of aerated polymer coatings]. *Science & technique*, 2021, vol. 20, no. 5, pp. 375–382. DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382> (in Russ.).
16. Korobov Yu., Belotserkovskiy 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.
17. Leivo E., Wilenius T., Kinosh T., Vuoristo P., Mäntylä T. Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings. *Progress in organic coatings*, 2004, vol. 49, iss. 1, pp. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.08.011>.
18. Belotserkovskiy M.A., Taran I.I., Ma Min. Issledovanie dempfirovaniye svoystv obraztsov so sloistymi gazotermicheski-mi pokrytiyami [Study of damping properties of samples with layered gas-thermal coatings]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2021, iss. 10, pp. 307–310 (in Russ.).
19. Belotserkovskiy 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.).
20. Lipatov Yu.S., Shilov V.V., Gomza Yu.P., Kruglyak N.E. *Rentgenograficheskie metody izucheniya polimernykh sistem* [Radiographic methods for studying polymer systems]. Kiev, Nauchnaya mysl Publ., 1982. 295 p. (in Russ.).
  21. Arutyunov V.S., et al. *Tekhnologicheskoe gorenje* [Technological combustion]. Moscow, Rossiyskaya akademiya nauk Publ., 2018. 611 p. (in Russ.).
  22. Vokhidova Z.Sh. *Fiziko-khimicheskie osnovy povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti gazoplamennykh pokrytiy iz termoplastichnykh polimerov*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Physico-chemical bases for improving the operational reliability of gas-flame coatings made of thermoplastic polymers. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Dushanbe, 2010. 23 p. (in Russ.).
  23. Belotserkovsky M.A. *Tekhnologii aktivirovannogo gazoplammennogo napyleniya antifriktsionnykh pokrytiy* [Technologies of activated flame spraying of antifriction coatings]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 198 p. (in Russ.).
  24. Belevskiy L.S. *Plasticheskoe deformirovanie poverkhnostnogo sloya i formirovanie pokrytiya pri nanesenii gibkim instrumentom* [Plastic deformation of the surface layer and the formation of the coating when applied with a flexible tool]. Magnitogorsk, Magnitogorskiy litsey RAN Publ., 1996. 230 p. (in Russ.).
  25. Antsupov V.P. *Teoriya i praktika plakirovaniya izdeliy gibkim instrumentom* [Theory and practice of cladding products with a flexible tool]. Magnitogorsk, Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova Publ., 1999. 242 p. (in Russ.).
  26. Vasilev V.V., et al. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 512 p. (in Russ.).
  27. Kovtun V.A., Pleskachevskiy Yu.M. *Tribotekhnicheskie pokrytiya na osnove poroshkovykh mednografitovykh sistem* [Tribotechnical coatings based on powdered copper graphite systems]. Gomel, Institut mekhaniki metallopolimernykh sistem NAN Belarusi Publ., 1998. 147 p. (in Russ.).
  28. Lyubarskiy I.M. *Povyshenie iznosoustoychivosti tyazhelonagruzhennykh shesteren* [Increasing the wear resistance of heavily loaded gears]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 132 p. (in Russ.).
  29. Kosarev O.I. *Sposoby snizheniya vzbuzhdeniya vibratsiy v pryamozubom zatseplenii* [Ways to reduce the excitation of vibrations in a spur gearing]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2001, no. 4, pp. 8–14 (in Russ.).