

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382>

УДК 62-752.2

## Технология получения и демпфирующие свойства аэрированных полимерных покрытий

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. В. К. Шелег<sup>1)</sup>,  
Ма Минь<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. М. А. Белоцерковский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Государственное научное объединение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Разработан и исследован процесс получения аэрированных (наполненных пузырьками воздуха) полимерных покрытий методом газопламенного напыления с оценкой их способности к демпфированию колебаний. Используя возможности конструкции полимерного термораспылителя модели ОИМ 050, заключающиеся в обеспечении подачи спутного воздушного потока между факелом пламени и струей порошкового материала, разработана технология управляемого формирования аэрированных полимерных покрытий. Эксперименты выполнялись с такими термопластичными полимерами, как полиэтилентерефталат, полиэтилен высокого давления, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиамид. Установлено, что коэффициент аэрирования растет практически прямо пропорционально с увеличением количества воздуха в спутном потоке у всех исследуемых полимерных покрытий. Отмечено, что на процесс аэрирования оказывают влияние реологические свойства жидких полимеров, а точнее, величина показателя текучести расплава полимера. Определены предельные значения воздуха в спутном потоке, которые позволяют не снижать значения адгезии полимерных покрытий со стальными подложками менее 6 МПа и не уменьшать их твердость более чем на 25–30 %. Исследования демпфирующих свойств образцов с полимерными покрытиями осуществляли 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, связанным с компьютером. Показано, что использование аэрирования при формировании шумопоглощающих покрытий на стальных образцах позволяет увеличить их логарифмический декремент затухания на 18–26 %.

**Ключевые слова:** газопламенное напыление, порошки полимеров, аэрированные покрытия, шумопоглощение, логарифмический декремент, затухание колебаний

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382>

## Production Technology and Damping Properties of Aerated Polymer Coatings

V. K. Sheleg<sup>1)</sup>, Ma Min<sup>1)</sup>, M. A. Belotserkovsky<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The process of obtaining aerated (filled with air bubbles) polymer coatings has been developed and investigated by the method of flame spraying with an assessment of their ability to damp vibrations. A technology for the controlled formation of aerated polymer coatings has been developed while using the capabilities of the ОИМ (OIM) 050 polymer thermal

### Адрес для переписки

Шелег Валерий Константинович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Б. Хмельницкого, 9,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-74-54  
metech@bntu.by

### Address for correspondence

Sheleg Valery K.  
Belarusian National Technical University  
9, B. Hmelnitzkogo str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-74-54  
metech@bntu.by

atomizer design which consists in providing a concurrent air flow between the flame torch and the jet of powder material. The experiments have been carried out with such thermoplastic polymers as polyethylene terephthalate, high pressure polyethylene, ultra high molecular weight polyethylene, polyamide. It has been found that the aeration coefficient grows almost in direct proportion with an increase in the amount of air in the concurrent flow for all investigated polymer coatings. It is noted that the aeration process is influenced by the rheological properties of liquid polymers, or rather, the value of the polymer melt flow rate. The limiting values of air in the concurrent flow have been determined, which make it possible not to reduce the adhesion of polymer coatings to steel substrates by less than 6 MPa and not to decrease their hardness by more than 25–30 %. Studies of the damping properties of samples with polymer coatings have been carried out on a stand, the kinematic diagram of which is based on loading the free end of a cantilever sample, abrupt removal of the load and registration of free damped oscillations by an induction-type contactless sensor connected to a computer. It is shown that the use of aeration when forming noise-absorbing coatings on steel samples can increase their logarithmic damping decrement by 18–26 %.

**Keywords:** flame spraying, polymer powders, aerated coatings, noise absorption, logarithmic decrement, vibration damping

**For citation:** Sheleg V. K., Ma Min, Belotserkovsky M. A. (2021) Production Technology and Damping Properties of Aerated Polymer Coatings. *Science and Technique*. 20 (5), 375–382. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-5-375-382> (in Russian)

## Введение

Развитие техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей машин и механизмов, привело к значительному возрастанию вредных шумов и вибраций, понижающих надежность работы механизмов, ухудшающих условия труда. Один из основных способов эффективного снижения вредных шумов и вибраций – применение в конструкциях, подверженных воздействию динамических нагрузок, покрытий из материалов с высокими вибропоглощающими свойствами. Многолетний опыт борьбы с шумами и вибрациями показал, что полимеры являются наиболее эффективными вибропоглощающими материалами [1].

Свойство полимеров проявлять ярко выраженное вязкоупругое поведение способствует эффективному рассеиванию энергии вибрации, что положительно выделяет их из числа прочих материалов [1, 2]. Именно благодаря этому уникальному симбиозу свойств упругого тела и вязкой жидкости в полимерах возникает сдвиг приложенного напряжения по фазе относительно деформации на фазовый угол  $\delta$ , основной характеристикой которого является коэффициент потерь или тангенс угла потерь  $\operatorname{tg}\delta$ .

Независимо от строения природа поглощения энергии колебаний для всех полимеров одинакова. В [1, 3, 4] молекулярный механизм поглощения и распространения колебаний в полимерах объяснен, исходя из существующей теории релаксации, базирующейся на том, что релаксацию материала вызывают изменения молекулярной структуры. В релаксирующей среде при постоянной деформации вызвавшее

ее напряжение постепенно спадает, в результате чего происходит его рассеивание в виде теплоты. В основе этого явления лежит процесс перехода системы к состоянию термодинамического равновесия после снятия внешней нагрузки, а время, необходимое для установления равновесия, называется временем релаксации.

Способность к релаксации, а соответственно и к вибропоглощению у полимеров сильно различается. Все полимеры условно разделили по величине коэффициента потерь  $\operatorname{tg}\delta$  на три группы [4, 5]. Первая – полимеры с наиболее высоким значением коэффициента потерь ( $\operatorname{tg}\delta \geq 1,4$ ), к которым относят сложные и простые эфиры поливинилового спирта. Вторая – полимеры со значением тангенса угла потерь  $\operatorname{tg}\delta$  в диапазоне от 0,8 до 1,4. К данной группе относятся различные синтетические каучуки и резины, поливинилхлорид и его пластифицированные композиции. Третья группа – полимеры с высокой степенью кристалличности, например полиэтилен, политетрафторэтилен; значение тангенса угла потерь  $\operatorname{tg}\delta$  – в пределах от 0,1 до 0,2, редко до 0,5.

Диссипация энергии колебаний может происходить в объеме всего изделия, выполненного из полимера, либо полимерные материалы используют как вибропоглощающие покрытия на металлических машиностроительных деталях или узлах. Применение полимерных покрытий, полученных различными методами, позволяет существенно улучшить эффективность поглощения колебаний, при этом нанесение полимерных материалов в виде покрытий на стали, чугуны, цветные металлы рацио-

нально совмещает механическую прочность основы и демпфирующую способность покрытия [6–8].

Совершенствование составов полимеров, а также развитие методов формирования полимерных демпфирующих покрытий привели к созданию высокопористых композитов и покрытий [9, 10], которые были названы аэрированными (англ. aerated coating), т. е. наполненными воздухом [11]. Отмечается, что аэрированные полимерные покрытия обладают наибольшей способностью шумопоглощения среди всех полимеров, относящихся к третьей группе.

Целью исследований, результаты которых приведены в данной статье, явились разработка приемов получения аэрированных полимерных покрытий методом газопламенного напыления и определение их способности к демпфированию колебаний.

### Оборудование для нанесения покрытий

Формирование покрытий осуществлялось с помощью установки газопламенного напыления полимерных порошков модели ОИМ 050 [12], разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси (усовершенствованная модель установки ТЕРКО-П). Установка используется для формирования покрытий из порошков термопластичных полимеров с температурой плавления от 90 до 400 °С. Размер напыляемых частиц 50–300 мкм. Частицы нагреваются в пропан-воздушном факеле пламени, ускоряются и осаждаются на подготовленной поверхности, образуя покрытие (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид термораспылителя установки ОИМ 050 и процесс нанесения покрытия

Fig. 1. External view of OIM 050 thermal atomizer and coating process

Конструкция термораспылителя обеспечивает возможность использования практически всех применяемых порошков термопластов, имеющих различные теплофизические характеристики, без замены соплового наконечника. Регулируемое изменение в достаточно широком диапазоне состава горючей смеси и управление формой факела пламени позволяют добиться необходимой для каждого напыляемого материала величины плотности теплового потока. Кроме того, по сравнению с известными установками типа УПТР, УГПД, ТЕРКО и другими в данном термораспылителе гораздо качественнее происходит процесс смешения пропан-воздушной смеси, обеспечиваются равномерность подачи порошковой шихты в факел и высокий коэффициент использования напыляемого материала.

Газосмесительная камера имеет форму кольцевой канавки (рис. 2), позволяющей в движущихся перемешивающихся газах образовывать циркуляционные токи, обуславливающие возможность появления эффекта турбулентности, что положительно сказывается на качестве горючей смеси. Конструкция соплового наконечника предусматривает обеспечение попадания частиц в самый высокотемпературный участок факела, что также позволило улучшить качество покрытий. Охлаждение мундштука осуществляется за счет потока воздуха, проходящего через зазор между мундштуком и сопловым наконечником. Кроме того, этот поток не позволяет полимерным частицам оседать на торце мундштука.

Основные элементы распылительного узла установки ОИМ 050 представлены на рис. 2. Сопловой наконечник 3, содержащий хвостовик 4, крепится гайкой 2 на корпусе 1. Воздух по каналу 5 и пропан по каналу 6 подаются в газосмесительную камеру 10, образованную винтовой канавкой с внутренней поверхностью корпуса. Обратному выходу смеси из камеры препятствует прокладка 11. Выпуск пропан-воздушной смеси для поджига и образования факела пламени осуществляется через сопла 14. Выполненные на наружной поверхности кольцевые ребра 13 служат для дополнительного охлаждения корпуса. В сопловой наконечник, имеющий канал 9 для подачи полимерного порошка, вставлен мундштук 7 с определенным зазором 8, который играет важнейшую роль в данной конструкции, а именно – позволяет изменять форму пламени и управлять его теплофизическими характеристиками.

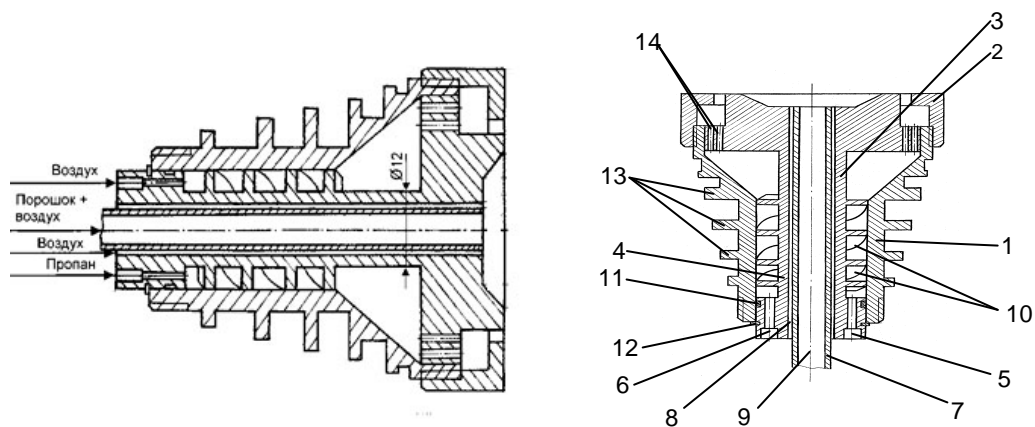


Рис. 2. Схема распылительного узла установки ОИМ 050

Fig. 2. Scheme of OIM 050 spraying unit

Изменяя соотношения скоростей выхода горючей смеси, воздушного потока с полимерным порошком и воздуха в зазоре 8, можно

«сжимать» или «разжимать» факел, управляя процессами теплообмена между напыляемым порошком и факелом пламени (рис. 3, табл. 1).

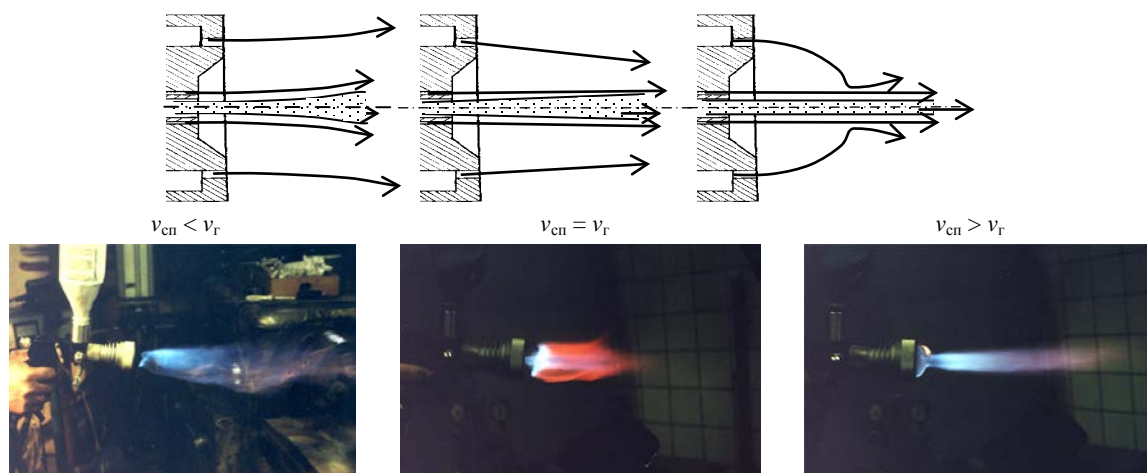


Рис. 3. Формы факела в зависимости от варианта газодинамической активации:

$v_{cp}$ ,  $v_r$  – скорость воздушного потока в зазоре и истекающей горючей смеси

Fig. 3. Torch shapes depending on variant of gas-dynamic activation:

$v_{cp}$ ,  $v_r$  – air flow rate in the gap and outflowing combustible mixture

Таблица 1

Режимы напыления полимеров с различной температурой плавления

Modes of spraying polymers with different melting points

Температура плавления полимера, К	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>		Размер частицы, мкм			Форма факела **
			До 100	100–200	200–400	
360–410	$2 \cdot 10^6$	β	24/1	23,5/1	23/1	«Веник»
		*	90/6/4	88/8/4	86/10/4	
420–510	$3,4 \cdot 10^6$	β	22,5/1	22/1	21,5/1	«Конус»
		*	82/13/5	80/15/5	78/17/5	
Более 510	Более $5 \cdot 10^6$	β	21/1	20,5/1	20/1	«Бутон»
		*	75/19/6	73/21/6	71/23/6	

\* Распределение воздуха, % (±1 %): в горючую смесь/на транспортировку порошка/в кольцевой зазор.

\*\* Формы факелов представлены на рис. 3.

Примечание. β – соотношение окислителя (воздуха) и горючего газа (пропана) в смеси.

### Материалы, оборудование и методики исследований

Для напыления покрытий были использованы порошки полиэтилена ПЭВД (ГОСТ 16338–85) марки 10703-20, полиэтилентерефталата ПЭТФ (ГОСТ Р 51695–2000), полиамида марки ПА-6 (ОСТ 6-06-09–93), полученные криогенным измельчением гранул полимеров, и порошок сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марки Hostalen GUR 412. Размер напыляемых частиц 100–200 мкм.

Образцы для исследования демпфирующих свойств покрытий представляли собой пластины размерами 135×20×3 мм (рис. 4а), выполненные из стали 20. Подготовку поверхности образцов перед нанесением покрытий осуществляли струйно-абразивной обработкой дробью чугунной колотой ДЧК 1 545 (ГОСТ 11964–81) при давлении сжатого воздуха 0,55–0,60 МПа и расходе 40–50 м<sup>3</sup>/ч.

Коэффициент аэрирования  $a_r$ , характеризующий количество пузырьков воздуха в покрытии, определяли оптическим методом на микроскопе «Альтами МЕТ 1 МТ», а также путем гидростатического взвешивания в этиловом спирте отделенных от подложки элементов покрытий, используя широко применяемый в практике порошковой металлургии метод исследования пористости спеченных материалов. Коэффициент аэрирования  $a_r$  показывает, какую часть объема покрытия занимают пузырьки воздуха.

Прочность сцепления покрытий оценивали методом отрыва штифта нормально приложен-

ной нагрузкой на адгезиметре модели ELCOMETER 506. Исследования демпфирующих свойств образцов с полимерными покрытиями осуществляли на стенде, разработанном и изготовленном в ОИМ НАН Беларуси (рис. 4б).

Кинематическая схема стенда основана на нагружении свободного конца консольно закрепленного образца, резком снятии нагрузки и регистрации свободных затухающих колебаний бесконтактным датчиком индукционного типа, связанным с компьютером. Стенд состоит из измерительной и регистрирующей частей. Измерительная часть включает узел крепления образца и узел нагружения, которые жестко закреплены на общей станине. Для калибровки деформации образцов при нагружении используется индикатор часового типа, расположенный на магнитном штативе. Регистрирующая часть стенда состоит из индуктивного датчика IF 6028 (фирма IFM Electronic, Германия), аналого-цифрового преобразователя E-154 (фирма LCard, Россия) и платы усилителя сигнала. Для отображения полученных виброграмм и дальнейшей их обработки используется персональный компьютер.

Основным измеряемым параметром является амплитуда затухающих колебаний образца, которая отображается на мониторе компьютера и представляет собой отображение мгновенных значений напряжения, фиксируемых индуктивным датчиком при изменяющемся расстоянии до поверхности образца в процессе колебаний. Регистрируемые значения напряжения поступают на аналого-цифровой преобразователь, в котором аналоговый сигнал преобразуется в цифровой для отображения на мониторе компьютера.

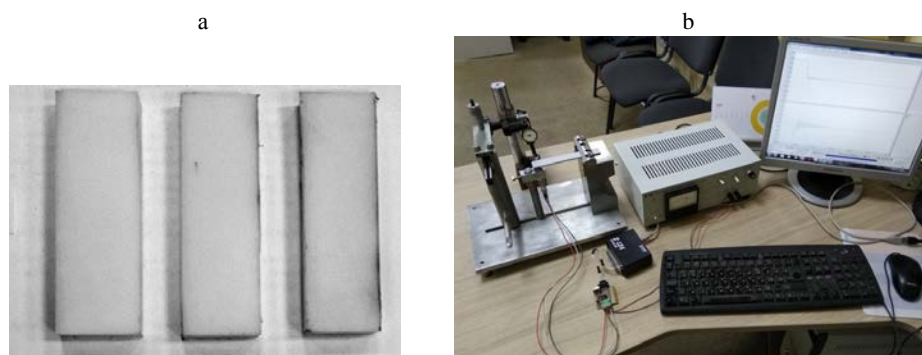


Рис. 4. Внешний вид образцов с полимерными покрытиями (а) и экспериментального стенда (б) для испытаний демпфирующих свойств

Fig. 4. Appearance of samples with polymer coatings (a) and experimental stand (b) for testing damping properties

Образец устанавливается покрытием вверх и жестко крепится на держателе с помощью прижимной планки двумя винтами. Длина свободного конца образца 90 мм. Индуктивный датчик выставляется по нижней поверхности образца на расстоянии приблизительно 1 мм с помощью крепежных гаек, позволяющих вертикально перемещать датчик. Для регистрации затухающих колебаний образца отклоняли свободный конец от положения равновесия на величину 1 мм, фиксируя напряжение сигнала от индуктивного датчика в соответствии с калибровочным графиком. Затем резко снимали нагрузку и останавливали запись виброграммы.

В процессе испытаний формируется массив данных, который записывается в память компьютера. Из этого массива выделяется и копируется участок, на котором записаны затухающие колебания образца. Дальнейшая обработка происходит в программе, разработанной в Excel. Для этого задают начальное, конечное значения амплитуд, а также количество выбранных циклов – обычно до 10.

Основным показателем демпфирующих свойств является логарифмический декремент затухания, который определяется по формуле

$$\delta = 1/(n - 1) \ln A_0/A_k,$$

где  $n$  – количество выбранных циклов;  $A_0$ ,  $A_k$  – начальное и конечное значения амплитуд сигнала.

Программа Excel автоматически вычисляет логарифмический декремент затухания  $\delta$ , и его значение отображается в заданной ячейке.

### Исследование процесса получения аэрированных полимерных покрытий

Предварительными экспериментами, выполненными при разработке конструкции термораспылителя [13, 14], установлено, что при увеличении количества воздуха, подаваемого в спутный поток, проходящий через кольцевой зазор 8 (рис. 2), в покрытии образуются воздушные пузырьки, количество которых пропорционально объему воздуха, проходящему через зазор. Регулируя объем воздуха, проходящего в спутном потоке, можно получать покрытия с достаточно большой степенью аэрирования (рис. 5).



Рис. 5. Поверхность аэрированного покрытия из ПЭВД (а) и вид пузырьков воздуха внутри покрытия при освещении «на просвет» (б) ( $\times 10$ )

Fig. 5. LDPE aerated coating surface (a) and type of air bubbles inside coating under illumination “in the light” (b) ( $\times 10$ )

Коэффициент аэрирования оценивался так же, как и пористость, т. е. как отношение объема пузырьков к объему покрытия. Исследовали зависимость коэффициента аэрирования  $a_r$  от количества воздуха, проходящего в спутном потоке. Чтобы исключить влияние конструктивного, температурного и других факторов, решили использовать не абсолютную величину объема воздуха в спутном потоке, а относительную – отношение проходящего объема воздуха в единицу времени в спутном потоке к объему воздуха, затрачиваемому в единицу времени на формирование факела пламени ( $K_Q$ ).

Установлено (рис. 6), что коэффициент аэрирования растет практически прямо пропорционально с увеличением показателя  $K_Q$  до 9–10 % у всех исследуемых полимерных покрытий.

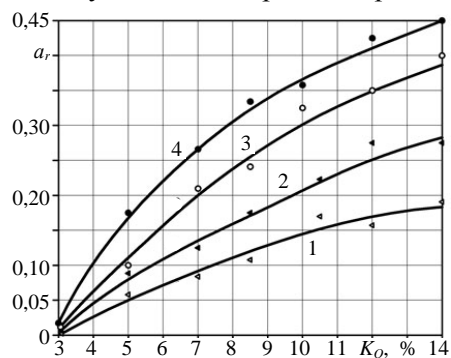


Рис. 6. Влияние количества воздуха в спутном потоке на коэффициент аэрирования наносимых покрытий из порошков:

- 1 – сверхвысокомолекулярного полиэтилена;
- 2 – полиэтилена высокого давления;
- 3 – полиамида ПА-6; 4 – полиэтилентерефталата

Fig. 6. Influence of air amount in the concurrent flow on aeration coefficient of applied coatings from powders: 1 – ultra-high molecular polyethylene; 2 – high-pressure polyethylene; 3 – polyamide ПА-6 [PA-6]; 4 – polyethyleneterephthalate

Отличие угла наклона у графиков, вероятно, связано с реологическими свойствами жидких

полимеров, а точнее, с величиной показателя текучести расплава (ПТР), характеризующего вязкость полимера в расплавленном состоянии. Данный показатель, согласно ГОСТ 11645–73, определяет, сколько термопластичного полимера в граммах под определенным давлением и при заданной температуре за 10 мин экструдировается через калиброванный капилляр. Чем выше данный показатель, тем полимер более текучий и менее вязкий.

У выбранных полимерных материалов самый низкий ПТР имеет СВМПЭ (0,04 г/10мин), а самый высокий – ПЭТФ (9,8 г/10мин), что полностью соответствует полученным результатам.

Образование пузырьков воздуха и их количество не могут не сказаться на физико-механических характеристиках полимерных покрытий. Для определения предельных значений воздуха в спутном потоке, которые вызывают значительное уменьшение механических характеристик покрытий, выполнили исследования адгезии и твердости аэрированных покрытий. Исходя из результатов (рис. 7), полученных для полимеров с наиболее высокими показателями ПТР (ПА-6 и ПЭТФ), а также из условия сохранения адгезии покрытий не менее 6 МПа, установлено, что значения  $K_Q$  не должны превышать 6–7 %. При этом твердость покрытий уменьшается на 25–30 %.

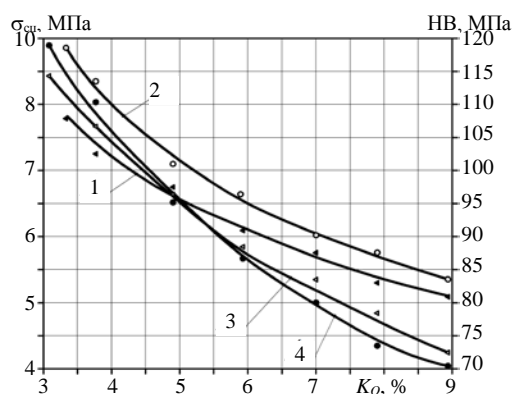


Рис. 7. Влияние количества воздуха в спутном потоке на прочность сцепления (1, 2) и твердость (3, 4) покрытий из полиамида ПА-6 (1, 4) и полиэтилентерефталата (2, 3)

Fig. 7. Influence of air amount in concurrent flow on adhesion strength (1, 2) and hardness (3, 4) of coatings from polyamide ПА-6 [PA-6] (1, 4) and polyethyleneterephthalate (2, 3)

### Оценка демпфирующих свойств покрытий

Как показали исследования декремента затухания колебаний стальных образцов, полимерные

покрытия могут обеспечивать значительное повышение демпфирующих свойств (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость декремента затухания колебаний от толщины полимерных покрытий  
Dependence of oscillation damping decrement on polymer coating thickness

Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Декремент затухания	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

Исследование изменения декремента затухания колебаний у образцов с аэрированными покрытиями толщиной 1 мм показало (рис. 8), что при увеличении коэффициента аэрирования от 0 до 0,18–0,20 логарифмический декремент затухания колебаний пропорционально повышается на 18–26 %. Таким образом, предложенный метод насыщения полимерных покрытий воздушными пузырьками позволяет значительно повысить их демпфирующую способность.

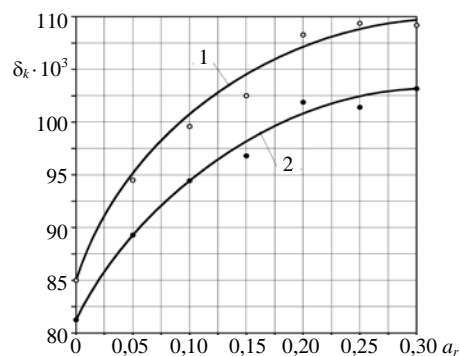


Рис. 8. Влияние степени аэрирования покрытий из полиэтилентерефталата (1) и полиэтилена высокого давления (2) на логарифмический декремент затухания колебаний

Fig. 8. Influence of aeration degree of coatings from polyethyleneterephthalate (1) and high-pressure polyethylene (2) on logarithmic decrement of oscillation damping

### ВЫВОДЫ

1. С помощью особенностей конструкции полимерного термораспылителя модели ОИМ 050 показана возможность управляемого насыщения воздушными пузырьками (аэрирования) напыляемых полимерных покрытий.

2. Определено, что насыщение пузырьками воздуха в количестве 15–20 % от общего объема полимерных покрытий позволяет сохранить величину их адгезии со стальными подложками до 6 МПа и уменьшить твердость не более чем на 30 %.

3. Установлено, что степень аэрирования покрытий при прочих равных условиях прямо пропорционально зависит от показателя текучести расплава используемого полимера.

4. Использование аэрирования при формировании шумопоглощающих покрытий на стальных образцах позволяет увеличить их логарифмический декремент затухания на 18–26 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. М.: Мир, 1988. 488 с.
2. Chung, D. D. L. Review. Materials for Vibration Damping / D. D. L. Chung // Journal of Materials Science. 2001. Vol. 36. P. 5733–5737. <https://doi.org/10.1023/A:1012999616049>.
3. Соломатов, В. И. Вибропоглощающие композиционные материалы / В. И. Соломатов, В. Д. Черкасов, Н. Е. Фомин. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 96 с.
4. Берлин, А. А. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) / А. А. Берлин // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 57–65.
5. Бартевев, Г. М. Релаксационные свойства полимеров / Г. М. Бартевев, А. Г. Бартевева. М.: Химия, 1992. 384 с.
6. Евстафьев, В. А. Демпфирование колебаний стержневых систем вибропоглощающими покрытиями / В. А. Евстафьев. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2011. 28 с.
7. Чернышев, В. М. Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов / В. М. Чернышев. М.: Наука, 2004. 288 с.
8. Ганбаров, А. Б. Обоснование и разработка вибродемпфирующего покрытия с упруго-волокнистой структурой / А. Б. Ганбаров. Воронеж: ВГЛА, 2004. 130 с.
9. Платонов, М. М. Акустические полимерные материалы нового поколения / М. М. Платонов, Е. М. Шульдебев, Т. А. Нестерова // Труды ВИАМ. 2016. № 4. С. 76–84.
10. Эксплуатационные свойства пористых изделий из эластомеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://niirp.com/articles/proizvodstvo\\_poristyh\\_izdelij\\_iz\\_elastomerov/ekspluatacionnye\\_svoystva\\_poristyh\\_izdelij\\_iz\\_elastomerov/](https://niirp.com/articles/proizvodstvo_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/ekspluatacionnye_svoystva_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/). Дата доступа 24.02.2021.
11. Whelan, T. Polymer Technology Dictionary / T. Whelan. First ed. Chapman and Hall. London, 1994. 561 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1292-5>.
12. Белоцерковский, М. А. Анализ конструкций распылителей для напыления композиционных полимерных порошковых покрытий / М. А. Белоцерковский, И. В. Макаревич // Технология – оборудование – инструмент – качество: тезисы докл. 32-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, БНТУ, 7–8 апр. 2016 г. / редкол. В. К. Шелег [и др.]. Минск: Бизнессофт, 2016. С. 25–26.
13. Свойства газопламенных полимерных покрытий, полученных с использованием различных горючих смесей / М. А. Белоцерковский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. № 1. С. 25–29.
14. Упругодиссипативные характеристики газопламенных покрытий / В. М. Рудько [и др.] // Вестник Полоцкого

государственного университета. Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. 2006. № 12. С. 71–76.

Поступила 20.04.2021

Подписана в печать 24.06.2021

Опубликована онлайн 30.09.2021

#### REFERENCES

1. Nashif A., Jones D., Henderson J. (1988) *Vibration Damping*. Moscow, Mir Publ. 488 (in Russian).
2. Chung D. D. L. (2001) Review. Materials for Vibration Damping. *Journal of Materials Science*, 36, 5733–5737. <https://doi.org/10.1023/A:1012999616049>.
3. Solomatov V. I., Cherkasov V. D., Fomin N. E. (2001) *Vibration-Absorbing Composite Materials*. Saransk, Publishing House of Mordovia State University. 96 (in Russian).
4. Berlin A. A. (1995) Modern Polymer Composite Materials (PCM). *Sorosovskii Obrazovatelnyi Zhurnal* [Soros Educational Journal], (1), 57–65 (in Russian).
5. Bartenev G. M., Barteneva A. G. (1992) *Relaxation Properties of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ. 384 (in Russian).
6. Evstafiev V. A. (2011) *Damping of Vibrations of Neural Rod Systems with Vibration-Absorbing Coatings*. Saint-Petersburg, Publishing House of Baltic State Technical University. 28 (in Russian).
7. Chernyshov V. M. (2004) *Damping of Vibrations of Mechanical Systems with Coatings Made of Polymer Materials*. Moscow, Nauka Publ. 288 (in Russian).
8. Ganbarov A. B. (2004) *Justification and Development of Vibration-Damping Coating with Elastic-Fibrous Structure*. Voronezh, Publishing House of Voronezh State Forestry Academy. 130 (in Russian).
9. Platonov M. M., Shuldeshev E. M., Nesterova T. A. (2016) New Generation Acoustic Polymer Materials. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, (4), 76–84 (in Russian).
10. Performance Properties of Porous Elastomer Products. Available at: [https://niirp.com/articles/proizvodstvo\\_poristyh\\_izdelij\\_iz\\_elastomerov/ekspluatacionnye\\_svoystva\\_poristyh\\_izdelij\\_iz\\_elastomerov/](https://niirp.com/articles/proizvodstvo_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/ekspluatacionnye_svoystva_poristyh_izdelij_iz_elastomerov/). (Accessed 24 February 2021) (in Russian).
11. Whelan T. (1994) *Polymer Technology Dictionary*. First ed. Chapman and Hall. London. 561. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1292-5>.
12. Belotserkovsky M. A., Makarevich I. V. (2016) Analysis of Spray Gun Designs for Spraying Composite Polymer Powder Coatings. *Tekhnologiya – Oborudovanie – Instrument – Kachestvo: Tezisy Dokl. 32-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, BNTU, 7–8 Apr. 2016 g.* [Technology – Equipment – Tools – Quality: Abstracts of 32<sup>nd</sup> International Scientific and Technical Conference, Minsk, Belarusian National Technical University, April 7–8, 2016]. Minsk, BusinessSoft Publ., 25–26 (in Russian).
13. Belotserkovsky M. A., Chekulayev A. V., Sheleg V. K., Makarevich I. V. (2015) Properties of the Flame Spraying Polymer Coatings Applied Using Various Combustible Mixtures. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, (1), 25–29 (in Russian).
14. Rudko V. M., Sheleg V. K., Belotserkovsky M. A., Levantsevich M. A. (2006) Elastic Dissipative Characteristics of Flame Coatings. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya V. Prikladnye Nauki. Promyshlennost' = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (12), 71–76 (in Russian).

Received: 20.04.2021

Accepted: 24.06.2021

Published online: 30.09.2021