

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛАЦЕТАТА НА ИХ ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА

© А. И. Сятковский<sup>1</sup>, Т. Б. Скуратова<sup>1</sup>, Д. Н. Трофимов<sup>1</sup>, А. С. Мазур<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Пластполимер»,

195197, г. Санкт-Петербург, Полюстровский пр., д. 32

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),

190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

E-mail: nauka@plastpolymer.com

Поступила в Редакцию 16 августа 2019 г.

После доработки 17 сентября 2019 г.

Принята к публикации 8 февраля 2020 г.

*Методом динамического механического анализа исследованы трехслойные композитные материалы металл–вязкоупругий полимер–металл, где в качестве вязкоупругого полимерного слоя использовались термопластичные пластифицированные пленки на основе поливинилацетата. Получены экспериментальные зависимости значений коэффициентов механических потерь и компонентов комплексного модуля упругости от температуры для композитов с различными соотношениями толщины армирующих и вязкоупругого слоев. Полученные результаты сопоставимы с экспериментальными данными, полученными другими методами на других полимерных материалах, а также с данными расчетов.*

Ключевые слова: *пластифицированные пленки; поливинилацетат; трехслойные композиты; диссипативные свойства*

DOI: 10.31857/S004446182004012X

В машиностроении, авиации, кораблестроении широко используются армированные вибропоглощающие покрытия и листовые композитные материалы, содержащие внутренние полимерные слои, обладающие высокой способностью к диссипации энергии. Главным практическим преимуществом таких армированных многослойных материалов перед однослойными полимерными покрытиями является их существенно большая эффективность в процессах вибродемпфирования без существенного увеличения массы или толщины демпфируемой конструкции [1, 2]. Простейшим вариантом таких слоистых материалов являются трехслойные композиты вида металл–полимер–металл, где полимерный слой, обладающий способностью к диссипации энергии, располагается между двумя металлическими армирующими слоями, хотя в настоящее время известно об успешном использовании материалов, содержащих пять и более слоев.

Подобные трехслойные структуры в виде составных стержней или пластин с демпфирующими накладками достаточно подробно анализировались экспериментальными и расчетными методами. Было

показано, что эффективность демпфирования многослойных структур при механических колебательных возмущениях полностью описывается через три группы параметров: параметры сдвига, геометрический фактор и частотный параметр. Эти параметры зависят от геометрических характеристик (длина стержней, соотношение толщин вязкоупругого и армирующего слоев), модуля сдвига вязкоупругого слоя, модуля упругости армирующего слоя, распределения масс относительно оси симметрии и угловой частоты [3–5]. В то же время расчетные методы базируются на ряде допущений, что ограничивает возможность поиска методов усовершенствования слоистых вибродемпфирующих материалов. Эффективность применения упрочненных вязкоупругих материалов, влияние клеевых соединений, обеспечивающих скрепление слоев в композитном материале, на его демпфирующие свойства — все эти практически важные вопросы могут решаться исключительно на базе экспериментальных данных.

К числу наиболее эффективных вязкоупругих полимерных связующих, используемых в качестве вну-

тренного слоя в композитах металл–полимер–металл, относятся пластифицированные полимерные пленки на основе поливинилацетата, ассортимент которых выпускается под общим названием ВПС–пленки (ВПС-2,5, ВПНС-4, ВПС-3, ВПНС-1 и др.). Все пленочные материалы типа ВПС обладают чрезвычайно высокими коэффициентами механических потерь в интервале температур  $-15 \div +50^\circ\text{C}$ .

В работе [6] приведены данные по экспериментальному исследованию температурно-частотных зависимостей физико-механических характеристик для различных видов ВПС–пленок. При этом изучались композитные материалы металл–полимер–металл с различными ВПС–пленками при фиксированных геометрических параметрах композита.

Целью настоящего исследования являлось экспериментальное изучение влияния геометрических параметров, таких как соотношение толщины армирующих слоев и внутреннего вязкоупругого слоя, трехслойных композитов на их физико-механические показатели методом динамического механического анализа (ДМА). Кроме того, нам представлялось необходимым сопоставить полученные экспериментальные закономерности с выводами, сделанными на основе исследований армированных стержней и пластин, с целью подтвердить обоснованность использования ДМА для анализа такого рода композитных материалов.

### Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования были выбраны пленочные материалы на основе поливинилацетата: ВПНС-4 и ВПС-2,5, серийно производимые в ОАО «Пластполимер», ТУ 4515-001-00203521–93 «Пленка термопластичная пластифицированная». Пленки являются самоклеящимися, толщина исходных пленок от  $0.6 \pm 0.1$  до  $1.8 \pm 0.1$  мм. Все перечисленные пленочные материалы получают путем смешения поливинилацетата с пластификатором и другими добавками в смесителе с последующим экструдированием расплавов через шнековую машину в пленку [7]. Пленки ВПНС-4 и ВПС-2,5 содержат низкотемпературный пластификатор из группы сложных эфиров в количестве 40 и 25% соответственно. Пленка ВПНС-4, содержащая большее количество низкотемпературного пластификатора, обладает максимальными демпфирующими свойствами в области более низких температур, чем пленка ВПС-2,5 [6].

Трехслойные композитные материалы, содержащие внутренний полимерный слой из различных

пленок ВПС и внешние металлические слои одинаковой толщины, готовили следующим образом: между двумя металлическими пластинами размером  $30 \times 7$  мм, поверхности которых предварительно обезжиривали ацетоном, размещали образцы различных ВПС–пленок. Полученные образцы композитных материалов выдерживали в прессе под давлением  $1 \text{ кг}\cdot\text{см}^{-2}$  при температуре  $+50^\circ\text{C}$  в течение 2 ч. Металлические слои для образцов композита изготавливали из стальной ленты толщиной 0.12, 0.25, 0.35 и 0.65 мм, ГОСТ 503–81 «Лента стальная холоднокатаная из низкоуглеродистой стали», марка 08кп. Модуль упругости при изгибе металлических пластин из этой ленты, определенный при температуре  $23^\circ\text{C}$  на разрывной машине Orientec RTM-1Т, составляет  $1.7 \cdot 10^{12}$  Па.

Измерения механических показателей осуществляли на приборе ДМА 8000 фирмы Perkin Elmer в режиме трехточечного изгиба в интервале температур  $-50 \div +80^\circ\text{C}$  при частоте 1 Гц. Для количественной оценки диссипативных свойств полимерных материалов использовался коэффициент механических потерь  $\eta$  и модуль механических потерь ( $E''$ ). Между этими величинами существует простая взаимосвязь  $E'' = E' \eta$ , где  $E'$  — динамический модуль упругости полимера. Кроме того, важным параметром является температура  $T_{\eta\text{max}}$ , при которой достигается максимум коэффициента механических потерь  $\eta_{\text{max}}$ . В дальнейшем в тексте мы будем использовать сокращенные названия показателей:  $\eta$  — коэффициент потерь,  $E'$  — модуль упругости,  $E''$  — модуль потерь и  $T_{\eta\text{max}}$  — температура максимального демпфирования.

Как уже отмечалось, демпфирование в слоистых конструкциях, содержащих внутренний полимерный слой, связано с их способностью диссипировать энергию при изгибных колебаниях за счет сдвиговых деформаций в вязкоупругом полимерном слое. В качестве метода испытаний был выбран «трехточечный изгиб», схематически представленный на рис. 1. Возмущение с фиксированной частотой прикладывается к середине пластины  $h_1$ , тогда как концы всего трехслойного композита остаются незакрепленными.

В работе [6] на примере пленок ВПС-2,5, ВПНС-4 и ВПНС-1 было показано, что физико-механические характеристики трехслойных композитов металл–пленка ВПС–металл, определенные при различных частотах возмущения, представляют собой кривые со сдвигом в область высоких температур  $\Delta T \approx 6-7^\circ$  при переходе от частоты 1 Гц к частоте 10 Гц и  $\Delta T \approx 8-9^\circ$  при переходе от частоты 10 Гц к частоте 100 Гц. В предлагаемой работе большинство измерений проводилось при частоте 1 Гц, поскольку при работе в

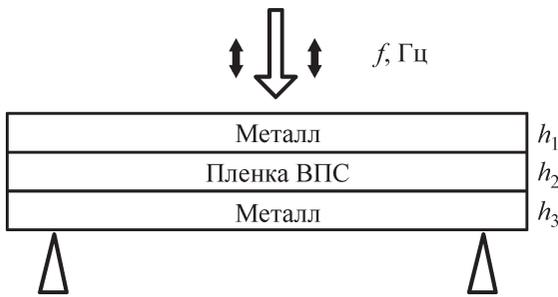


Рис. 1. Схема испытания композитных материалов при деформации «трехточечный изгиб».

$h_1, h_3$  — толщины армирующих металлических слоев,  
 $h_2$  — толщина вязкоупругого полимерного слоя,  
 $f$  (Гц) — частота деформации.

режиме трехточечного изгиба на низких частотах проще обеспечивать фиксацию образца в датчике прибора.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов потерь и модулей упругости от температуры для «симметричных» ( $h_1 = h_3$ ) трехслойных композитов с внутренними вязкоупругими полимерными слоями из различных пленок ВПС.

С увеличением толщины вязкоупругого слоя  $h_2$  при неизменной толщине внешних металлических

слоев коэффициент механических потерь композита растет (рис. 2, а, в). В отличие от однослойных покрытий с полимерным демпфирующим слоем, где увеличение толщины демпфирующего слоя всегда приводит к возрастанию коэффициента потерь [1, 8], в трехслойных композитах демпфирование зависит не только от толщины центрального слоя, но также и от соотношения толщин всех слоев [9–11]. Наиболее подробно этот вопрос исследовался в работе [9], где было показано, что в случае, когда толщина вязкоупругого слоя меньше толщины армирующих слоев, коэффициент потерь уменьшается с увеличением толщины пленки. Когда толщина пленки в 2 раза и более превосходит толщину армирующих слоев (как и в нашем случае, представленном на рис. 2, а, в), коэффициент потерь увеличивается с ростом толщины демпфирующего слоя [9].

Увеличение толщины внешних металлических армирующих слоев при сохранении толщины вязкоупругого слоя приводит к падению коэффициента механических потерь (рис. 2, кривые 1, 4, 5), что также согласуется с экспериментальными и расчетными данными подобных структур [8]. Температура максимального демпфирования  $T_{\eta_{\max}}$  практически не зависит от соотношения толщины вязкоупругого и

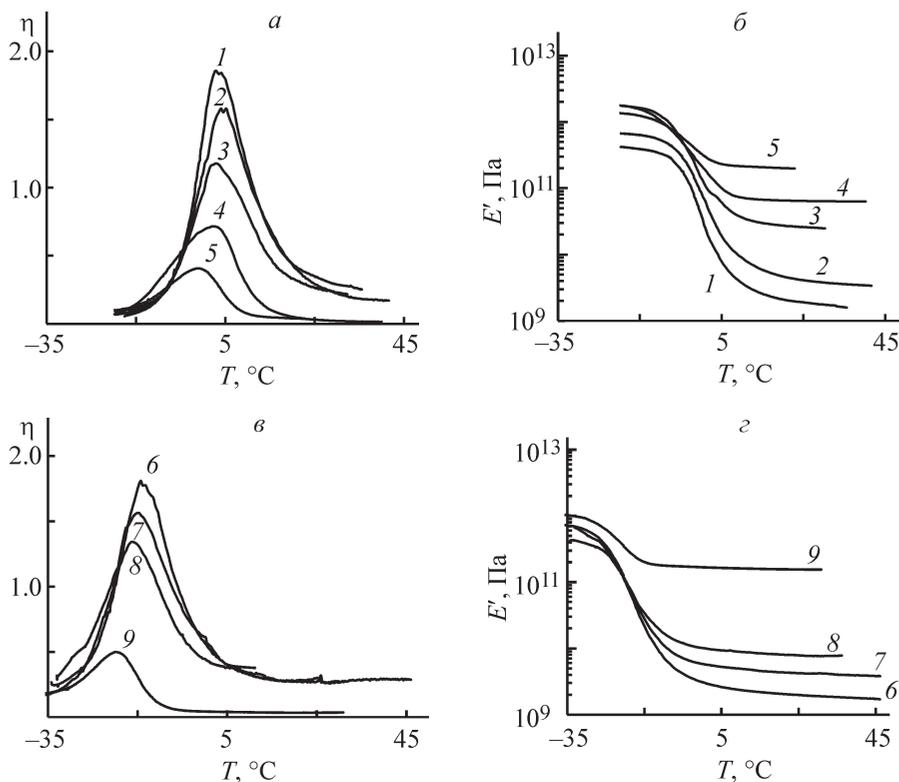


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь (а, в) и модуля упругости (б, г) от температуры при возмущении с частотой 1 Гц для композитов с полимерными пленками ВПС-2,5 (а, б) и ВПНС-4 (в, г) толщиной  $h_2 = 1.8$  (1, 6), 1.3 (2, 7), 0.5 мм (3–5, 8, 9) и металлическими слоями толщиной  $h_1 = h_3 = 0.12$  (1–3, 6–8), 0.25 (4), 0.65 мм (5, 9).

металлических слоев (небольшая тенденция к сдвигу  $T_{\eta_{\max}}$  в область низких температур при увеличении толщины армирующих металлических слоев связана, по-видимому, с общим увеличением жесткости сэндвичевой структуры, что приводит к повышению собственных частот колебаний [12] или, как в нашем случае, к сдвигу в низкотемпературную область. Соотношение толщины полимерного и металлических слоев в композите является определяющим в характере зависимостей модулей упругости от температуры (рис. 2, б, з). Чем больше толщина вязкоупругого слоя, тем больше падение модуля упругости с температурой и тем меньше его значение при температуре максимального демпфирования  $T_{\eta_{\max}}$ . При очень большой (по отношению к толщине армирующих металлических слоев) толщине пленки характер температурных зависимостей модулей упругости композитных материалов  $E'$  приближается к таковому для неармированных термопластов [6].

При расчете трехслойных композитов металл–полимер–металл было установлено, что максимальными демпфирующими свойствами обладают «симметричные» композиты, т. е. такие, где толщина верхнего  $h_1$  и нижнего  $h_3$  армирующих слоев одинакова [9]. Для сопоставления с расчетными данными была проведена серия экспериментов, в которых варьировалась толщина армирующих слоев  $h_1$  и  $h_3$  при постоянной толщине вязкоупругого слоя (см. таблицу).

Из результатов измерений коэффициентов потерь и динамических модулей упругости для «асимметричных» композитов ( $h_1 > h_3$  или  $h_1 < h_3$ ) следует, что эти показатели не зависят от того, к какому из армирующих слоев прикладывается возмущение. Таким образом, в исследуемых условиях трехслойные композиты ведут себя как своего рода единый материал, характеристики которого определяются конкретными соотношениями полимерных и металлических слоев в его составе. Сравнивая «симметричные» и «асим-

метричные» композиты с близкими отношениями общей толщины металлических слоев к толщине вязкоупругого слоя (см. таблицу, композиты № 2, 5, 6), можно отметить, что коэффициент потерь больше в случае «симметричных» композитов, тогда как модуль упругости больше в случае «асимметричных». Этот вывод также хорошо согласуется с результатами как экспериментов, так и расчетов трехслойных композитных материалов с промежуточным вязкоупругим слоем [9].

При анализе эффективности демпфирования конструкций многослойными покрытиями успешно применяется метод «эквивалентных» покрытий. В этом методе многослойное покрытие рассматривается как эквивалентная однородная система, чьи «усредненные» свойства зависят от конкретных конструктивных особенностей реального покрытия. Показано, что такое эквивалентное покрытие можно рассматривать как однослойное и, следовательно, использовать формулы и подход, применяемые для однослойных демпфирующих покрытий [13]. Если применить подобный подход к трехслойным композитам металл–пленка ВПС–металл, вибродемпфирующая способность такого «эквивалентного» материала будет определяться модулем потерь  $E''$ . На рис. 3 представлены зависимости модуля потерь от температуры для трехслойных образцов с ВПС-2,5 и ВПНС-4 при различной толщине вязкоупругого слоя. Из рис. 3 видно, что во всем исследованном интервале температур модуль потерь  $E''$  для композитов с толщиной вязкоупругого слоя  $h_2 = 0.5$  мм больше, чем для композитов с более толстым слоем ВПС-пленок ( $h_2 = 1.3$  мм и  $h_2 = 1.8$  мм). Этот довольно неожиданный результат объясняется тем, что падение модуля упругости композита с увеличением содержания полимерной компоненты не компенсируется увеличением коэффициента потерь.

Если принять во внимание, что для большинства вибропоглощающих покрытий толщина армирующе-

Влияние толщины армирующих слоев металла на диссипативные свойства трехслойных композитов металл–пленка ВПС-2,5–металл ( $f=1$  Гц,  $h_2 = 0.5$  мм)

№ композита	Толщина металлического слоя, мм		Температура максимального демпфирования $T_{\eta_{\max}}$ , °С	Коэффициент потерь $\eta_{\max}$	Модуль упругости $E' \cdot 10^{-11}$ , Па
	$h_1$	$h_3$			
1	0.12	0.12	1.0	1.17	1.11
2	0.25	0.25	2.1	0.72	1.54
3	0.25	0.12	5.3	0.88	1.32
4	0.12	0.25	7.2	0.89	1.51
5	0.35	0.12	1.4	0.48	2.1
6	0.12	0.35	2.6	0.54	2.0

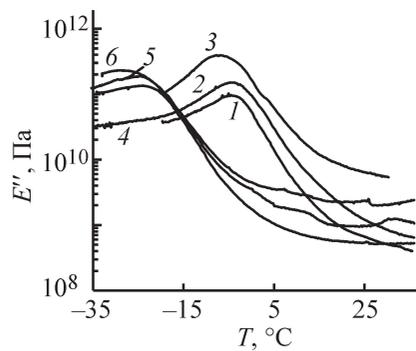


Рис. 3. Зависимость модуля потерь от температуры при динамическом возмущении методом трехточечного изгиба с частотой 1 Гц для композитных слоистых материалов с металлическими слоями толщиной  $h_1 = h_3 = 0.12$  мм и с полимерными пленками ВПС-2,5 (1–3) и ВПНС-4 (4–6) толщиной  $h_2 = 1.8$  (1, 4), 1.3 (2, 5), 0.5 мм (3, 6).

го слоя существенно меньше толщины демпфируемого слоя, то полученные результаты свидетельствуют о том, что эффективность демпфирующих покрытий с вязкоупругой полимерной прокладкой и металлическим армирующим слоем не пропорциональна толщине диссипативного слоя. Действительно, высокоэффективные демпфирующие покрытия могут быть изготовлены на базе сравнительно тонких ВПС-пленок и сравнительно тонких металлических армирующих слоев. В работе [14] показано, что при демпфировании металлического листа толщиной 3 мм покрытием с пленкой ВПС-2,5 толщиной 0.4 мм и армирующим листом толщиной 0.6 мм значительный эффект 20–30 децибелл достигается в интервале частот 10–6000 Гц, причем изменение толщины вязкоупругого слоя в интервале 0.2–1.5 мм мало сказывается на эффективности демпфирования.

В заключение следует отметить, что все полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с расчетными и экспериментальными данными, полученными другими методами, что, по нашему мнению, подтверждает правомерность использования метода трехточечного изгиба при моделировании сдвиговых деформаций в трехслойных композитах.

### Выводы

В условиях деформации трехточечного изгиба исследованные композитные материалы ведут себя как однородный материал с «усредненными» физико-механическими характеристиками. Полученные экспериментальные результаты подтверждают правомерность использования метода ДМА в режиме

трехточечного изгиба при анализе композитов типа металл–вязкоупругий полимерный слой–металл. Для «симметричных» композитов с одинаковой толщиной обоих металлических армирующих слоев при увеличении толщины вязкоупругого слоя коэффициент механических потерь растет, тогда как модуль упругости уменьшается для обеих вязкоупругих пленок ВПС-2,5 и ВПНС-4. При сохранении толщины вязкоупругого слоя коэффициент механических потерь в «симметричных» композитах уменьшается с увеличением толщины металлических армирующих слоев, при этом модуль упругости композитов увеличивается. При одинаковом соотношении металл/полимер в структуре композитного материала коэффициент механических потерь для «симметричных» композитов больше, чем для «асимметричных». Эффективное демпфирование достигается при строго определенных соотношениях толщины вязкоупругого и армирующих слоев, увеличение толщины только одного вязкоупругого слоя из-за снижения модуля упругости всего композита приводит к снижению модуля механических потерь и, следовательно, к снижению вибропоглощения.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

Сятковский Александр Иорданович, к.х.н.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-6819>  
Скуратова Татьяна Борисовна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9041-4762>  
Трофимов Дмитрий Николаевич,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1901>  
Мазур Андрей Семенович, д.т.н., проф.,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3973-0046>

### Список литературы

- [1] Mohan D. Rao. Recent application of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // J. Sound Vibration. 2003. V. 262. P. 457–474. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00106-8)
- [2] Nakra B. C. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping // J. Sound Vibration. 1998. V. 211. N 3. P. 449–465.
- [3] Grootenhuis P. The control of vibration with viscoelastic materials // J. Sound Vibration. 1970. V. 11. N 4. P. 421–433.

- [4] *Won S. G., Bae S. H., Cho J. R., Bae S. R., Jeong W. B.* Three-layered damped beam element for forced vibration analysis of symmetric sandwich structures with viscoelastic core // *Finit Elements in Analysis and Design*. 2013. V 68. P. 39–51.  
<https://doi.org/10.1016/j.finel.2013.01.004>
- [5] *Zhon X. Q., Yu D. Y., Shao X. Y., Zhang S. Q., Wang S.* Research and applications of viscoelastic vibration damping materials: A Review // *Composite Structures*. 2016. V. 136. P. 460–480.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.014>
- [6] *Скуратова Т. Б., Кириллов С. Е., Сятковский А. И.* Диссипативные свойства полимерных пленок и композитных материалов на основе поливинилацетата // *ЖПХ*. 2019. Т. 92. № 7. С. 881–887.  
<https://doi.org/10.1134/S0044461819070090>  
[*Skuratova T. B., Kirillov S. E., Syatkovskii A. I.* Dissipative properties of polymer films and composite materials based on polyvinyl acetate // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 7. P. 952–957.  
<https://doi.org/10.1134/S1070427219070115>].
- [7] *Розенберг М. Э.* Полимеры на основе винилацетата. Л.: Химия, 1983. С. 144–145.
- [8] *Corcaro R. D., Sperling L. H.* Sound and vibration damping with polymers. // *ACS Symp. Ser.; Am. Chem. Soc.* Washington, DC, 1990. P. 317–345.
- [9] *Boubaker K., Ross A.* Transient and harmonic response of a sandwich with partial constrained layer damping: A parametric study // *Composites. Part B*. 2016. V. 91. P. 44–55.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.037>
- [10] *Chen Y. C., Huang S. C.* An optimal placement of CLD treatment for vibration suppression of plates // *Int. J. Mech. Sci.* 2002. V. 44. P. 1801–1821.
- [11] *Hujare P. P., Sahasrabudhe A. D.* Effect of thickness of damping material on vibration control of structural vibration in constrained layer damping treatment // *App. Mech. and Mater.* 2014. V. 592-594. P. 2031–2035. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2031>
- [12] *Ahmed J. K.* Parametric study of dynamic analysis of composite laminated plate // *Int. J. Civil Environment Eng.* 2017. V. 11. N 7. P. 905–909.
- [13] *Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж.* Демпфирование колебаний // Пер. с англ. под ред. Э. И. Григолюка. М.: Мир, 1988. С. 308–315 [*Nashif Ahid D., Johnes David I. G., Henderson John P.* *Vibration Damping*. John Wiley & Sons, 1985].
- [14] *Kirpichnikov V., Syatkovskiy A.* Effectiveness research of polymer film-based vibration absorbers // *Akustika*. 2019. V. 32. N 3. P. 36–38.
-