УДК 678.747.2

А.И. Гуляев<sup>1</sup>, П.Н. Медведев<sup>1</sup>, С.В. Сбитнева<sup>1</sup>, А.А. Петров<sup>1</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ОЦЕНКЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ «ВОЛОКНО–МАТРИЦА» В УГЛЕПЛАСТИКАХ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО, МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИСУЛЬФОНОМ

## DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86

Предложен алгоритм проведения экспериментального определения адгезионной прочности «волокноматрица» методом выталкивания волокон индентором. Представлены результаты экспериментального определения данной характеристики для углепластиков на основе двух марок высокопрочных волокон, различающихся диаметром и формой поперечного сечения, а также морфологией поверхности, и эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном. Методами микроскопии контролировали корректность выталкивания волокон. Полученные значения прочности адгезионной связи могут рассматриваться как константы системы «полимер-волокно» в исходном состоянии.

Ключевые слова: волокнистый композит, полимерный композиционный материал, адгезия, граница раздела, граничный слой, межфазное взаимодействие, инструментальное индентирование, метод выталкивания волокон.

# A.I. Gulyaev<sup>1</sup>, P.N. Medvedev<sup>1</sup>, S.V. Sbitneva<sup>1</sup>, A.A. Petrov<sup>1</sup>

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF «FIBER–MATRIX» ADHESION STRENGTH IN CARBON FIBER EPOXY/POLYSULPHONE COMPOSITE

The paper proposes a method for determining the fiber-matrix adhesion strength by pushing-out the fibers by a nanoindenter (push-out test). There are given the results of experimental determination of this characteristic for carbon fiber epoxy/polysulphone composites based on two brands of high-strength fibers, differing in diameter, cross-sectional shape and surface morphology. The correctness of the push-out process was controlled by the microscopy technique. The obtained values of adhesive strength can be considered as constants of polymer-fiber systems in the initial state.

*Keywords:* fiber composite, polymer composite material, adhesion, interface, interphase, boundary interaction, indentation, push-out test.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

#### Введение

Всевозрастающее применение армированных волокнами полимерных композитов в различных отраслях промышленности обусловлено их высокими удельными упруго-прочностными характеристиками и широкими возможностями регулирования их свойств посредством управления структурой армирования [1-3]. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются системами со сложной многоуровневой организацией структуры. Можно выделить уровни строения отдельных структурных составляющих материала, уровень структуры монослоя композита и уровень структуры армирования. Каждый из структурных уровней вносит существенный вклад в комплекс свойств материала и дефекты на конкретном структурном уровне могут стать критическими для конструкции из такого материала.

Структурные предпосылки свойств закладываются на самых мелкомасштабных уровнях организации структуры и, в зависимости от того, благоприятствует ли организация структуры крупномасштабных уровней реализации заложенных предпосылок, проявляются в большей или меньшей степени [4].

Такие свойства полимерных композитов, как, например, межслоевая вязкость разрушения (трещиностойкость) и прочность при межслойном сдвиге, определяют способность материала сопротивляться деформированию и разрушению при нагружении вне направлений армирования [5, 6]. При таких видах механического воздействия основную нагрузку воспринимают полимерная матрица и граничный слой «волокно–матрица». Ввиду того, что, по сравнению с полимерной матрицей, физико-химическим строением и структурнофазовым состоянием граничного слоя гораздо сложнее управлять, именно отсутствие полного понимания взаимосвязи «технология-структурасвойство» для граничных слоев может являться лимитирующим фактором создания полимерного композита с наиболее эффективным комплексом свойств. В связи с этим при разработке волокнистых композитов вопросу взаимодействия на границе раздела всегда уделялось особое внимание.

На протяжении последних десятилетий активно ведутся научно-исследовательские работы, направленные как на совершенствование методов управления взаимодействием «волокно–матрица» [7–10], так и на разработку способов определения величины прочности адгезионной связи «волокно– матрица» [10–13].

К настоящему времени разработано более десяти принципиально различающихся способов экспериментального определения адгезионной прочности «волокно-матрица» в композиционных материалах [7]. Существуют способы, которые требуют изготовления специальных модельных образцов, и способы, которые могут быть осуществлены на образцах, изготовленных из опытных или промышленных ПКМ. Различают способы, в которых нагрузку прикладывают непосредственно к единичному волокну, и способы, в которых нагружают модельный образец или стандартный образец ПКМ. Во многих работах [11, 14-17] проводили сравнение значений адгезионной прочности «волокно-матрица», полученных для одних и тех же систем разными методами. В ряде случаев результаты оказываются близки [17], однако часто они существенно различаются [11, 14-16]. Большинство исследователей объясняют данное явление различием физического смысла, который содержат результаты, полученные разными методами. В монографии [18] указано на необходимость разделять термины «адгезионная прочность» и «прочность адгезионной связи». Прочность адгезионной связи отражает только физико-химическое взаимодействие, присущее системе «волокно-полимер» [18]. Данная характеристика не зависит от формы и размеров образца и именно ее целесообразно применять при сравнении различных систем и установлении влияния технологических и эксплуатационных факторов на уровень адгезионного взаимодействия. Адгезионная прочность характеризует совокупность всех сил, действующих на границе раздела. Данная величина существенно зависит от формы и размеров образца и характеризует не систему «полимер-волокно», а конкретное адгезионное соединение [18]. Вероятно, различие в экспериментальных данных, получаемых разными методами, во многом обусловлено тем, в какой мере результат определения адгезионной прочности стремится к значению прочности адгезионной связи. Данный тезис можно проиллюстрировать на примере научно-технических литературных данных по определению адгезионной прочности методами вытягивания и выталкивания единичных волокон.

В работе [15] приведены результаты исследования зависимости нагрузки при выталкивании волокна от толщины образца и показано, что данная зависимость линейна в диапазоне толщин образцов от 50 до 100 мкм. В этой работе сделан вывод, что определяемые методом выталкивания единичного волокна характеристики адгезионной прочности являются константами материала, так как не зависят от размеров образца. Данное заключение входит в некоторое противоречие с положениями отечественных работ по определению адгезионной прочности «волокно-матрица» методом вытягивания волокна из матрицы [18-20]. В монографии [18] и работах [19, 20] показано, что измеренная средняя адгезионная прочность (напряжение сдвига по границе «волокноматрица») в большинстве случаев уменьшается с увеличением длины склейки (площади контакта «волокно-матрица»). В монографии [18] подробно рассмотрены вероятные причины подобной зависимости и сделано предположение, что основная причина - наличие остаточных напряжений на границе раздела, возникающих при отверждении системы и ее последующем охлаждении. В монографии [18] показано, что при уменьшении площади контакта (S->0) значение адгезионной прочности, определенное в эксперименте по вытягиванию волокна из матрицы, будет стремиться к некоторому постоянному значению, обозначаемому как локальная [18] или истинная [20] адгезионная прочность. Указанное противоречие, вероятно, устраняется тем фактом, что площадь контакта «волокноматрица» в экспериментах по выталкиванию волокон на порядок меньше, чем в случае испытаний на вытягивание волокна из матрицы.

В данной работе представлены результаты экспериментального определения адгезии эпоксидно-полисульфоновой матрицы к высокопрочным углеродным волокнам, различающимся, по данным растровой электронной микроскопии, диаметром и формой поперечного сечения и морфологией поверхности. Определение адгезионной прочности (напряжения сдвига по границе «волокно-матрица») проведено методом выталкивания волокна индентором. Корректность результатов выталкивания единичных волокон контролировали с применением методов микроскопии. Полученные в данной работе значения прочности адгезионной связи могут рассматриваться как константы для исследуемых систем «волокноматрица» в исходном состоянии.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» и 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

## Материалы и методы

В данной работе исследовали однонаправленные углепластики на основе двух марок высокопрочных волокон и эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном.

Пробоподготовка образцов для измерения адгезионной прочности «волокно-матрица» методом выталкивания волокон включала вырезание пробы толщиной ~1 мм перпендикулярно оси волокон и механическое утонение и шлифование пробы последовательным применением абразивной бумаги с меньшей зернистостью. Данным способом подготовлены образцы углепластиков толщиной 25 и 50 мкм.

С целью минимизации изгиба образца при воздействии индентора применяли оснастку стандартную предметную сетку для просвечивающей электронной микроскопии с диаметром ячеек 160 мкм, при этом волокно выталкивали в ячейку предметной сетки. Образец на предметной сетке помещали на плоскопараллельный держатель и фиксировали по краям образца термопластичным клеем-расплавом. Держатель помещали на предметный столик комплекса для инструментального наноиндентирования Nanovea PB1000, с применением которого получали зависимость «нагрузка-перемещение индентора». Для осуществления выталкивания волокон при минимальном деформировании торцов волокон, через которые нагрузка передается всему волокну, применяли индентор в виде усеченного конуса с диаметром рабочей части 5 мкм. Измерение проводили в режиме постоянной скорости нагружения, которая составляла 20 мН/мин.

Измерение глубины вдавливания волокна и высоты части волокна, вышедшей с противоположной поверхности образца, проводили методом конфокальной сканирующей лазерной микроскопии (КСЛМ) на микроскопе Olympus LEXT OLS3100 при увеличении ×1000 (поле зрения 96×128 мкм). Методом КСЛМ также измеряли отклонение от плоскопараллельности образца, зафиксированного на держателе, в пределах области проведения выталкивания волокон. Отклонение не должно превышать 1 градус. Восстановление моделей поверхности, компьютерную обработку с целью удаления шумов и построение профилей поверхности проводили с применением программы LEXT-OLS3000.

Исследование поперечного сечения и поверхности углеродных волокон, а также участков вдавливания волокон в образец и выхода волокон с противоположной стороны образца проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Zeiss EVO MA 10 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 20 пА. Геометрические характеристики поперечного сечения волокон (диаметр, вытянутость, периметр) определяли на РЭМ-изображениях в программе КОМПАС-3D V14.



Рис. 1. Изображения (×30000) поперечного сечения (a, b) и поверхности (b, c) углеродных волокон марок l(a, b) и 2(b, c)



Рис. 2. Кривые «напряжение-перемещение» для углепластика на основе волокон марок 1 (а) и 2 (б)

#### Результаты и обсуждение

Проведены исследования геометрических характеристик поперечного сечения и морфологии поверхности углеродных волокон. На изображениях, приведенных на рис. 1, показано различие в форме и размерах поперечного сечения и морфологии поверхности.

Для волокон марки 1 (рис. 1, a,  $\delta$ ) характерна круглая форма поперечного сечения, средний диаметр 6,6 мкм (разброс значений – от 5,3 до 8,0 мкм) и гладкая поверхность. Волокна марки 2 (рис. 1, e, e) представлены различной формой поперечного сечения: от округлой до бобовидной, имеют средний диаметр 5,2 мкм (разброс значений – от 3,2 до 7,0 мкм), вытянутость (отношение среднего наибольшего характерного размера поперечных сечений волокон к наименьшему) 1,2 и фибриллизованную поверхность.

Проведены исследования по выталкиванию единичных углеродных волокон из образцов полимерных композитов. На полученных кривых «нагрузка–перемещение индентора» выявляется не менее двух характерных значений нагрузки – значение нагрузки, соответствующее началу отклонения зависимости от линейной, и максимальное значение нагрузки.

Из допущения об однородном напряженном состоянии граничного слоя при воздействии индентора значение напряжения сдвига по границе раздела «волокно-матрица» вычисляли по формуле

$$\tau = \frac{P}{S} = \frac{P}{\Pi h},$$

где P – максимальная нагрузка, H; S – площадь контакта «волокно-матрица», м<sup>2</sup>; П – периметр поперечного сечения волокна, м; h – толщина образца композита, м.

На рис. 2 приведены экспериментальные данные, построенные в координатах «напряжениеперемещение».

В таблице приведены средние значения адгезионной прочности (напряжения сдвига по границе раздела «волокно-матрица»), разброс значений и коэффициент вариации.

Фактором, определяющим корректность полученных значений адгезионной прочности, является разрушение адгезионной связи по всей площади взаимодействия «волокно-матрица» и перемещение волокна соосно действию индентора. Необходимо исключить экспериментальные данные, полученные при прохождении таких нежелательных процессов, как потеря устойчивости волокна вследствие изгиба или касание индентором соседних волокон или матрицы до страгивания исследуемого волокна по разрушенной границе раздела. С целью подтверждения прохождения

Адгези	онная	прочность	«волокно-	-матрица»
--------	-------	-----------	-----------	-----------

Напряжение сдвига по границе	Значение напряжения сдвига* для углепластика на основе волокна марки			
раздела «волокно-матрица»	1	2		
Среднее значение, МПа	105 (85–127)	105 (49–165)		
Коэффициент вариации, %	12,6	37,1		
* В скобках минимальное и максимальное значения.				

## Испытания материалов



Рис. 3. Изображения (×1000) в режиме топографической цветовой кодировки и профили поверхности лицевой (*a*) и обратной (*б*) стороны образца после выталкивания волокон

процесса выталкивания волокна из утоненного образца углепластика проводили исследование лицевой и обратной сторон образца методом КСЛМ. Примеры изображений поверхностей образца в режиме топографической цветовой кодировки и их профили приведены на рис. 3. Видно, что происходит страгивание волокна и его скольжение по разрушенной границе раздела с выходом части волокна с противоположной стороны. Значения конечного положения индентора, полученные при записи кривой «нагрузка-перемещение» при выталкивании волокна, можно сравнивать с перемещением волокна (по данным КСЛМ) с целью анализа остаточной упругой составляющей граничного слоя.

Важными методическими вопросами являются деформирование торца волокна под действием индентора [21] и характер разрушения при выталкивании волокна (адгезионный, когезионный или смешанный). На рис. 4 приведен вид волокон после выталкивания индентором. На торцах волокон с рабочей стороны не выявлено признаков пластической деформации (отпечатков индентора). Таким образом, не требуется применять модели, учитывающие вклад пластического деформирования торца волокна.

При измерении адгезионной прочности корректные значения можно получить только при адгезионном характере разрушения [18]. Анализ характера разрушения целесообразно проводить с учетом представлений о структуре полимерной матрицы и граничного слоя [22]. Матрица исследованных углепластиков представляет собой многофазную систему с сонепрерывной фазовой морфологией. Фаза, обогащенная эпоксидным полимером, формирует как непрерывную фазу, так и дисперсные сферические домены в фазе, обогащенные термопластом (полисульфоном). Формирование сонепрерывной фазовой морфологии способствует реализации сочетания высоких упруго-



Рис. 4. Изображения (×30000) волокон после выталкивания индентором с рабочей (*a*) и противоположной стороны (*б*)

прочностных свойств и трещиностойкости [23]. В работе [24] показано, что вокруг волокон в углепластиках на основе системы «реактопласттермопласт» может формироваться слой, обедненный термопластом, и разрушение может происходить не по границе «волокно-матрица», а по границе между объемом матрицы и обеденным слоем. Экспериментальному исследованию адгезионной прочности «волокно-матрица» в системах на основе эпоксидных полимеров, модифицированных теплостойкими термопластами, посвящены работы [19, 25, 26], в которых также указано на существование обедненного термопластом слоя вблизи поверхности волокон.

Характер разрушения при выталкивании волокон контролировали методом РЭМ. Вид волокон, вышедших с противоположной стороны в процессе выталкивания, показывает, что разрушение произошло по границе раздела «волокно– матрица» (без захвата обедненного термопластом слоя); в редких случаях наблюдали тяжи полимерной матрицы, соединенные с волокном.

Выявленные методом РЭМ особенности процесса выталкивания единичных волокон индентором – отсутствие признаков пластической деформации торца волокна и разрушение по границе раздела «волокно-матрица» под воздействием индентора – подтверждают правомерность вычисления напряжения сдвига по границе раздела (количественной характеристики прочности адгезионной связи) как отношения нагрузки при выталкивании волокна к площади адгезионного контакта.

Предложенный алгоритм экспериментального определения напряжения сдвига по границе раздела «волокно-матрица», состоящий в проведении выталкивания единичных волокон из утоненного образца полимерного композита с записью кривой «нагрузка-перемещение индентора» и контроле корректности проведения эксперимента методами микроскопии, позволяет получить значение прочности адгезионной связи, которое не требует математического моделирования для восстановления истинного значения и является константой системы «волокно–матрица».

### Заключения

Продолжающееся совершенствование методов измерения адгезионной прочности системы «волокно-матрица» указывает, во-первых, на комплексный характер явления адгезии, а вовторых, на различие физического смысла характеристик адгезии, получаемых разными методами. Существующие методы измерения адгезионной прочности в той или иной мере характеризуют не только уровень взаимодействия на границе раздела, но и прочность конкретного адгезионного соединения в целом. Применение метода выталкивания волокна позволяет проводить эксперимент в условиях, при которых получаемые значения адгезионной прочности можно считать размерно-независимыми.

В данной работе предложен алгоритм определения прочности адгезионной связи (напряжения сдвига по границе «волокно-матрица»), который включает проведение выталкивания единичных волокон индентором из утоненного перпендикулярно направлению волокон образца полимерного композита и контроль корректности проведения эксперимента методами КСЛМ и РЭМ. Приведены экспериментальные данные определения прочности адгезионной связи «волокно-матрица» в однонаправленных углепластиках на основе двух марок высокопрочных волокон и эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном. Полученные значения могут рассматриваться как константы для данных систем «полимерволокно».

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
- 2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
- 3. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
- 4. Llorca J., Gonzalez C., Molina-Aldareguia J.M. et al. Multiscale modeling of composite materials: a roadmap towards virtual testing // Advanced Materials. 2011. Vol. 23. P. 5130–5147.
- 5. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №4 (40). Ст. 12. URL: http://www.viamworks.ru (дата обращения: 03.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
- 6. Большаков В.А., Солодилов В.И., Корохин Р.А., Кондрашов С.В., Меркулова Ю.И., Дьячкова Т.П. Исследование трещиностойкости полимерных композиционных материалов, изготовленных методом инфузии с использованием различных концентратов на основе модифицированных УНТ // Труды ВИАМ: электрон. науч.технич. журн. 2017. №7 (55). Ст. 09. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 03.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-9-9.
- Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites // Progress in Materials Science. 2015. Vol. 73. P. 1–43.

## Жаропрочные сплавы и стали

- Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш. Современное состояние проблемы поверхностной обработки углеродных волокон для последующего их применения в полимерных композитах в качестве армирующего элемента // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №7. С. 80–85.
- Liu L., Jia C., He J. et al. Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites // Composites Science and Technology. 2015. Vol. 121. P. 56–72.
- 10. Kim J.-K., Mai Y.-W. Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites. Oxford: Elsevier, 1998. 486 p.
- Herrera-Franco P.J., Drzal L.T. Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites // Composites, 1992. Vol. 23. P. 2–27.
- 12. Zhandarov S., Mader E. Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters // Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65. P. 149–160.
- Гуляев А.И. Измерение адгезионной прочности «волокно-матрица» с применением наноиндентирования (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №3 (75). Ст. 08. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 03.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
- Горбаткина Ю.А., Сопотов Р.И., Горбунова И.Ю. и др. Сравнение различных методов оценки прочности соединений модифицированный эпоксидный полимер–твердое тело // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. №1. С. 16–20.
- Ramanathan T., Bismarck A., Schulz E., Subramanian K. Investigation of the influence of surface-activated carbon fibres on debonding energy and frictional stress in polymer-matrix composites by the micro-indentation technique // Composites Science and Technology. 2001. Vol. 61. P. 2511–2518.
- Zhou X.-F., Wagner H.D., Nutt S.R. Interfacial properties of polymer composites measured by push-out and fragmentation tests // Composites: Part A. 2001. Vol. 32. P. 1543–1551.
- Medina C.M., Molina-Aldareguia J.M., Gonzalez C. et al. Comparison of push-in and push-out tests for measuring interfacial shear strength in nano-reinforced composite materials // Journal of Composite Materials. 2016. Vol. 50. Issue 12. P. 1651–1659.
- 18. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.
- Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Куперман А.М. Адгезия модифицированных эпоксидных матриц к армирующим волокнам // Высокомолекулярные соединения. Сер.: А. 2016. №5. С. 439–447.
- Сергеев А.Ю., Турусов Р.А., Баурова Н.И. Определение адгезионной прочности соединений на примере испытаний образцов методом выдергивания волокон из матрицы // Композиты и наноструктуры. 2017. №1. С. 52–62.
- Mueller W.M., Moosburger-Will J., Sause M.G.R., Horn S. Microscopic analysis of single-fiber push-out tests on ceramic matrix composites performed with Berkovich and flat-end indenter and evaluation of interfacial fracture toughness // Journal of the European Ceramic Society. 2013. Vol. 33. P. 441–451.
- 22. Гуляев А.И., Шуртаков С.В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно-матрица» в углепластиках // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 08. URL: http://www.viamworks.ru (дата обращения: 03.06.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.
- Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Петрова А.П. Исследование эпоксиднополисульфоновых полимерных систем как основы высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С. 7–12.
- Гуляев А.И., Яковлев И.О., Шуртаков С.В., Лашов О.А. Влияние температуры и климатического воздействия на механизм межслоевого разрушения углепластика по моде I // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №10. С. 23–30.
- Ахматова О.В., Горбаткина Ю.А., Горбунова И.Ю., Иванова-Мумжиева В.Г., Кербер М.Л. Влияние наноразмерных частиц глины и термопластичного модификатора на адгезионную прочность соединений эпоксиаминного связующего с волокнами // Пластические массы. 2012. №10. С. 31–35.
- Горбаткина Ю.А., Журавлева О.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Чеботарев В.П. Влияние молекулярной массы полисульфона на адгезию эпоксиполисульфоновых связующих к волокнам // Пластические массы. 2017. №5–6. С. 14–17.