ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ МЕТОДОМ ВЫДЕРГИВАНИЯ ВОЛОКНА ИЗ МАТРИЦЫ

А.Ю.Сергеев*, Р.А.Турусов**, Н.И.Баурова***

*ОАО «Композит», г. Королев, Россия; **Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия; ***Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

(Поступила в редакцию 01.11.2016, переработанный вариант – 16.01.2017, принята в печать – 1.03.2017)

Получены экспериментальные результаты измерения средней адгезионной прочности при сдвиге связующего, модифицированного дисперсными наполнителями. Приведены результаты микроскопии образцов после испытаний pull-out. Показано, что модель адгезионного взаимодействия удовлетворительно описывает эксперимент и позволяет получить не зависящие от геометрии образца параметры адгезионного соединения, характерные для выбранной пары адгезив - субстрат. Исследуется возможность использования результатов лабораторных испытаний при оценке адгезионной прочности связующего методом pull-out для ремонта цилиндрических деталей машин.

Ключевые слова: адгезионная прочность, сдвиг, pull-out, ремонт.

THE DETERMINATION OF ADHESIVE BOND STRENGTH OF JOINTS ON EXAMPLE OF TESTING SPECIMENS USING PULL-OUT METHOD

A.Yu. Sergeev*, R.A.Turusov**, N.I. Baurova***

*OAO «Kompozit», Korolev, Russia;

N. Semenov Institute of Chemical Physics of RAS, Moscow, Russia; *Moscow State Automobile and Road Technical University, Moscow, Russia

The experimental results of the shear strength of adhesive binder modified with dispersed fillers are obtained. The results of samples microscopy after pull-out testing are given. It is shown that the adhesive interaction model describes experiment satisfactorily and allows to get the parameters of adhesive compound, specific to the selected pair of adhesive – substrate. The possibility of using the experimental results of the determination of adhesive bond strength by means of pull-out method in relation to repair of cylindrical machine parts is investigated.

Keywords: adhesive strength, shift, pull-out, repair.

1. Введение

Оценка надежности деталей и узлов, изготовленных (или восстановленных) с использованием наполненных полимерных материалов, невозможна без учета адгезионного взаимодействия и адгезионной прочности соединений. От них в значительной степени зависит и то, насколько полно будет реализован вклад упругопрочностных характеристик наполнителя в прочность материала и соединения, и то, по какому механизму будет происходить разрушение соединения.

Существующие методы определения адгезионной прочности можно условно разделить на макро - и микромеханические. Если адгезив и субстрат находятся в твердом состоянии, адгезионная прочность определяется напряжением (сдвиг, отрыв, кручение), превалирующим в испытании и разрушением адгезионного соединения. Если компоненты находятся в высокоэластическом состоянии, то адгезионная прочность

определяется методом и усилием отслаивания адгезива от субстрата [1]. В настоящее время в системах «волокно-матрица», как правило, применяются различные варианты метода выдергивания (pull-out), метод фрагментации, метод выталкивания, т.е. методы, использующие разрушение адгезионного соединения при сдвиге [2]. В этом случае адгезионная прочность соединения выражена касательными напряжениями τ_i . В случае, когда адгезионную прочность измеряют отрывом склеенных встык образцов (например, по ГОСТ 14760-69*), то говорят об определении нормальных отрывающих напряжениях σ_{onn} [3, 4].

В данной работе сообщаются результаты измерения средней адгезионной прочности при выдергивании волокна из полимерного связующего (метод pull-out), оцениваемой как отношение разрушающей нагрузки к площади склейки. В качестве связующего был взят эпоксидиановый олигомер ЭД-20, отверждаемый полиэтиленполиамином (ПЭПА) и триэтаноламинтитанатом (ТЭАТ) в массовом соотношении: 10 масс. ч. олигомера к 1 масс.ч. отвердителя. В качестве дисперсного наполнителя был взят шунгит марки Ш-30. Наряду с указанными веществами использовалась двухкомпонентная композиция марки Done Deal DD6540, включающая в себя различные типы дисперсных наполнителей – стальной порошок, карбонат кальция, аморфный кремний, сульфат бария, не волокнистый тальк. Такая композиция широко распространена при ремонте деталей машин.

2. Методика изготовления образцов и проведения испытаний

Для связующих, обладающих довольно высокой вязкостью (эпоксидных, полиэфирных, полиамидоимидных) может быть применен известный способ [1] изготовления образцов в алюминиевых чашечках с размерами: диаметр – 8 мм, глубина – 3 мм, толщина 0,02 мм. Чашки получали штамповкой заготовок алюминиевой фольги с помощью специальных пуансона и матрицы. Чашечки остаются в составе образцов. Полученные образцы устанавливали в формы, рассчитанные в среднем на 48 ячеек. Формы позволяют фиксировать установленное волокно перпендикулярно дну образцов. Образцы при этом остаются в формах до конца отверждения.

Волокно устанавливали до заливки связующего. В данной работе в качестве волокна была выбрана стальная проволока марки OBC диаметром 150 мкм. При испытании образцов методом выдергивания (pull-out) важной задачей является обеспечение достаточно малой площади склейки. Геометрия адгезионного соединения характеризуется длиной склейки *l*, определяемой толщиной слоя полимера, и площадью

 $S = \pi dl$, где d - диаметр волокна.

В полученные алюминиевые чашечки заливали заранее приготовленный клеевой состав. Диаметр волокна оставался постоянным, длина склейки варьировалась. При использовании отвердителя ПЭПА отверждение производили 4 часа при температуре +22 °C. После этого образцы подвергали отжигу: выдержка образцов в печи при температуре +100 °C в течение 2 ч. Такая термообработка позволяет доотверждать связующее и снимать остаточные напряжения в нем. А при использовании в качестве отвердителя ТЭАТ образцы выдерживали при температуре 160 °C в течение 8 часов.

Параллельно получали составы с обоими типами отвердителей, модифицированные шунгитом Ш-30 в весовом количестве 20% от массы эпоксидной смолы. Для достижения однородности распределения шунгита по матрице использовали механическую мешалку на скорости перемешивания 2500 об/мин. Отверждение и термообработка были те же, что и для ненаполненной смолы. Наполнитель оставался равномерно распределенным по объему смолы. После этого часть образцов, полученных отвержденных ПЭПА и модифицированных шунгитом, подвергалась 100 циклам, включающим нагрев до температуры +100 °C, кратковременную выдержку в течение 10 минут и последующее охлаждение до температуры +22°C.

Далее образцы устанавливали в адгезиометр (рис. 1), позволяющий закреплять до 8 образцов одновременно и определяли разрушающую нагрузку. Скорость нагружения образцов в адгезиометре была равна 1,85 H/c, температура испытаний - +25 °C.

Если при проведении эксперимента образец разрушался в два или более этапов (рис. 2), то значение средней адгезионной прочности оценивали по первому этапу разрушения, несмотря на то, что на втором этапе могло быть зафиксировано большее значение разрушающей нагрузки. Причиной разрушения образ-



Puc. 1



Puc. 2

цов в несколько этапов может быть шероховатость проволоки или некоторое количество отвержденного связующего, оставшееся на свободном конце проволоки. Определение длины клеевого контакта производили на микрометре с двумя конусными вставками. Высоту слоя измеряли непосредственно над отверстием, оставшимся после выдергивания волокна, так как при смачивании волокна адгезивом всегда образуются мениски. Для определения длины клеевого соединения вычитали толщину фольги из измеряемой толщины. Делением величины разрушающей нагрузки для *i*-го образца на его площадь склейки получали среднюю адгезионную прочность связующего при сдвиге т,:

$$\overline{\tau}_i = \frac{F_i}{S_i},\tag{1}$$

где $\overline{\tau}_i$ – средняя сдвиговая адгезионная прочность, МПа; F_i - разрушающая сила, H; S_i - площадь контакта матрицы и волокна, мм².

Далее рассчитанные зависимости τ_i от S_i разбивали на j равных диапазонов площадей и рассчитывали средние значения касательных напряжений и площадей на каждом j-ом промежутке. А по полученным средним значениям адгезионной прочности τ строили графики ее зависимости от площади соединения S. Типичные кривые для разных составов приведены на рисунках 3-4.







3. Обсуждение результатов испытаний

Из приведенных зависимостей адгезионной сдвиговой прочности от площади склейки (рис. 3-4) установлено, что при добавлении шунгита адгезионная прочность снизилась незначительно, но после 100 циклов нагрева до +100 °C с последующим охлаждением до комнатной температуры кривая оказалась выше

доцикловой. Причин снижения по отношению к чистой смоле может быть несколько (см., например, [7]). Однако к окончанию 100 циклов выдержки при +100 °С происходит гарантированное доотверждение связующего, приводящее к изменению напряженного состояния модели за счет релаксации, и, возможно, к увеличению числа физических связей связующего с дисперсным наполнителем и стальным волокном.

Для композиции марки Done Deal DD6540 получена сравнительно низкая средняя адгезионная прочность. Из представленных графиков отчетливо видно, что измеренная средняя адгезионная прочность существенно зависит от длины склейки. Таким образом, возникает вопрос - какое значение необходимо брать для оценки адгезионной прочности исследуемого клея к металлической подложке в различных типах конструкций, работающих на сдвиг.

В соответствии со статистической теорией прочности принято считать, что всякому твердому телу свойственно наличие некоторых дефектов, которые снижают «практическую» прочность по сравнению с теоретической. При этом с увеличением площади поверхности и объема деформируемого твердого тела растет вероятность появления дефекта приводящего к разрушению материала (масштабный фактор). Таким образом, в соответствии с этой теорией дефекты являются «непреодолимой данностью» каждого материала, и при этом они не поддаются управлению. Т.е. к масштабному фактору обращаются тогда, когда не ясен физический механизм явления. В отличие от статистической теории в настоящей работе приведена интерпретация экспериментальных данных, основанная на физических представлениях об адгезионном взаимодействии адгезива и субстрата [7].

Обратимся к теории [7,9]. На вопрос, что такое адгезия, можно ответить так. Адгезия - это явление или процесс установления обладающих некоторой энергией связей между адгезивом (клеем, матрицей) и субстратом. Допустим, что мы можем регулировать плотность этих связей между поверхностями адгезива и субстрата. Например, при плотности связей $n_{pl}=10^{14}$ 1/см² это будет означать, что задействован примерно каждый десятый атом поверхности субстрата с противолежащим ему атомом адгезива. Такая среда будет обладать модулем Юнга E^* вдоль стержней и модулем сдвига G^* , характеризующим связь между

деформацией сдвига γ в плоскости контакта и напряжением сдвига $\tau = G^* \gamma$. Если мы задействуем каждый сотый атом, то плотность связей станет равной примерно $n_{p2}=10^{12}$ 1/см². Тогда и модуль Юнга E^* и модуль сдвига G^* контактного слоя также уменьшатся на два порядка. Вот таким образом мы можем воздействовать на адгезионное взаимодействие и его интенсивность. Величина этого взаимодействия может меняться в диапазоне нескольких порядков. Представим себе эти связи в виде коротких длиной h^* упругих стерженьков перпендикулярных поверхностям субстрата и адгезива. Стерженьки, поскольку они редки, не касаются друг друга. Таким образом, стерженьки – связи создают некоторый слой толщиной h^* анизотропной сплошной среды, который можно назвать контактным слоем. В такой среде заведомо отсутствуют нормальные напряжения, перпендикулярные «боковой» поверхности стерженьков. Модуль Юнга такой среды $E^* = 2G^*$. Величину G^*/h^* принято называть жесткостью контактного слоя, либо интенсивностью адгезионного взаимодействия.

Из теории об адгезионном взаимодействии [7], приведенных кривых (рис. 3-4) и литературных данных [1] следует, что при уменьшении площади склейки измеряемая адгезионная прочность будет увеличивать-

ся, стремясь в итоге к определенному значению, т.е. $\tau_{ad} = \lim_{S \to 0} (P/S)$. Это значение называют истинной [2,

5-7] или локальной [1] адгезионной прочностью клея. Определению истинной, не зависящей от геометрии образца адгезионной прочности τ_{ad} при испытаниях на сдвиг посвящены работы [5-7]. При увеличении площади склейки (здесь посредством увеличения длины) значение адгезионной прочности, регистрируемое в эксперименте, снижается, стремясь к определенному значению τ_{fr} . Приведем выражения, полученные в работах [5,7] для средних касательных напряжений:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_{ad}}{\omega \cdot l} th(\omega \cdot l) + \frac{A}{l} \cdot th(\frac{\omega \cdot l}{2}) th(\omega \cdot l) - \tau_{fr}, \qquad (2)$$

где
$$\tau_{fr} = \frac{K_1(\varepsilon_{q2} - \varepsilon_{q1})E_1E_2(R^2 - r_1^2)}{E_1[R^2(1 + \mu_2) + r_1^2(1 - \mu_2)] + E_2(1 - \mu_1) \cdot (R^2 - r_1^2)},$$

$$A = \beta \frac{(\varepsilon_{q2} - \varepsilon_{q1})}{2\pi r_{1}} \qquad \qquad \omega = \sqrt{\frac{G^{*}}{h^{*}} \cdot \frac{2\pi r_{1}}{\beta}}$$

здесь $\bar{\tau}$ - среднее значение адгезионной прочности, определяемой из эксперимента, МПа; τ_{ad} - истинная адгезионная прочность связующего, не зависящая от геометрии образцов, МПа; G^*/h^* - жесткость контактного слоя (интенсивность адгезионного взаимодействия [9]), МПа/мм; ε_{ql} , ε_{q2} - деформации, вызванные усадкой, либо температурными изменениями, либо совместным их действием для волокна и матрицы соответственно, мм/мм; E_l , E_2 - модули упругости волокна и матрицы соответственно, МПа; $\mu_1; \mu_2$ - коэффициенты Пуассона волокна и матрицы соответственно; α_l^T , α_2^T – коэффициенты линейного температурного расширения волокна и матрицы соответственно, 1/K; α_2^w коэффициент, характеризующий химическую усадку полимера при отверждении 1/K; ΔT – разность температур, K; r_1 - радиус волокна, мм; R - радиус отвержденного связующего (определяется диаметром алюминиевой чашки), мм;l - длина склейки, мм; τ_{tr} – напряжения от сил трения, МПа; K_l - коэффициент трения между связующим и волокном.

В выражении (2) присутствуют три неизвестные величины: τ_{ad} , G^*/h^* , τ_{fr} . При этом из выражения (2) можно получить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} \tau_{ad} = \frac{[\bar{\tau}_{2} - \bar{\tau}_{1} - \frac{A}{l_{2}} th(\frac{\omega l_{2}}{2}) th(\omega l_{2}) + \frac{A}{l_{1}} th(\frac{\omega l_{1}}{2}) th(\omega l_{1})] \frac{\omega l_{2}}{th(\omega l_{2})} \\ (1 - \frac{th(\omega l_{1})}{\omega l_{1}} \frac{\omega l_{2}}{th(\omega l_{2})}) \\ \left\{ \tau_{ad} = \frac{[\bar{\tau}_{3} - \bar{\tau}_{1} - \frac{A}{l_{3}} th(\frac{\omega l_{3}}{2}) th(\omega l_{3}) + \frac{A}{l_{1}} th(\frac{\omega l_{1}}{2}) th(\omega l_{1})] \frac{\omega l_{3}}{th(\omega l_{3})} \\ (1 - \frac{th(\omega l_{1})}{\omega l_{1}} \frac{\omega l_{3}}{th(\omega l_{3})}) \\ \left\{ \tau_{fr} = \tau_{ad} \frac{th(\omega l_{1})}{\omega l_{1}} + \frac{A}{l_{1}} th(\frac{\omega l_{1}}{2}) th(\omega l_{1}) - \bar{\tau}_{1} \end{cases}$$

$$\end{cases}$$

$$\tag{3}$$

Для решения системы уравнений (3) необходимо из полученных зависимостей $\bar{\tau}(\bar{l})$ на рис. 3-4 выбрать три наиболее достоверные точки (\bar{l}_i) , где (i=1, 2, 3). В настоящей работе система уравнений

была решена численно в программе MathCad. Варьированием величины жесткости G^*/h^* определялось пересечение кривых ($-_1(\overline{l}_1)$) и ($-_2(\overline{l}_2)$). Этим определялось искомое решение значение жесткости G^*/h^* . Далее с помощью первого или второго уравнения системы (3) определялось τ_{ad} . Из третьего уравнения определялось τ_{fi} . Данные для численного расчета адгезионного соединения стального волокна с эпоксидным олигомером приведены в таблице 1. Результаты расчета параметров адгезионного соединения волокна и полимера приведены в таблице 2.

Анализ выражения (2) показывает, что при уменьшении площади склейки (S \rightarrow 0) регистрируемое в эксперименте значение адгезионной прочности будет стремиться к значению ($\tau_{ad} - \tau_{fr}$). Средние касательные напряжения, действующие на границе волокна и полимера, зависят от химической усадки полимера при полимеризации, а также температурной усадки полимера при остывании его до температуры испытаний, если полимеризация проходила при повышенных температурах. Действие этих усадок двоякое [7]. По радиусу полимер обжимает проволоку, увеличивая силу и напряжение трения. А вдоль оси, полимерный цилиндр, пытаясь сократиться по длине, создает касательные напряжения, уменьшающие разрушающую силу.

Таблица 1

Параметр	Волокно, сталь	Связующее
Модуль упругости, Е, МПа	$E_1 = 2, 1 \cdot 10^5$	E ₂ =3000
Коэффициент линейного расширения, α, 1/К	$\alpha_1 = 10^{-5}$	$\alpha_2 = 5, 5 \cdot 10^{-5}$
Радиус, мм	<i>r</i> ₁ =0,075	<i>R</i> =4
Изменение температуры, ΔT	70	

Таблица 2

Параметры, характеризующие соединение полимера и волокна

Наименование адгезионного	Истинное	Жесткость	Значение
соединения	(предельное)	контактного слоя	параметра,
	значение	для	$ au_{fr,}$ МПа
	адгезионной	соединения, <i>G/h</i> *,	
	прочности $ au_{ad}$,	МПа/мм	
	МПа		
(ЭД-20+ПЭПА)-сталь	29	$1,9 \cdot 10^{3}$	1,9
(ЭД20+ПЭПА+Шунгит(20%)-сталь			
	29	$1,2 \cdot 10^3$	5,5
(ЭД-20+ПЭПА+Шунгит 20%) (100			
циклов нагрева до 100°С)-сталь	45	$7,5 \cdot 10^3$	-1,5
Done Deal DD6540 – сталь	25	$5,4 \cdot 10^{3}$	6,2
(ЭД20+ТЭАТ) – сталь	108	$1,0 \cdot 10^4$	-6,5
(ЭДТ-10)-сталь	128	$1,9 \cdot 10^4$	-2,4

На графике рис. 5 представлены экспериментальные точки для адгезионного соединения ЭДТ-10 - сталь и кривая, рассчитанная по описанной выше методике. Как видно из рис. 5, расчетная кривая удовлетворительно описывает эксперимент.

Если предположить, что модель взаимодействия цилиндрического волокна с полимерной матрицей верна, то из анализа выражения (2) можно заключить, что на больших длинах склейки (при $l, S \rightarrow \infty$) вклад адгезионной прочности в касательные напряжения, возникающие при сдвиге полимера, ничтожны, и все



Puc. 5

определяется напряжениями от сил трения между полимером и волокном τ_{jr} . Найденные параметры адгезионного соединения волокна и эпоксидного связующего - истинная адгезионная прочность τ_{ad} и жесткость контактного слоя (или иначе, интенсивность адгезионного взаимодействия) G^*/h^* могут быть использованы при расчетах адгезионных соединений различной формы и размеров, работающих не только на сдвиг [3,7].

4. Исследование механизма разрушения с использованием результатов электронной микроскопии

После испытаний методом выдергивания (pull-out) при статистической обработке результатов испытаний из-за конкуренции адгезионных и когезионных разрывов возникают специфические трудности, так как эксперимент позволяет измерить лишь меньшую разрушающую силу [1]. Если не учитывать образцы, разрушившиеся когезионно, то, используя формулу (1), получим значение средней адгезионной прочности отличное от значения, которое получилось бы, если бы все образцы разрушились адгезионно. Увеличение количества испытываемых образцов также не решает проблему определения истинной адгезионной прочности.

Для анализа механизма разрушения образцы изучали с использованием растрового электронного микроскопа «Phenom». В качестве критерия, устанавливающего процесс разрушения, принят объем связующего, покрывающего поверхность металлической проволоки. По результатам исследований установлено, что из 52 образцов состава, отвержденного полиэтиленполиамином, 6 образцов разрушились когезионно, остальные 46 - адгезионно (рис. 6). Из 56 образцов состава, отвержденного триэтаноламинотитанатом, лишь 4 образца разрушились адгезионно, а 52- когезионно (рис. 7). Это говорит о том, что связующее с отвердителем горячего отверждения имеет больший потенциал для усиления их дисперсными и волокнистыми наполнителями по сравнению со связующим на отвердителе холодного отверждения.

Для определения поправки, учитывающей долю когезионных разрывов, в [8] провели статистическую обработку полученных данных с учетом результатов микроскопии методом, разработанным Ю. А. Гор-



Puc. 6



Puc. 7

баткиной и В. Г. Ивановой-Мумжиевой, который изложен в [1]. В таблице 3 приведены истинное значение адгезионной прочности τ_0 и когезионной прочности σ_0 , рассчитанные указанным выше методом.

Значения истинной сдвиговой адгезионной прочности, рассчитанные при помощи модели адгезионного взаимодействия стального волокна и матрицы, и значения, полученные с использованием указанного выше метода, близки друг к другу для состава ЭД-20 + ПЭПА (таблицы 2, 3). Для состава ЭД-20+ТЭАТ доля

Таблица 3

The Provide Pr		
Параметр	ЭД20+ПЭПА+шунгит 20	ЭД20+ТЭАТ+шунгит 20
	масс. %	масс. %
Истинное значение адгезионной	25,5	109,4
прочности $ au_0$, МПа	,	,
Истинное значение когезионной	15,3	66.4
прочности σ_0 , МПа	,	,
Количество образцов,	46	4
разрушивших ся адгезионно n_{τ} , шт		
Количество образцов,	6	52
разрушившихся когезионно <i>n</i> _σ , шт	-	

Параметры адгезионного соединения стального волокна и эпоксидного олигомера

разрушившихся когезионно образцов была велика (таблица 3), что не позволило с достаточной точностью определить значение истинной адгезионной прочности [8].

Найденные значения τ_{ad} , G^*/h^* , τ_{fr} могут быть использованы далее при оценке прочности и долговечности цилиндрических деталей машин, восстановленных с применением полимерных материалов.

Выводы

1. Из теории адгезионного взаимодействия и экспериментальных данных по выдергиванию стальной проволоки из эпоксидных матриц (pull-out) получены не зависящие от геометрии образцов значения жесткости контактного слоя – G^*/h^* , истинной адгезионной прочности связующего - τ_{ad} , а также напряжения от сил трения - τ_{fr} . Все они призваны характеризовать адгезионное соединение эпоксидного олигомера со стальным волокном. Первые два параметра, характеризующие взаимодействие данной пары веществ адгезив – субстрат, безотносительно к геометрии образцов, могут быть использованы для расчета деталей и образцов любой конфигурации. В частности, для оценки прочности изготовленных и восстановленных с использованием данных полимеров стальных деталей и узлов.

2. Структурный анализ показал, что в случае применения отвердителей горячего типа преобладает когезионный тип разрушения над адгезионным, что предполагает возможности модифицирования данного состава.

3. Значения адгезионной прочности связующего при сдвиге, полученные с использованием модели адгезионного взаимодействия волокна с полимерной матрицей и значения, полученные при использовании метода математической статистики, близки для состава ЭД-20+ПЭПА. Для состава ЭД20+ТЭАТ нахождение истинной адгезионной прочности методом математической статистики осложняется большой долей когезионных разрывов.

4. Анализ выражения (2) показывает, что существует теоретическая возможность экстремальной зависимости средней адгезионной прочности от концентрации наполнителя; для численной оценки такой зависимости необходимо знание величин модулей упругости и коэффициентов линейного расширения полимерных связующих, наполненных дисперсными частицами.

Приведенные в статье результаты получены в рамках проекта № Б1124214, выполняемого в соответствии с Проектной частью Государственного задания в сфере научной деятельности за 2016 год.

Библиографический список

1. Горбаткина Ю.А., Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. -М.: Химия, 1987. -190 с.

2. Фрейдин А.С., Турусов Р.А., Свойства и расчет адгезионных соединений.-М.: Химия, 1990. - 256 с.

3. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact-layer method in adhesive mechanics: Adhesive strength during normal detachment, *Polymer science. Series D*, 2010, V3, №.3, 159-169.

4. Сергеев А.Ю., Определение адгезионной прочности эпоксиполимера к стали на статический отрыв, Энциклопедия инженера-химика, 2014, №11, 6-10.

5. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact-layer method in adhesion mechanics: Picking fiber from a matrix, *Polymer science. Series D*, 2010, V.3, no 2, 75-86.

6. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact layer method: Determining parameters of rigidity and true strength of an adhesion bond for a contact layer, *Polymer Science. Series D*, 2011, V. 4, no 1, 1-4.

7. Турусов Р.А., Адгезионная механика.- М.: МГСУ, 2015.- 230 с.

8. Baurova N.I., Sergeev A. Yu., Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing, *Polymer science series D*, 2014, V.7, no 4, 298-302.

9. Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. Роль интенсивности адгезионного взаимодействия и жесткости матрицы в передаче усилий от цельного волокна к разорванному в волокнистом композите и в реализации прочности армирующих волокон. Часть I, *Механика композиционных материалов и конструкций.* 2016, №3, с.430-451.

References

1. Gorbatkina Yu.A., *Adgezionnaya protchnost' v systemakh polimer -volokno* [Adhesive strength in polymer-fiber systems]. Moscow, Khimiya, 1987. 190 p.

2. Freydin A.S., Turusov R.A., *Svoystva i rastchet adgesionnikh soedinenii* [Properties and calculation of adhesive connections]. Moscow: Khimiya, 1990. - 256 c.

3. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact-layer method in adhesive mechanics: Adhesive strength during normal detachment, *Polymer science*. *Series D*, 2010, V3, №.3, 159-169.

4. Sergeev A.Yu., Determination of the adhesive strength of an epoxy polymer to steel in static separation, Entsiklopediya. Inzhenera-Khimika - Encyclopedia of the chemical engineer, 2014, no 11, 6-10 (in Russian).

5. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact-layer method in adhesion mechanics: Picking fiber from a matrix, *Polymer science. Series D*, 2010, V.3, №2, 75-86.

6. Turusov R.A., Manevich L.I., Contact layer method: Determining parameters of rigidity and true strength of an adhesion bond for a contact layer, *Polymer Science*. Series D, 2011, V. 4, No1, 1-4.

7. Turusov R.A., Adgesionnaya mekhanika [Adgesion mechanics]. Moscow: MGSU, 2015, 230 p.

8. Baurova N.I., Sergeev A. Yu., Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing, *Polymer science series D*, 2014, V.7, N_{0} 4, 298-302.

9. Turusov R.A., Bogachev E.A., Elakov A.B. The role of adhesion interaction and rigidity of the matrix of fibre composite in force transmission from the intact fibre to the ruptured one, *MCMK*, 2016, №3, p. 430-451.

Сведения об авторах:

А.Ю. Сергеев¹: канд. техн. наук, научный сотрудник ОАО «Композит», Московская область, г. Королев, Россия, sergeevandrey89@gmail.com, тел. 8 (495) 513-22-18.

Р.А. Турусов: д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник Института химической физики РАН, Москва, Россия, **rob-turusov@yandex.ru**, тел. 8(495)939-72-00.

Н.И. Баурова: д-р техн. наук, проф. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин» Московского автомобильно – дорожного государственного технического университета (МАДИ), Москва, Россия, <u>nbaurova@mail.ru</u>, тел. 8 (499) 155-03-10.

¹ Контактное лицо