

УДК 678.01:539.3:539.27

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ КАК ФУНДАМЕНТ «ТЕОРИИ ТОРСИОНОВ» В МЕХАНИКЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ**

(получена редакцией 16.02.2015, переработанный вариант 24.06.15, направлена в печать – 30.06.15)

**И.С.Деев\*, П.А.Белов\*\*, Л.П.Кобец\*\***

\**ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»  
ГНЦ РФ, Россия*

\*\* *Научно-образовательный центр «Новые материалы, композиты и нанотехнологии»  
при МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия*

Изложены обобщенные результаты фрактографических исследований новой «торсионной» моды разрушения полимерных матриц, характерным признаком которой является фрагментация и выделение из массива материала локальных областей («торсионов») различной формы в нагруженных полимерах и полимерных композиционных материалах на их основе. Установлено, что «торсионная» мода разрушения в разных условиях нагружения универсальна и характерна для полимерных композитов с различными волокнами (углеродными, стеклянными, органическими и др.), наномодифицированных полимеров, не зависит от типа волокна и наблюдается на мезо- и микроуровнях. Выбраны и предложены к обсуждению наиболее яркие неклассические эффекты, которые можно формализовать и в дальнейшем построить на их основе «теорию торсионов». Обнаружено, что для каждой моды трещин существуют две подмоды, при которых берега трещины могут быть как шероховатыми, так и зеркально-гладкими. Показано существование целых (не разрушенных) торсионов с сохранением их внутренней структуры, наличие спиралевидной, цилиндрической, конической и других форм торсионов в зависимости от граничных условий на их торцах. Полученные данные представляют собой многообразный и интересный материал для построения математических моделей как образования самих торсионов, так и механики разрушения полимерных композитов в целом.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, «торсионная» мода разрушения, механика дефектных сред, масштабные эффекты, неклассические эффекты.

## **EXPERIMENTAL NONCLASSICAL EFFECTS AS A BASE OF «THEORY OF TORSIONS» IN FRACTURE MECHANICS OF POLYMERIC COMPOSITES**

**Deev I.S., Belov P.A., Kobets L.P.**

\* *All-russian institute of aviation materials SSC RF, Moscow, Russia, 105005*

\*\* *Scientific and educational center «New materials, composites and nanotechnologies» N.E. Bauman  
MSTU, Moscow, Russia, 122290*

Results of fractographic observations of a new «torsion» mode of fracture of the polymer matrix which characteristic feature is fragmentation and localization of so called arrays of material of local areas «torsions» of various forms in the loaded polymers and polymer matrix composites are generalized. It is shown that the «torsion» mode of fracture in various types of loading is universal and characteristic for polymer matrix reinforced with various fibres (carbon, glass, organic etc.) nanomodified polymers, and is observed on both meso- and microlevels. The brightest nonclassical effects, which can be formalized to construct on their basis «a torsion's theory», are chosen and offered for discussion. It is found that for each mode of cracks there are two submodes, at which crack

surfaces can be either rough, or mirror like. There are exist non-fractured torsions, which preserve their microstructure. Torsions can be of various shapes, spiral, cylindrical, conical etc. depending on boundary conditions on their ends. Obtained experimental data present a diverse and interesting base for theoretical models of torsions formation and fracture mechanics of polymers.

**Keywords:** the polymeric composite materials, the torsion mode of fracture, mechanics of defective continuum, scale effects, nonclassical elastic characteristics

## 1. Введение

В настоящее время достигнуты значительные успехи в области механики разрушения полимерных материалов и одним из важных направлений создания новых композитов на основе различного класса полимеров является управление процессом их разрушения [1]. Особенностью отверженных эпоксидных, фенольных, кремнийорганических и других термореактивных связующих является то, что все они относятся к коллоидно-дисперсным системам [2]. Коллоидная химия рассматривает эти полимеры как микро/нанокомпозиты, содержащие дисперсную фазу, различным образом распределенную в дисперсионной (молекулярно-дисперсной) среде. Дисперсионная среда играет роль «матрицы» и характеризуется пониженной концентрацией отвердителя/катализатора, вследствие чего она не доотверждена и/или может быть даже термопластичной. Дисперсной фазой являются коллоидные частицы полностью отверженного связующего. Таким образом, уже с точки зрения механики сплошной среды, полимерные матрицы из класса коллоидно-дисперсных систем можно рассматривать как дефектную среду. Действительно, коллоидные частицы и их ассоциаты имеют диапазон размеров от нанометров до микрометров, их целесообразно попытаться представить как поле «дефектов» в материале матрицы, а саму матрицу – как однородную дефектную среду.

Механические свойства полимеров и матриц в полимерных композиционных материалах (ПКМ) зависят от их химической природы, структуры и условий нагружения. Топография поверхности разрушения термопластичных полимеров подробно описана в [3-7]. Вопросам разрушения реактопластов посвящено гораздо меньшее число исследований, среди которых можно отметить работы [8-12], относящиеся к фрактографии эпоксидных полимеров различного типа. В этих работах была обнаружена чрезвычайно важная особенность структуры поверхности трещин, образующихся при разрушении полимерных матриц под действием приложенных нагрузок. Оказалось, что образующаяся поверхность разрушения связана с микроструктурой материала на различных структурных уровнях, неоднородностями действующих внешних силовых полей и существенным образом зависит от механизма разрушения.

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) эпоксидных угле-, стекло- и органопластиков при изгибе, межслойном сдвиге, сжатии, нормальном отрыве и др. обнаружили [8-16], что разрушение ПКМ сопровождается фрагментацией матрицы между волокнами на макро- и микроуровнях и образованием «торсионов».

Ранее [11], при испытании эпоксидных полимеров на сжатие, было обнаружено образование на поверхности разрушения регулярных полос. В [12] полосы сдвига обнаружены на поверхностях разрушения эпоксидных полимеров при осевом сжатии цилиндрических образцов, статическом изгибе и сдвиге ПКМ (образовывались в полимерной матрице). Была установлена криволинейная, близкая к цилиндрической, форма отдельно взятой поверхности, расположенной между гребнями полос, и протяженные цилиндрические фрагменты – торсионы, остающиеся на другой. Обосновано предположение о новой «торсионной моде» разрушения полимеров и матриц при различных видах нагружения.

При разрушении полимеров и матриц в ПКМ образующиеся поверхности берегов трещин отличаются разнообразием макро- и микроструктур и характеризуются наличием неоднородностей (выступов, впадин, новых микро- и субмикротрещин и др.) разной формы и размеров. В ряде работ [17-21] зарубежных исследователей для наблюдаемых на поверхностях разрушения полимерных композитов фрактографических структур применяются различные термины – *hackles*, *cusps*, *bands*, *hills* и объясняют механизм их появления сдвиговым разрушением. Сложная геометрия поверхности реальной трещины должна учитываться

при построении математических моделей разрушения и распространения трещин. В то же время необходимо отметить, что причины и закономерности формирования трещин, по которым происходит разрушение полимерного композита, в настоящее время изучены ещё недостаточно.

Целью данной работы является обобщение опубликованных ранее экспериментальных данных (электронно-микроскопических фотографий берегов трещин, образующихся при разрушении полимерных матриц и композитов на их основе) [8, 9, 11-15, 22], которые трактуются как неклассические эффекты, то есть эффекты, которые не могут быть объяснены в рамках классической механики сплошной среды. Ввиду их самостоятельной научной ценности, эти эффекты приводятся в данной работе без попыток их теоретического объяснения.

## **2. Объекты и методы исследования**

Объектами обобщения являлись результаты фрактографических исследований образцов ненаполненных модифицированных эпоксидных полимеров (эпоксидаинового, эпоксиноловачного и эпоксицианэфирного типов), которые представляли собой композиции, содержащие эпоксидные смолы, отвердители, катализаторы отверждения, а также образцов полимерных композиционных материалов (угле-, стекло- и органопластиков) на основе указанных выше полимеров.

Результаты фрактографических исследований были получены на образцах, испытанных на сжатие, статический изгиб, межслойный сдвиг и поперечный отрыв. На сжатие по ГОСТ 4651-82 (ASTM D 6674) испытывали отливки отверженных связующих сечением 10x10 мм и высотой 15 мм. На статический изгиб по ГОСТ 4648-71 (ASTM D 790/256 12) испытывали образцы полимеров длиной 80 мм и сечением 10x3 мм. Испытания на изгиб ПКМ проводили по ГОСТ 25.604-82 на образцах сечением 6x2 мм, длиной 60 мм на рабочей базе 40 мм, на межслойный сдвиг методом «короткой балки» – по РД 50-675-88 (ASTM D 2244) на образцах сечением 6x6 мм и длиной 41 мм на рабочей базе 30 мм, на поперечный отрыв (грибки диаметром 25 мм, толщиной образца 2 мм). Скорость перемещения активного захвата при испытании на сжатие и поперечный отрыв составляла 1,25, на изгиб - 2, на межслойный сдвиг – 0,5 мм/мин. Структуру поверхностей разрушения при разных видах нагружения образцов исследовали на макро-, мезо-, микро- и частично наноуровнях методом сканирующей электронной микроскопии по специальной методике препарировании [8, 11, 12]. Результаты обобщения фрактографических исследований механики разрушения полимерных матриц и композитов приведены на рисунках 1- 9.

## **3. Некоторые неклассические эффекты механики разрушения полимерных матриц и композитов**

### **3.1. Существование шероховатых берегов трещины [11]**

Рис. 1 демонстрирует электронные микрофотографии берега магистральной трещины при разных увеличениях в образце эпоксидного полимера, разрушенного при испытаниях на сжатие. Фотографии этих образцов дают основание утверждать, что поверхность берегов трещины представляет собой периодическую совокупность полуцилиндрических бороздок. Можно предположить, что диаметр цилиндрических поверхностей или что то же – расстояние между гребнями, образованными пересечением двух соседних полуцилиндрических поверхностей, определяется механическими свойствами материала. В [22] было показано, что это расстояние выражается через вязкость разрушения и предел прочности материала в рамках классической теории упругости.

### **3.2. Существование зеркальных берегов трещины [11, 22]**

На рисунке 2 показаны электронные микрофотографии берегов магистральной трещины образца эпоксидного полимера, разрушенного при испытаниях на разрыв. Поверхность берегов трещины у очага разрушения практически зеркальная и не содержит периодической системы полуцилиндрических бороздок (Рис. 2а). На основании этих фотографий можно утверждать, что по крайней мере для разрушения по моде I (в условиях

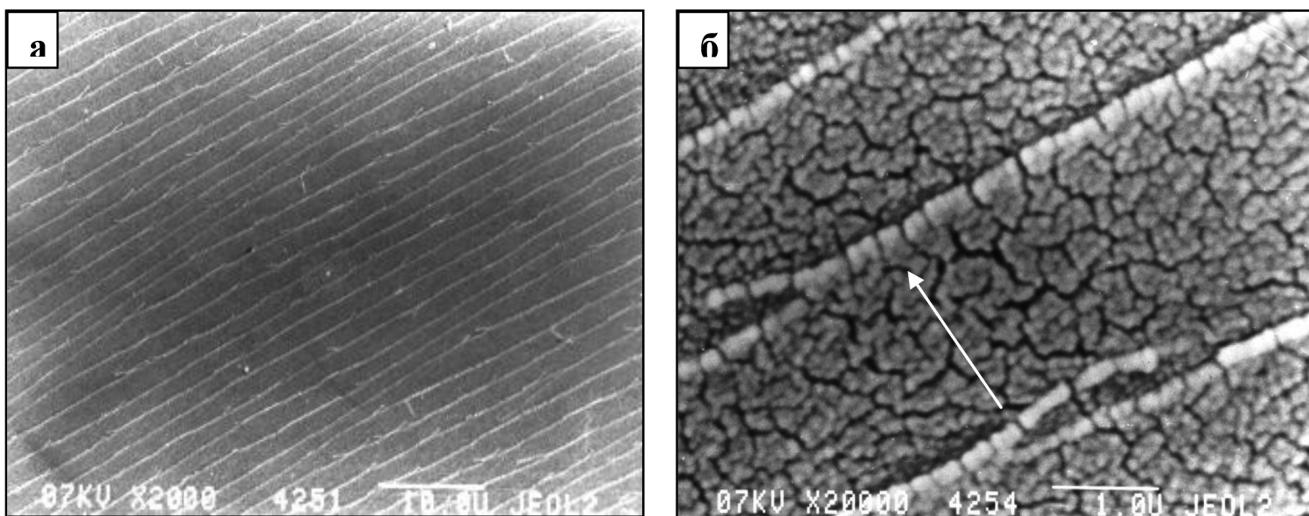


Рис. 1. Микроструктура поверхности трещины с шероховатыми берегами (стрелкой показано направление разрушения эпоксидного полимера при сжатии)

The microstructure of a rough crack surface (the arrow shows the direction of fracturing epoxy polymer under compression)

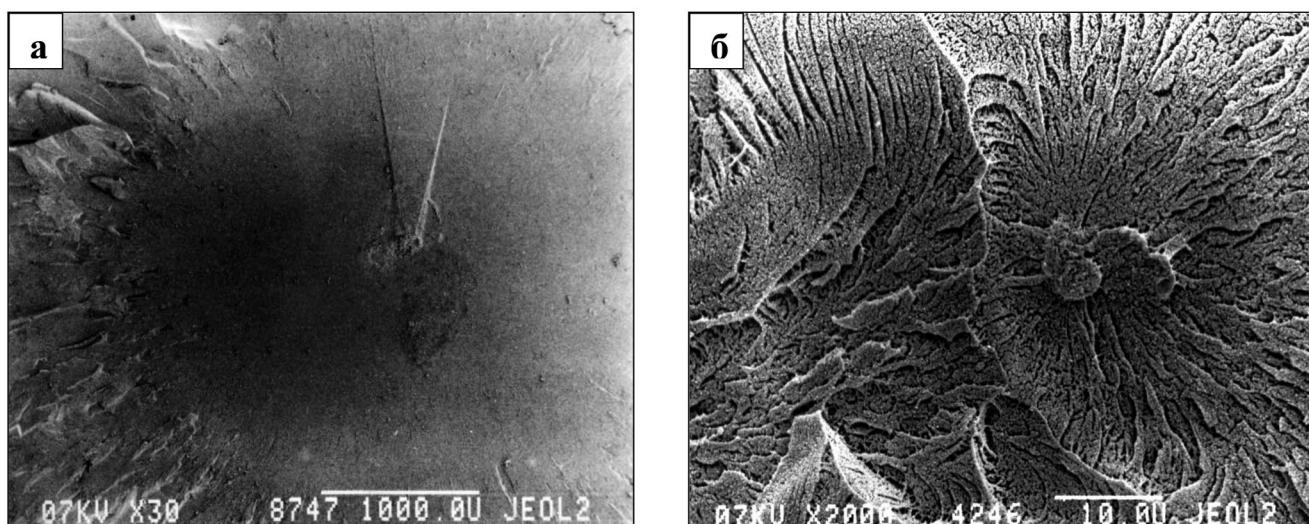


Рис. 2. Микроструктура поверхности трещины с зеркально-гладкими (а) и шероховатыми (б) берегами в эпоксидных полимерах, разрушенных при растяжении

The microstructure of mirror-like (a) and rough (b) crack surface in the epoxy polymers fractured in tension

отрыва) имеет место «расщепление» на две подмоды: с зеркальными и шероховатыми берегами трещины (Рис. 2 б). Попытка объяснить существование зеркальных берегов трещины в рамках классической теории прочности оказалась неудачной.

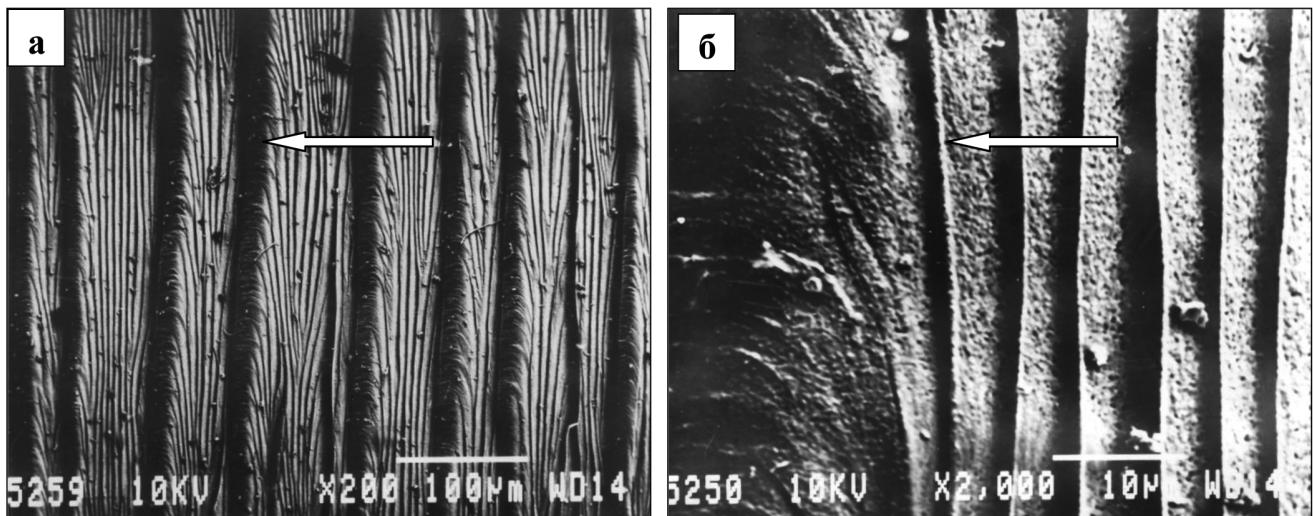
### 3.3. Периодичность цилиндрических бороздок на берегах шероховатой трещины [11]

Электронные микрофотографии с разным увеличением берегов магистральной трещины в образце эпоксидного полимера, разрушенного при испытаниях на изгиб, приведены на рисунке 3. Эти фотографии снимают сомнения в том, что подмоды разрушения с шероховатыми и зеркальными берегами могут быть реализованы только для разных полимерных материалов (см. Рис.2). Здесь обе подмоды реализованы для одного и того же материала. Вторым принципиальным моментом этих фотографий является то, что в

процессе эволюции трещины (разрушения) подмоды разрушения могут периодически сменять друг друга. Этот факт дает возможность сделать предположение, что периодическая смена режимов разрушения связана с потерей устойчивости текущего режима разрушения. Как следствие этого предположения можно утверждать, что уравнение движения фронта трещины должно быть нелинейным и иметь не единственное решение.

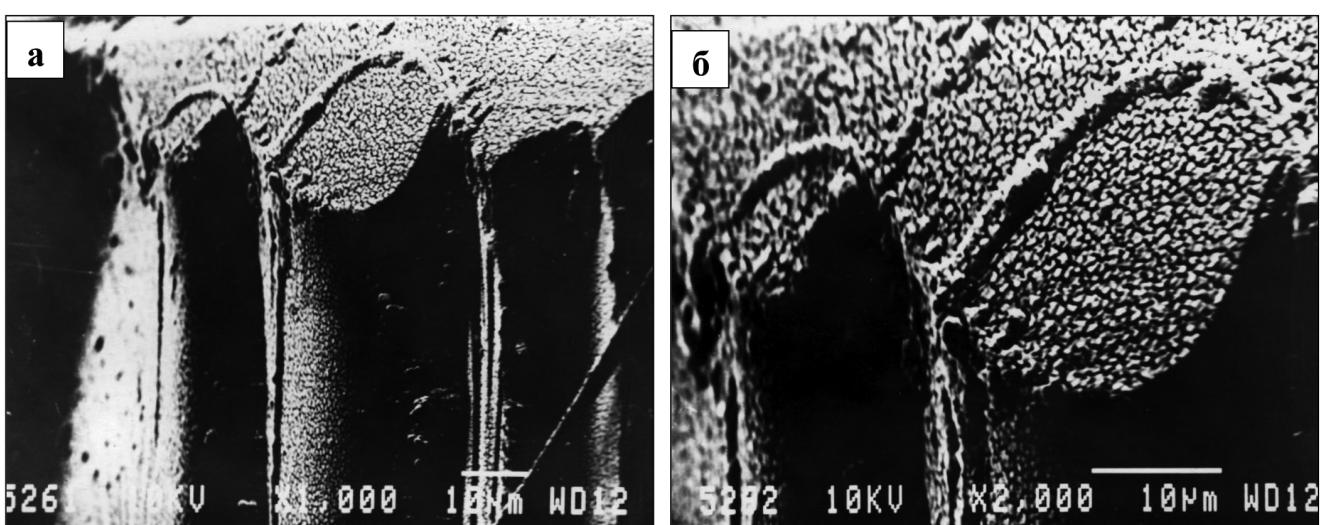
### 3.4. Сохранение целостности торсионов [12, 13]

На рисунке 4 приведены электронные микрофотографии берегов магистральной трещины в образце эпоксидного полимера, разрушенного при испытаниях на изгиб. В отличие от предыдущих фотографий (см. Рис. 3), эти показывают наличие не только цилиндрических бороздок на берегах трещины, но и цилиндрических фрагментов материала образца, которые отделились от бороздок. Это приводит к следующей трак-



**Рис. 3. Микроструктура поверхности берега шероховатой трещины с периодическими цилиндрическими бороздками, образующимися в результате смены режима разрушения при испытаниях на изгиб (стрелками показано направление разрушения)**

*The microstructure of rough crack surface with a periodic cylindrical grooves, which are formed as a result of changing in the mode of fracture at bending tests (the arrows show the fracture direction)*



**Рис. 4. Микроструктура новых неклассических объектов – «торсионов» на берегах шероховатой трещины в эпоксидном полимере при испытаниях на изгиб**

*The microstructure of new nonclassical objects – «torsions» on the rough crack surface in epoxy polymer after bending tests*

товке процесса разрушения: вдоль фронта трещины из массива образца отделяется цилиндрическая область, которую назвали «торсионом». При этом на берегах трещины остаются соответствующие полуцилиндрические бороздки, от одной из которых торсион может не отделиться.

Таким образом, существование не потерявшего своей целостности торсиона является зафиксированным неклассическим эффектом, так как в рамках классической теории упругости в любой области, окружающей вершину трещины, напряжения внутри области превышают напряжения, действующие на поверхности области. По определению торсиона, его поверхность определяется той поверхностью, на которой критическое напряжение становится равным пределу прочности. Поэтому классическая теория упругости в принципе не может объяснить существование целостного торсиона, так как в любой внутренней точке торсиона классическое решение дает критическое напряжение, превышающее предел прочности.

### 3.5. Однородная структура длинных торсионов [12]

Рис. 5 интересен тем, что он показывает структуру сохранивших свою целостность длинных торсионов. Под длинными торсионами будем традиционно понимать такие, длина которых намного превосходит характерный поперечный размер (диаметр, корень квадратный из площади поперечного сечения). Полагая, что для длинных торсионов любое поперечное сечение эквивалентно любому другому поперечному сечению, фотографии на этом рисунке позволяют утверждать, что длинные торсионы являются однородными фрагментами исходного материала образца.

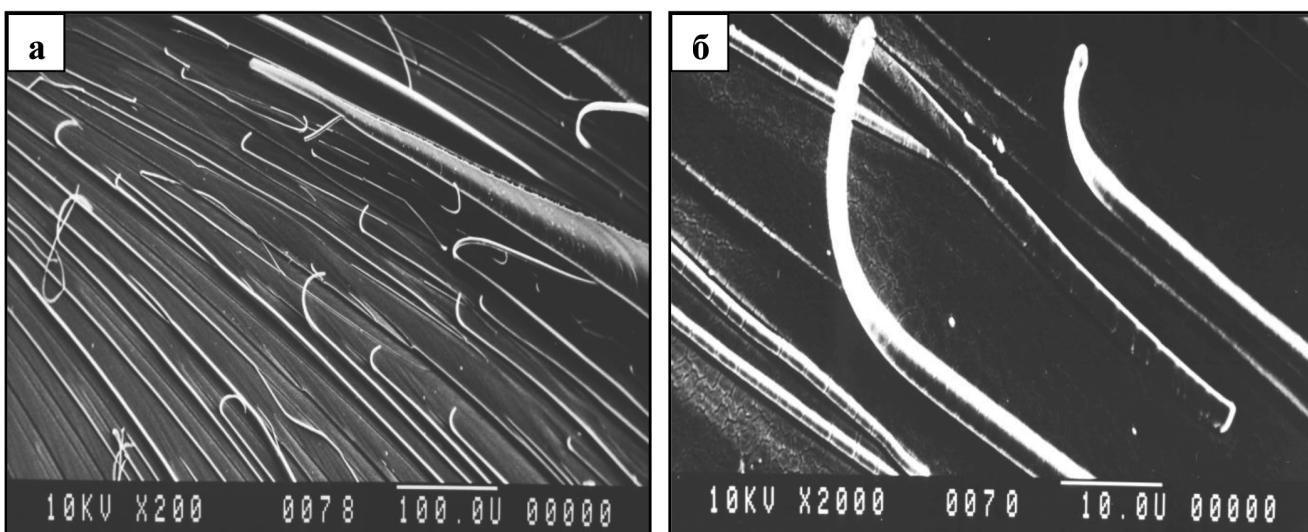


Рис. 5. Микроструктура длинных торсионов на поверхности трещины в эпоксидном полимере при испытаниях на изгиб

*The microstructure of long torsions on the crack surface in epoxy polymer after bending tests*

### 3.6. Структура поверхности коротких торсионов [12-15]

На рисунках 6 и 7 показаны электронные микрофотографии сохранивших свою целостность коротких торсионов. Под короткими торсионами будем традиционно понимать такие, длина которых соизмерима с характерным поперечным размером. Не трудно убедиться в том, что у коротких торсионов существует спиралевидная структура поверхности (Рис. 7). Такая спиралевидная структура, вероятно, определяется решениями типа краевого или multiscale-эффекта. Обратим внимание на то, что на этих рисунках поверхность торцев торсионов свободна от обобщенных нагрузок.

### 3.7. Расщепление структуры коротких торсионов [12-15]

На Рис. 8 представлены электронные микрофотографии сохранивших свою целостность коротких торсионов между волокнами в стекло- и углепластике. В этом случае у коротких торсионов существует уже

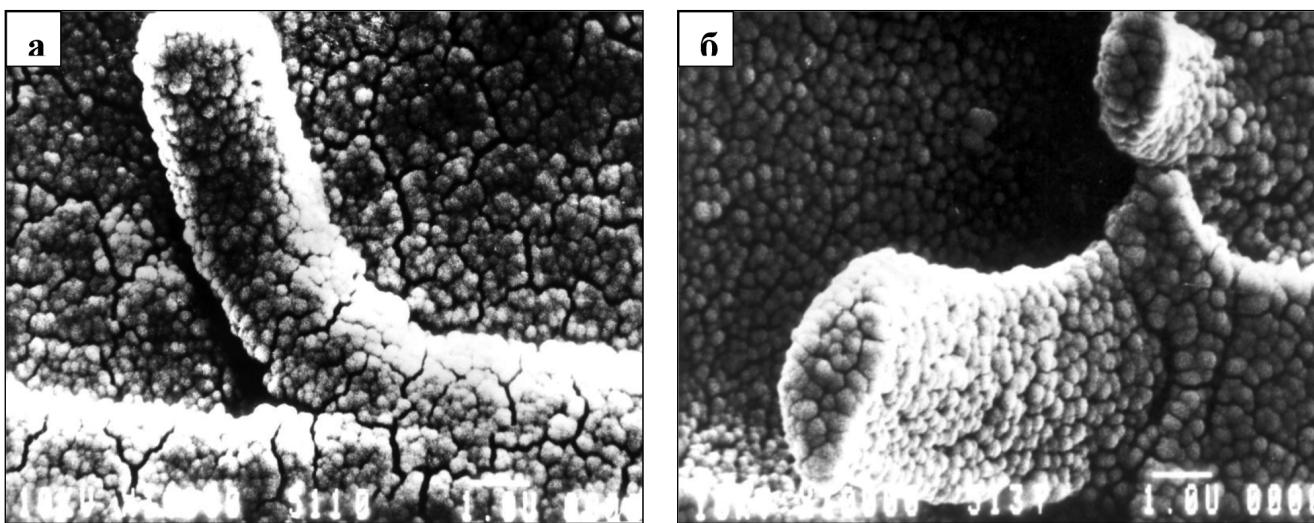


Рис. 6. Микроструктура коротких торсионов на поверхности трещины в эпоксидном полимере при испытаниях на изгиб

The microstructure of short torsions on crack surface in epoxy polymer after bending tests

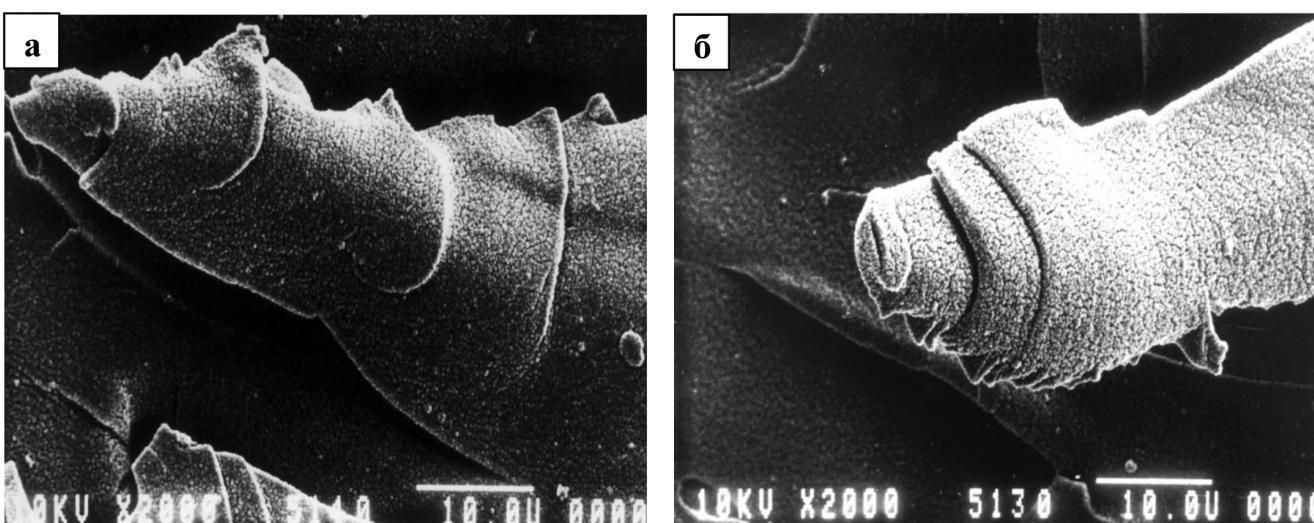


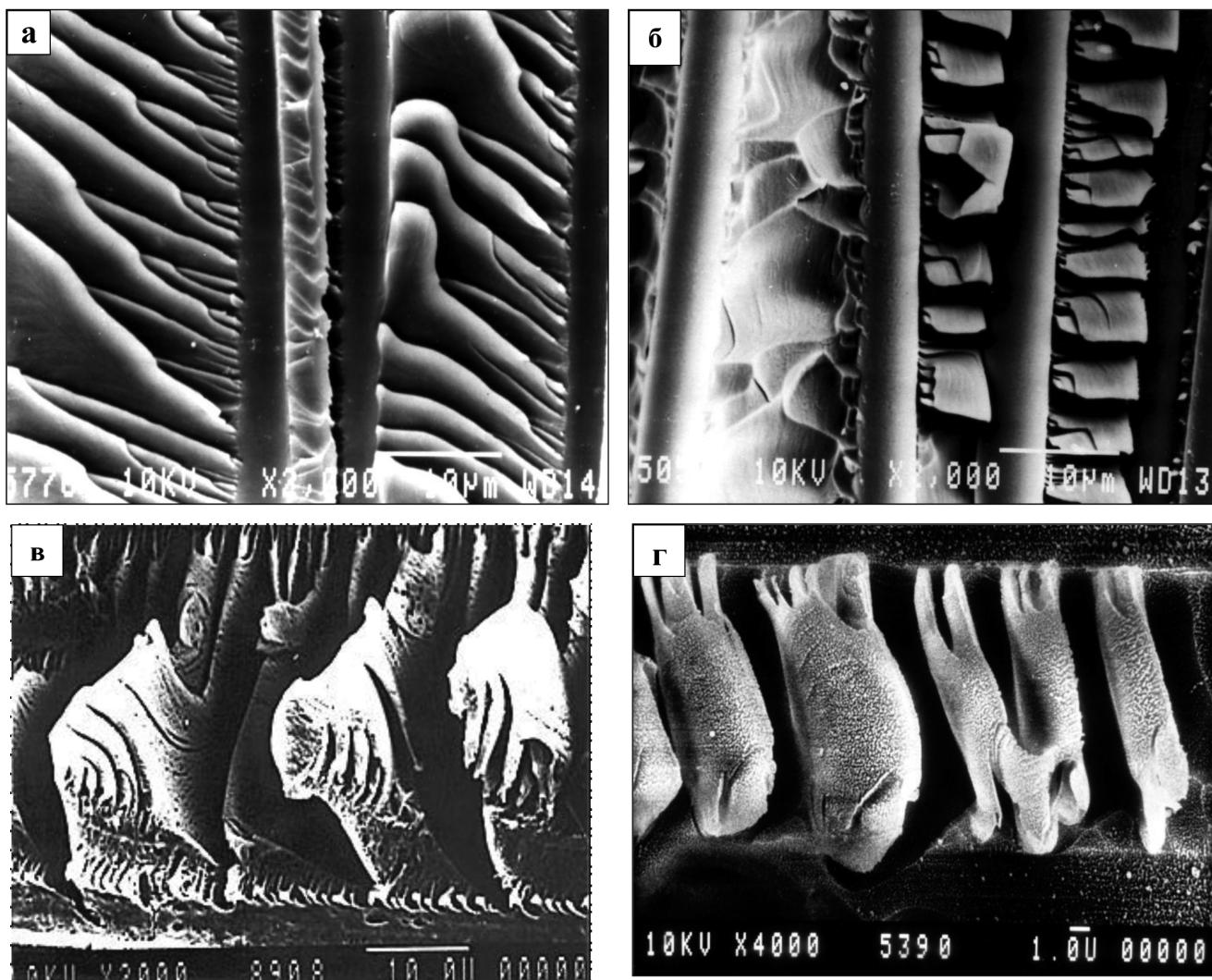
Рис. 7. Торсионы со спиралевидной микроструктурой на поверхности трещины в эпоксидном полимере при испытаниях на изгиб

The torsions with spiral-shape microstructure on the crack surface in epoxy polymer after bending tests

более сложная и разнообразная внутренняя структура. Будем называть это разнообразие структур «корневидными торсионами», продольным или поперечным расщеплением объёма торсионов. Экспериментально установлено, что это разнообразие определяется локальными адгезионными свойствами поверхности контакта волокно-матрица. Обратим внимание на то, что в общем случае попытка описать подобные структуры в рамках любой модели дефектной среды приведет к формулировке обобщенной контактной задачи. С учетом того, что модули волокна на два порядка больше модулей матрицы, приближенно можно считать постановку подобной краевой задачи как обобщенное защемление.

### 3.8. Торсионы в наномодифицированных полимерах

Микрофотографии поверхностей разрушения эпоксидной композиции, модифицированной углеродных нанотрубок приведены на Рис. 9. Исследование фрактографии поверхностей разрушения наномодифицированных эпоксидных композиций показало, что нанотрубки весьма активно влияют на процесс формирова-



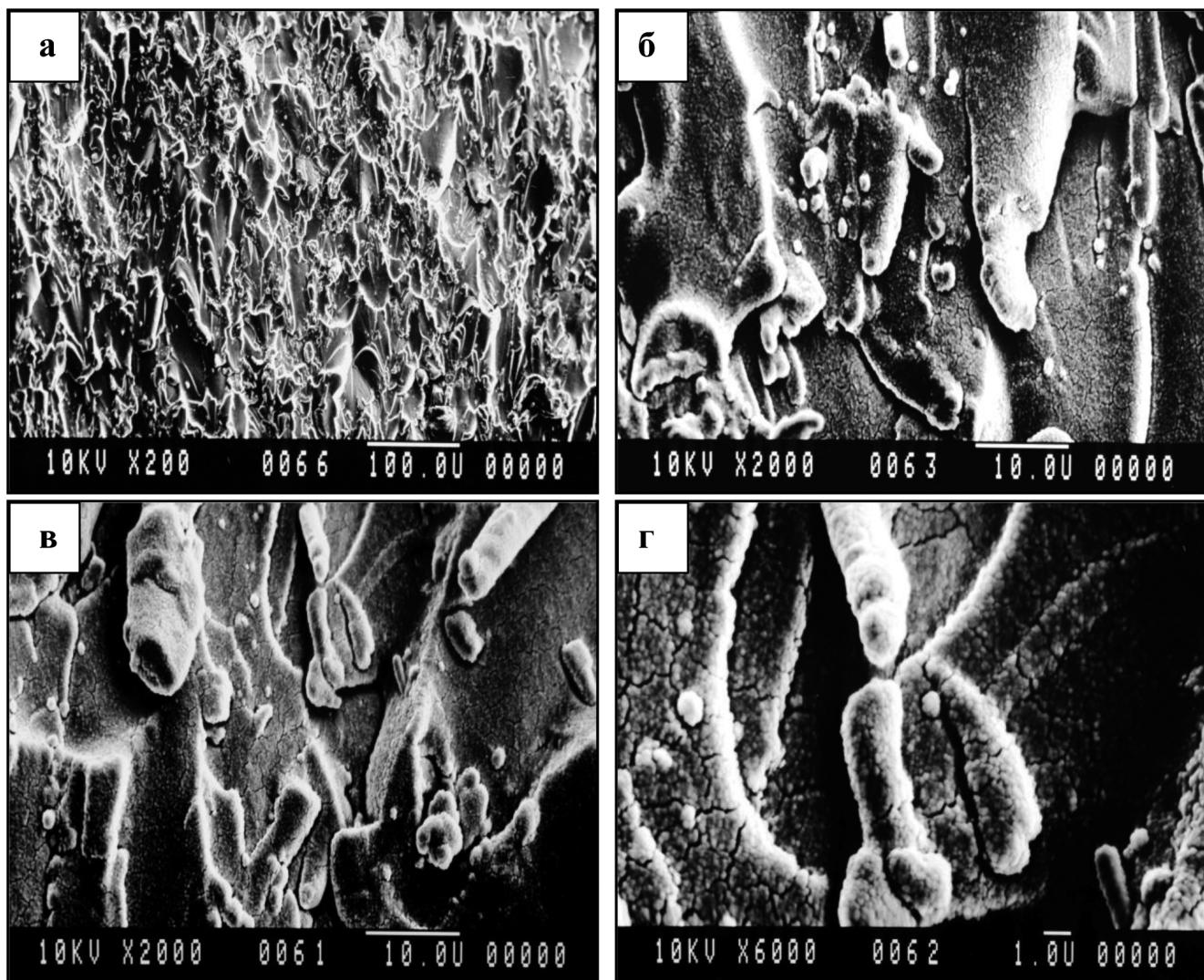
**Рис. 8. Микроструктура расщепленных торцов коротких торсионов на поверхности разрушения эпоксидной матрицы в стеклопластике (а, б, в) и углепластике (г) при испытаниях на изгиб**  
**The microstructure of splinted short torsion ends on the fracture surface of epoxy matrix reinforced with glass fiber (a, b, c) and carbon fiber (d) after bending tests**

ния торсионов. Микрофотографии этого рисунка объективно свидетельствуют о высокой адсорбционной способности поверхности нанотрубок по отношению к олигомерам и частицам дисперсной фазы полимера, в результате чего на поверхности разрушения в условиях силового воздействия происходит образование новых структур в виде многочисленных коротких торсионов.

Полученные экспериментальные электронно-микроскопические данные и их обобщение представляют собой многообразный и интригующий материал для построения математических моделей как самих торсионов, так и механики разрушения полимерных композитов в целом. С другой стороны, специфика работы волокнистых композиционных материалов с полимерной матрицей требует разработки надежных инженерных методик определения трещиностойкости композитов, учитывающих торсионный характер их разрушения, что имеет несомненную практическую ценность.

### Заключение

В работе изложены обобщенные результаты фрактографических исследований новой «торсионной» моды



**Рис. 9. Микроструктура торсионов в эпоксидной композиции, модифицированной введением углеродных нанотрубок**  
**The microstructure of torsions in a epoxy polymer matrix modified by carbon nanotubes**

разрушения, характерным признаком которой является фрагментация и выделение из массива материала локальных областей («торсионов») различной формы в нагруженных полимерах и полимерных композиционных материалах на их основе.

Установлено, что «торсионная» мода разрушения в разных условиях нагружения универсальна и характерна для полимеров, армированных различными волокнами (углеродными, стеклянными, органическими и др.), наномодифицированных полимеров, не зависит от типа наполнителя и наблюдается на мезо- и микроравнениях.

Выбраны и предложены к обсуждению наиболее яркие неклассические эффекты, которые можно формализовать и в дальнейшем построить на их основе «теорию торсионов». Установлено, что для каждой моды трещин существуют две подмоды, при которых берега трещины могут быть как шероховатыми, так и зеркально-гладкими. Показано существование целых (не разрушенных) торсионов с сохранением их внутренней структуры, наличие корневидной, цилиндрической, конической и других форм торсионов в зависимости от граничных условий на их торцах.

В рамках классической механики трещин удалось объяснить существование шероховатых берегов трещин и выразить диаметр (характерный поперечный размер) торсиона через такие классические характе-

ристики связующего как предел прочности и вязкость разрушения [22].

В рамках неклассического обобщения – ««простейшей» теории когезионного поля» осуществлена успешная попытка построить более полную теорию торсионов, способную объяснить существование как шероховатых, так и зеркально-гладких берегов трещин [22]. С другой стороны, показано, что не все неклассические эффекты удается объяснить в рамках этой простой неклассической модели.

Последующие шаги видятся в выборе и тестировании последовательности все более сложных и полных градиентных теорий, способных объяснить существование целых (неразрушенных) торсионов, сохранение внутренней структуры длинных торсионов, спиралевидную или корневидную структуру коротких торсионов в зависимости от граничных условий на торцах. Полученные данные представляют собой многообразный и интересный материал для построения теоретических моделей как образования самих торсионов, так и механики разрушения ПКМ в целом.

#### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов технологий их переработки на период до 2030 года», *Авиационные материалы и технологии*, 2015, №1 (в печати).
2. Деев И.С., Кобец Л.П. Структурообразование в наполненных термореактивных полимерах, *Коллоидный журнал*, 1999, Т.61, №5. С. 650-660.
3. Kausch H.H. *Polymer Fracture*, Springer Verlag, New York, 1978. 332 p.
4. Kinloch A.J., Young R.J. *Fracture Behavior of Polymers*, Elsevier Applied Science, London, 1983, 496 p.
5. Williams J.G., *Fracture Mechanics of Polymers*, Ellis, Horwood Chichester, 1984, 303 p.
6. Гуль В.Е. *Структура и прочность полимеров*, М, Химия, 1971, 334 с.
7. Марихин В.А., Мясникова Л.П. *Надмолекулярная структура полимеров*, Л, Химия. 1977. 240 с.
8. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В., Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении, *Труды ВИАМ*, 2014, №7, Ст. 06 <http://viam-works.ru/ru/articles>.
9. Каблов Е.Н., Деев И.С., Ефимов В.А., Кавун Н.С., Кобец Л.П., Никишин Е.Ф.; Влияние атмосферных факторов и механических напряжений на микроструктурные особенности разрушения полимерных композиционных материалов, В сб. докладов VII научной конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2008», Ч. 1, М, 2008, С. 279–286.
10. Корхов В.П., Файтельсон Е.А., Молчанов Ю.М. Упорядочение эпоксидного полимера при ориентировании, *Механика композитных материалов*, 1989, №6, С. 1103–1108.
11. Деев И.С., Кобец Л.П. Фрактография эпоксидных полимеров, *Высокомолекулярные соединения*, Сер. А, 1996, Т. 38, №4, С. 627–633.
12. Деев И. С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе, *Материаловедение*, 2010, №5, С. 8–16, №6. С. 13–18.
13. Деев И.С., Кобец Л.П. «Торсионное» разрушение эпоксидных полимеров и матриц в полимерных композиционных материалах, В сб. материалов IV Международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», М, ИМЕТ РАН, 2011, С. 596–597.
14. Деев И.С., Кобец Л.П., Румянцев А.Ф. Фрактографические исследования эпоксидных углепластиков после испытаний на трещиностойкость по моде I, *Композиты и наноструктуры*, 2013, №2, С. 2–12.
15. Деев И.С., Кобец Л.П., Румянцев А.Ф. Исследование усталостного расслоения углепластиков в условиях отрыва и сдвига, В сб. материалов V Международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», М, ИМЕТ РАН, 2013, С. 585–587.
16. Davies M.L., Benzeggagh F. X., de Charentenay, The Delamination Behavior of Carbon Fiber Reinforced PPS, *SAMPE Quarterly*, 1987, V. 19, №1, pp. 19-24.
17. Min-Seok Sohn and Xiao-Zhi Hu. Comparative study of dynamic and static delamination behaviour of carbon fibre/epoxy composite laminates, *Composites*, 26, 1995, pp. 849-858.
18. Fridrich K., Walter R., Carlsson L.A., Smiley J., Gillespie J. W. Mechanisms for rate effects on interlaminar

fracture toughness of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites, *Journal of Materials Science*, 1989, V. 24, pp. 3387-3398.

19. Birger S., Moshonov A. and Kenig S. Failure mechanisms of graphite – fabric epoxy composites subjected to flexural loading, *Composites*, V. 20, 1989, pp. 136 – 144.

20. Purslow D. Matrix fractography of Fibre-Reinforced epoxy composites, *Composites*, V. 17, № 4, 1986, pp. 289 – 303.

21. Fractography and Atlas of Fractographs. V 9, (American Society Metals, 1974)

22. S. Lurie, P. Belov Gradient effects in fracture mechanics for nanostructured materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.130, 2014, pp. 3-11.

### **References**

1. Kablov E.N., Innovative development of Federal State Unitary Enterprise VIAM of GNTs Russian Federation on realization «Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030», *Aviationnye materialy i tekhnologii - The aviation materials and technologies*, 2015, no. 1, (in press), (in Russian).
2. Deev I.S., Kobets L.P. Structurization in the filled thermoreactive polymers, *Kolloidnyj zhurnal - Colloidal journal*, 1999, V 61, no. 5. pp. 650-660 (in Russian).
3. Kausch H.H. *Polymer fracture*. Springer verlag, New York, 1978, 332 p.
4. Kinloch A.J. and Young R.J. *Fracture behavior of polymers*. Elsevier applied Science, London, 1983, 496 p.
5. Williams J.G., *Fracture mechanics of polymers*, Ellis, Horwood Chichester, 198, 303 p.
6. Gul V.E. *Struktura i prochnost polimerov* [Structure and strength of polymers], Moscow, Khimiya, 1971, p. 334 (in Russian).
7. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. *Nadmolekulyarnaya struktura polimerov* [Supermolecular structure of polymers], L, Khimiya, 1977, 240 p. (in Russian).
8. Deev I.S., Kablov E.N., Kobets L.P., Chursova L.V. [Research by method the scanning electronic microscopy of deformation microphase structures of polymeric matrixes at mechanical loading]. *Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Trudy VIAM»*, 2014, no. 6, VIAM/2014-Tr-07-06 (in Russian). Available at: <http://www.viam-woks.ru/ru/articles>.
9. Kablov E.N., Deev I.S., Efimov V.A., Kavun N.S., Kobets L.P., Nikishin E.F. [Influence of atmospheric factors and mechanical stresses on microstructural features of fracture of polymeric composite materials]. *Sbornik dokladov VII nauchnoj konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviasalon-2008»*. [In a collection of reports of the VII scientific conference on hydroaviation of «Gidroaviasalon-2008»], Part 1, Moscow, 2008, pp 279-286 (in Russian).
10. Korkhov V.P., Fajtelson E.A., Molchanov Yu.M., Streamlining of epoxy polymer at orientation] Uporyadochenie epoksidnogo polimera pri orientirovani, *Mekhanika kompozitnykh materialov - Mechanics of composite materials*, 1989, no 6, p.p. 1103-1108 (in Russian).
11. Deev I. S., Kobets L. P., Fractography of epoxy polymers, *Vysokomolekulyarnye soedineniya - High-molecular links*, Ser. A, 1996, V. 38, № 4, p.p. 627-633 (in Russian).
12. Deev I.S., Kobets L.P. , Research of a microstructure and features of destruction of epoxy polymers and composite materials on their basis *Materialovedenie - Materials science*, 2010, № 5, pp. 8-16; №6, pp. 13-18 (in Russian).
13. Deev I.S., Kobets L.P. [The «torsion» destruction of epoxy polymers and matrixes in polymeric composite materials], *Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov*, [In a collection of materials of the IV International conference «Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials»], Moscow, IMET RAN, 2011, pp. 596-597 (in Russian).
14. Deev I.S., Kobets L.P., Rumyantsev A.F., Fractography researches of epoxy coal plastics after tests for crack resistance on mode of I, *Kompozity i nanostruktury - Composites and nanostructures*, 2013, no 2, p.p. 2-12 (in Russian).
15. Deev I.S., Kobets L.P., Rumyantsev A.F. [Research of fatigue stratification of coal plastics in the conditions of a separation and shift] *V sb. materialov V mezhdunarodnoj konf. «Deformatsiya i razrushenie materialov*

*i nanomaterialov», [In a collection of materials of the V International conference «Deformation and Destruction of Materials and Nanomaterials»]. Moscow, IMET RAN, 2013, pp. 585-587 (in Russian).*

16. Davies, M.L. Benzeggagh, F. X. de Charentenay. The Delamination Behavior of Carbon Fiber Reinforced PPS. *SAMPE Quarterly*, 1987, V. 19, №1, pp. 19-24.

17. Min-Seok Sohn and Xiao-Zhi Hu. Comparative study of dynamic and static delamination behaviour of carbon fibre/epoxy composite laminates. *Composites*, 1995. 26, pp. 849-858.

18. Fridrich K., Walter R., Carlsson L.A., Smiley J., Gillespie J. W. Mechanisms for rate effects on interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites. *Journal of Materials Science*, 1989, V. 24, pp. 3387-3398.

19. Birger S., Moshonov A. and Kenig S. Failure mechanisms of graphite – fabric epoxy composites subjected to flexural loading. *Composites*, 1989, V. 20, , pp. 136 – 144.

20. Purslow D. Matrix fractography of Fibre-Reinforced epoxy composites. *Composites*, 1986, V. 17, no. 4, pp. 289 – 303.

21. Fractography and Atlas of Fractographs, Volume 9, American Society Metals, 1974.

22. S. Lurie, P. Belov. Gradient effects in fracture mechanics for nanostructured materials, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 130, 2014, pp. 3-11.

#### *Сведения об авторах*

**Деев И.С.\*:** ктн, главный научный сотрудник, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ, 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д.17, e-mail: [deev@viam.ru](mailto:deev@viam.ru), тел. 89031244824.

**Белов П.А.:** дфмн, ст. научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Новые материалы, композиты и нанотехнологии» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

**Кобец Л. П.:** дтн, ст. научный сотрудник, Научно-образовательный центр «Новые материалы, композиты и нанотехнологии» при МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

---

\*<sup>)</sup> for correspondence