

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ
РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, Н. Т. Бобро, Л. В. Прохорец

Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепропетровск, 490005, Украина.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

В статье показано, что при исследовании процессов разрушения композиционных материалов на макроструктурном уровне в ряде случаев необходимо учитывать целый комплекс факторов, которые имеют случайный характер, например, разброс прочности волокон, разброс прочности связи компонентов, случайные отклонения в укладке волокон и т.д. Таким методом, который позволяет наиболее полно учесть и синтезировать разнообразную информацию о статистических свойствах компонентов, их связи и укладке, а также позволяет систематически исследовать роль отдельных факторов и их влияние на развитие разрушения материала, является структурно-имитационное моделирование на электронной вычислительной машине.

Ключевые слова: статистические методы, композиционные материалы, разрушение, накопление повреждений.

**СТАТИСТИЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
РУЙНУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

С. І. Скіпочка, Т. А. Паламарчук, М. Т. Бобро, Л. В. Прохорець

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2-А, м. Дніпропетровськ, 490005, Україна.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

В статті показано, що при дослідженні процесів руйнування композиційних матеріалів на макроструктурному рівні у ряді випадків необхідно враховувати цілий комплекс чинників, які мають випадковий характер, наприклад, розкид міцності волокон, розкид міцності зв'язку компонентів, випадкові відхилення в укладанні волокон і т.д. Таким методом, який дозволяє якнайповніше врахувати і синтезувати різноманітну інформацію про статистичні властивості компонентів, їх зв'язок і укладання, а також дозволяє систематично досліджувати роль окремих чинників і їх вплив на розвиток руйнування матеріалу, є структурно-імітаційне моделювання на електронній обчислювальній машині.

Ключові слова: статистичні методи, композиційні матеріали, руйнування, накопичення пошкоджень.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Несмотря на определенные достижения в построении моделей деформируемых сред с неоднородной структурой и в изучении накопления повреждений в материалах в условиях сложного напряженного состояния [1–6], при анализе процессов перераспределения напряжений в компози-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

тах, как правило, используются наиболее простые схемы, отражающие механику взаимодействия компонентов на фоне макронеоднородных, одноосных полей напряжений. Среди подходов, изучающих распределение напряжений на микроструктурном уровне, можно выделить два основных направления: исследование перераспределения напряжений при разрыве волокон или при наличии дискретных волокон и анализ перераспределения напряжений, вызванного различием упругопластических свойств компонентов при их совместном деформировании.

Цель работы – изучить статистические методы, наиболее адекватно описывающие разрушение композиционных материалов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В задачах о совместном деформировании компонентов рассматриваются композиты с непрерывными или длинными волокнами, предполагается, что в исследуемой области не происходит перераспределения осевых напряжений между волокнами и матрицей, и анализируется распределение напряжений только в поперечном направлении. Распределение радиальных и окружных напряжений в компонентах композиционного материала исследовалось теоретически и экспериментально многими исследователями.

В ряде работ [6, 7] высказывалось мнение о том, что возникновение напряжений, обжимающих волокна (при деформировании композитов с металлическими матрицами), может оказать существенное влияние на развитие процесса разрушения. Это мнение основано на экспериментально установленном эффекте увеличения деформации до разрушения, как у пластичных, так и у хрупких материалов при наличии в них сложного напряженного состояния, в частности, при сжатии их в направлении, поперечном приложению основной разрушающей нагрузки.

Взаимодействие микромеханизмов разрушения приводит к ситуациям, когда волокна нагружаются силами трения, например, при отслоении разрушившихся волокон от матрицы. При описании напряженного состояния в общем случае возникают существенные трудности и, как правило, при анализе перераспределений в осевом направлении не учитывается взаимодействие компонентов в поперечном направлении. Но представления о напряжениях обжатия волокон и информация об их величинах оказываются весьма полезными при оценке сил трения, возникающих на границах компонентов при развитии процессов расщепления.

Исследованию перераспределения напряжений, вызванного разрушением волокон или наличием дискретных волокон, посвящено, по-видимому, наибольшее число работ, связанных с микромеханикой композитных сред. Ряд таких исследований был выполнен с помощью поляризационно-оптических методов. Эти исследования проводились в плоской, псевдоплоской [8] и объемной постановках. То обстоятельство, что в непосредственной близости от конца волокна, где градиенты напряжений максимальны, изоклины наблюдаются размытыми, ограничивает возможности экспериментальных методов. Аналогичные трудности возникают при попытках исследования перераспределения напряжений, методами, основанными на измерении микротвердости.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Другой фундаментальный подход к анализу распределения напряжений в области концевых участков волокон основан на численных методах механики деформируемых сред, в частности на методе конечных элементов. Применение этого метода к задачам о концентрации напряжений в целом открывает широкие возможности, позволяет анализировать модели композитов с любыми геометрическими параметрами, с компонентами различной жесткости, с различными видами нагружения. Но, как и в экспериментальных подходах, численные расчеты, как правило, приводят к неопределенности, связанной с нереально высокими значениями напряжений в локальных областях, прилегающих непосредственно к местам разрывов.

Эти противоречия между принципиальной возможностью методов и ограниченностью полученных результатов обусловлены тем обстоятельством, что геометрия расчетной модели, как правило, лишь весьма приближенно отражает реальную конфигурацию повреждений, вызванных, например, разрушением отдельного волокна. В силу этого построение «точных» моделей и применение «мощных» расчетных методов в ряде случаев представляется малооправданным. Можно также отметить, что наличие чрезвычайно большого количества моделей, описывающих перераспределение напряжений в композитах, и то, что эти модели продолжают создаваться и уточняться, является показателем определенной неудовлетворенности, которую испытывают исследователи в этой области.

Разнообразные модели, применяемые для получения аналитических зависимостей, описывающих распределение напряжений в композите с разрушенными или дискретными волокнами, можно классифицировать как по типу напряженного состояния (НС), которое учитывается моделью (трехмерные (I), двумерные (II), одномерные (III)), так и по форме исследуемых объектов (линейные (а), плоские (б), объемные (в)).

В моделях, учитывающих трехмерность напряженного состояния, рассматривалось цилиндрическое волокно или погруженное в бесконечный континуум матрицы, или окруженное цилиндрической матрицей [9]. Эти модели, как правило, являются громоздкими и малоинформативными. Значительно большая информация была получена с помощью двухмерных плоских моделей. Но решения, учитывающие двухосность напряженного состояния в компонентах, как правило, служат для оценки правомерности применения упрощающих гипотез, согласно которым выделяются жесткие элементы, работающие на растяжение, и более мягкие, работающие на сдвиг [10].

В подавляющем большинстве исследований использовались одномерные линейные модели, в которых учитывается перераспределение напряжений только вдоль одной осевой координаты.

Структурный и фрактографический анализ локальных повреждений, вызванных разрушением волокон в композите, показывает, что образующиеся дефекты, как правило, существенно различаются по виду, содержат микроповреждения прилегающей матрицы, микрораспределения по границам компонентов, имеют неправильные геометрические формы. В силу этого целе-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

сообразность анализа напряженного состояния, непосредственно в области локального дефекта на основе более «точных» моделей представляется сомнительной. В то же время в области, несколько удаленной от места локального разрушения, перераспределение напряжений между компонентами достаточно эффективно описывается введением ряда упрощающих гипотез, в частности, с использованием одномерных представлений.

Применение вероятностных методов к исследованию процессов разрушения композитов с волокнами, имеющими существенный разброс прочностных свойств, обусловлено внутренней структурой этих материалов. Статистические теории прочности композитов, как правило, опираются на развитые В.А. Вейбуллом представления о существовании статистического распределения механических свойств отдельных структурных материалов.

Следует отметить, что еще раньше вероятностные методы использовались при определении условий перехода металла от упругого состояния в пластическое с учетом разброса пределов текучести его отдельных зерен. При статистических оценках кратковременной прочности материалов наиболее часто применяется гипотеза разрушения по слабейшему звену, которая легла в основу подходов, развитых Я. И. Френкелем и Т. А. Конторовой, В. В. Болотиним и другими [3, 4] исследователями, давшими объяснение некоторых аспектов прочности твердых тел, в частности масштабного эффекта с вероятных позиций [4, 11, 12].

На раннем этапе работ по композиционным материалам исследователей больше привлекал этап накопления повреждений, или кумулятивное разрушение. Предполагалось, что при дроблении волокон может быть реализована чрезвычайно высокая прочность коротких участков волокон.

В основу многих исследований были положены зависимости, полученные Даниэльсом и Колеманом, которые связывают прочность пучков волокон с разбросом прочности исходных волокон. Основное предположение в этих подходах состояло в том, что прочность композита зависит только от свойств волокон.

Вопросам перехода от разрушения отдельных волокон к макроразрушению частично посвящены работы Цвебена [13–15], в которых анализируется вероятность разрушения ряда соседних волокон с учетом их локальных перегрузок и распределение магистральной трещины представляется в виде вероятностного процесса последовательного разрушения волокон в некоторой плоскости.

Критерием перехода к макроразрушению при этом является наличие критического числа разрывов соседних волокон. Положив это число равным единице, по Цвебену, можно получить нижнюю оценку прочности композита. В последующих совместных работах Цвебена и Б. Розена [14] делается попытка объединить эти две модели, их комбинация дает неплохое приближение при оценке прочности композитов, но лишь в тех случаях, когда процесс разрушения полностью определяется статистическим распределением прочности армирующих волокон.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Имеются и другие направления развития концепции пучка и учета перегрузки волокон. Например, в работе Мора [1] принимается, что при обрыве волокна нагрузка с него перераспределяется на ближайшие соседние волокна и эти перегруженные волокна представляют собой пучок «композитное волокно», разрушение которого может быть описано по Даниэльсу. Волокна, окружающие композитное волокно первого порядка, образуют пучок второго порядка и т.д. Такое описание процесса разрушения композита как последовательного разрушения все более крупных пучков волокон, по-видимому, содержит в себе ограниченность предыдущих моделей.

Модель, учитывающая влияние вязкости разрушения матрицы, объемных долей компонентов и наличие слипшихся волокон на развитие процессов разрушения композитов, была разработана С. Т. Милейко [16]. Возможность реализации этапа накопления повреждений и возможность развития макроразрушения материала вслед за разрушением отдельных волокон оцениваются при этом подходе путем применения концепций линейной механики разрушения. Хотя статистический аспект проблемы разрушения представлен в несколько неопределенном виде, в работах С. Т. Милейко дается оценка границ применимости гипотезы разрушения по слабейшему звену для композитов, определяются объемные доли волокон, при которых реализуется дробление волокон, и даются рекомендации по увеличению прочности материалов за счет более полной реализации высоких прочностных свойств волокон.

Попытка учесть разнообразные механизмы разрушения, например, отслоение разрушившихся волокон, развитие трещин в матрице и т.д. в ряде работ делились путем вероятностного анализа многообразия поверхностей разрушения.

Определенный этап в развитии статистических представлений о разрушении материалов связан с построением кинетических моделей. Наиболее общий подход к стохастическому описанию разрушения развивается в работах [3, 4], согласно которым разрушение материала представляется многомерным случайным процессом. Такой подход позволяет учесть различные микромеханизмы разрушения, накопление отдельных повреждений, их слияние в магистральную трещину, а также учесть нестационарность процесса нагружения, временные эффекты, т.е. практически все особенности развития разрушения на микроструктурном уровне. Однако необходимо заметить, что непосредственная реализация этих моделей на электронной вычислительной машине (ЭВМ) требует введения упрощающих гипотез, что существенно снижает общность подхода.

В работах В. П. Тамужа [17] развитие кинетических статистических моделей разрушения идет в двух направлениях. Первое состоит в построении теории дисперсного разрушения твердого тела при сложном напряженном состоянии. Это направление опирается на статистические теории пластичности и на теории длительной прочности А. А. Ильютина, Ю. Н. Роботнова, Л. М. Качанова [1], в которых статистическое накопление повреждений в объеме тела не связывается с какими-либо конкретными видами дефектов материала или микромеханизмами разрушения.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Второе направление состоит в учете конкретных механизмов разрушения, их кинетики и статистики, например, на субмикроструктурном уровне для композиционных материалов. Полимерный материал представляется состоящим из совокупности элементов, размеры которых соответствуют размерам зародышевых трещин, и предполагается, что вероятность разрушения элемента описывается зависимостью, допускающей термоактивационную интерпретацию элементарных актов разрушения [17]. Возникающие дефекты разных размеров представлялись в виде сфероидов, что позволило рассчитывать концентрацию напряжений в элементах, соседствующих с разрушенными, и учитывать ее при определении вероятности разрушения соответствующих элементов.

При построении модели разрушения композиционного материала [1, 17] использовались представления, аналогичные тем, которые применялись Розеном [15], учитывалась зависимость прочности волокон от времени. Это достигалось введением двойного (по времени и по напряжениям) статистического распределения типа вейбулловского. При расчете локальных перегрузок волокон в окрестностях дефектов применялась одномерная объемная модель, учитывающая упругопластические свойства матрицы. Очаги разрушения, содержащие несколько разрушенных волокон, представлялись в виде дискообразных трещин.

Анализ кинетики накопления повреждений, проведенный В. П. Тамужем, показал, что большинство единичных разрывов волокон, возникает в начале нагружения и их концентрация в процессе нагружения изменяется незначительно, в то же время количество крупных дефектов возрастает с течением времени вплоть до окончательного разрушения материала. Следует заметить, что, хотя модель дает возможность проследить кинетику дефектов различной величины, в ней не учитывается взаимодействие дефектов, развивающихся из различных центров, не учитывается возможность образования крупных ансамблей дефектов за счет слияния более мелких.

В ином аспекте развития разрушения во времени представлено в модели Д. Лифшица [18], который также, развивая модель Б. Розена [15], учитывает кинетику уменьшения несущей способности концевых участков разрушившихся волокон за счет релаксации касательных напряжений в матрице. При этом уменьшение несущей способности концевых участков волокон, по Д. Лифшицу, эквивалентно накоплению новых разрывов волокон.

Оценивая рассмотренные кинетические модели в целом, необходимо отметить, что, несмотря на универсальность аналитических методов, в рамках кинетических вероятностей моделей пока не удается в полной мере преодолеть барьер, отделяющий кинетику накопления повреждений в объеме материала и кинетику развития отдельных очагов разрушения. Хотя оба эти процесса могут быть описаны единой системой уравнений, численная реализация ее на ЭВМ вызывает принципиальные трудности, что неизбежно ставит вопрос о рациональности той или иной модели с точки зрения громоздкости вычислений и информативности получаемых результатов.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

В ряде случаев представляется целесообразным выделение двух этапов в развитии процесса разрушения на макроструктурном уровне. Первый этап – это этап статистического накопления повреждений при увеличении нагрузками или с течением времени, второй – это лавинные процессы разрушения микрообъемов материала при некоторой фиксированной нагрузке или фиксированном во времени.

В предположении, что на этапе статистического накопления повреждений накопление разрывов волокон происходит во всем объеме материала, была разработана модель, позволяющая прогнозировать диаграммы растяжения композитов с хрупкими волокнами [1]. Для композитов с небольшими объемными долями волокон, т.е., когда разрывы отдельных волокон не приводят к существенной перегрузке соседних и не вызывает их последующего разрушения, получены аналитические выражения функций накопления повреждений, основанные на аппроксимации распределений прочности исходных волокон.

Анализ особенностей накопления повреждений и сопротивления материалов действующим нагрузкам в зависимости от условий нагружения с позиций синергетики приводит к заключению о возможности управления свойствами композиционных материалов путем целенаправленного использования кооперативных эффектов пластического деформирования и разрушения структурных элементов, т.е. эффектов, отражающих свойство самоорганизации диссипативных структур. Широкие перспективы в этом направлении открывает соединение подходов синергетики с возможностью компьютерной имитации механизмов деформирования и разрушения материалов на различных структурных уровнях.

ВЫВОДЫ. При исследовании процессов разрушения композиционных материалов на макроструктурном уровне в ряде случаев необходимо учитывать целый комплекс факторов, которые имеют случайный характер, например, разброс прочности волокон, разброс прочности связи компонентов, случайные отклонения в укладке волокон и т.д. Таким методом, который позволяет наиболее полно учесть и синтезировать разнообразную информацию о статистических свойствах компонентов, их связи и укладке, а также позволяет систематически исследовать роль отдельных факторов и их влияние на развитие разрушения материала, является структурно-имитационное моделирование на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинский А. С. Процессы разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1988. – 278 с.
2. Ван Фо Фы Г. А. Теория армированных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 181 с.
3. Паньков А. А. Статистическая механика пьезокомпозитов. – Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2009. – 480 с.
4. Болотин В. В. К механике разрушения композиционных материалов // Проблемы прочности. – 1981. – № 7. – С. 17–28.
5. Эберт Л. Математическая модель механического поведения поверхностей раздела в композиционных материалах // Волокнистые композиционные материалы. – М.: Мир, 1967. – С. 110–137.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

6. Упрочнение металлов волокнами / В. С. Иванова, И. М. Копьев, Л. Р. Ботвина, Т. Д. Шермергор. – М.: Наука, 1973. – 207 с.
7. Вильчек М. И. Некоторые результаты экспериментального изучения распределения напряжений у конца моноволокна // Механика полимеров. – 1972. – № 2. – С. 262–266.
8. Винер Н. Кибернетика. – М.: Советское радио, 1968. – 100 с.
9. Школьный П. А. Сцепление арматуры с бетоном // Проблемы прочности. – 1972. – № 8. – С. 30–35.
10. Михайлов А. М. О разрушении однонаправленного стеклопластика // Изв. АН СССР. МТТ. – 1973. – № 5. – С. 131–139.
11. Райнович А. Л. Введение в механику армированных полимеров. – М.: Наука, 1970. – 200 с.
12. Роботнов Ю. Н. Механика композитов // Вестник АН СССР. – 1979. – № 5. – С. 50–58.
13. Zweben C. Tensile failure of fiber components // AIAA. – 1968. – Vol 6. – P. 23–25.
14. A statistical theory of materials strength with application to composite material / C. Zweben, B. W. Posen // J. Mech and Phys. Solids. – 1970. – Vol. 18. – P. 189–206.
15. Розен Б. Механика упрочнения композиций // Волокнистые композиционные материалы. – М.: Мир, 1967. – С. 54–96.
16. Милейко С. Т. Макро- и микротрещины в композитах // Разрушение композиционных материалов. – Рига: Зинатне, 1979. – С. 13–16.
17. Микромеханика разрушения полимерных материалов / В. П. Тамуж, В. С. Куксенко. – Рига: Зинатне, 1978. – 294 с.
18. Лифшиц Дж. Замедленное разрушение волокнистых композитов // Композитные материалы. – М.: Мир, 1978. – Т. 5. – С. 267–332.

STATISTICAL APPROACHES TO RESEARCH OF DESTRUCTIONS PROCESSES IN COMPOSITION MATERIALS

S. Skipochka, T. Palamarchuk, N. Bobro, L. Prokhorets

M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU)

vul. Simferopolskaya, 2-A, Dnepropetrovsk, 490005, Ukraine.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

It is shown in the article, that at research of destruction processes in composition materials at macrostructural level in a number of cases it is necessary to take into account the whole complex of factors, which have a casual character, for example, throwing of strength of fibres, throwing of strength of components communication, casual rejections in piling of fibres and etc. By such method, which allows most complete to take into account and synthesize various information about statistical properties of components, their communication and piling, and also allows systematic to explore the role of separate factors and their influence on development of destruction of material, there is the structural-imitation design on COMPUTER.

Key words: statistical methods, composition materials, destruction, accumulation of damages.

REFERENCES

1. Ovchinskiy, A. S. (1988), *Protsess razrusheniya kompozitsionnykh materialov* [Processes of destruction of composition materials], Nauka, Moscow, Russia.
2. Van Fo Fy, G. A. (1971), *Teoriya armirovannykh materialov* [Theory of the reinforced materials], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Pankov, A. A. (2009), *Statisticheskaya mekhanika pezokompozitov* [Statistical mechanics of piesocomposite], Izdatelstvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, Perm, Russia.
4. Bolotin, V. V. (1981), “To mechanics of destruction of composition materials”, *Problemy prochnosti*, no. 7, pp. 17–28.
5. Ebert, L. and Gedd, Dzh. (1967), “Mathematical model of mechanical conduct of surfaces of section in composition materials”, *Voloknistye kompozitsionnye materialy* [Fibred composition materials], Mir, Moscow, Russia, pp. 110–137.
6. Ivanova, V. S., Kopev, I. M., Botvina, L. R. and Shermergor, T. D. (1973), *Uprochnenie metallov voloknami* [Consolidating of metals by fibres], Nauka, Moscow, Russia.
7. Vilchek, M. I. (1972), “Some results of experimental study of distributing of tensions at the end of monofibre”, *Mekhanika polimerov*, no. 2, pp. 262–266.
8. Viner, N. (1968), *Kibernetika* [Cybernetics], Sovetskoe radio, Moscow, Russia.
9. Shkolnyu, P. A. (1972), “Coupling of armature with a concrete”, *Problemy prochnosti*, no. 8, pp. 30–35.
10. Mikhaylov, A. M. (1973), “About destruction of unidirectional glass-reinforced plastic”, *Izv. AN SSSR. MTT*, no. 5, pp. 131–139.
11. Raynovich, A. L. (1970), *Vvedenie v mekhaniku armirovanykh polimerov* [Introduction to mechanics of the reinforced polymers], Nauka, Moscow, Russia.
12. Robotnov, Yu. N. (1979), “Mechanics of composites”, *Vestnik AN SSSR*, no. 5, pp. 50–58.
13. Zweben, C. (1968), “Tensile failure of fiber components”, *AIAA*, vol 6, pp. 23–25.
14. Zweben, C. and Posen, B. W. (1970), “A statistical theory of materials strength with application to composite material”, *J. Mech and Phys. Solids*, vol 18, pp. 189–206.
15. Rozen, B. (1967), “Mechanics of consolidating of compositions”, *Voloknistye kompozitsionnye materialy* [Fibred composition materials], Mir, Moscow, Russia, pp. 54–96.
16. Mileyko, S. T. (1979), “Macro- and microcracks in composites”, *Razryshenie kompozitsionnykh materialov* [Destruction of composition materials], Zinatne, Riga, Latvian, pp. 13–16.
17. Tamuzh, V. P., Kuksenko, V. S. (1978), *Mikromekhanika razrusheniya polimernykh materialov* [Micromechanic of destruction of polymeric materials], Zinatne, Riga, Latvian.
18. Lifshits, Dzh. (1978), “Slow destruction of fibred composites”, *Kompozitnye materialy* [Composite materials], Mir, Moscow, Russia, vol. 5, pp. 267–332.

Стаття надійшла 04.03.2015.