

УДК 539.422.5

## МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТА ИЗ ХРУПКИХ КОМПОНЕНТОВ В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

© 2011 г.

К.А. Хвостунков<sup>1</sup>, А.Г. Шпенев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

khvostunkov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается проблема создания высокотемпературного композита из хрупких компонентов, обладающего нехрупким поведением в целом. Исследуются условия оптимизации свойств покрытия и неидеальности самих волокон для достижения максимальной диссипации энергии в процессе вытягивания волокна из матрицы при раскрытии берегов магистральной трещины. Рассматривается модель однонаправленного композита с трещиной, ортогональной волокнам, в условиях установившейся ползучести при малоцикловом усталостном трехточечном нагружении.

*Ключевые слова:* композит, хрупкие волокна, вытягивание волокна, диссипация энергии, разрушение композита, малоцикловая усталость, установившаяся ползучесть.

### Диссипация энергии при вытягивании волокна с неидеальным покрытием

Получена зависимость величины работы вытягивания волокна от касательного напряжения в его покрытии, представленная на рис. 1.

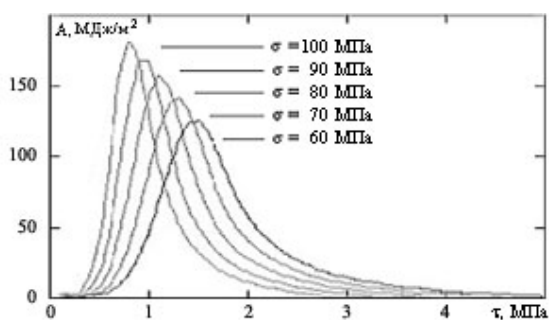


Рис. 1

Существует область величин касательных напряжений, определяемых неидеальностью покрытия волокна, в которой уровень диссипации энергии достигает максимума. Определены оптимальные границы параметра  $\beta$ , отвечающего в распределении Вейбулла за разброс прочности в пучке волокон (рис. 2).

При стремлении касательных напряжений к нулю (фактически – полному разрушению покрытия) система волокно–матрица перестает работать, что приводит к резкому падению уровня рассеиваемой энергии при вытягивании волокна. При идеально сплошном покрытии, порождающем максимальные касательные напряжения, вероят-

ность обрыва волокна в плоскости магистральной трещины стремительно возрастает, что в итоге приводит к аналогичному стремлению к нулю величины работы вытягивания волокна.

Поиск оптимальной «неидеальности» осложняется тем, что в условиях переменных нагрузок

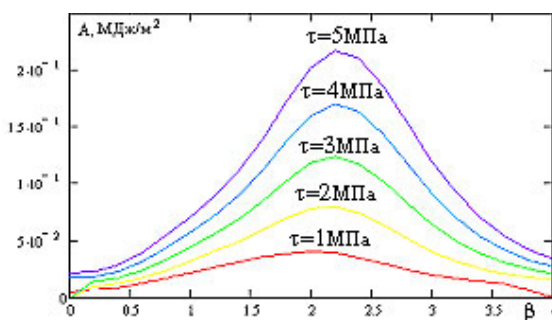


Рис. 2

и температур слабая граница волокна/матрица может стремительно деградировать. Рассматриваемая модель [1] дает возможность учесть эти изменения.

### Деградация покрытия волокна при малоцикловой усталости

При определении оптимальных свойств покрытия волокна надо учитывать факт деградации покрытия в случае его неидеальной сплошности. Иллюстрацией может служить график зависимости скорости прогиба середины стержня в установившемся режиме ползучести при трехточеч-

ном изгибе [2] (рис. 3). За шесть шагов скорость возросла на один порядок.

Процесс деградации (роста поврежденности) покрытия волокна предлагается моделировать на основе процесса износа зоны контакта волокно-матрица на каждом шагу по нагрузке-разгрузке [1].

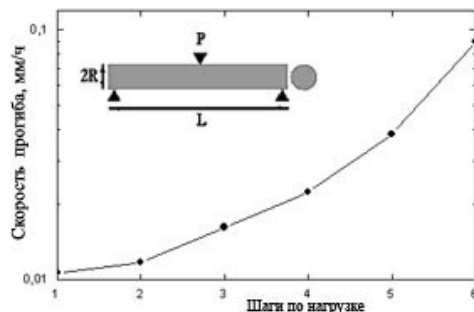


Рис. 3

Касательное напряжение  $\tau_s$  задается по закону сухого трения в зависимости от распределенного нормального усилия, взятого в виде функции от продольной координаты и величины продольного перемещения волокна:  $q = q(y, u)$ .

Для определения функции  $q(y, u)$  получено уравнение:

$$q(y, u) = q_0 - A_1 \int_0^u q(y, t) dt - A_2 \int_0^{L-u} q(t, u) dt + A_3 \int_0^y q(t, u) dt.$$

Первое слагаемое отвечает за величину поперечных напряжений, возникающих при создании композита, второе учитывает износ покрытия за счет истирания, третье слагаемое отвечает за Пуассоновское сужение волокна, в то время как четвертое слагаемое учитывает вклад матрицы.

#### A FRACTURE MODEL FOR A BRITTLE COMPOSITE WITHIN THE THREE-POINT BENDING LOW-CYCLE FATIGUE TEST

*K.A. Khvostunkov, A.G. Shpenev*

The problem of creating heatresistant composites with brittle components is considered. The conditions for optimal fiber coating and for maximum energy dissipation due the fiber pull-out mechanism are investigated. The model of unidirectional fiber composite with a crack within the steady state creep and low-cycle three-point bending fatigue test is studied.

*Keywords:* composite, brittle fibers, fiber pull-out, energy dissipation, composite fracture, low cycle fatigue, steady state creep.

В итоге получена теоретическая зависимость сплошности поверхности раздела от напряжения на разных циклах нагружения в соответствии с моделью абразивного износа в поверхности контакта волокно/матрица (рис. 4). Чем дальше от нейтральной оси стержня в условиях трехточеч-

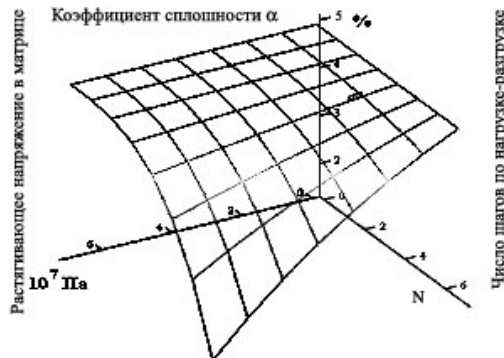


Рис. 4

ного изгиба, тем быстрее идет процесс истирания и деградации зоны покрытия, причем для внешних слоев достаточно менее десяти шагов для полного разрушения зоны контакта волокно/матрица.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №09-08-01267-а.*

#### Список литературы

1. Khvostunkov K.A., Shpenev A.G. Fatigue fracture model for weak fiber/matrix interface composite within three point bending test // Key Engineering Materials. 2011. V. 465. P. 161–164.
2. Mileiko S.T., Kiiko V.M., Khvostunkov K.A. Creep of composites with a porous fiber/matrix interface under variable loading // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Elsevier. 2006. V. 45, No 1. P. 41–45.