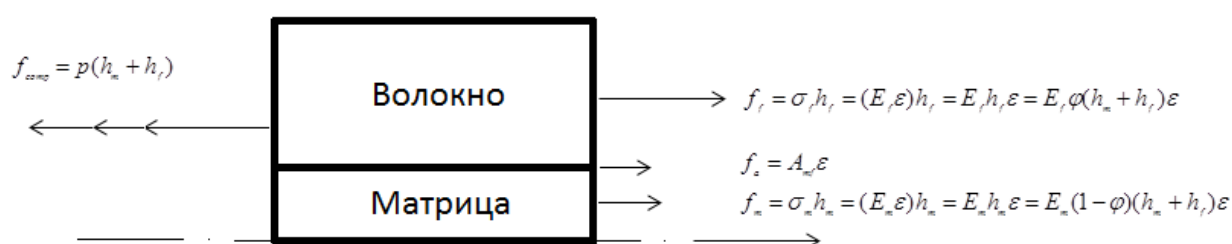


АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ PULL-OUT ЭКСПЕРИМЕНТУ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ СИСТЕМЫ ВОЛОКНО-МАТРИЦА.

Введение.

Работе [1] исследованы свойства волокнистого композиционного материала, представленного ячейкой периодичности, показанной на рисунке, учитывающей адгезионные взаимодействия волокна с матрицей.



Здесь f, σ, E, h - соответственно сила, напряжение, модуль Юнга, поперечный размер (высота) фазы. Индексом f отмечены параметры, относящиеся к волокну (fiber) индексом m - параметры, относящиеся к матрице (matrix). p - внешняя распределенная нагрузка (напряжение), ε - однородная деформация растяжения (волокна, матрицы, композита), f_{comp} - внешняя растягивающая сила, действующая на композит, f_a - внутренняя адгезионная сила, A_{mf} - адгезионный модуль пары волокно-матрица. Исследование проводилось в предположении физической линейности адгезионной силы f_a .

Методика экспериментального определения величины адгезионного модуля пары волокно-матрица A_{mf}

В соответствии и с учетом введенного понятия адгезионной силы, можно записать условие глобального равновесия ячейки периодичности следующим образом:

$$f_{comp} = f_f + f_m + f_a \quad (1)$$

Здесь:

$$f_{comp} = p(h_m + h_f) \quad (2)$$

- сила растяжения композита,

$$f_f = \sigma_f h_f = (E_f \varepsilon) h_f = E_f h_f \varepsilon = E_f \varphi (h_m + h_f) \varepsilon \quad (3)$$

- сила растяжения волокна,

$$f_m = \sigma_m h_m = (E_m \varepsilon) h_m = E_m h_m \varepsilon = E_m (1 - \varphi) (h_m + h_f) \varepsilon \quad (4)$$

- сила растяжения матрицы,

$$f_a = A_{mf} \varepsilon \quad (5)$$

- адгезионная сила на границе контакта волокно-матрица.

Подставляя в (1) определения сил (2)-(5), получим:

$$p(h_m + h_f) = E_f \varphi (h_m + h_f) \varepsilon + E_m (1 - \varphi) (h_m + h_f) \varepsilon + A_{mf} \varepsilon$$

Таким образом, зная среднестатистическое расстояние между волокнами $(h_m + h_f)$, растягивающее напряжение p , приложенное к композиту, среднюю деформацию композита ε при напряжении p , относительную объемную долю волокон φ в композите, а также заранее определённые модули Юнга волокна E_f и матрицы E_m , можно определить по экспериментальным данным и адгезионный модуль пары волокно-матрица.

$$A_{mf} = \left[\frac{p}{\varepsilon} - E_f \varphi - E_m (1 - \varphi) \right] (h_m + h_f) \quad (6)$$

Здесь A_{mf} , p и ε - соответственно величины адгезионного модуля, растягивающего напряжения в композите и средней по сечению деформации растяжения композита.

Специфика и сложность этого эксперимента заключается в том, что адгезионные свойства исследуемой пары «рождаются» при изготовлении композита и во многом определяются качеством технологии изготовления образцов. Поэтому даже в одном образце локальные адгезионные свойства могут и, в общем случае будут, различны. Они должны зависеть от локальной степени загрязнения волокна, качества локальной пропитки и других технологических факторов.

Методика экспериментального определения величины адгезионного предела прочности.

В рамках методики определения величины адгезионного модуля пары волокно-матрица A_{mf} предположим, что на некотором шаге нагружения произошло разрушение композита. Это событие можно истолковать в трех различных вариантах:

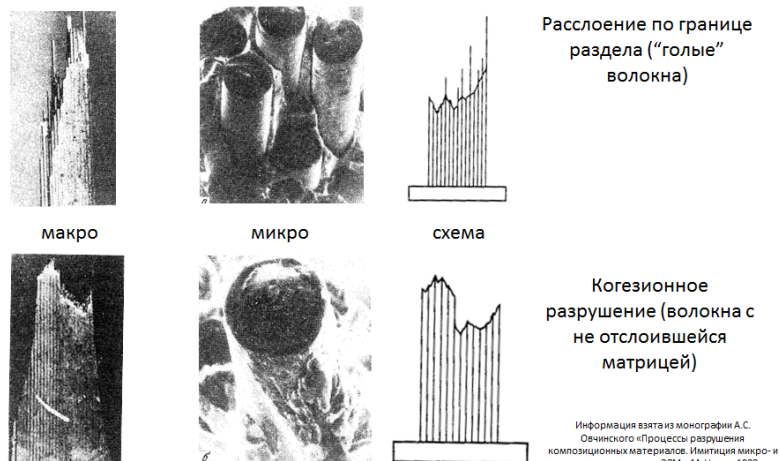
Произошло когезионное разрушение волокна, а затем и композита в целом.

Произошло когезионное разрушение матрицы, а затем и композита в целом.

Произошло разрушение адгезионных связей между волокном и матрицей (расслоение, деламинация), а затем и композита в целом.

Сортировку экспериментальных образцов можно осуществить по схеме, показанной на рисунке ниже[2]:

Отбор испытанных образцов по модам разрушения волокнистого композита



Если на микрофотографиях поверхности разрушения видны «голые» (не облепленные остатками матрицы) волокна или аккуратные дырки в матрице от выдернутых волокон – образец разрушился из-за первоначального разрушения адгезионных связей между волокном и матрицей. Такую ситуацию иллюстрирует первый ряд рисунка.

Если поверхность разрушения локально совпадает с поверхностью, нормальной к осям волокон, можно с уверенностью говорить, что произошло когезионное разрушение волокна или матрицы, при этом адгезионные связи между волокном и матрицей сохранились неразрушенными. Даже если разрушение проходило по матрице так, что можно различить отдельное волокно, его цилиндрическая поверхность должна быть не «голой», а покрытой остатками неразрушенной матрицы. Такую ситуацию иллюстрирует второй ряд рисунка.

Таким образом, есть вполне логичный алгоритм отбора тех образцов, которые разрушились из-за низкой адгезионной прочности связей волокно-матрица.

Из соотношений (3), (4) и (5) для отобранных образцов следуют три условия прочности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{bf} \geq E_f \varepsilon_{kp} \\ \sigma_{bm} \geq E_m \varepsilon_{kp} \\ \sigma_a = \frac{|A_{mf}|}{(h_m + h_f)} \varepsilon_{kp} \end{array} \right. \quad (7)$$

Предварительно, отдельно для волокна, и отдельно для матрицы могут быть определены предельные деформации $\varepsilon_{bf} = \sigma_{bf} / E_f$ и $\varepsilon_{bm} = \sigma_{bm} / E_m$. Обычно, $\varepsilon_{fb} < \varepsilon_{mb}$, т.е. предельная деформация волокна меньше предельной деформации матрицы. С учетом анализа микрофотографий, приведенных выше, можно утверждать, что для композитов, склонных к деламации/расслоению $\varepsilon_{kp} < \varepsilon_{bf}$, а для качественно изготовленных композитов, не склонных к деламации, $\varepsilon_{kp} = \varepsilon_{bf}$.

Последнее равенство дает возможность экспериментального определения величины адгезионного предела прочности σ_a по известной критической

средней деформации растяжения композита $\varepsilon_{sp} < \varepsilon_{bf}$, адгезионному модулю A_{mf} и среднестатистическому расстоянию между волокнами $(h_m + h_f)$.

Предложенный метод обладает преимуществом перед существующими. Так в [3] описан классический pull-out эксперимент над единственным волокном, выдергиваемым из капли связующего, заполимеризованного между двумя более толстыми волокнами.

В [4] предложен метод определения угла смачивания связующим десятка волокон, снаряженных в жесткую рамку. Его можно использовать и для pull-out эксперимента для увеличения производительности испытаний в десять раз.

Предложенный метод позволяет одновременно испытывать до сотни тысяч волокон, что позволяет получить более надежные и достоверные экспериментальные данные.

Список использованной литературы.

1. Нелюб В.А. «Характеристики межфазных слоев полимерных композиционных материалов», Клеи. Герметики. Технологии, 2013, №6, стр. 23-25.
2. Овчинский А.С. «Процессы разрушения композиционных материалов. Имитация микро- и макро процессов на ЭВМ», М., Наука, 1988, 280 стр.
3. Горбаткина Ю.А. «Адгезионная прочность в системах полимер-волокно», Химия, 1987, 192стр.
4. Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., «Армированные пластики—современные конструкционные материалы»