

УДК 620:678

**РАЗРУШЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ  
ДЕФОРМИРОВАНИИ**

**Саркисян Н.Е., Саркисян Н.Н.**

**Ն.Ե.Սարգսյան, Ն.Ն.Սարգսյան**

**Թեղիկավոր կոմպոզիտային նյութերի քայքայման երկարատև և ցիկլիկ ձևախախտման դեպքում**

Հետազոտված է շերտավոր կոմպոզիտային նյութերի քայքայման մեխանիզմը կառճատև ստատիկ և երկարատև ցիկլիկ բեռնավորման դեպքերում: Վերլուծությունը հիմնված է ապակե-, աջիե- և օրգանապլաստների ամրության, ձևախախտման և քայքայման փորձարարական հետազոտման մեծածավալ արդյունքների ուսումնասիրության վրա, նրանց սակավացիկային և բազմացիկլային հոգնածության պայմանների դեպքում ձգման, սեղմման, սիմետրիկ ցիկլով ձգման-սեղմման, հարթ մաքուր ծռման և միջշերտային սահքի պայմաններում: Դիտարկված է սիմետրիկ կենտրոնական անցքի և մակերևույթային ճեղքի տեսք ունեցող լարումների կուտակիչների ազդեցությունը նյութի վնասվածության գործընթացի զարգացման վրա: Ուսումնասիրված է ճաքերի ծագման, կուտակման և տարածման առանձնահատկությունները, կախված կոմպոզիտի ամրանավորման կառուցվածքից և բեռնավորման ուղղությունից: Նկարագրված են հոգնածային ճաքերի ծագման և տարածման երեք փուլեր, որոնք միասին վերցրած բերում են կոմպոզիտի քայքայմանը: Քննարկվում են թեղիկավոր կոպոզիտների քայքայման էմպիրիկ մոդելի կառուցման հարցեր, որոնք հաշվի են առնում նյութի լարվածային վիճակի և երկարատև ցիկլիկ բեռնավորման հիմնական բնութագրիչները:

**N.E.Sargsyan, N.N.Sargsyan**

**Destruction Of Fiber Composite Material Under Long Term Cycle Deformation**

Researched the laminar composite materials failure mechanism under the static short-term and cyclic long-term loading. The analysis reasoning on the results of extensive experimental studies of strength, deformability and failure of glass-fiber, black-reinforced and organoplast materials under the stipulation that low-cycle and high-cycle fatigue are under the stretching, pressuring, symmetric stretching-pressuring cycle, simple bending and interlaminar shift. Considered the impact of symmetrical cut stress concentrator and central round outlet into the process of material development of failure. Studied the characteristics of crack birth process, their accumulation and extension depend upon the structure of armoured composite material and loading direction. Described three stage of fatigue crack beginning and spreading which is in aggregate bring to damage of composite. Discussed the questions of fibrous composite damaging empirical model considering the major characteristics of strained state and cyclic warping duration.

Исследован механизм разрушения слоистых композитных материалов при кратковременном статическом и длительном циклическом нагружении. Анализ основан на результатах обширного экспериментального исследования прочности, деформативности и разрушения стекло-, угле- и органопластиков в условиях мало- и многоциклового усталости при растяжении, сжатии, симметричном цикле растяжения-сжатия, плоского чистого изгиба и межслойного сдвига. Рассмотрено влияние на процесс развития повреждаемости материала концентратора напряжений в виде симметричного поверхностного надреза и центрального кругового отверстия, соответственно проведённых в плоскости армирующего слоя и перпендикулярного к нему направления. Изучены особенности процесса зарождения трещин, их накопления и распространения в зависимости от структуры армирования композита и направления нагружения. Описаны три этапа возникновения и распространения усталостных трещин, в совокупности приводящих к разрушению композита.

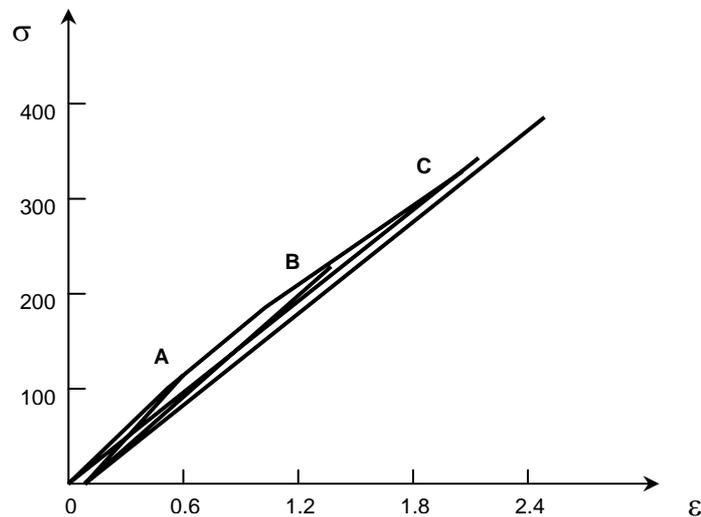
Исследованию процессов зарождения и развития усталостных трещин в конструкционных материалах посвящено множество статей, обзоров, монографий и т.д. Проблема разрушения материалов особенно актуальна в связи с ужесточением температурно-силовых и других условий эксплуатации конструкций и элементов, повышением требований к их надежности и долговечности ([1-2] и др.).

Целью настоящей работы является исследование макрохарактера усталостного разрушения полимерных армированных композитных материалов в условиях длительного циклического деформирования. Работа основывается на результатах экспериментального исследования усталостной прочности, деформативности и разрушения волокнистых композитных материалов, опубликованных в [3-10], ранее нами не опубликованных данных и на известных положениях механики разрушения армированных сред. Объектом исследования служат ориентированные слоистые пластики, изготовленные на основе различных модификаций эпоксидных смол. Наполнителем для этих композитов служат органические и неорганические материалы типа органических, углеродных и стеклянных волокон. Экспериментальные результаты соответствуют испытаниям плоских образцов в виде двухсторонней лопатки и прямоугольной полоски. Образцы были как гладкие (без концентратора напряжений) и с концентраторами напряжений в виде центрального кругового отверстия или поверхностного надреза. Рассматриваются случаи длительного симметричного растяжения-сжатия, пульсирующего цикла растяжения и сжатия, а также плоского чистого изгиба и межслойного сдвига образцов, вырезанных из готового пластика в направлениях армирования и в промежуточных к ним направлениях. Указанные испытания соответствуют областям мало- и многоциклового усталости материалов. При этом частота циклического нагружения фиксировалась в пределах, соответственно, 1-3 и 800-3600 цикл./мин. Продолжительность циклического деформирования (база испытаний) составляла соответственно  $1000$  и  $10^6$  циклов.

Проведено визуальное и микроскопное изучение процессов зарождения и дальнейшего развития повреждаемости материалов (усталостных трещин) при длительном переменном деформировании образцов композита. В результате исследований установлено, что основной причиной разрушения композитного материала является зарождение трещины в полимерном связующем или возникновение трещины на поверхности раздела «армирующее волокно-полимерная матрица», а не разрыв отдельно взятых армирующих волокон. В каждом из рассмотренных случаев нагружения кривая зависимости «напряжение-деформация» статического кратковременного растяжения материала может быть представлена ломанной диаграммой, состоящей из двух или трёх линейных участков. Точки слома этой диаграммы определённо указывают на особенности процесса развития повреждаемости материала на различных стадиях его сопротивления разрушению и на скачкообразный характер накопления механических повреждений во времени вплоть до его окончательного разрушения, т.е. излома образца. Установлены экспериментальные значения напряжений и деформаций, соответствующих указанным точкам слома диаграммы деформативности. Эти напряжения, например, для нижней точки слома (перегиба) диаграммы статической деформируемости находятся в пределах 0,1-0,25 от предела кратковременной прочности композита и зависят от типа наполнителя, степени ортогонального армирования, угла линии действия нагрузки относительно направления волокон, а также других свойств композита. На фиг.1, в частности, приведены кривые растяжения и разгрузки образцов, иллюстрирующие сопротивляемость стеклопластика разрушению при повторно-статическом нагружении.

Циклическое деформирование материала в итоге приводит к образованию магистральной трещины. При этом, на фазе образования микротрещин, их накопления и зарождения магистральной трещины развитие повреждаемости происходит в

области опасного сечения образца материала. Основная часть настоящего исследования проведена на стекловолокнистых слоистых пластиках, что даёт возможность последующего отделения (отслаивания) армирующих слоёв друг от друга и осуществить описание характера повреждаемости композита, т.е. его дефектацию.



Фиг.1. Типовая диаграмма растяжения разгрузки ортогонально-армированного стеклопластика. Разгрузка начинается с точек А, В, С.

Усталостное разрушение испытанных здесь композитных материалов имеет объёмный характер и развитие повреждаемости происходит не только в плоскостях параллельных максимальным напряжениям, но и в соседних к ним сечениях.

Поверхность повреждаемости, в частности, у образцов с концентратором напряжения в виде центрального кругового отверстия, в опасном сечении имеет вид параболоида вращения с вершиной у поверхности концентратора с геометрической осью, перпендикулярной к линии действия нагрузки.

Как показывают расчёты, в ходе разрушения материала температура его циклического разогрева, имеющего место в области многоциклового усталости, незначительно влияет на общую меру повреждаемости, т.е. чисто механический характер процесса повреждаемости существенно превалирует над тепловым размягчением и разрушением материала из-за влияния теплового поля напряжений.

Композитный материал может иметь ряд различных плоскостей, по которым его механические свойства проявляются достаточно слабо, что является следствием особенностей микроструктуры материала. Локальные разрушения начинаются именно в этих плоскостях и, в основном, обусловлены действием касательных напряжений, по отношению к которым, как известно, слоистые композитные материалы слабо сопротивляются.

В наших предыдущих работах, а также другими авторами ранее установлено, что такого характера макроразрушения композита определённым образом снижает влияние концентратора напряжения на ход процесса разрушения, несколько сглаживая пиковые значения полей напряжений. Эта особенность слоистых композитных материалов резко отличает их от механического поведения под нагрузкой традиционных изотропных конструкционных материалов, типа металлов и сплавов.

В качестве критерия разрушения принимается нарушение сплошности среды в полимерной матрице или граничной поверхности «волокно-матрица», которые являются следствием зарождения микротрещин и их определённого накопления в

первичной стадии сопротивления материала. В подобных случаях значение напряжения вблизи некоторого повреждённого участка или их группы превосходит определённое предельное значение, которое может быть названо критической величиной напряжения, соответствующего так называемому нижнему порогу трещинообразования материала.

В соответствии с современной оценкой потери несущей способности композита, их разрушение начинается с процесса зарождения трещины в окрестности имеющегося в материале исходного дефекта различного происхождения и в дальнейшем возникновением и развитием (распространением) трещин на поверхности раздела «матрица-волокно», и, наконец, при наиболее высоких напряжениях, разрывом тех волокон, которые имеют те или иные технологические несовершенства или же какие-то недостатки структуры армирования. Последнее может проявляться разрывом отдельных волокон. Указанными выше явлениями в целом и обусловлено появление отдельных сломов (перегибов) диаграммы деформирования материалов при их кратковременном статическом нагружении вплоть до слома образца.

Таким образом, установлены три основных случая разрушения волокнистых материалов. Они сводятся к появлению повреждения материалов вследствие накопления трещин в полимерной матрице, разрыву или отрыву отдельных волокон от матрицы и накоплению повреждений в некотором слабом звене композита, которые вместе взятые и приводят к конечному разрушению материала.

Слоистые пластики, испытанные в настоящей работе, по-разному сопротивляются деформированию и разрушению при сдвиге в плоскости армирования (слоя) и в перпендикулярном к ней направлении. В первом случае эффект влияния армирования практически отсутствует и прочность композита при сдвиге, в основном, определяется прочностью полимерного связующего и сопротивляемостью адгезионных связей на граничной поверхности «волокно–матрица». Во втором случае, при нагружении в направлении перпендикулярном плоскости армирования, эффект армирования имеет значение, которое существенно возрастает по мере усиления степени ортогонального армирования композита.

Описанные выше три вида процесса разрушения в конечном итоге мало зависят от режима нагружения, а именно: растяжения, сжатия, изгиба и сдвига.

Разрушение стеклопластиков может происходить и от нормальных напряжений, при их действии в плоскости армирующего слоя или же в направлении, перпендикулярном в плоскости армирования. В первом случае разрушение происходит вследствие образования и накопления микротрещин или нарушений связей на граничной поверхности «волокно-матрица». Во втором же случае разрушение происходит из-за отслаивания армирующих слоёв композита друг от друга.

В данной работе, при циклическом деформировании стеклопластиков, в зависимости от взаимного расположения армирующих слоёв, дальнейшее развитие возникающих трещин могло произойти нелинейно, т.е. в некоторых случаях наблюдалось отклонение направления распространения трещины от волокна, а именно: «перепрыгивание» трещины на направление соседнего волокна.

Поскольку в слоистых пластиках могут быть различные плоскости слабого сопротивления разрушению, то, очевидно, что в процессе объёмного разрушения материала распространение трещин может происходить в любом направлении.

Обобщая вышеуказанное, в механизме усталостного разрушения композита можно выделить три характерных процесса:

- зарождение осевых трещин в направлении внешней силы;
- распространение трещин в направлении, перпендикулярном направлению нагружения;

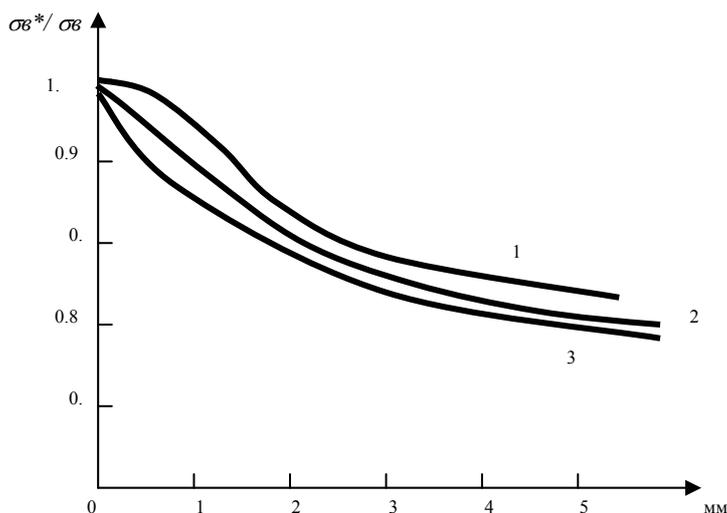
- развитие трещин в направлениях, отличных от направления нагружения, но при этом, одновременно, параллельно направлениям армирующих волокон.

Если материал разрушается при амплитудных значениях напряжения, которые меньше прочности контрольных образцов (предварительно не подвергшихся циклическому деформированию), то это свидетельствует о том, что в процессе продолжительного нагружения в материале происходят необратимые изменения, вызывающие снижение значения его прочностных характеристик до величины действующего циклического напряжения.

Очевидно, что усталостное разрушение волокнистых композитных материалов происходит по трём вышеописанным процессам одновременно.

Циклическое нагружение слоистых пластиков, имеющих слабые участки сопротивления и условия для развития трещин, приводит к нарушению прочностных связей между полимерной матрицей и армирующими волокнами, дальнейшему распространению трещин и отслаиванию слоёв композита друг от друга.

Обработка экспериментальных результатов показывает, что для исследованных стеклопластиков значение предельной деформации разрушения в перпендикулярном к волокнам направлении составляет не более, чем две трети от величины деформации разрушения композита в направлении волокон. В этом заключается причина преждевременного разрушения слоёв композита, уложенных перпендикулярно к основному направлению армирования.



Фиг.2. Влияние длины поверхностного надреза на изменение прочности стеклопластика.

Для иллюстрации на фиг.2 приведены графики, показывающие влияние изменения длины поверхностного надреза на сопротивляемость стеклопластика разрушению при его длительном деформировании (падение прочности стеклопластика). Цифрами 1, 2 и 3 на графиках обозначено количество циклов предварительного растяжения-разгрузки, соответственно, 100, 200 и 400, при напряжении, равном условному пределу малоциклового усталостной прочности на принятой базе испытания. В рассматриваемых испытаниях глубина поверхностного надреза составляла 0,5 мм, при ширине призматического рабочего участка образца 15мм.

Как известно, при одноосном растяжении образцов в виде двухсторонней лопатки, строго говоря, в материале возникает плоское напряжённое состояние. В этом случае причину разрушения часто принято объяснять концентрацией

напряжений, возникающих на концах волокон, выходящих на торцевую поверхность рабочего участка образца (т.н. эффект перерезанных нитей). Вместе с тем, в литературе имеются известные экспериментальные данные [11], подтвержденные нашими работами, которые указывают не только на отсутствие концентраций напряжений у концевых участков волокон, выходящих на торцевую часть рабочего участка образца, но и подтверждают определённую степень их недогруженности во всём процессе кратковременного статического растяжения образца вплоть до момента его излома, когда нагружение происходит в диагональном, по отношению к ортогонально ориентированным волокнам композита, направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 294с.
2. Глушак Б.Л., Новиков С.А., Рузанова А.И., Садырин А.И. Разрушение деформируемых сред при импульсивных нагрузках. Нижний Новгород: Нижегородский Университет. 1992. 192с.
3. Саркисян Н.Е., Саркисян Н.Н. Особенности влияния концентратора напряжений на прочность композитного материала. // Изв. НАН и ГИУА. Сер. «Технические науки». 2003. Т. LVI. №3. С.355-359.
4. Саркисян Н.Е., Саркисян Н.Н. Особенности процесса распространения усталостных трещин вблизи концентратора напряжений в композитных материалах при их осевом растяжении. // Изв. НАН и ГИУА. Сер. «Технические науки». 2003. Т. LVI. №1. С.3-7.
5. Саркисян Н.Е., Саркисян Н.Н. Характер повреждения композитных материалов и оценка снижения их прочности при циклическом деформировании. // Изв. НАН Армении. Механика. 2000. Т.53. №1. С.78-82.
6. Саркисян Н.Е., Карапетян К.А., Хачикян А.Г. Прочность и деформативность слоистых пластиков при сложном нагружении. // Изв. НАН и ГИУА. Сер. «Технические науки». 1998. №1. 5с.
7. Саркисян Н.Е. Расчётная модель анизотропии малоциклового деформативности стеклопластиков. // Механика композитных материалов. 1985. №3. С.437-442.
8. Саркисян Н.Е., Кравченко В.Л., Петров В.С. Влияние УКИ на прочность и деформативность стеклотекстолита при малоциклового растяжении. // Механика композитных материалов. 1979. №1. С.163-165.
9. Саркисян Н.Е. Анизотропия малоциклового усталостной прочности и деформативности стеклопластика при растяжении. // Механика полимеров. 1976. №3. С.425-429.
10. Саркисян Н.Е. Анизотропия статической и циклической деформативности стеклопластиков типа СВМ. // Изв. АН Арм.ССР. Механика. 1971. Т.24. №3. С.61-73.
11. Гольдман А.Я., Савельева Н.Ф. О напряженном состоянии и некоторых особенностях разрушения образцов стеклопластиков при растяжении под углом к направлению армирования. // Механика полимеров. 1967. №6. С.1030-1034.

Ереванский Государственный Университет  
Архитектуры и Строительства

Поступила в редакцию  
18.07.2006