

УДК 620:678.

**АНИЗОТРОПИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЛУЧАЯХ
ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Саркисян Н.Е., Саркисян Н.Н., Казарян А.Н.

Ն.Ե. Սարգսյան, Ն.Ն. Սարգսյան, Ա.Ն. Կազարյան

**Վոլտաճղատային նյութերի ձևախախտելիության հատկությունների անիզոտրոպիան ցիկլիկ
բեռնավորման զանազան դեպքում**

Հետազոտված է ապակե-, աջիւե- և օրգանապլաստների ձևախախտելիության հատկությունների անիզոտրոպիան բարբախող ձգման և սեղանաձև ցիկլով ձգման –հանգստի դեպքերում: Դիտարկված են անընդհատ ձգման հաճախության և հաստատուն ձգման ու պայմանական հանգստի վիճակում գտնվելու տևողությունների փոփոխության ազդեցությունները նշված գործընթացների վրա: Սահմանված է ապակե-, և ածխեպլաստների ձևախախտելիության հատկությունների հաստատունությունը նյութի ամրանավորման ուղղություններով ձգման դեպքում: Ուժի այլ ուղղություններով ազդման դեպքերում, ինչպես նաև օրգանապլաստների դեպքում տեղի է ունենում ձևախախտությունների անընդհատ աճ, պայմանավորված բեռնավորման հաճախությամբ, լարման մակարդակով և թելիկների նկատմամբ բեռնվածքի կողմնորոշման անկյունով:

N.E.Sargsyan, N.N.Sargsyan, A.N.Kazaryan

Anisotropy Of Deformability Behaviour Of Composite Materials Under Different Type Of Cyclic Loading

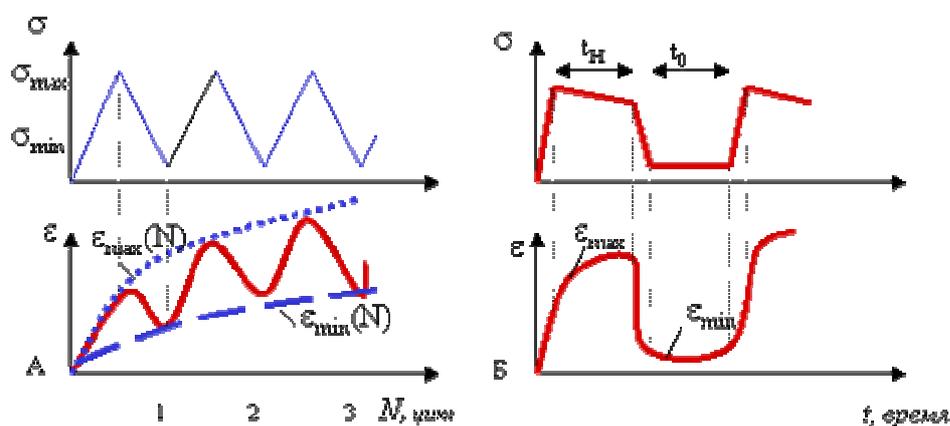
Investigated changing of deformability anisotropy of fiberglass, black-reinforced and organic plastics under pulsating cycle of straining and trapeziform cycle straining-relaxation. Analyzed the impact of persistent loading frequency and loading time into material under the constant loading and conventional relaxation. Established the stability of fiberglass, black-reinforced plastics deformation under straining with grain. The growth of deformation in time depending to loading frequency, strain level and angel orientation depending to fiber are taking place.

Исследовано изменение анизотропии деформативности стекло-, угле- и органопластиков при пульсирующем цикле растяжения и трапециевидном цикле растяжения-«отдыха». Рассмотрено влияние на указанный процесс частоты непрерывного нагружения и изменения продолжительности времени нахождения материала под постоянной нагрузкой и в состоянии условного отдыха. Установлена стабильность деформативных свойств стекло- и углепластиков при растяжении в направлениях армирования. При прочих направлениях действия силы, а также для органопластиков происходит закономерный рост деформации во времени, обусловленный частотой нагружения, уровнем напряжения и углом ориентации нагрузки относительно волокон.

Исследование механического поведения армированных композитных материалов под нагрузкой, в частности, выявления особенностей их сопротивления деформациям и разрушению, представляет большой научный и практический интерес, обусловленный непрерывным ростом объемов производства и расширением областей применения композитов в быстроразвивающихся отраслях современной техники ([1] и др.).

Приобретают приоритетное значение исследования, направленные на установление закономерностей возникновения и развития различного рода механических повреждений, накопление которых во времени может привести не

только к снижению значений характеристик надёжности конструкций и элементов, но и стать причиной преждевременного истощения их несущей способности и разрушения (см., например [2, 3]). При этом продолжает оставаться актуальной комплексная программа экспериментального исследования прочности и деформативных свойств композитных материалов при различных случаях длительного циклического нагружения, отражающих технологические особенности изготовления конструкции и температурно-влажностные и прочие важнейшие условия их эксплуатации. При этом следует отметить, что подавляющая часть опубликованных данных относится лишь к реализациям одного какого-либо простого вида циклической деформации [4-6], в то время как влияние сложного напряжённого состояния изучалось крайне редко [7]. Отметим также, что по исследованию рассматриваемой здесь проблеме имеется относительно небольшое количество работ, при этом их основная часть относится к области многоциклового усталости материала (реализация сравнительно высокой частоты нагружения), в то время как малоцикловая усталость (низкочастотное



нагружение) изучена ещё в меньшей мере.

Фиг.1. Схема изменения напряжений и деформаций во времени, соответствующие пилообразному (а) и трапециевидному (б) циклу нагружения материала.

Целью настоящей работы является исследование анизотропии деформативных свойств армированных полимерных композитных материалов при пульсирующем непрерывном цикле растяжения и повторно-переменном цикле растяжения с «отдыхом».

На фиг.1 приведена схема изменения напряжений и деформаций во времени, которые соответствуют пилообразному (а) и трапециевидному (б) циклу нагружения материала.

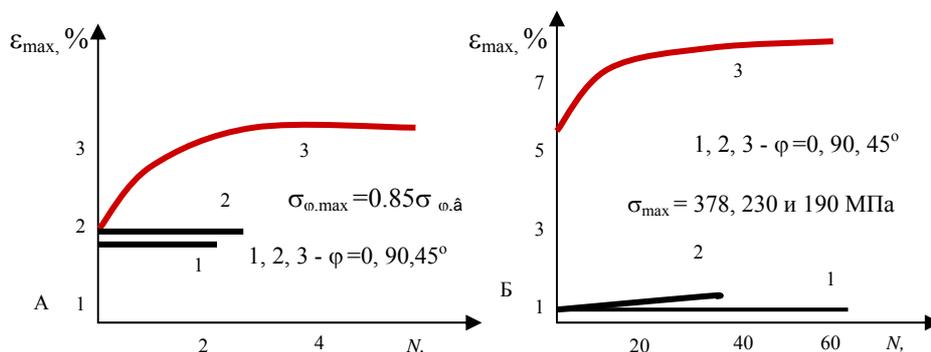
Частота непрерывного малоциклового растяжения составляла 0,5; 1; 2 и 4 цикл/мин. при принятой базе усталостных испытаний, равной 1000 или 10000 циклов. Частота повторно-статического цикла растяжения-«отдыха» зависела от продолжительности времени нахождения образца в состоянии условного отдыха (без нагрузки), которое составляло 15, 30 и 120 мин. и от времени выдержки образца под нагрузкой ($t = 30$ и 60 мин).

Следует отметить, что в рассматриваемом здесь экспериментальном исследовании непрерывное циклическое нагружение-разгрузка образцов происходила не с постоянной скоростью изменения напряжения, что имеет место в обычных усталостных испытаниях, а при постоянной величине скорости деформации, которая для указанных выше частот нагружения соответствовала скоростям холостого перемещения захватов испытательной машины, составляющей соответственно 4; 6; 8 и 10 мм/мин. База испытаний в этом случае деформирования композита была принята равной 24, 48 или 96 циклов.

В работе были испытаны плоские образцы различных форм и геометрий, которые были вырезаны из листов композитного материала в направлениях ортогонального армирования и в промежуточных к ним направлениях. Угол вырезки продольной оси образца φ составлял 0; 15; 30; 45 и 90° и отсчитывался от направления укладки основной части волокон (от направления основы ткани).

В качестве материала для испытаний служили композитные материалы, изготовленные на термопластичных смолах, преимущественно эпоксидных, и в качестве армирующих элементов, имеющие стеклянные, углеродные и органические волокна.

На фиг.2 приведены экспериментальные кривые, которые иллюстрируют анизотропию циклической деформативности ортогонально неравнопрочностно армированных стеклопластиков (стеклотекстолитов) при одинаковом относительном уровне напряжения (а) и одинаковом абсолютном его



значении (б).

Фиг.2. Экспериментальные кривые, иллюстрирующие анизотропию циклической деформативности ортогонально неравнопрочностно армированных стеклопластиков (стеклотекстолитов) при одинаковом относительном уровне напряжения (а) и одинаковом абсолютном его значении (б).

Полученные данные указывают на качественные различия, которые имеются в тех случаях циклического деформирования стеклопластиков, при которых нагружение происходит в направлениях волокон ($\varphi=0^\circ$ и 90°) и в промежуточных к ним направлениях. При растяжении в направлении волокон зависимость деформации $\epsilon \sim N$ от числа циклов нагружения может быть принята линейной вплоть до излома образца.

Рост максимальных значений деформаций ϵ_{\max} по сравнению с величиной первого цикла растяжения не меняется за всё дальнейшее нагружение.

Величина этой деформации практически не отличается от деформации образца при кратковременном статическом растяжении. Во всё время циклического деформирования друг от друга практически не отличаются также и диаграммы нагружения и разгрузки композита. Следовательно, в случаях нагружения композитов в направлениях волокон явление деформационного гистерезиса в процессе циклического нагружения-разгрузки полностью отсутствует. Таким образом, при растяжении в направлениях армирования испытанные здесь композитные материалы проявляют стабильность деформативных свойств вплоть до излома образца и, поэтому, разрушение материала носит чисто хрупкий характер, обусловленный только развитием механической повреждаемости. Отметим, что такую же картину анизотропии циклической деформируемости проявляют углепластики, когда нагружение происходит в направлениях армирующих волокон.

Иную картину представляют случаи циклического деформирования материалов, когда нагружение происходит в направлениях промежуточных к направлениям волокон (фиг. 2,б). В этих случаях максимальные значения деформации ε_{\max} за время продолжительного циклического нагружения возрастают примерно в 1.2-1.8 раза в зависимости от уровня напряжения и угла направления действия нагрузки. Что касается минимальных значений деформаций цикла ε_{\min} , которые соответствуют моментам времени достижения напряжения цикла своего минимального (практически нулевого) значения и обусловленные циклической ползучестью материала, то они практически отсутствуют вплоть до излома образца, если растяжение происходит в направлениях армирования. Между тем, при деформировании композитов в направлениях, промежуточных к направлениям волокон, наблюдается бурный рост минимальных деформаций цикла, значения которых к моменту излома образца могут возрастать по отношению к соответствующему значению первого цикла в 1.2-2.5 раза в зависимости от величины циклического напряжения и угла ориентации линии действия нагрузки. При этом установлено, что когда нагрузка действует в направлениях $\varphi=15^\circ$ и 30° , величина деформации к моменту циклического разрушения практически совпадает со значением деформации статического разрушения образца при его кратковременном растяжении.

При нагружении только в направлении $\varphi=45^\circ$ циклическая деформация разрушения получается заметно больше (8-12% от начального значения в зависимости от свойств композита), чем соответствующая статическая деформация.

В работе исследована кинетика деформативности испытанных композитов $\Pi \sim N$, выявлены количественные характеристики, которые определяют рост деформаций, начиная с первого цикла нагружения вплоть до момента времени излома образца.

Установлено, что на линейном участке графика $\varepsilon_{\max} \sim N$ имеет место двухпараметровая зависимость вида показательной функции между максимальным значением деформации и соответствующим напряжением σ_{\max} . Параметры указанной зависимости не обусловлены величиной напряжения и определяются только углом линии действия нагрузки относительно волокон. Такая же

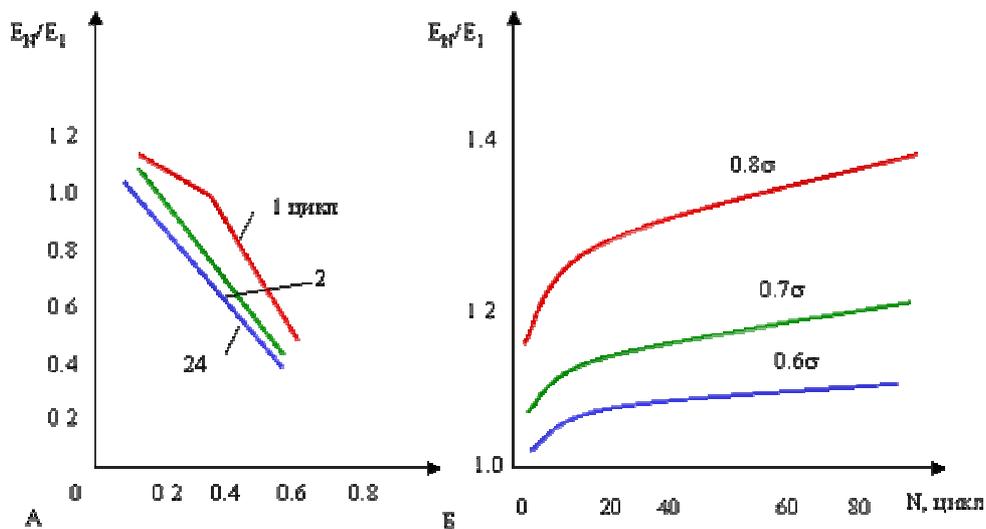
зависимость с несколько иными значениями тех же параметров справедливо также для деформации ε_{\min} [8, 9].

Выводы о деформационном упрочнении органопластика получены впервые и, естественно, нуждаются в дальнейшем подтверждении.

Изучены закономерности изменения деформации ε_{\max} и ε_{\min} при трапециевидном цикле растяжения-отдыха при различных вариантах времени нахождения образца под постоянной нагрузкой и времени его условного отдыха, т.е. нахождения в разгруженном состоянии [8, 9]. Рассмотрено влияние на указанный процесс деформируемости угла φ ориентации линии действия растягивающей нагрузки, количества циклов нагружения и величины относительного уровня напряжения цикла $\sigma_{\varphi\max}=0.2-0.85\sigma_{\varphi}$

Установлено, что эффективность цикличности приложения статической нагрузки в большей мере зависит от свойств композитного материала и ориентации линии действия нагрузки относительно волокон, в то время как изменение временных параметров нахождения образца под нагрузкой t_n и в условиях разгрузки t_o мало влияет на деформативные характеристики исследованных здесь композитов. Для органо- и стеклопластиков, изготовленных на одном и том же полимерном связующем и подвергающихся одинаковым условиям нагружения вдоль волокон, выявлен качественно различный характер изменения деформативных свойств. Значения деформаций ε_{\max} , представляющих сумму условно мгновенной деформации нагружения и деформаций циклической ползучести, накапливаемой во времени, в направлениях промежуточных к волокнам, существенно зависят от количества циклов растяжения и отдыха.

Исследовано явление прямой и обратной (восстановление деформации после снятия нагрузки) ползучести стекло- и органопластиков в зависимости от уровня напряжения и количества циклов нагружения. Построены графики экспериментальных зависимостей $\varepsilon(\sigma, t, N)$, анализ которых позволяет установить взаимосвязи, выражающие меру накапливаемой во времени деформации, скорость изменения деформации, их зависимость от уровня напряжения и количества циклов [8, 9].



Фиг.3. Закономерности изменения циклического модуля упругости при диагональном направлении нагружения стеклопластиков $\varphi=45^\circ$ (а) и однонаправленных органических (б). E_N/E_1 – модуль упругости начального (линейного участка) диаграммы ($\sim \sigma$).

Изучено изменение величины модуля упругости композитных материалов в процессе длительного нагружения по циклу растяжения-отдыха.

Полученные в работе данные, в частности, показывают, что при диагональном направлении нагружения стеклопластиков $\varphi=45^\circ$ (фиг.3,а) и однонаправленных органических (фиг.3,б) закономерности изменения циклического модуля упругости качественно различны.

В условиях, указанных выше случаев, малоциклового растяжения имеет место определённое изменение модуля упругости композита.

Изменение циклического модуля упругости стеклопластиков незначительно (около 10 %) и, как правило, происходит в сторону снижения его значения. При этом можно установить определённую зависимость – чем больше долговечность материала (меньше напряжение), тем больше падение значения E_N . Для испытанных здесь органических, наоборот, наблюдается увеличение циклического модуля упругости (до 13-20 %).

При описанном выше виде нагружения модуль упругости стеклопластика закономерно убывает, при этом на снижение значения E_N в особенности сильно влияют уровень циклического напряжения и угол ориентации нагрузки относительно волокон. Когда $\varphi=45^\circ$, при малом количестве циклов нагружения и сравнительно низких уровнях напряжения, модуль упругости E_N не только не снижается, но, наоборот, наблюдается определённое его возрастание. Вместе с тем, при дальнейшем увеличении циклов растяжения-отдыха, независимо от напряжения, имеет место падение значения E_N . Между тем, данные по органическому свидетельствуют о существенном деформационном упрочнении этого материала (фиг.3 б).

В заключение отметим, что разброс средних опытных данных (коэффициент вариации) значений циклических деформаций разрушения и модулей упругости в

данной работе не выходил за пределы 4-7%, имел случайный характер и не зависел от условий испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян С.А. Сопротивление материалов, разносопротивляющихся растяжению и сжатию. Ереван: Изд. РАХ. 2004. 187с.
2. 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. No.1. С. 78-82.
3. 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. No.1. С.3-7.
4. Саркисян Н.Е., Кравченко В.Л., Петров В.С. Влияние УКИ на прочность и деформативность стеклотекстолита при малоцикловом растяжении. // Механика композитных материалов. 1979. No.1. С.163-165
5. Krempf E., Niu-Tyan-Min. Graphite/Epoxy (45). Tybes. Their static axial and shear properties and their fatigue behavior under completely reversed load controlled loading.-J.Compos. Mater., 1982. v.16, May, P. 172-187.
6. Wang S.S.,Chim E.S.- M., Zahlan N.M. Fatigue crack propacation in random short-fiber SMC composite. // Composite Materials, 1983. v.17, № 3, P. 250-268.
7. Саркисян Н.Е., Карапетян К.А., Хачикян А.Г. Прочность и деформативность слоистых пластиков при сложном нагружении. // Изв. НАН и ГИУА. 1998. Серия «Технические науки». No.1. С.127-132.
8. Саркисян Н.Е. Анизотропия малоцикловой усталостной прочности и деформативности стеклопластика при растяжении. // Механика полимеров. 1976. No.3. С.425-429.
9. Саркисян Н.Е. Анизотропия циклической деформативности стеклопластика при растяжении с “отдыхом”. // Механика композитных материалов. 1979. No.6. С.991-994.

Ереванский Государственный Университет
Архитектуры и Строительства

Поступила в редакцию
18.07.2005