

Ու. Ե. ՏԱՐԿԻՍՅԱՆ, Մ. Մ. ՄԱՐՏԻՐՕՍՅԱՆ, Ա. Ն. ԿԱԳՐԱՄԱՆՅԱՆ

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОЙ ПРЕДЫСТОРИИ СИЛОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ДЕФОРМАТИВНОСТЬ
СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

Экспериментальное исследование влияния различного рода предварительного силового воздействия на изменение механических свойств композиционных материалов, в том числе стеклопластиков, представляет определенный практический и научный интерес. Выяснение степени изменчивости прочности и деформативности материалов, в частности, дает возможность более реальной оценки их работоспособности в конструкции.

К настоящему времени накоплен известный объем экспериментальной информации*. Необходимо отметить, что изучено лишь влияние простого силового воздействия, большей частью циклического. При этом рассматривалось только изменение кривой статического деформирования и предела прочности композита. Задача в такой же постановке, но при более сложном случае предварительного силового воздействия, была изучена в работе [1].

В последнее время привлекает внимание также вопрос оценки влияния предварительного циклического нагружения на изменение усталостной прочности композитов. В частности, установлено, что предварительное нагружение образцов из стекло- и углепластиков напряжением малой амплитуды существенно повышает долговечность при последующем циклическом нагружении с более высоким напряжением [2].

Предварительное нагружение улучшало усталостные свойства также бороалюминиевых и бороэпоксидных композитов [3]. В работе [4] было показано, что предварительное статическое и циклическое деформирование не вызывает такого повреждения материала, которое заметно повлияло бы на усталостную прочность стеклопластика.

В исследованиях [2—4] виды предварительного и последующего силового воздействия были идентичными, например, растяжение — растяжение. В настоящей работе впервые экспериментально изучается влияние одного вида предварительного воздействия (здесь мало- и многоциклового растяжения) на деформативность стеклопластика в условиях последующего, другого вида деформирования (здесь ползучести), и наоборот.

Рассмотрено влияние комплекса следующих видов силового воздействия: 1) многоциклового растяжения частотой 1200 цик/мин (для удобства изложения этот вид нагружения далее условно обозначим через α);

* Обзор литературы см., например, [1].

2) малациклового растяжения частотой 1 цик/мин (вид нагружения β) и 3) статической ползучести, воздействие которой обозначим через γ .

Исследование проведено с учетом анизотропии механических свойств стеклопластика, для чего нагрузка прикладывалась в направлении основы ткани ($\varphi = 0^\circ$) и в направлении под углом $\varphi = 45^\circ$.

Материалом для испытаний служил стеклотекстолит, изготовленный методом прессования ткани ТСУ-8/3 и связующего ЭДГ-10. Форма и размеры образцов, методика проведения испытаний на циклическую и статическую усталость подробно описаны в [1].

Предварительное деформирование осуществлялось в зависимости от порядка чередования видов нагружения по форме

$$\alpha_i \rightarrow \beta_j \rightarrow \gamma \quad (1.1)$$

$$\beta_i \rightarrow \alpha_j \rightarrow \gamma \quad (1.2)$$

$$\gamma_i \rightarrow \alpha_j \rightarrow \beta \quad (1.3)$$

где через индексы i и $j = 1, 2, 3$ условно обозначены уровни накопленной повреждаемости в условиях предварительного деформирования одного вида нагружения.

Повреждаемость материала в данной работе трактуется как отвлеченное число (меньшее единицы), являющееся отношением количества циклов (или времени) предварительного деформирования к числу циклов (времени) до разрушения в условиях одного и того же вида нагружения. Одновременно принимается справедливость гипотезы линейности суммирования повреждений и независимость повреждаемости в указанном выше смысле от вида деформации. Далее в статье повреждаемость (или сумма повреждаемостей) условно заменена латинскими индексами, которые в этом случае, очевидно, могут непрерывно менять свое значение от 0 до 1.

Как и ранее [1], рассмотрены три уровня предварительной повреждаемости, которые соответствовали длительности деформирования 0.1, 0.2 и 0.3 от базового значения долговечности при данном виде нагружения. Базовое значение долговечности было принято равным числу циклов до разрушения образца, составляющим соответственно $N_1 = 2 \cdot 10^6$, $N_2 = 200$ цикл и $\tau_1 = 240$ час. Таким образом, имели $\alpha_1 = 2 \cdot 10^6$, $\alpha_2 = 4 \cdot 10^5$ и $\alpha_3 = 6 \cdot 10^4$ цикл; $\beta_1 = 20$, $\beta_2 = 40$ и $\beta_3 = 60$ цикл; $\gamma_1 = 24$, $\gamma_2 = 48$ и $\gamma_3 = 72$ часа. Величину напряжения, соответствующего базовому значению долговечности, вычисляли по результатам отдельных поставленных серий испытаний α , β и γ , проводившихся обычным образом до разрушения образца. При нагружении вдоль основы ткани напряжения α_1 , α_2 и α_3 составляли соответственно 0.2, 0.75 и 0.7 σ_{α} , где σ_{α} — предел прочности стеклотекстолита на растяжение в направлении $\varphi = 0^\circ$. При растяжении под углом $\varphi = 45^\circ$ напряжения α_1 , α_2 и α_3 соответственно равны 0.2; 0.9 и 0.65 σ_{α} , где σ_{α} — прочность композита в этом направлении.

Контрольные испытания (в отсутствии предварительного нагружения) и этапы предварительного и последующего растяжения образцов проводились при указанных выше фиксированных значениях напряжений.

Таким образом, влияние предварительного растяжения в данной работе изучено в зависимости от очередности воздействия силовых факторов (форма 1 и 2), вида фактора и уровня предварительной повреждаемости (форма 1—3)².

На фиг. 1 представлены кривые^{2*}, иллюстрирующие влияние предварительного циклического растяжения на последующий процесс ползучести испытанного стеклотекстолита в направлении $\varphi = 0^\circ$. Деформации ползучести оказываются больше или меньше, чем соответствующие деформации контрольных образцов (кривая 3), смотря по тому, предыстория образцов имела малоцикловое (кривая 1) или многоцикловое (кривая 4) растяжение. В первом случае, поскольку напряжение σ_d является достаточно высоким (0,75 σ_n) происходит существенное деформационное разупрочнение³ материала исходного состояния. В условиях, когда вначале осуществляется малоцикловое растяжение, имевшее место в данной работе при сравнительно малом напряжении ($\sigma_d = 0,2 \sigma_n$), наоборот, происходит некоторое упрочнение деформационных свойств композита. На фиг. 1 кривые 2 и 3 идут достаточно близко друг от друга, что свидетельствует о практической компенсации процессов циклического деформационного упрочнения и разупрочнения материала, когда деформированию с большой частотой нагружения следует непродолжительное малоцикловое растяжение с высоким напряжением.

Сделанный выше вывод о том, что предварительное растяжение малым напряжением и высокой частотой способствует деформационному упрочнению композита, подтверждается графиками, показанными на фиг. 2, где кривые 3, 4 и 5 располагаются ниже не только кривой 1, соответствующей образцам исходного состояния, но и кривой 2, при которой предварительному циклическому деформированию α предшествовало статическое растяжение: γ . Наконец, качественно подобная картина наблюдалась также и в испытаниях нетканого стеклопластика СВАН [5]. Эти данные дополняют экспериментальные результаты настоящей работы, поскольку они соответствуют режиму нагружения, когда процессу ползучести предшествует длительное циклическое растяжение (режим $\alpha - \gamma$).

Как видно из фиг. 1, деформации ползучести стеклотекстолита образцов рабочей и контрольной группы отличаются⁴ примерно в 1,5 раза в условиях разупрочнения и 0,8 раза в условиях деформационного упрочнения материала. Однако, если сравнение вести в отношении величины об-

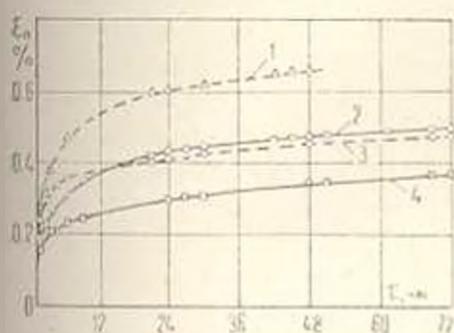
* Все испытания проводили практически непрерывно. Перевод образца от одного вида нагружения к другому занимал не более 5 мин.

** Приподимые в работе графики построены по средним данным из испытания трех образцов на каждый эксперимент.

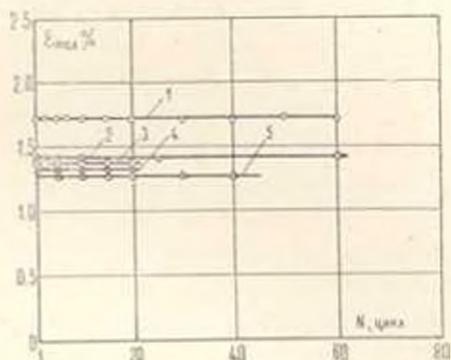
*** Здесь и далее в статье под понятием деформационного упрочнения материала (разупрочнения) подразумевается изменение отношения деформаций в данный момент времени t или числа циклов N образцов рабочей и контрольной группы, когда другие условия испытания остаются неизменными. Для случая упрочнения это отношение меньше единицы, а при разупрочнении, наоборот, больше единицы.

**** Деформации статической ползучести здесь сравниваются к моменту времени $t = 48$ час.

ших деформаций (включая мгновенные), то количественные изменения деформаций вследствие рассмотренной сложной предыстории нагружения окажутся небольшими (1.1 и 0.95 раза).



Фиг. 1. Влияние режима предварительного растяжения на статическую ползучесть стеклотекстолита ($\varphi = 0^\circ$): 1 — $\alpha_1 \rightarrow \alpha_1$; 2 — $\alpha_1 \rightarrow \beta_1$; 3 — контрольная группа; 4 — $\beta_1 \rightarrow \beta_1$.



Фиг. 2. Влияние режима предварительного растяжения на циклическую деформативность стеклотекстолита ($\varphi = 0^\circ$): 1 — контрольная группа; 2 — $\alpha_1 \rightarrow \alpha_1$; 3 — α_1 ; 4 — $\alpha_1 \rightarrow \beta_1$; 5 — β_1 .

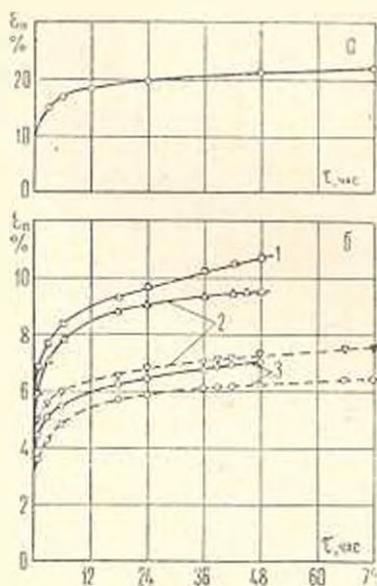
В направлении $\varphi = 0^\circ$ типы силового воздействия α , или α и γ вместе, но и разной комбинации, являются факторами, способствующими некоторому деформационному упрочнению материала. В самом деле, предыстория нагружения качественно не влияет на характер зависимости деформаций от числа циклов нагружения в условиях малоциклового усталости, поскольку во всех случаях явление циклической ползучести отсутствует. В количественном отношении деформация ε_{max} образцов рабочей группы составляет примерно $0.75 \div 0.85$ деформации образцов, не подвергшихся предварительному нагружению.

Наиболее ошутимое влияние история предварительного нагружения оказывает при деформировании образцов, вырезанных под углом 45° по отношению к волокнам. В этом случае становится существенной роль нелинейных свойств полимерного связующего в образовании деформации, особенно ее части, соответствующей процессу ползучести (статической или циклической). Все виды предварительного силового воздействия (форма 1—3) при $\varphi = 45^\circ$ оказывают существенное деформационно-упрочняющее влияние на стеклоармированный композит.

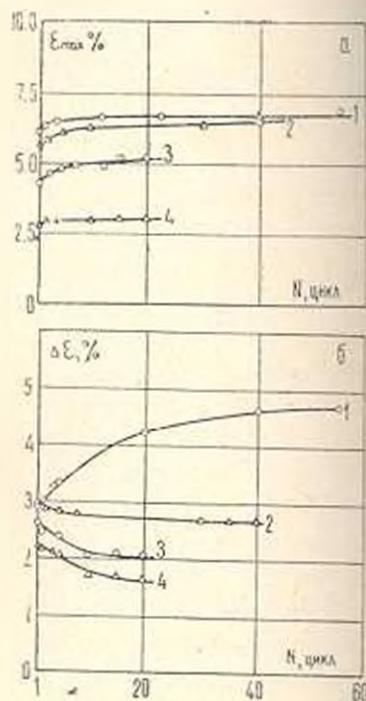
Деформация статической ползучести образцов, испытывавших предварительное растяжение, в зависимости от предыстории (1—2) оказывается в $2.0 \div 3.5$ раза меньше, чем деформация ползучести образцов контрольной группы (фиг. 3, а и б). При этом в деформационном упрочнении стеклотекстолита значительную роль играют как очередность нагрузки (α или β), так и длительность предварительного нагружения. Как и в случаях нагружения вдоль волокон, при одинаковом уровне накопленной повреждаемости (условие $i + j = const$) большее деформационное упрочнение на-

* Соответствует моментам времени, когда напряжение в цикле достигает максимальной величины.

блюдается, когда в процессе предварительного нагружения малоциклово-
му утомлению (β) материала предшествует утомление под воздействием
сравнительно малой по величине, но изменяющейся с большой частотой,
нагрузки α . Так, например, деформация ползучести при предварительном
растяжении по режиму $\alpha_2 \rightarrow \beta_1$ составляет 0,8 часть деформации ползу-
чести режима нагружения $\beta_1 \rightarrow \alpha_1$ (пунктирная и сплошная кривая 2 на
фиг. 3, б). Эти же кривые в сравнении с кривыми 3 ($i + j = 0,3$) показы-
вают, что чем ниже уровень предварительной повреждаемости, тем в боль-
шей степени материал может упрочиться и деформационном оттолении.
Так, если в условиях предварительного растяжения $\beta_1 \rightarrow \alpha_1$, которому
соответствует условная повреждаемость 0,5 (кривая 1, фиг. 3, б), дефор-
мационное упрочнение* составляет 0,5, то уровням повреждаемости 0,4 и
0,3 этому коэффициенту соответствуют значения $0,35 \div 0,45$ и $0,30 \div 0,32$.



Фиг. 3. Влияние режима предвари-
тельного растяжения на статическую пол-
зучесть стеклотекстолята ($\varphi = 45^\circ$): а —
контрольная группа; б—1— $\beta_2 \rightarrow \alpha_2$; 2—
 $\beta_2 \rightarrow \alpha_1$ и $\alpha_2 \rightarrow \beta_1$; 3— $\beta_1 \rightarrow \alpha_2$ и $\alpha_2 \rightarrow \beta_2$



Фиг. 4. Влияние режима предвари-
тельного растяжения на малоцикловую де-
формативность стеклотекстолята ($\varphi =$
 45°). 1—контрольная группа; 2— α_2
3— α_1 ; 4— $\beta_1 \rightarrow \alpha_1$

На фиг. 4 представлены графики, иллюстрирующие влияние предва-
рительного растяжения на изменение экстремальных деформаций цикла
в случаях, когда нагрузка действует в направлении $\varphi = 45^\circ$. На фиг. 4б
через $\Delta \epsilon$ обозначена разность деформаций $\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$, где деформация
 ϵ_{\min} соответствует минимальному напряжению цикла.

* Отношение деформаций ползучести образцов рабочей и контрольной группы по
кривым 1—3 на фиг. 3, б и фиг. 3, а.

Как показывают экспериментальные данные, при ориентации $\varphi = 45^\circ$ предварительное растяжение вызывает деформационное упрочнение материала, которое может существенно (более чем в 2 раза) уменьшать деформацию ε_{max} по сравнению с деформациями контрольных образцов (фиг. 4, а). При этом наблюдается определенная закономерность. Чем дольше ($\alpha_1 = 3\alpha_2$) образцы подвергаются циклическому растяжению с сравнительно малым напряжением и большей частотой, тем острее уменьшается деформация при последующем малоцикловом растяжении (фиг. 4, кривые 2 и 3). Упрочняющая роль предварительного растяжения в последующем процессе растяжения должна больше проявляться в тех случаях, когда предварительное деформирование включает в себя также и этап статической ползучести (фиг. 4, кривая 4). В этих условиях в материале в основном завершается процесс «насыщения» деформациями ползучести. Поскольку последующее деформирование такого же знака, что и предварительное (растяжение), то тем самым создаются более благоприятные условия для сопротивления материала новому процессу деформирования.

Наконец, обратим внимание на качественно разный ход кривых разности деформаций $\Delta\varepsilon$ на фиг. 4, б при малоцикловом растяжении контрольной (1) и рабочей (2—4) группы образцов. Это как раз иллюстрирует процесс деформационного упрочнения материала, поскольку значение текущего модуля упругости $\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ непрерывно возрастает.

В условиях отсутствия предварительного растяжения разность экстремальных значений циклической деформации непрерывно растет по мере увеличения числа циклов нагружения (на базе $N = 20$ цикл в 1,4 раза). Если же материал предварительно подвергается длительному циклическому или статическому деформированию, то указанная разность деформаций $\Delta\varepsilon$ при последующем малоцикловом растяжении непрерывно уменьшается (в 1,1—1,4 раза на той же базе). Примечательным является тот факт, что влияние предыстории нагружения больше всего сказывается не в первом цикле малоциклового растяжения, а по мере увеличения числа циклов N . Как показывают экспериментальные данные, в зависимости от режима предварительного растяжения отношение деформаций $\Delta\varepsilon$ контрольных и рабочих образцов в 1-ом цикле составляет 1,0—1,3, а при $N = 20$ цикл достигает значения 1,3—2,7.

Выводы: 1. При растяжении стеклотекстолита в направлении основы ткани ($\varphi = 0^\circ$) деформация статической ползучести оказывается больше или меньше, чем деформация ползучести контрольных образцов (не подвергшихся предварительному нагружению) в зависимости от того, предыстория образцов имела малоцикловое (частота 1 цикл/мин, напряжение $\sigma_3 = 0,75 \sigma_n$) или многоцикловое растяжение (1200 цикл/мин, $\sigma_7 = 0,2 \sigma_n$). В первом случае происходит существенное деформационное разупрочнение материала; во втором, наоборот, имеет место некоторое упрочнение деформационных свойств композита.

2. В направлении $\varphi = 0^\circ$ предварительное силовое воздействие (α или α и статическая ползучесть γ вместе, но и разной комбинации), является фактором, способствующим деформационному упрочнению материала в условиях последующего малоциклового растяжения.

3. История предварительного нагружения наиболее сильное влияние оказывает при деформировании образцов, вырезанных под углом 45° . В этом случае все рассмотренные виды силового воздействия вызывают значительное деформационное упрочнение стеклотекстолита.

4. В направлении $\varphi = 45^\circ$ деформация статической ползучести в зависимости от предыстории нагружения в 2,0 ÷ 3,5 раза меньше, чем деформация ползучести контрольной группы образцов.

а) При одинаковом уровне предварительной повреждаемости материала большее деформационное упрочнение наблюдается, когда в предыстории нагружения малоциклового утомлению композита предшествует воздействие сравнительно малого по величине, но изменяющегося с большой частотой напряжения.

б) Чем ниже уровень предварительной повреждаемости, тем в большей мере упрочняется материал в деформационном отношении.

5. В направлении $\varphi = 45^\circ$ предварительное растяжение может более, чем в 2 раза уменьшить максимальные деформации цикла в условиях последующего малоциклового растяжения.

а) Чем дольше материал подвергается циклическому растяжению с сравнительно малым напряжением и большой частотой, тем ощутимее уменьшение деформации при последующем нагружении.

б) Упрочняющая роль предварительного растяжения усиливается, когда предыстория нагружения включает в себя также и этап статической ползучести.

6. Если в условиях отсутствия предварительного растяжения разность экстремальных значений деформаций цикла непрерывно растет (циклический модуль упругости снижается), то вследствие воздействия рассмотренных видов предварительных нагрузок эта разность деформаций, наоборот, с увеличением числа циклов N последовательно уменьшается (модуль упругости возрастает).

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 22 III 1979

Ե. Բ. ԽԱՐԿՆԱՆ, Մ. Մ. ԵԱՐՏԵՐՈՍՅԱՆ, Լ. Ն. ՎԱՀՐԱՄԱՆՅԱՆ

ԻԱՐԻ ՈՒԺԱՅԻՆ ՆԵՐՎՈՐԴՆՈՒԹՅԱՆ ՆԱԿԱՊԱՏՄՈՒԹՅԱՆ ԱԶԳԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԱՊԱԿԵՏԵՔՍՈՆԼԻՏԻ ԵՐԿԱՐԱՏԵԿ ԴԵՑԵՆՏՐԱԼԻՆԻՅԱՆ ՎՐԱ

Ա մ փ ո փ ո ռ մ

Քերպած են նախնական ձգման կոմպլեքսի (բազմացիկլային, սակավացիկլային և ստատիկական) ազդեցության փորձնական հետազոտության արդյունքները ապակետեքստուրայի դեֆորմատիվության վրա հետազոտողների

ստեղծագիտային ձգման պայմաններում: Բեռնավորումը կատարված է պլանկոգործվածքի հենքի և 45° անկյան ուղղությամբ:

Սահմանված են նախնական ձգման ազդեցության առանձնահատկությունները կախված դիտարկվող ուժային գործոնների կիրառման հաջորդականությունից, նրանց տեսակից և կուտակված նախնական վնասվածքների մակարդակից (դեֆորմացիան երկարատևությունից):

THE INFLUENCE OF COMPLEX PREHISTORY OF FORCE EFFECT ON PROLONGED DEFORMATION OF FIBRE-GLASS LAMINATE

N. E. SARKISIAN, M. M. MARTIROSIAN, A. N. KAGRAMANIAN

S u m m a r y

The experimental investigation of the influence of the complex preliminary tension (polycyclic, small-cyclic, statical) on the deformation of the fibre-glass laminate under the conditions of subsequent creeping and small-cycle tension is discussed. Loading is applied in the direction of the material base and at a 45° angle.

The influence peculiarities of preliminary tension, depending on the succession of the effect of force factors, of their type and level of preliminary damage (prolonged deformation), are found.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Саркисян Н. Е., Сироткин О. С., Воробей В. В., Мартиросян М. М., Каграманян А. Н. Суммирование повреждений при квазистатическом и переменном нагружении элементов из композиционных материалов. Изв. АН АрмССР, Механика, 1979, т. 32, № 2.
2. Berg C. A., Salama M. Coaxing in fatigue of composites. Fibre Sci. and Technol., 1973, No. 6, No. 2.
3. Stinchcomb W. W., Reifsnider K. L., Williams R. S. Critical factors for frequency-dependent fatigue processes in composite materials. "Exp. Mech.", 1976, 16, No. 19.
4. Петренко И. П. Влияние асимметрии и частоты нагружения на усталостные характеристики предварительно деформированного стеклопластика. Прикл. механ., 1977, 13, № 2.
5. Саркисян Н. Е. О влиянии предварительного циклического нагружения на статическую прочность и деформативность стеклопластика. Изв. АН АрмССР, Механика, 1973, т. 26, № 1.