

Разработка теории микрооднородных напряженных состояний для оценки прочности армированных пластиков с концентраторами напряжений (Сообщение 2)

Сапожников С.Б.

Челябинский государственный технический университет

Проведены испытания на растяжение, сжатие и сдвиг монослоев армированных тканью пластиков (АТП) с различными скоростями нагружения, разгрузками и при циклическом нагружении. Разработаны структурные реологические модели монослоев при сдвиге (учтено упруговязкопластическое поведение материала), позволившие прогнозировать реологические свойства АТП при нагружении вдоль волокон основы или утка в зависимости от способа переплетения нитей.

Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых деформирования с разгрузками показало их удовлетворительное соответствие.

Проведены высокочастотные (150Гц) испытания при консольном изгибе трехслойных сотовых панелей с тонкими обшивками из органопластика (знакопеременное нагружение), при котором в обшивках имело место одноосное растяжение-сжатие. Показано, что нагружение сопровождается интенсивным саморазогревом, а разрушение обшивок происходит в фазе сжатия. Предложен метод оценки циклической прочности и долговечности АТП по критерию термомеханического разрушения.

3. Механические испытания образцов монослоев и разработка соответствующих склерономных и реономных моделей

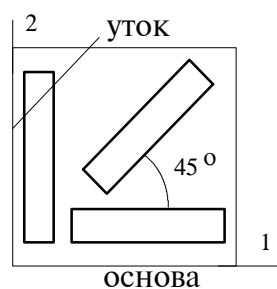


Рис.1.

Армированные тканевым наполнителем пластики (АТП) являются анизотропными материалами, имеющими в плоскости укладки слоев две ортогональные оси симметрии механических свойств, совпадающие с направлениями укладки нитей основы и утка (ортотропные материалы, рис.1).

По этой причине определение механических характеристик проводят в направлениях укладки нитей и в диагональном направлении (рис.1).

В последнем случае ввиду малой прочности на сдвиг полимерного связующего компоненты напряжений, действующих вдоль волокон (в направлениях 1 и 2), далеки от предельных и поэтому диаграмма деформирования такого образца отражает, в основном, нелинейное поведение монослоя АТП при сдвиге [1,с.51, 3].

3.1. Сдвиговое нагружение монослоя

Рассмотрим более подробно нагружение монослоев АТП при сдвиге в площадках, совпадающих с главными направлениями анизотропии.

Чтобы растяжение диагонального образца-полоски в стандартных клиновых захватах испытательной машины происходило без изгиба в его плоскости, необходимо

обеспечить равенство или, в крайнем случае, близость упругих и прочностных свойств материала вдоль волокон основы и утка. Это обеспечивается при ортогональной укладке волокон основы в соседних монослоях многослойного пакета - структура $[0/90]_{\text{sim}}$. Такая структура имеет четыре оси симметрии механических свойств, поэтому нагружение в любом из направлений симметрии не будет сопровождаться сдвиговыми деформациями, приводящими к изгибу образца

В данной части исследован прессованный стеклотекстолит СФ-2-50Г как пример типового АТП, упругие и прочностные характеристики которого при статическом нагружении приведены в таблице. Здесь E , G - модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона, F - пределы прочности, индексы 1,2,12,- направления нагружения (вдоль основы, утка или сдвиговое), а t и c - растяжение и сжатие. Стеклотекстолит армирован равнопрочной стеклотканью полотняного переплетения.

E_1/E_2	G_{12}	ν_1	F_{1t}/F_{1c}	F_{2t}/F_{2c}	F_{12}
ГПа	ГПа	-	МПа	МПа	МПа
28.0/27,5	6,0	0,14	400/350	380/320	95

Программа нагружения включала в себя испытания на растяжение в диагональном направлении с выдержками на трех разных уровнях напряжений и разгрузками, с записью диаграмм растяжения σ - ϵ и ползучести ϵ - t . Здесь и везде ниже

σ - нормальное напряжение, ϵ - нормальная продольная деформация, t - время. Преобразование полученных диаграмм σ - ϵ в диаграммы сдвига τ - γ (τ - напряжение, γ - деформация сдвига) было осуществлено с использованием допущения о том, что коэффициент Пуассона при диагональном нагружении близок к единице. Это допущение вполне справедливо для материалов, у которых модуль сдвига G_{12} существенно меньше модулей упругости E_1 и E_2 .

Кривая ползучести 1 и соответствующая программа нагружения показаны на рис.2. Обработка кривых ползучести (пренебрегли участком кратковременной ползучести, а быстрое нагружение заменяли мгновенным - линии 2) позволила выделить склерономную r и реономную p составляющие в деформации сдвига γ ($\gamma = r + p$).

На рис.3а и 3б приведены зависимости $r(\tau)$ и $\dot{p}(\tau)$. Здесь точка над p означает дифференцирование по времени. Светлые кружки показывают скорость установившейся ползучести на этапе нагружения, а темные - после частичной разгрузки. Время выдержки на постоянном напряжении всегда равнялось 10 минутам.

Склерономная деформация $r(\tau)$ может быть вполне удовлетворительно описана моделью упругопластической среды с линейным упрочнением (модуль упрочнения $G'_{12} = 0,08 G_{12}$). Для этого наиболее подходящим представляется структурный подход [2], в котором среда представляется набором упругопластических подэлементов с различными пределами текучести.

Реологическая функция $\dot{p}(\tau)$ может быть аппроксимирована линейной зависимостью $\dot{p} = 9,8 \cdot 10^{-4} (\tau / F_{12})$.

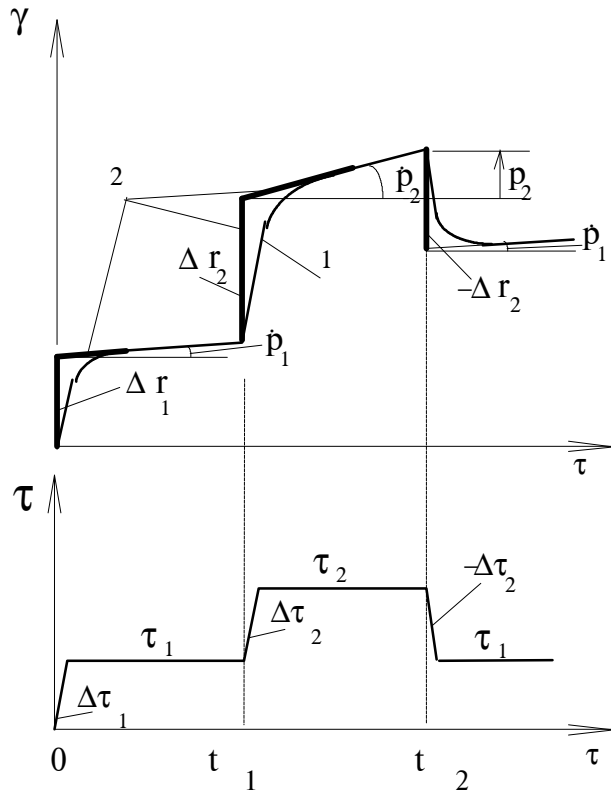


Рис.2.

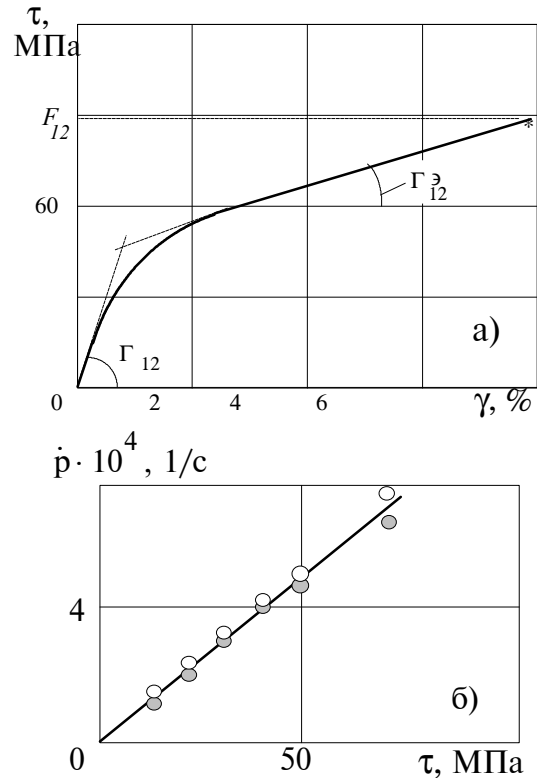


Рис.3.

Кратко система уравнений совместности деформаций подэлементов, физических уравнений подхода [2] может быть записана в виде, где k - номер подэлемента, τ_T - пределы текучести, q - веса, z - коэффициенты, \dot{p}^k - реологическая функция подэлемента:

$$\gamma^k = \gamma \quad (k = 1, 2, \dots, N); \quad \tau = \sum_{k=1}^N \tau^k q^k; \quad \gamma^k = r^k + p^k;$$

$$r^k = \tau^k / G_{12}; \quad \dot{p}^k = \begin{cases} \dot{p}(\tau^k / z^k), & \tau^k < \tau_T^k; \\ \infty, & \tau^k \geq \tau_T^k. \end{cases} \quad (1)$$

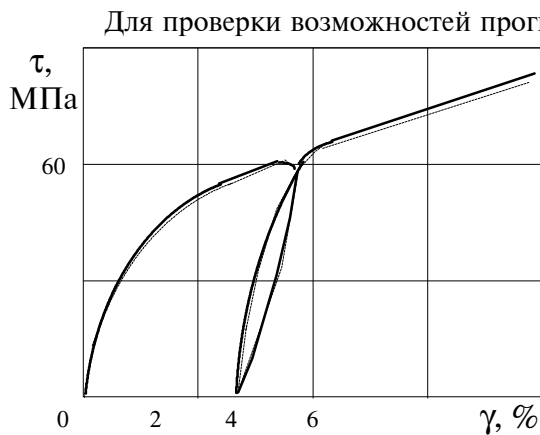


Рис.4.

Для проверки возможностей прогнозирования диаграмм циклического сдвигового нагружения проведены эксперименты и расчеты при полной разгрузке и повторном нагружении (рис.4). На этом рисунке сплошная кривая - эксперимент, а прерывистая - расчет. Скорость деформирования была равна $\dot{\gamma} = 6,6 \cdot 10^{-4}$ 1/сек. В расчетах было использовано четыре подэлемента со следующими пределами текучести, весами и коэффициентами:

$$\tau_T = \{10; 42; 96; 480 \text{ МПа}\}, \quad q = \{0,25; 0,375; 0,295; 0,08\}, \quad z = \{0,118; 0,494; 1,13; 5,65\}$$

Можно отметить вполне удовлетворительное

совпадение расчета и эксперимента.

При циклическом нагружении для оценки тепловыделения весьма важной является энергетическая характеристика Ψ - коэффициент рассеяния, равный отношению площади петли гистерезиса (рассеянной в тепло энергии деформирования) к полной энергии деформирования в цикле. Расчеты Ψ по структурной модели среды как функции напряжений разгрузки σ_{\max} проведены для диапазона $\sigma_{\max} = (0,1-0,8)F_{12}$. Получено, что эту функцию можно аппроксимировать степенной зависимостью типа

$$\Psi = m(\sigma_{\max} / F_{12})^n, \text{ где } n < 1.$$

Для целей упрощенного анализа диаграмм **монотонного** нагружения АТП вдоль направления укладки нитей основы или утка можно допустить аппроксимацию диаграммы сдвига в виде билинейной зависимости (показана прерывистыми линиями на рис.3а). В этом случае модель можно упростить до двух подэлементов: $\tau_T = \{32; 184 \text{ МПа}\}$, $q = \{0,75; 0,25\}$, $\varepsilon = \{0,457; 2,63\}$.

3.2. Нагружение монослоя вдоль волокон

Монослой АТП представляет собой регулярно искривленные и переплетенные нити основы (1 на рис.5) и утка (2 на рис.5), которые пропитаны связующим. Любой способ переплетения (полотняный, саржевый, сатиновый и др.) можно представить в виде последовательного соединения (4 на рис.5) прямолинейных и наклонных участков нити. Такая аппроксимация структуры аналогична аппроксимации [4, с.60].

Итак, параметры структуры АТП при нагружении вдоль нитей таковы: толщина δ , длина L , относительная длина прямого участка нити m , угол наклона α (обычно этот угол можно считать малым: $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$; $\cos \alpha \approx 1$), ширина нити S .

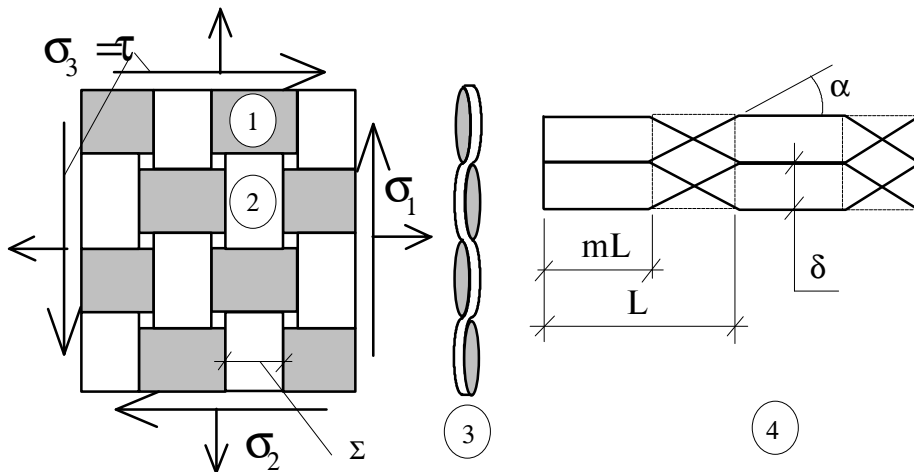


Рис.5. Обозначения: 1 - нить основы, 2 - нить утка, 3 - сечение АТП вдоль утка, 4 - схематизация структуры АТП при нагружении вдоль нити основы или утка.

Отметим, что при растяжении прямолинейного участка работают, в-основном, высокопрочные и высокомодульные волокна и реологические свойства данного участка несущественны по сравнению с другим участком, где волокна располагаются под некоторым углом α к направлению нагружения. Растяжение АТП напряжениями σ , монотонно возрастающими во времени со скоростью $\dot{\sigma}$ приводит к появлению

касательных напряжений τ на наклонных участках, которые связаны с углом α следующим образом (поворот главных площадок на угол α):

$$\tau = \sigma \cdot \sin(2\alpha) / 2. \quad (2)$$

Модуль упругости наклонного участка E_2 отличается от модуля упругости прямолинейного участка E_1 , поскольку для ортотропных материалов, обладающих низким модулем сдвига G_{12} , при малых углах α и упругих деформациях известна связь [5]

$$E_2 \approx E_1 / (1 + \alpha^2 \frac{E_1}{G_{12}}). \quad (3)$$

Указанные выше микроструктурные допущения позволяют дополнить систему уравнений состояния данной модели АТП при монотонном нагружении вдоль основы или утка следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \dot{\sigma} \cdot t; \quad \varepsilon = \varepsilon_1 m + \varepsilon_2 (1 - m); \quad \varepsilon_1 = \sigma / E_1; \\ \varepsilon_2 &\approx \varepsilon_1 + \gamma(\tau, \dots) \cdot 2\alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь γ определяется в соответствии с (1).

Уравнения (1)-(4) позволяют на основании испытаний только на сдвиг и анализа микроструктуры АТП (по его продольным шлифам) прогнозировать его поведение при нагружении вдоль нитей основы или утка. Например, для АТП типа СФ-2-50Г $m=0,2$; $\alpha=12^\circ$ при нагружении со скоростью $\dot{\sigma} = 2$ МПа/сек расчетная кривая "напряжение - деформация" при растяжении вдоль основы показана на рис.6 сплошной линией, а экспериментальные кривые лежат в заштрихованной зоне. На диаграммах растяжения хорошо видна зона "перелома", где жесткость стеклопластика уменьшается практически скачком. Аналогичные кривые были получены на различных стеклопластиках с тканевой арматурой в работе [6, с.67], [9, с.146] и др. Однако лишь в данной работе удалось получить адекватное описание наблюдаемого явления, связанного с началом интенсивных сдвиговых пластических деформаций в искривленных участках нитей.

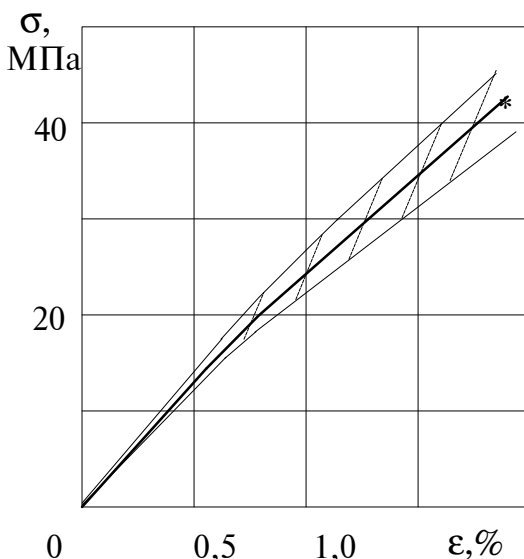


Рис.6

Следует также отметить, что изменение скорости нагружения в пределах 1...50 МПа/сек не приводит к существенному изменению предела прочности и характера диаграмм растяжения. Это связано, очевидно, с превалированием склерономной составляющей сдвиговой деформации над реономной, что позволяет в расчетах многослойных материалов при однократном кратковременном нагружении использовать наиболее простой склерономный вариант учета сдвиговой нелинейности монослоя АТП [7].

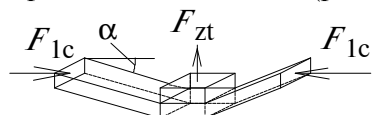
Достаточно широкая полоса разброса экспериментальных диаграмм растяжения образцов одной партии может быть объяснена тем, что уточная нить в любой ткани не натягивается и может искривляться случайным образом в процессе переработки [5] и при укладке в многослойный пакет. Иными словами, направление нитей в слоях может отличаться от направления нагружения. В этом случае деформации растяжения нитей будут сопровождаться

небольшими сдвиговыми деформациями монослоев в их плоскости, что приведет к снижению наблюдаемого модуля упругости, предела прочности и понижению напряжения "перелома".

Аналогичный эффект имеет место в испытаниях при повышенной температуре [6]: в этом случае понижаются сдвиговые пределы текучести из-за уменьшения остаточных радиальных напряжений сжатия на поверхности раздела волокна и связующего, что приводит к понижению координат точки "перелома". Увеличение температуры испытаний ведет, естественно, и к уменьшению модуля сдвига связующего, что приводит к уменьшению касательного модуля АТП после точки "перелома".

Следует остановиться более подробно на особенностях деформирования АТП при сжатии вдоль нитей основы или утка.

Используя ту же схематизацию микроструктуры (рис.5), несложно показать, что при сжатии вдоль направления 1 или 2 в направлении, ортогональном к плоскости АТП между наклонными участками нитей соседних монослоев или в пределах одного слоя должны появиться напряжения растяжения, удерживающие наклонные участки в равновесии. При растяжении АТП в этих местах возникали напряжения сжатия. Напряжения растяжения в трансверсальном направлении опасны тем, что из-за достаточно низкой прочности F_{zt} на поперечный отрыв АТП будут иметь, как следствие и пониженную прочность при сжатии F_{1c} или F_{2c} . Пользуясь уравнением равновесия нитей в предельном состоянии (рис.7), для малых углов α получим следующую зависимость:



$$F_{1c} = F_{zt} \frac{S}{2\delta \alpha}. \quad (5)$$

Рис.7.

Для рассматриваемого стеклопластика $\alpha \approx 12^\circ$, $F_{zt} = 31 \pm 5$ МПа, $S \approx 0,5$ мм, $\delta \approx 0,10$ мм. Тогда $F_{1c} = (31 \pm 5) \cdot 0,5 / (2 \cdot 0,1 \cdot 0,21) = 369 \pm 60$ МПа. Экспериментальные значения пределов прочности при сжатии вдоль утка и основы (см.табл.) находятся в указанном интервале, что свидетельствует в пользу предлагаемого подхода.

4.Обоснование концепции термомеханического разрушения АТП при циклическом нагружении

Упругопластическое циклическое сдвиговое (и продольное) нагружение АТП сопровождается рассеянием подводимой энергии в окружающую среду в виде тепла. Если частота нагружения мала, то теплоотвод через захваты, в воздух обеспечивает практически изотермический режим испытаний. Высокочастотное нагружение приводит к нарушению условия изотермичности испытаний, поскольку темп саморазогрева становится слишком высоким, а условия теплоотвода практически не изменяются. Повышение температуры T АТП приводит к падению его предела прочности $F_x(T)$. Если действующие максимальные напряжения σ_{max} в процессе испытаний поддерживаются неизменными, то, очевидно, будет происходить разрушение, когда выполнится условие

$$F_x(T) \leq \sigma_{max}. \quad (6)$$

Эти соображения были проверены при испытаниях на выносливость трехслойных панелей шириной 100мм и длиной 300мм с тонкими обшивками толщиной 0,7мм из органопластика марки 10Т (шесть слоев ткани СВМ артикул 56313 сатинового переплетения, ориентированной основой вдоль оси панели, и связующее горячего отверждения УП-2227) и сотовым наполнителем высотой 8мм при консольном изгибе

(частота вынужденных колебаний 150 Гц). В испытаниях в обшивках имело место знакопеременное симметричное изменение напряжений.

Опыты были проведены до разрушения образцов. В зоне действия максимальных напряжений была установлена термопара. В первой серии опытов условия теплоотвода в среду были естественными, а во второй серии поверхности панели подвергали интенсивному обдуву воздухом комнатной температуры.

Кривые выносливости в двойных логарифмических координатах показаны на рис.8. Во всех случаях разрушения имело место повышение температуры, причем в

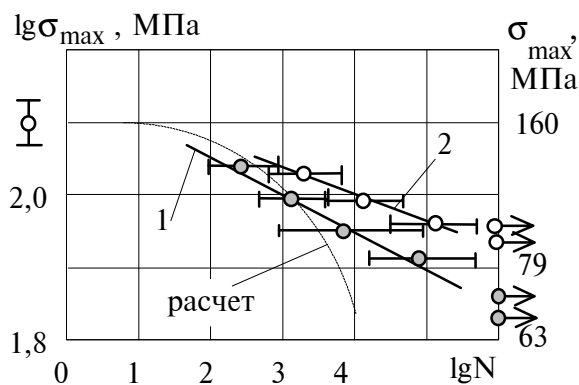


Рис.8.

Однако при повышении температуры свыше 100⁰С происходит резкое падение предела прочности, и температуру T* = 100⁰С можно считать предельной для органита 10Т.

Процесс саморазогрева в естественных условиях будем считать адиабатическим. Будем пренебрегать также изменением температуры по толщине обшивки ввиду ее малости. Принятие этих допущений позволяет записать уравнение теплового баланса после нагружения до числа циклов ΔN_i:

$$\Delta Q_i = Cm\Delta T_i, \Delta Q_i \approx \psi \frac{\sigma_{\max}^2 V}{E_x} \Delta N_i,$$

$$m = \rho \delta S; V = \delta S; \quad i = 1, 2, \dots$$

$$\Delta T_i \approx \psi \frac{\sigma_{\max}^2 \Delta N_i}{C\rho E_x}, \quad T_{i+1} = T_i + \Delta T_i.$$
(7)

Здесь *i* - номер шага расчета, *E_x* - модуль упругости при нагружении вдоль оси X, *Q* - энергия саморазогрева, *T* - температура, *C* - теплоемкость, *ρ* - плотность материала обшивки панели, *δ* - толщина обшивки, *S* - площадь поверхности теплоотдачи в воздух, *ψ* - коэффициент потерь, значение которого для органита зависит лишь от максимальных напряжений сжатия в виде $\psi \approx m'(\sigma_{\max} / F_{xc})^{n'}$, причем для органита 10Т в нормальных условиях при квазистатическом нагружении $m'' \approx 0,1$, $n'' \approx 0,5$ при напряжениях в пределах от 0,1 до 0,8 от предела прочности. Данная степенная зависимость неслучайна, так как рассеяние энергии при растяжении (сжатии) вдоль волокон основы (утка) происходит за счет сдвиговых деформаций на наклонных участках нитей (см. п.3).

Поскольку пределы прочности на растяжение и сжатие органита 10Т отличаются почти в 5 раз (600 и 125 МПа), то при симметричном цикле, очевидно, превалируют реологические эффекты на той части, где действуют напряжения сжатия.

Термомеханическое условие разрушения в данном случае имеет вид

$$\sigma_{\max} \geq F_{xc}(T), \quad (8)$$

в котором предел прочности на сжатие снижается с ростом температуры

$$F_{xc}(T) = F_{xc}(20) - 0,9(T - 20). \quad (9)$$

Суммируя приращение температур в (7) по шагам и проверяя условие разрушения (8), можно вычислить искомую долговечность

$$N = \sum_i \Delta N_i.$$

Расчеты долговечности при заданных максимальных напряжениях представлены на рис.8 прерывистой линией при следующих значениях констант: $m'=0,1$, $n'=0,5$, $C \approx 1,5$ КДж/(кг °С), $\rho=1300$ кг/м³, $\delta=0,7$ мм, $E_x=25$ ГПа, $F_{xc}(20)=125$ МПа. Полученные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами первой группы опытов (некоторое отличие в области больших долговечностей можно объяснить неучетом конвективного теплоотвода в турбулентный слой воздуха, окружающий колеблющуюся на вибростенде панель, а также теплоемкости сотового заполнителя).

Важно отметить, что при интенсивном обдуве воздухом и прочих равных условиях (кривая 2 на рис.8) долговечность обшивок резко увеличивается - это также соответствует теоретическим положениям данной работы о термомеханическом разрушении при высокочастотном нагружении. Вообще говоря, саморазогрев при циклических испытаниях необходимо всегда тщательно контролировать, чтобы не списать на "усталость" имеющиеся разрушения образцов из нержавеющей стали X18H9T, на фоне разогрева на сотни градусов [10] при испытаниях на частоте 10 Гц.

Литература

1. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1984. - 264с.
2. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. М: Машиностроение, 1984. -256с.
3. Sandhu R.S. Nonlinear Response of Unidirectional and Angle Ply Laminates. - AIAA Paper, 1974- p.74-380.
4. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Прочность армированных пластиков. М.: Химия, 1982. - 216с.
5. Болотин В.В. Теория армированной слоистой среды со случайными начальными неправильностями. - Механика полимеров, 1966, №1.-с.11-19.
6. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. Рига: Зинатне, 1966. - 266с.
7. Сапожников С.Б. Разработка теории микрооднородных напряженных состояний для оценки прочности армированных пластиков с концентраторами напряжений (Сообщение 1). - Динамика, прочность и износоустойчивость машин (журнал на электронных носителях). Челябинск: 1995, №1. - с.35-45.
8. Васильев В.В. Механика конструкций из армированных пластиков. М.: Машиностроение, 1988. - 272с.
9. Композиционные материалы: Справочник /В.В.Васильев, В.Д.Протасов, В.В.Болотин и др. - М.: Машиностроение, 1990.-512 с.
10. Махутов Н.А., Маханев В.О., Гриневич Ю.В. Нелинейные связанные задачи механики разрушения / Сб.тр. Всесоюзной конференции "Нелинейные явления", М.: Наука, 1991, 214 с.