

УДК 539.3; 620.1

**П. Б. Северов**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия  
Тел.: +7 (916) 5163999; E-mail: alpinprom@yandex.ru

## ИЗМЕНЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЕ - ДЕФОРМАЦИЯ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИЯХ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

*В статье рассмотрены распределения повреждений в образцах из слоистых углепластиков с целью объяснения нелинейности зависимости «напряжение - деформация» при одноосном растяжении и, в частности, непривычного увеличения касательного модуля указанной зависимости. Для регистрации повреждений применялся метод акустической эмиссии. При квазистатическом растяжении установлена зависимость касательного модуля  $E_x$  диаграммы деформирования от взаимного расположения зоны разрушения материала и зоны измерения деформации. При циклическом растяжении выявлена зависимость касательного модуля  $E_x$  от количества циклов нагружения на участке активного деформирования петли гистерезиса.*

**Ключевые слова:** слоистый углепластик, нелинейность диаграммы деформирования, касательный модуль, акустическая эмиссия, распределение АЭ импульсов.

**P. B. Severov**

## CHANGE IN THE TANGENT MODULUS OF THE STRESS - STRAIN DEPENDENCE UNDER QUASI-STATIC AND CYCLIC LOADINGS OF CFRP LAMINATES

*The article considers damage distributions in samples of CFRP laminates in order to explain the nonlinearity of the stress-strain dependence under uniaxial tension and, in particular, the unusual increase in the tangent modulus of this dependence. The acoustic emission method was used to register the damage. In the case of quasi-static tension, the dependence of the tangent modulus  $E_x$  of the stress-strain diagram on the mutual position of the material failure zone and zone of strain measurement is established. Under cyclic tension, the dependence of the tangent modulus  $E_x$  on the number of loading cycles in the area of active strain of the hysteresis loop is revealed.*

**Keywords:** CFRP laminate, nonlinear stress-strain diagram, tangent modulus, acoustic emission, AE pulse distribution.

### 1. Введение

Композитный материал представляется в качестве эволюционирующей нагружаемой многомасштабной нелинейной динамической системы, обладающей свойством самоорганизованной критичности (стремление к критическому состоянию) в процессе медленной квазистационарной и сверхбыстрой катастрофической стадий эволюции [1].

Упругое нелинейное деформирование графитоэпоксидных образцов с увеличением касательного модуля в момент разрушения на 11 - 13% по отношению к модулю в начальной стадии нагружения отмечено в работе [2]. Увеличение касательного модуля примерно на 10% для однонаправленных композитов, нагруженных вдоль волокон, отмечено также в работе [3], в которой указывается на влияние модуля волокна (его увеличения) на характер зависимости «напряжение – деформация» для отдельного однонаправленного слоя.

Физические принципы, заложенные в методы измерения силы (напряжения  $\sigma$ ) и удлинения (деформации  $\varepsilon$ ) при механическом нагружении образца, одинаковы: изменение сопротивления чувствительных элементов силоизмерителя и экстензометра при их деформации. Силоизмеритель реагирует на изменение состояния материала образца во всем его объеме, экстензометр – только в локальном объеме материала в пределах размеров самого экстензометра. Нарушение корреляции между измеряемыми параметрами

механического нагружения  $\sigma$  и  $\varepsilon$  свидетельствует о рассогласовании в поведении части образца по отношению к его целому, то есть, о некой деструкции материала, которая в своем развитии определяет характер кривой деформирования.

## 2. Материалы и методы испытания

Испытания образцов проводились в гидравлических захватах электросервогидравлической установки INOVA ИК-6033. Система сбора и обработки экспериментальной информации на базе электронной аппаратуры и программного продукта фирмы National Instruments США, акустико-эмиссионное оборудование и программное обеспечение фирмы ИНТЕРЮНИС РФ.

Образец №1 вырезан в направлении 0 из слоистого углепластика КМУ-3Л с укладкой  $[0_2/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_3/\pm 45^0/0_2]_s$ . Размеры рабочей зоны образца: длина 100 мм, поперечное сечение  $10 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 30 мкм/сек. Образец доведен до разрушения, регистрация сигналов акустической эмиссии не проводилась.

Образец №2 вырезан в направлении 0 из слоистого однонаправленного углепластика с укладкой  $[0_{26}]$ . Размеры рабочей зоны образца: длина корсетной части  $\approx 40$  мм, минимальное поперечное сечение  $25,5 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 1 мкм/сек. Образец доведен до разрушения, проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии [4, 5].

Образец №3 вырезан из слоистого квазиизотропного углепластика  $(0/\pm 45^0/90^0)$ , укладка и направление вырезки образца не установлены. Размеры рабочей зоны образца: длина 140 мм, поперечное сечение  $70 \times 7$  мм<sup>2</sup>. Нагружение: квазистатическое одноосное растяжение с постоянной скоростью перемещения захвата 2 мкм/сек. Образец до разрушения не доведен, проводилась регистрация сигналов акустической эмиссии.

Образец №4 аналогичен образцу №1. Нагружение 1: циклическое растяжение с управлением по силе, частота нагружения  $f = 10$  Гц, максимальное напряжение  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа, минимальное напряжение  $\sigma_x^{\min} = 52,5$  МПа, количество циклов нагружения  $4,37 \times 10^6$ . Нагружение 2: квазистатическое одноосное растяжение, запись петли гистерезиса через каждые  $10^4$  циклов, скорость изменения напряжения  $V\sigma_x \approx 5$  МПа/сек, максимальный уровень напряжения  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа, минимальный уровень напряжения  $\sigma_x^{\min} = 0$  МПа. Образец до разрушения не доведен, регистрация сигналов акустической эмиссии не проводилась.

## 3. Результаты исследования

На рисунках 1, а, б, в для образца №1 представлены (в зависимости от времени) нормированные скорость изменения напряжения  $v\sigma_x$ , скорость деформации  $v\varepsilon_x$ , разность скоростей  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  и продольный касательный модуль  $E_x$ . Разность нормированных скоростей  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  определяет характер нелинейности диаграммы деформирования на различных ее участках:  $v\sigma_x - v\varepsilon_x < 0$  ( $E_x \downarrow$ ) – диаграмма деформирования выпуклая,  $v\sigma_x - v\varepsilon_x = 0$  ( $E_x = \text{const}$ ) – линейная,  $v\sigma_x - v\varepsilon_x > 0$  ( $E_x \uparrow$ ) – вогнутая. Начальный участок диаграммы деформирования образца №1 выпуклый, после точки перегиба – вогнутый (рис. 1(б)). Значительное увеличение  $E_x$  на рис. 1(в) определяется значительным увеличением  $v\sigma_x - v\varepsilon_x$  на рис. 1(б), так как скорость деформации  $v\varepsilon_x$  прогрессирующе отстает от скорости изменения напряжения  $v\sigma_x$  вследствие образования вне зоны экстензометра области локализации процессов разрушения - деформирование по длине образца становится неоднородным [6].

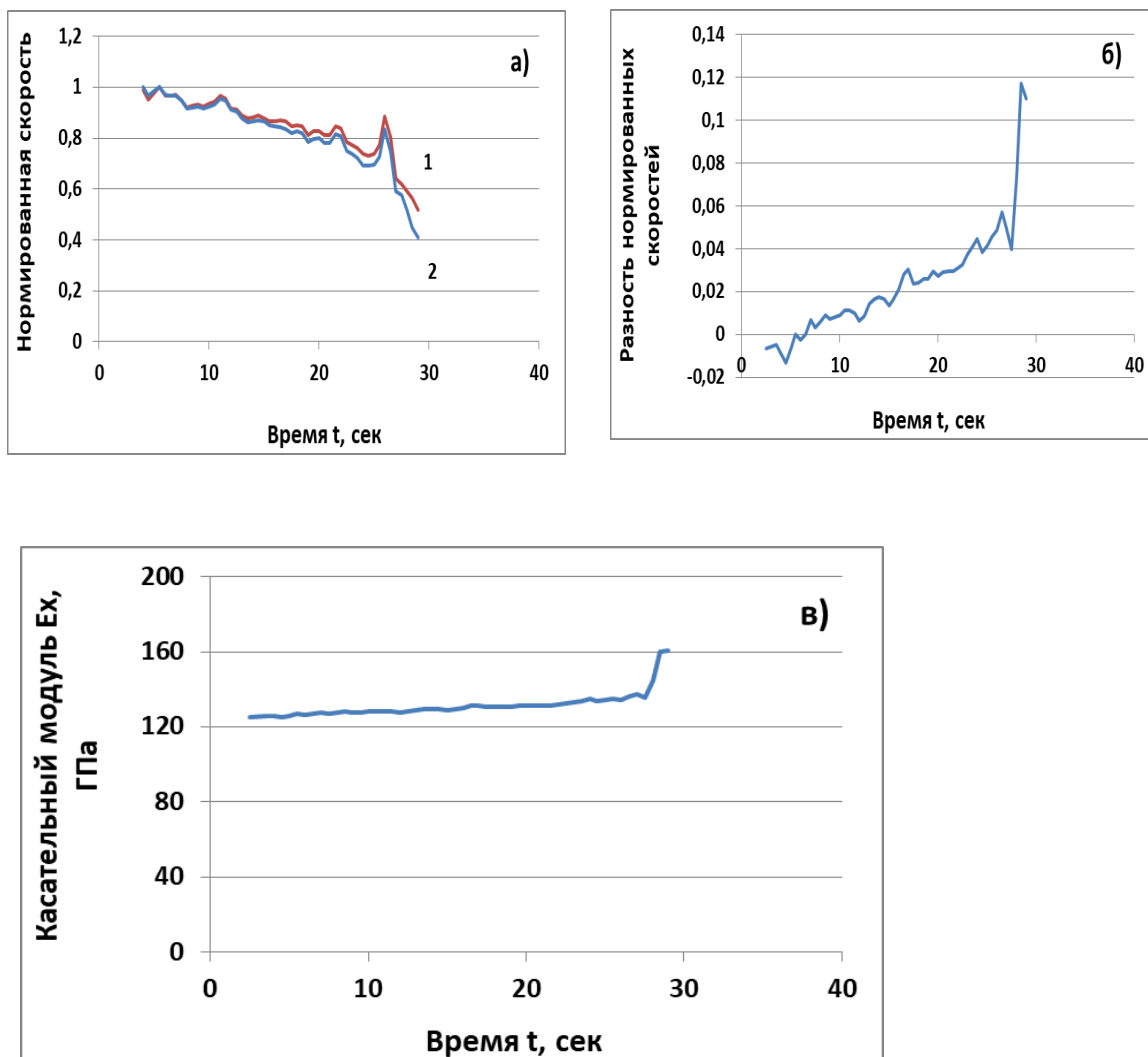


Рисунок 1. Образец №1: а - зависимости нормированных скоростей  $v\sigma_x$  (1),  $v\epsilon_x$  (2) от времени; б - изменение разности нормированных скоростей  $v\sigma_x - v\epsilon_x$  во времени; в - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени

Нелинейность зависимости напряжения от деформации удалось объяснить благодаря сочетанию акустико-эмиссионного метода с классическими методами измерения механических величин в процессе нагружения композитных образцов. На рисунках 2(а), 2(б), 2(в) для корсетного образца №2 представлены зависимости  $v\sigma_x(t)$ ,  $v\epsilon_x(t)$ ,  $E_x(t)$  и распределение акустико-эмиссионных (АЭ) импульсов по длине образца во времени (параллельные линии на рис. 2(в) – координаты ножек экстензометра). Характер поведения касательного модуля  $E_x$  определяется миграцией во времени нагружения зоны максимальной деформационной активности и разрушения по отношению к объему материала, охватываемого экстензометром. При интенсивном развитии деформации и разрушения материала в зоне экстензометра (рис. 2(в)) касательный модуль  $E_x$  уменьшается с явно выраженным трендом к нулевому значению (рис. 2(б)). До этого наклон кривой деформирования сначала незначительно увеличивался, а затем некоторое время

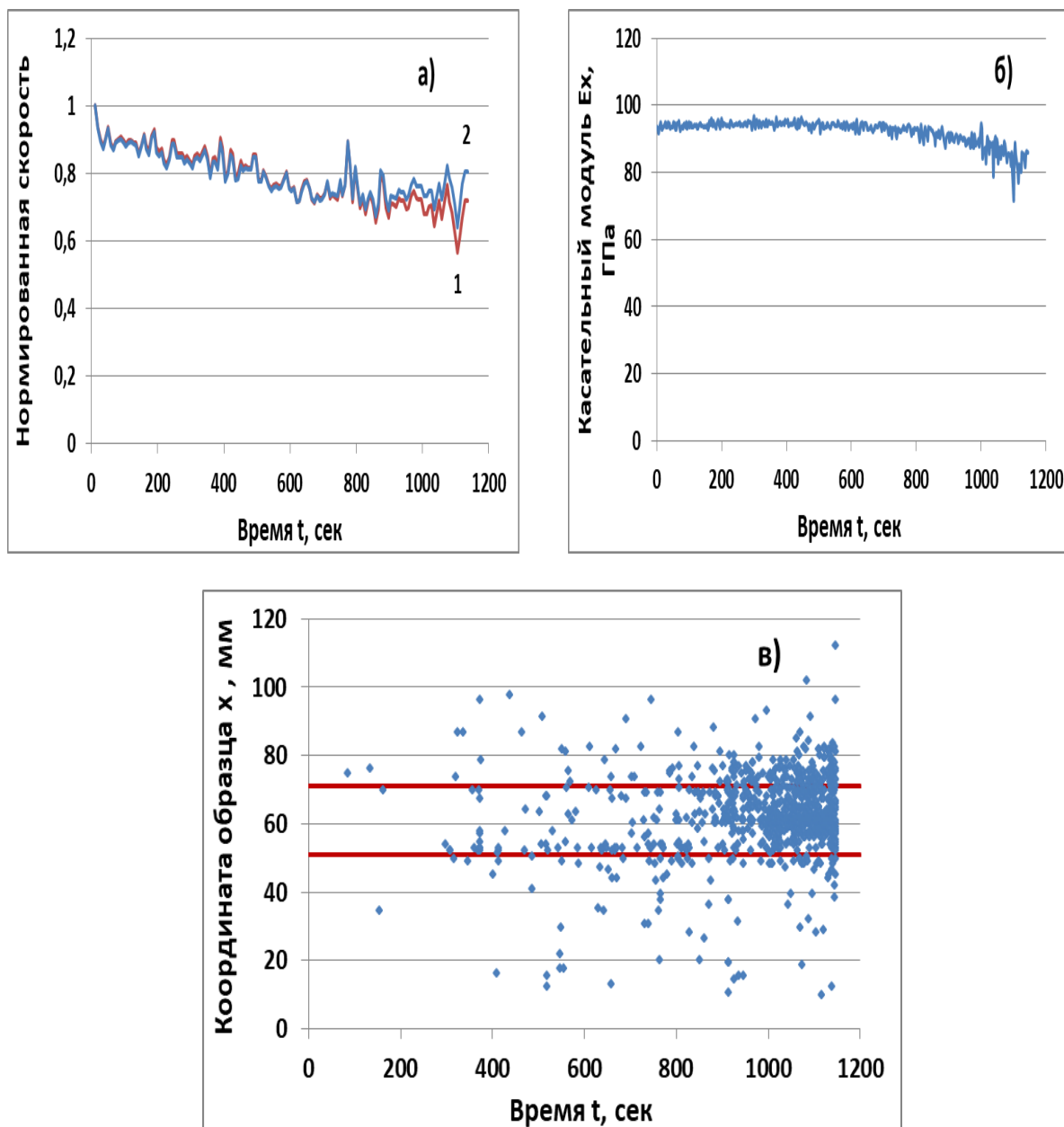


Рисунок. 2. Образец №2: а - зависимости нормированных скоростей  $v\sigma_x$  (1),  $v\epsilon_x$  (2) от времени; б - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени; в - распределение АЭ импульсов по длине образца во времени

оставался постоянным. Такое поведение коррелирует с развитием процесса разрушения образца по его длине во времени, представленного на рис. 2(в), а также соответствует зависимостям  $v\sigma_x(t)$ ,  $v\epsilon_x(t)$  (рис. 2(а)).

На рисунках 3(а), 3(б), 3(в) для образца №3 представлены зависимости, аналогичные образцу №2. Акустико-эмиссионный анализ дает распределение АЭ импульсов по длине образца во времени (рис. 3(в), параллельные линии – координаты ножек экстензометра). В объеме материала, охватываемого экстензометром, наблюдается незначительное количество АЭ событий, свидетельствующих о деформационной активности

и локальных разрушениях. Разность нормированных скоростей  $v\sigma_x - v\varepsilon_x > 0$  (рис. 3(а)), касательный модуль  $E_x$  увеличивается (рис. 3(б)), диаграмма деформирования вогнутая.

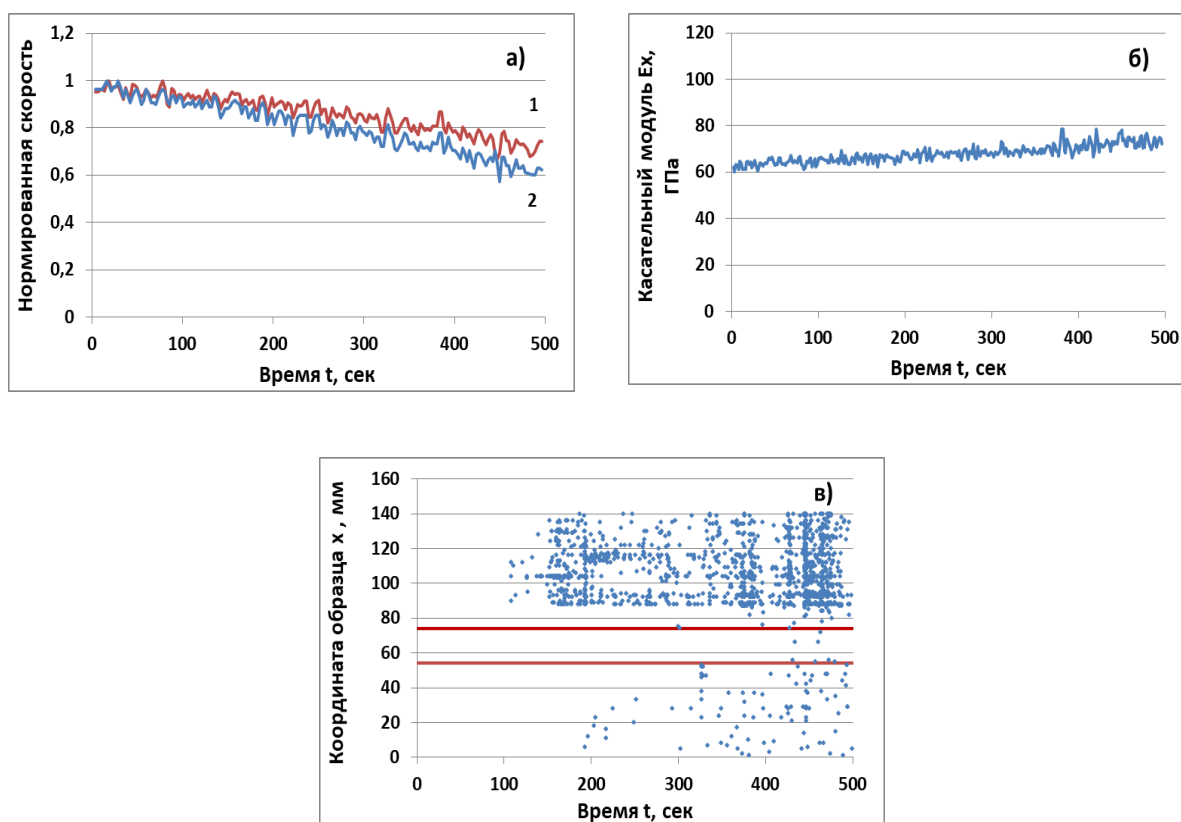


Рисунок. 3. Образец №3: а - зависимости нормированных скоростей  $v\sigma_x$  (1),  $v\varepsilon_x$  (2) от времени; б - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от времени; в - распределение АЭ импульсов по длине образца во времени

Все выше описанные эксперименты проводились при жестком нагружении с постоянными скоростями перемещения захвата. Квасистатическое одноосное растяжение образца №4 проводилось при мягком нагружении с постоянной скоростью изменения напряжения  $V\sigma_x \approx 5$  МПа/сек до максимального уровня напряжения  $\sigma_x^{\max} = 525$  МПа. Зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения для этого образца представлена на рис. 4(а). Довольно значительная выпуклость кривой деформирования на начальном участке ( $E_x \downarrow$ ) через небольшой линейный участок переходит в незначительную вогнутость до конца нагружения ( $E_x \uparrow$ ). На рис. 4(б) приведено сравнение зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения для двух видов нагружения: жесткого (образец №1 кривая 1) и мягкого (образец №4 кривая 2). Кривые практически совпадают во всем диапазоне напряжений за исключением начальных участков нагружения до  $\sigma_x \approx 150$  МПа. Пока пояснения отмеченному расхождению нет.

В дальнейшем образец №4 подвергся циклическому растяжению (Нагружение 1 в разделе «Материалы и методы испытаний»). Через каждые  $10^4$  циклов записывалась петля гистерезиса (Нагружение 2 там же). Описанное квазистатическое растяжение образца №4 – половина петли гистерезиса №0 при увеличении нагрузки. Петля гистерезиса №0 записана до начала, а петля №437 после завершения циклического нагружения. Результат циклического воздействия на образец представлен на рис. 4(в) в виде сравне-

ния зависимостей продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения при увеличении нагрузки в петлях гистерезиса №0 и №437. С увеличением числа циклов нагружения выпуклость зависимости  $\sigma_x = f(\epsilon_x)$  на начальном участке до  $\sigma_x \approx 150$  МПа постепенно уменьшается и плавно переходит в постепенно увеличивающуюся вогнутость. Вогнутость зависимости  $\sigma_x = f(\epsilon_x)$  при  $\sigma_x > 150$  МПа уменьшается незначительно с увеличением количества циклов нагружения.

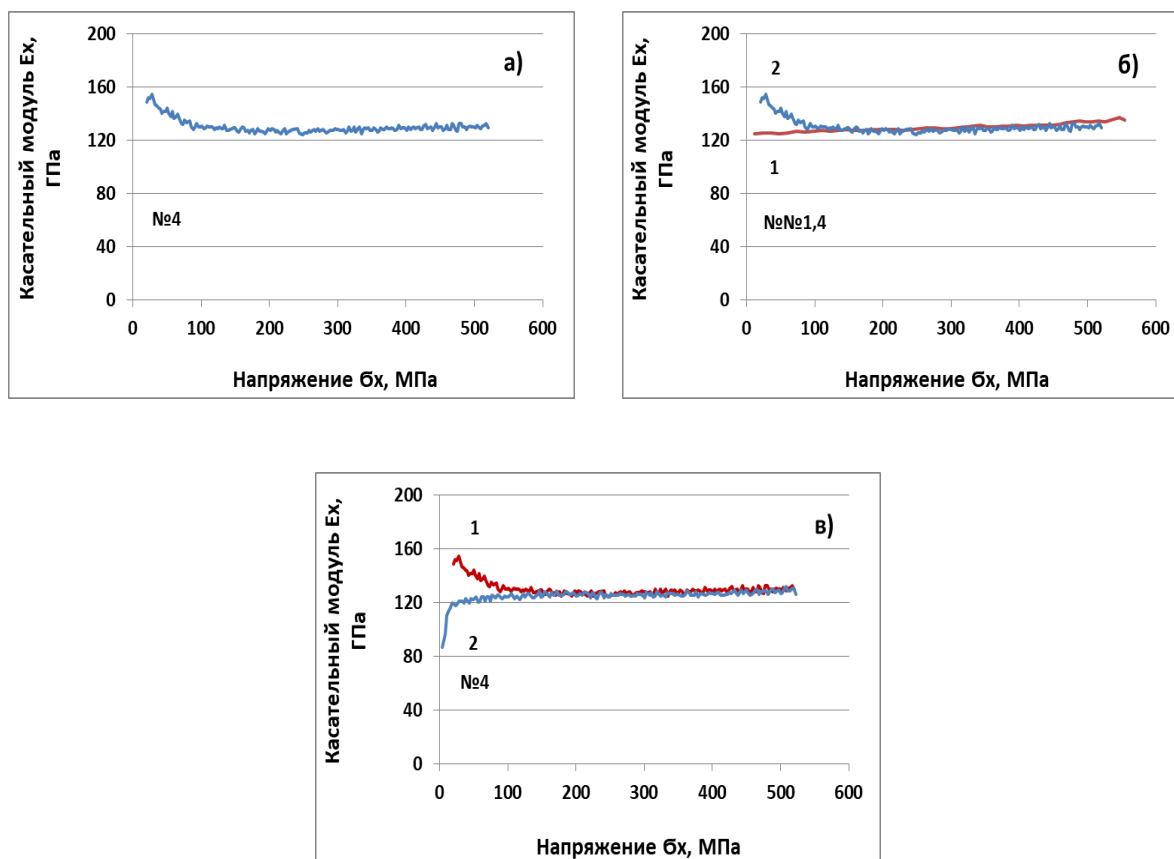


Рисунок 4. Образец №4: а - зависимость продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения при мягком нагружении; б - зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения: образец №1 при жестком (1), образец №4 при мягком (2) нагружениях; в - зависимости продольного касательного модуля  $E_x$  от напряжения в начале (1) и конце (2) циклического нагружения

### 5. Заключение

Проведенные механические эксперименты совместно с акустико-эмиссионными измерениями подтверждают, что незначительные выпуклость или вогнутость кривой деформирования зависят от взаимного расположения зоны деструкции, мигрирующей и развивающейся при квазистатическом растяжении образца, и места закрепления экстензометра на образце: при интенсивном развитии деформаций и разрушений материала в зоне экстензометра касательный модуль уменьшается, в противном случае – увеличивается.

Приведенное пояснение увеличения касательного модуля  $E_x$  нелинейной зависимости напряжения от деформации при одноосном квазистатическом растяжении слоистых углепластиков не поясняет увеличение касательного модуля  $E_x$  при циклическом

нагружении таких углепластиков. Как видно из рис. 4(в), касательный модуль  $E_x$  зависимости  $\sigma_x = f(\varepsilon_x)$ , за исключением начального участка, продолжает увеличиваться даже после нескольких миллионов циклов нагружения. Незначительное накопление повреждений материала в процессе записи петли гистерезиса при увеличении нагрузки после существенного циклического воздействия не позволяет утверждать, что увеличение касательного модуля  $E_x$  определяется интенсивным развитием деформаций и разрушений материала вне зоны экстензометра. Вопрос сохранения вогнутости петли гистерезиса (увеличения касательного модуля) при циклическом нагружении остается открытым.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Макаров, П. В. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред / П. В. Макаров, М. О. Еремин // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. №1. – С. 5-26.
2. Лагас, П. А. Нелинейный характер зависимости “напряжение – деформация” для слоистых графитоэпоксидных пластиков // Аэрокосмическая техника. – 1986. – №4. – С. 102-111.
3. Sendekyj, G. P. Fracture Behavior of Thornel 300/5208 Graphite-Epoxy Laminates – Part 1: Unnotched Laminates / G. P. Sendekyj, M. D. Richardson, J. E. Pappas // Composite Reliability, ASTM STP 580. – 1975. – Pp. 528-546.
4. Северов, П. Б. Оценка механического состояния слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов неупругого деформирования и разрушения / П. Б. Северов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №4. – С. 85-92.
5. Северов, П. Б. Деформирование и разрушение однонаправленных слоистых углепластиков по данным акустической эмиссии / П.Б. Северов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. – Уфа, 2019. – С. 776-778.
6. Severov, P.V. Experimental Studies on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Laminates under Static and Cyclic Loading / P.V. Severov, A. M. Dumanskii // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2014. – Vol. 43, No. 5. – Pp. 435-438.

Поступила в редколлегию 04.02.2021г.