DOI 10.25205/978-5-4437-1353-3-34 **УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА НА УЧАСТКАХ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ПОВТОРНОМ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ** Северов П.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

Нелинейность зависимости "деформация – напряжение" при механическом нагружении слоистых углепластиков с различными видами укладок является характерной особенностью этого подкласса композиционных материалов. Диаграммы деформирования образцов для большинства укладок углеродных волокон выпуклы в положительном направлении оси ординат - вверх. Менее привычным является выпуклость кривой деформирования вниз, что связано с увеличением касательного модуля в процессе деформирования. Повышение жесткости материала с ростом величины деформации связано, предположительно, с постепенным включением в работу волокон углерода или их частей, расположенных вдоль направления приложения усилия. Зачастую нелинейность слабо выражена и почти не заметна на диаграммах деформирования. Реальное пребывание материала в поле приложенных нагрузок неизбежно вносит изменения в его структуру, и эти изменения позволяют судить о деградации свойств на макроуровне. Свойства материала, например, в начале нагружения и перед разрушением различны [1]. Увеличению скорости накопления повреждений, приводящих в итоге к макро разрушению, способствуют, наряду с другими факторами, циклические переменные нагрузки.

В настоящей работе показана возможность уточненного анализа нелинейности верхних и нижних ветвей петель гистерезиса углепластика с укладкой [0_{26}], все волокна которого работают в направлении приложенной нагрузки, при повторном квазистатическом нагружении с управлением электросервогидравлической испытательной машиной по перемещению активного захвата (см. рис. 1а). Данное нагружение не относится к мягкому (управление по σ) или жесткому (управление по ε) видам нагружения. Суммарная диаграмма деформирования в соответствии с диаграммой нагружения, представленной на рисунке 1а, приведена на рисунке 16.



Рис. 1. Диаграмма нагружения (а) и суммарная диаграмма деформирования образца (б)

Всего записано 8 петель гистерезиса, разрушение образца произошло на 9-ом цикле нагружения при выходе на горизонтальный участок изменения положения активного захвата. Увеличение деформации ϵ ↑ на верхней ветви петли гистерезиса назовем активным деформированием, уменьшение деформации ϵ ↓ на нижней ветви – пассивным [2]. Массивы экспериментальных точек (ϵ_i , σ_i) на каждой верхней и нижней ветвях аппроксимировались полиномами 6-й степени. Далее работа с массивами точек замещалась математическими манипуляциями с группами уравнений верхних ϵ ↑ и нижних ϵ ↓ ветвей. Нелинейные составляющие верхних и нижних ветвей петель гистерезиса представлены на рисунках 2а и 26 соответственно. Они получены вычитанием из уравнений ветвей уравнений прямых, аппроксимирующих соответствующие массивы точек.



Рис. 2. Нелинейные составляющие верхних (а) и нижних (б) ветвей петель гистерезиса

Наличие полиномиальных уравнений ветвей петель гистерезиса позволило для каждой петли определить как функции деформации: расстояние по оси ординат между ветвями, касательные модули ветвей, скорости изменения касательных модулей ветвей, работу напряжений ветвей, рассеяние механической энергии на единицу объёма материала и другое. Определенный интерес представляет изменение указанных характеристик петли гистерезиса углепластика с ростом числа циклов нагружения и увеличением уровня накопленных повреждений. Для демонстрации на рисунках За и Зб приведены модули линейных составляющих верхних є↑ и нижних є↓ ветвей петель гистерезиса в зависимости от цикла нагружения и рассеяние механической энергии на единицу объема материала в зависимости от деформации и цикла нагружения.



Рис. 3. Модули линейных составляющих ветвей (а) и рассеяние механической энергии на единицу объема материала (б)

В заключение хотелось бы указать цель работы: сопоставить рассеяние механической энергии в зависимости от цикла нагружения с накопленным уровнем энергии акустических импульсов в каждом цикле нагружения. Синхронно с механическим экспериментом проводилась регистрация акустико-эмиссионных сигналов [3].

1. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. № 1. С. 5–26.

2. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1974. – 560 с.

3. Северов П.Б. Деформирование и разрушение однонаправленных слоистых углепластиков по данным акустической эмиссии // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. Уфа. 2019. С. 776–778.