

АППРОКСИМАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИКОВ

¹Думанский А.М., ²Таирова Л.П., ¹Алимов М.А., ³Горлач И. (¹ИМАШ РАН, Россия,²МГТУ им. Баумана, Москва, Россия, ³Метрополитен Университет Нельсона

Манделы, Порт Элизабет, Южная Африка)

Тел.: +7 (499) 1353074; E-mail: alduman@rambler.ru

Аннотация. Предложен вариант аппроксимации диаграмм деформирования многослойных композитов, позволяющий учитывать нелинейные свойства. Аппроксимация основана на предположении: нелинейность деформирования композита определяется нелинейными свойствами слоев при сдвиге в плоскости слоя. В качестве исходных данных предлагается использовать результаты испытаний на квазистатическое растяжение перекрестно армированных образцов с углами укладки $45^\circ \pm 10^\circ$.

Ключевые слова: жесткость, податливость, сдвиг, кусочно-линейная зависимость, матричные преобразования, функция Хевисайда, однонаправленный слой.

1. Введение. Композитные материалы широко внедряются в современное машиностроение. В ряде отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая и авиационная без использования полимерных волокнистых композитов невозможна реализация большинства технических проектов. Данная работа посвящена разработке теории структурно-феноменологического подхода, позволяющего описывать нелинейное деформирование слоистых пластиков.

Соотношения теории слоистых пластин широко используются при описании механического поведения элементов тонкостенных конструкций из композитных материалов, армированных непрерывными волокнами. Однако необходимость все более точного соответствия расчетных и экспериментальных данных породила множество уточненных подходов, объясняющих и описывающих особенности реального поведения материалов и конструкций из композитов. Сложность в разработке таких подходов объясняется анизотропией механических свойств слоистых композитов и разнообразием механизмов деформирования и разрушения.

Исходными данными при проектировании элементов конструкций из композитов чаще всего являются свойства однонаправленного слоя (ОС), поэтому возникает необходимость максимально точного определения механических свойств ОС. Эта задача успешно решается методом идентификации по результатам испытаний слоистых образцов с различными схемами армирования [1].

Результаты экспериментов показывают, что наибольшая степень нелинейности диаграмм деформирования при одноосном нагружении наблюдается при испытании структур с укладкой близкой к $\pm 45^\circ$, т.е. в условиях, когда имеют место максимальные значения напряжений сдвига в главных осях ортотропии слоя. Сама идея учета нелинейных свойств слоя при сдвиге не нова и существует немало попыток описания этих свойств [2], однако создание методик, максимально удобных в инженерной практике и обеспечивающих хорошую точность описания экспериментальных данных для различных структур, по-прежнему актуальна. Одна из методик предлагается в данной работе.

2. Описание модели. Предлагаемая методика основана на использовании соотношений, обладающих значительной универсальностью и простотой, что может оказаться весьма полезным при описании нелинейного деформирования многослойных композитов с учетом фактора времени (реологических свойств композитов).

Результаты экспериментальных исследований слоистых углепластиков позволяют предположить, что модули упругости и коэффициенты Пуассона относительно главных осей ортотропии слоя могут с достаточной для практики точностью считаться постоянными вплоть до разрушения. Нелинейная зависимость деформаций сдвига от касательных напряжений может быть получена по результатам испытаний на сдвиг в плоскости слоя или методом идентификации, по результатам испытаний образцов с перекрестной укладкой.

Предположим, что кривую деформирования слоя при сдвиге в плоскости слоя можно аппроксимировать некоторой непрерывной функцией, состоящей из связанных линейных участков. В этом случае выражение для модуля сдвига можно представить в

виде суммы: $g_{66}(\gamma_{12}) = \sum_{k=1}^n \Delta g_k H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(k)})$, где Δg_k - изменение модуля сдвига слоя

при переходе к новому участку, $H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^{(k)})$ - функция Хевисайда, n - количество линейных участков. В случае, если имеются два участка, зависимость модуля сдвига $G_{12} = g_{66}$ от деформации γ_{12} может быть записана в следующем виде

$$g_{66}(\gamma_{12}) = g_{66}^0 H(\gamma_{12}) - (g_{66}^0 - g) H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^*), \quad (1)$$

где g_{66} характеризует угол наклона прямой на втором участке аппроксимации, γ_{12}^* - значение деформации, при которой начинается переход на второй линейный участок.

Подставляя выражение для модифицированного модуля сдвига в матрицу жесткости, получаем следующее выражение

$$[G_{12}] = \begin{pmatrix} g_{11}^0 & g_{11}^0 & 0 \\ g_{11}^0 & g_{11}^0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{66}^0 H(\gamma) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (g_{66}^0 - g) H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^*) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Первое слагаемое представляет собой матрицу элементов жесткости слоя на начальном участке, а второе позволяет учитывать нелинейность.

Для удобства представим (2) в матричном виде:

$$[G_{12}] = [G_{12}^0] - [G_0] f, \quad (3)$$

где $f = H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^*)$ - множитель матрицы $[G_0]$, имеющей в рассматриваемом случае лишь один ненулевой член, но в других случаях может иметь и более сложный вид.

Матрица жесткости пакета формируется в соответствии с соотношениями теории слоистых пластин [4]

$$[G_{xy}] = \sum_k [T_1^{(k)}] [G_{12}] [T_1^{(k)}]^T \bar{h}^{(k)}, \quad (4)$$

$$[T_1^{(k)}] = \begin{pmatrix} c^2 & s^2 & -2sc \\ s^2 & c^2 & 2sc \\ sc & -sc & c^2 - s^2 \end{pmatrix} - \text{матрица поворота, } s = \sin \theta, c = \cos \theta.$$

Подставляя представление матрицы жесткости (3) в (4), в общем виде получаем

$$[G_{xy}] = [G_{xy}^0] - [G]f, \quad (5)$$

Где
$$[G_{xy}^0] = [T_1^{(k)}][G_{12}^0][T_1^{(k)}]^T, [G] = [T_1^{(k)}][G_0][T_1^{(k)}]^T.$$

Рассмотрим возможность определения деформаций слоистого композита по заданным значениям внешних напряжений с учетом принятых гипотез. Выражение для определения деформаций по заданным напряжениям может быть представлено в следующем виде

$$\{\varepsilon_{xy}\} = [S_{xy}]\{\sigma_{xy}\}, \quad (6)$$

где $\{\varepsilon_{xy}\}, \{\sigma_{xy}\}$ - столбцы деформаций и напряжений в осях пакета, $[S_{xy}]$ - матрица податливости пакета. Для получения матрицы податливости проведем обращение матрицы жесткости с помощью некоторых матричных преобразований

$$[S_{xy}] = \left[[G_{xy}^0] \left[[I] + [G_{xy}^0]^{-1} [G]f \right] \right]^{-1} = \left[[I] + [G_{xy}^0]^{-1} [G]f \right]^{-1} [G_{xy}^0]^{-1}, \quad (7)$$

$[I]$ - единичная матрица.

Отметим, что при отсутствии нелинейных свойств, наши выражения вырождаются в обычные соотношения линейной теории пластин.

Обращение матрицы жесткости $[G_{xy}^0]^{-1} = [S_{xy}^0]$ есть обращение обычной числовой матрицы и трудности не представляет, основная задача заключается в обращении функциональной части выражения (7). Представим ее в удобном для проведения матричных преобразований виде

$$[I - Af]^{-1} = I + Af + (Af)^2 + \dots \quad (8)$$

где
$$[A] = [G_{xy}^0]^{-1} [G].$$

Ряд в (8) будет сходиться при выполнении некоторых условий связанных с нормой матричного выражения $[A]f$, а именно $\|Af\| < 1$.

Для получения вида ряда в (8), удобного для практических вычислений, проведем диагонализацию матрицы после которой ее можно представить в следующем виде $[A] = [R][D][R]^{-1}$, где $[R]$ матрица, составленная из собственных векторов, а диагональная матрица $[D]$ - собственных значений матрицы $[A]$.

Подставляя полученное представление в ряд в (8) получаем следующее выражение

$$I + Af + (Af)^2 + \dots = R \left(I + Df + (Df)^2 + \dots \right) R^{-1}. \quad (9)$$

Диагональная матрица в скобках в выражении (9) может быть свернута следующим образом

$$I + Df + (Df)^2 + \dots = \text{diag} \left(1 + \lambda_i f + (\lambda_i f)^2 + \dots \right) = \text{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i f} \right). \quad (10)$$

Выражение для матрицы податливости (7) принимает следующий вид

$$[S_{xy}] = [R] \operatorname{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i f} \right) [R]^{-1} [S_{xy}^0]. \quad (11)$$

В нашем случае матрица податливости является функцией от сдвиговой деформации γ_{12} , при $\gamma < \gamma_{12}^*$ имеем $f = (g_{66}^0 - g) H(\gamma_{12} - \gamma_{12}^*) = 0$ и она равна матрице податливости $[S_{xy}^0]$, при $\gamma \geq \gamma_{12}^*$ она скачком меняет свои числовые значения.

Для расчета деформаций в слоях при заданной внешней нагрузке для какой-либо схемы армирования необходимо определить числовое значение напряжения, при котором достигается значение сдвиговой деформации, равное γ_{12}^* . Это может быть выполнено с помощью анализа следующего выражения

$$\{\sigma_{xy}\} = [G_{xy}^0] [T_2^{(k)}] \{\varepsilon_{12}^*\}, \quad (12)$$

где $[T_2^{(k)}]$ - матрица преобразования при повороте системы координат, $\{\varepsilon_{12}^*\}$ - столбец деформаций, в котором значение компоненты сдвига равно пороговому значению γ_{12}^* .

Можно предложить следующую схему проведения тестовых испытаний, определения характеристик жесткости и построения диаграмм деформирования. На основании диаграмм деформирования в начальной линейной области методом идентификации [1] проводится определение упругих характеристик слоя. Как правило, программа испытаний включает одноосное нагружение перекрестно армированных образцов, включая структуры, близкие к $[\pm 45^\circ]$. По диаграммам деформирования этих структур, в которых в наибольшей степени проявились нелинейные свойства, осуществляется построение диаграмм деформирования слоя при сдвиге. Потом на основании анализа экспериментальных данных фиксируется значение порогового значения сдвиговой деформации, при которой начинается второй участок линейного деформирования. Используя полученные выше соотношения, строятся диаграммы деформирования слоистого композита, учитывающие его нелинейные свойства.

3. Заключение. Предложена последовательность расчетов, основанная на соотношениях теории слоистых пластин, позволяющая учесть нелинейное деформирование слоистого композитного материала, определяющееся нелинейностью деформаций при сдвиге в плоскости слоя.

Список литературы: 1. Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Таирова Л.П. Идентификация упругих характеристик однонаправленных материалов по результатам испытаний многослойных композитов. / Сборник научных статей: Расчеты на прочность. - Выпуск 30. М.: Машиностроение, 1989. - С. 16-31. 2. Лагас П.А. Нелинейный характер зависимости «напряжение-деформация» для слоистых графитопоксидных пластиков // Аэрокосмическая техника. - 1985. - № 4. - Апрель. - С. 191-206. 3. Композиционные материалы. Справочник. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с. 4. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. - М.: Мир, 1989. 655 с.

AN APPROXIMATION OF NONLINEAR STRAIN OF LAMINATED PLASTICS

¹Dumansky A.M., ²Tairova L.P., ¹Alimov M.A., ³Gorlach I. (¹Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, ³Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth, South Africa)

Abstract A version of stress-strain diagram approximation for multilayered composites, which takes into account the nonlinear properties of composites has been proposed in this research, was suggested. The approximation is based on the assumption that the nonlinear strain is induced by the nonlinear properties of the layer under shear strain. The test results with the ply angle of $45 \pm 10^\circ$ lay up under quasistatic tension is presented for an application as the initial data.

Key words: stiffness, compliance, shear, piecewise-linear dependence, matrix transformation, Heaviside function, unidirectional layer.

АПРОКСИМАЦІЯ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ШАРОВИХ ПЛАСТИКІВ

¹Думанський А.М., ²Таїрова Л.П., ¹Алімов М.А., ³Горлач І. (Інститут машинобудування ім. А.А. Благонравова РАН, Москва, Росія, ²МДТУ ім. Баумана, Москва, Росія, ³Нельсон Мандела Метрополітен Юніверсіті, Порт Елізабет, ПАР)

Анотація Запропоновано різновид апроксимації діаграм багатошарових композитів, який дозволяє враховувати нелінійні властивості. Апроксимація ґрунтується на припущенні: нелінійність деформування композита визначається нелінійними властивостями шарів при зсуві в площині шара. Відносно вихідних даних пропонується зуживати наслідок випробування на квазістатичний розтяг навхрест армованих зразків з кутами укладання $45 \pm 10^\circ$.

Ключові слова: жорсткість, піддатливість, зсув, шматочно-лінійна залежність, матричні перетворення, функція Хевісайда, однонаправлений шар.

Надійшла до редколегії: 03.12.2010.

УДК 539.3; 620.1

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА

¹Думанский А.М., ²Таирова Л.П., ¹Северов П.Б. (ИМАШ РАН, Москва, Россия, ²МГТУ им. Баумана, Москва, Россия)

Тел.: +7 (499) 1353074; E-mail: alduman@rambler.ru

Аннотация. Приведено описание и методика проведения экспериментов при квазистатическом и циклическом нагружении в гигацикловой области образцов слоистого углепластика КМУ-3Л, которые хранились в комнатных условиях в течение 30 лет. Дан анализ диаграмм деформирования в продольном и поперечном направлениях, а также по толщине образца. Проведены тестовые испытания образцов на усталостное нагружение с периодической оценкой кривых деформирования. Проведено сопоставление полученных механических свойств с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: жесткость, прочность, сопротивление усталости, циклическое нагружение, накопление повреждений.

1. Введение. Углепластик является одним из основных конструкционных материалов, используемых в современном машиностроении, особенно в аэрокосмической и авиационной промышленности. В первую очередь это связано с его высокими показателями по удельным характеристикам жесткости, прочности, сопротивления длительным, переменным во времени нагрузкам, коррозионной стойкости и др. Элементы конструкций, в которых используются углепластики, предназначены для длительного использования в условиях переменных нагрузок и ряда других внешних воздействий. В связи с этим накопление экспериментальных данных по механическому поведению углепластика, отработка методик проведения испытаний и интерпретации и опытных

данных представляется актуальной. Установлению взаимосвязи свойств углепластика при различных режимах нагружения, в частности, посвящены работы [1,2].

2. Экспериментальное оборудование и результаты исследования. В работе представлены результаты двух независимо проведенных экспериментов образцов из углепластика КМУ-3Л, которые в течение примерно 30 лет находились на хранении в комнатных условиях. В соответствии с первым исследованием предполагалось оценить упругопрочностные свойства при одноосном растяжении образцов со структурой $[0\pm45]$, 26 слоев уложены под углом 0 и по 8 слоев под углом ±45 , размером $200\times10\times5$ мм. Был проведено испытание на восемь циклов статического растяжения до разрушения в последнем цикле на электрогидравлической установке *Instron* с одновременным измерением деформаций в трех направлениях: в продольном, поперечном и по толщине образца. Деформации измерялись с помощью тензометрической станции *СИИТ-3* с пошаговым измерением нагрузки и перемещений. Для определения характеристик упругости на все образцы были наклеены тензодатчики *КФ БП1-10-100-А-12* с базой 5 мм - по 6 штук на каждый образец, по два на каждую сторону образца и, кроме того производился контроль перемещений с помощью специального приспособления предусмотренного *Instron*. Перед наклейкой датчиков поверхности образцов в зонах расположения датчиков зачищались мелкой наждачной бумагой, пока не начинали просвечивать волокна поверхностного слоя при осмотре поверхности через лупу с 4-кратным увеличением. Образец с приклеенными датчиками в захватах испытательной машины приведен на рис. 1.



Рис. 1. Образец углепластика КМУ-3Л в захватах машины *Instron*

Датчики приклеивались клеем быстрого отверждения *Super Glue Alsticko*. Наличие 2 продольных датчиков, 2 поперечных и 2 по толщине позволяло вести контроль равномерности деформаций в рабочем сечении в соответствии с ГОСТ 25.601-80. Рядом с каждым датчиком приклеивалась бобышка, использовавшаяся для соединения датчика с проводами, идущими к регистрирующему прибору *СИИТ-3* во время испытаний на растяжение. Образец в захватах испытательной машины с приклеенными тензодатчиками показан на рис. 1. Были выполнены 8 циклов нагружения с разгрузкой, причем последний до разрушения.

Результаты экспериментальных данных приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что в продольном и поперечном направлениях материал показал линейность свойств до разрушения. На диаграммах зависимости деформации по толщине образца на начальном участке наблюдалось утонение образца, а при разгрузке происходило появление положительной деформации, связанной с накоплением разрушений по толщине. Кинетика изменения деформаций по толщине показана на рис. 3 из которого видно как растет остаточная деформация.

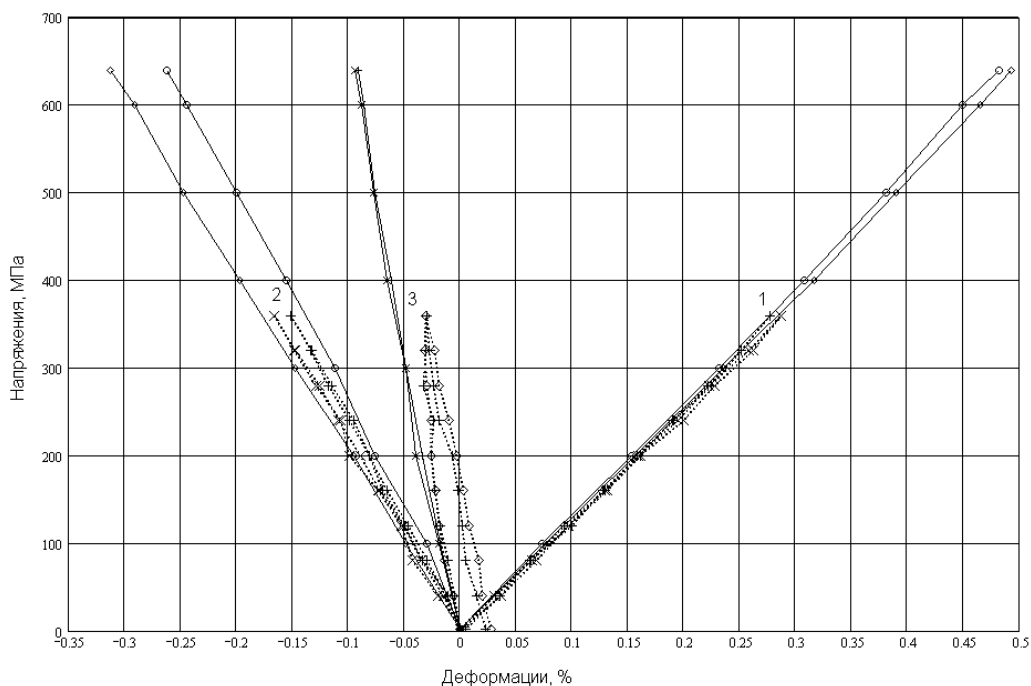


Рис. 2. Экспериментальные кривые деформирования углепластика КМУ-3Л. (1 - продольные деформации, 2 – в поперечном направлении и 3 - по толщине образца)

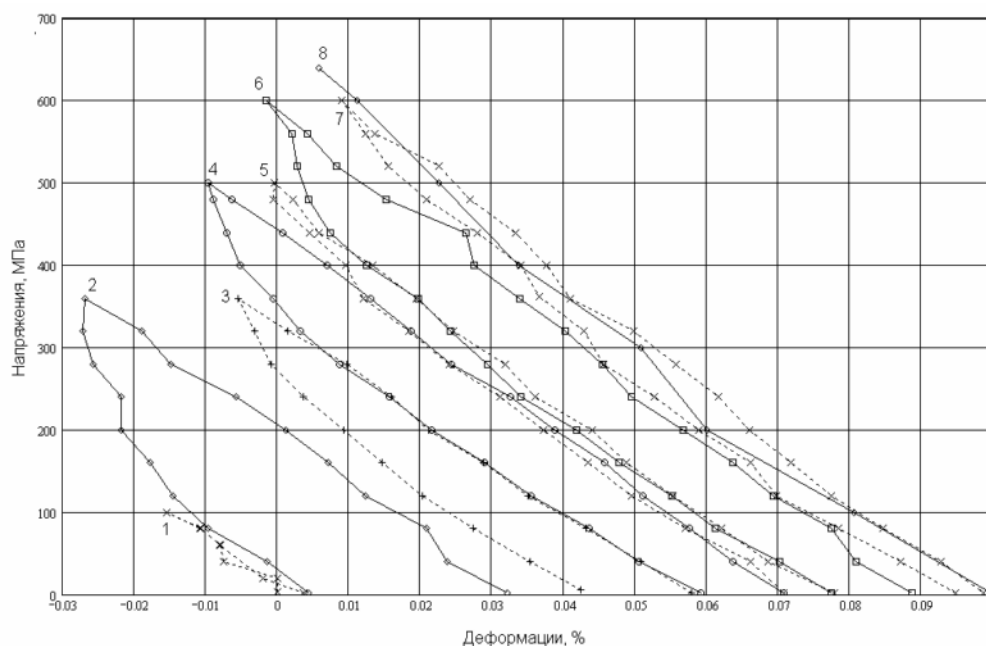


Рис. 3. Экспериментальные кривые деформирования углепластика КМУ-3Л по толщине (цифра указывает номер цикла нагружения)

Вычисленные средние значения модуля упругости в продольном направлении, коэффициентов Пуассона оказались равными соответственно: $E_x = 127$ ГПа, $\nu_{xy} = 0,56$, $\nu_{xz} = 0,12$. Предельное напряжение оказалось равным 670 МПа. Заметное отклонение ν_{xz} на втором цикле нагружения свидетельствует о том, что в окрестности края по тол-

щине произошло растрескивание, при разгрузке не позволившее деформации образца вернуться в прежнее состояние.

Вторая часть эксперимента состояла в получении оценки жесткости материала в продольном направлении и установлении закономерностей механического поведения при циклическом нагружении.

Механические испытания проводились на электросервогидравлической установке INOVA ИК-6033, разработанной в конце 80-х начале 90-х годов рядом предприятий стран СЭВ (СССР, ЧССР, ГДР, НРБ). Электронная управляющая система *EDIZ-6* и гидравлическая распределительная станция (*Manifold*) произведены на предприятии INOVA (ЧССР). Гидравлический агрегат и аппаратура управления гидравлическим агрегатом продукция предприятия *ORSTA GYDRAULIK* (ГДР). Нагружающее устройство с комплектом механических и гидравлических захватов поставлены заводом ЗИМ (СССР). Рабочий цилиндр на гидравлических опорах и два сервоклапана к нему изготовлены на предприятии Хидравлика (НРБ). Нагревательная печь для проведения температурных испытаний до 1200⁰ С спроектирована и изготовлена МНПО «Измеритель» (СССР). В эксплуатацию установка INOVA ИК-6033 введена в 2010 году силами специалистов ИМАШ РАН.

Некоторые технические характеристики машины: диапазон статических и динамических усилий ± 200 кН, ход плунжера 100 мм, экстензометр продольной деформации с базой 20 мм (диапазон измерения удлинения ± 1 мм), датчик раскрытия трещины с регулируемой базой измерения от 5 до 12 мм (диапазон измерения раскрытия ± 2 мм), максимальный расход масла 130 л/мин при давлении 20 МПа, система регулирования постоянного давления масла гидроагрегата, максимальный суммарный расход двух сервоклапанов гидроцилиндра 126 л/мин.

Аппаратура электронной одноканальной управляющей системы *EDIZ-6* состоит из пяти функциональных блоков, соединенных общей шиной *EBUS*. Это блоки: *X 843* – трёхканальный запоминающий осциллограф, *GEN 601* – одноканальный генератор функций нагружения (диапазон генерирования сигнала от 0,001 до 127,5 Гц), *PAS 601* – тринадцатиканальный блок измерения (частота дискретизации сигнала от 0,03 до 10000 выборок в секунду), *RED 611* – одноканальный аналоговый регулятор *PI* типа (*P* пропорциональное, *PI* пропорционально-интегральное виды регулирования), *PIL 601* – блок защиты и управления гидравликой. Блоки *GEN*, *PAS* и *RED* построены на базе микропроцессоров *INTEL 8088*, что позволяет их программирование в ручном режиме до и во время проведения испытания. Эти же блоки объединены внешней шиной *IEEE – 488* (приборный интерфейс, *GPIB*) для подключения управляющего компьютера. В качестве сигнала обратной связи в контуре регулирования может выбираться сигнал одного из четырёх датчиков: усилия, положения плунжера, удлинения (деформации) образца и датчика раскрытия трещины.

В дополнение к стандартной системе измерения и сбора экспериментальных данных аппаратуры *EDIZ-6* (блок *PAS 601*) специалистами ИМАШ РАН разработана современная система сбора, обработки и визуализации экспериментальной информации при проведении механических испытаний материалов и деталей машин на базе электронной аппаратуры и программного продукта фирмы *NATIONAL INSTRUMENTS* США. Для решения данной задачи был использован измерительный модуль *NI 9219* и язык программирования *LabVIEW*. Созданы, отлажены и применены в реальном эксперименте несколько виртуальных приборов (*BIT*), позволяющие совместно с испытательной установкой INOVA ИК-6033 в процессе нагружения образца собирать информацию о силе, приложенной к образцу, деформации образца и перемещении активного захвата. Затем экспериментальные данные передаются в программу *Microsoft Office*

Excel, для последующей обработки. Разработанные виртуальные приборы использовались, в частности, для построения диаграммы деформирования образца из композитного материала КМУ-3Л при постоянной скорости перемещения активного захвата (плунжера), а также в процессе циклического нагружения (мягкое нагружение) такого же образца с целью изучения динамики и закономерностей накопления усталостных повреждений.

Статическое нагружение образца проводилось в гидравлических захватах при постоянной скорости перемещения плунжера $0,03$ мм/сек. Через каждые $0,5$ секунды синхронно измерялись положение плунжера, усилие и осреднённая по слоям (экстензометр устанавливался по толщине) продольная деформация образца. Непосредственно разрушение образца длилось около 7 сек из 34 сек общего времени испытания. Полному разделению образца на две части предшествовало послойное разрушение его передней и задней плоскостей с некоторым сдвигом во времени. С целью представления диаграммы деформирования в классическом виде гладкой монотонно изменяющейся (возрастающей) кривой в координатах номинальная деформация (неизменная база экстензометра 20 мм) – номинальное напряжение (неизменная площадь поперечного сечения 50 мм²) применялась процедура восстановления диаграммы деформирования по реальным измерениям усилия и продольной осреднённой деформации. В результате получены следующие характеристики композитного материала КМУ-3Л: предел прочности 690 МПа, продольная деформация в момент разрушения $0,545\%$, модуль Юнга 131 ГПа. При анализе графика «номинальные напряжения - модуль Юнга» выявлена их линейная зависимость в диапазоне изменения напряжения от 11 МПа до 555 МПа в соответствии с уравнением линии тренда $E = 0,0182\sigma + 124,6$. Максимальное значение модуля $E = 161$ ГПа отмечено при $\sigma = 577$ МПа непосредственно перед первым разрушением слоёв фронтальной части образца.

Циклическое нагружение аналогичного по геометрическим размерам и укладке образца из композитного материала КМУ-3Л проводилось в специальных захватах, работающих только на растяжение и обеспечивающих постоянное усилие зажатия образца. Параметры цикла нагружения следующие: форма – косинус, частота – 10 Гц, асимметрия цикла нагружения $R = 0,1$, $\sigma_{max} = 525$ МПа ($0,76$ от σ_b). Сигналом обратной связи в контуре регулирования было выбрано усилие. В данном эксперименте была предпринята попытка связать изменение модуля Юнга композитного материала КМУ-3Л при циклическом нагружении с процессом накопления усталостных повреждений. Для этого через каждые 10000 циклов нагружения генерировался маркерный цикл нагружения со следующими параметрами: форма цикла – равнобедренный треугольник, частота – $0,005$ Гц, асимметрия $R = 0$, $\sigma_{max} = 525$ МПа. Сигнал обратной связи тот же – усилие. Параллельно с частотой 2 Гц максимально точно измерялись и запоминались нагрузка и деформация образца. В последующем петли обрабатывались в *Excel* с целью вычисления модуля упругости E . Испытание образца (он не разрушился) приостановлено после 4370000 циклов нагружения. Записано и обработано 438 петель и определено, соответственно, такое же количество значений модуля Юнга. Предварительные результаты динамики модуля для композитного материала КМУ-3Л в процессе циклического нагружения следующие: в начальной стадии нагружения при $0 \leq N \leq 200000$ наблюдается относительно значительное уменьшение модуля в соответствии с уравнением линии тренда $E = -900 \cdot 10^{-8} N + 130,6$. На втором участке при $200000 \leq N \leq 2620000$ и на третьем при $2740000 \leq N \leq 4370000$ степень деградации модуля ощутимо падает, что видно соответственно из уравнений $E = -30 \cdot 10^{-8} N + 127,4$ и $E = -7 \cdot 10^{-8} N + 127,3$.

Предварительное сравнение результатов статических испытаний на жесткость и прочность с результатами работы [3] показали хорошую сохраняемость механических свойств углепластика.

3. Заключение. Таким образом, в работе выполнена отработка методики проведения испытаний, анализ закономерностей механического поведения образцов из углепластика при одноосном статическом и циклическом нагружении. Описано оборудование, используемое при проведении испытаний и специфика его использования. Получены диаграммы деформирования образцов из углепластика КМУ-3Л. Отмечены особенности изменения модуля упругости в зависимости от числа циклов нагружения в том числе в гигацикловой области.

Список литературы: 1. Махутов Н.А., Думанский А.М., Стрекалов В.Б. Расчетно-экспериментальное определение сопротивления усталости углепластиков и элементов из них // Заводская лаборатория. - 2006- Т. 72. № 6. — С. 41-46. 2. Виноградов Ю.И., Думанский А.М., Стрекалов В.Б. Оценка характеристик сопротивления усталости многослойных композитных материалов // Механика композитных материалов. — 1993. — Т. 29.- № 3.- С. 329-335. 3. Зиновьев П. А., Песошников Е. М., Попов Б. Г., Таирова Л. П. Экспериментальное исследование некоторых особенностей деформирования и разрушения слоистого углепластика // Механика композитных материалов. — 1980. - № 2. — С. 241— 245.

EXPERIMENTAL-CALCULATED ESTIMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

¹Dumansky A.M., ²Tairova L.P., ¹Severov P.B. (¹Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia)

Abstract Description and experimental procedure on quasistatic and cyclic loading at gigacyclic area of carbon fiber reinforced plastic which were stored for 30 years are presented. The stress-strain diagrams in longitudinal, transverse and by thickness are analyzed. Fatigue testing of samples with periodical estimation of strain curves is conducted. A comparison of the obtained data and known ones is made.

Key words: stiffness, strength, fatigue, cyclic loading, strength, damage accumulation.

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШАРОВОГО ВУГЛЕПЛАСТИКА

¹Думанський А.М., ²Таїрова Л.П., ¹Сєвєров П.Б. (Інститут машинобудування ім. А.А. Благонравова РАН, Москва, Росія, ²МДТУ ім. Баумана, Москва, Росія)

Анотація У статті подано описання та методика проведення експериментів на квазістатичне та циклічне навантаження зразків шарового вуглепластика КМУ-3Л, які знаходились на зберіганні в кімнатних умовах протягом 30 років. Надано аналіз діаграм деформування в поздовжньому та поперечному напрямках, а так само по товщині зразку. Проведено тестові випробування зразків на утомленість від навантаження з періодичною оцінкою кривих деформування. Зроблено порівняння отриманих механічних властивостей з відомими експериментальними даними.

Надійшла до редколегії: 03.12.2010.