

Программа расчета характеристик прочности и упругости полимерных композиционных материалов

А. В. Дроздов^а, В. В. Харченко^а, А. М. Потапов^б, Д. В. Клименко^б, В. Н. Харченко^б,
А. А. Самусенко^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М. К. Янгеля”, Днепр, Украина

Описана программа CFRP Strength, позволяющая выполнять расчеты характеристик прочности и упругости полимерных композиционных материалов при основных видах нагружения, а именно: растяжении, сжатии и изгибе в соответствии с действующими стандартами на испытания такого класса материалов. Программа обеспечивает также статистическую оценку характеристик прочности с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла.

Ключевые слова: композиционные материалы, механические характеристики, расчет, растяжение, сжатие, изгиб, прочность, модуль упругости, распределение Вейбулла.

Введение. В настоящее время продолжает увеличиваться производство полимерных композиционных материалов [1]. Такие материалы широко применяются в конструкциях ракетно-космической техники и авиастроении [2], что обусловлено их уникальными свойствами, а именно: высокими удельной прочностью и жесткостью, низкими значениями температурного расширения и устойчивостью к коррозии. Процесс внедрения в производство и рост использования данных материалов сопровождаются постоянным совершенствованием технологии их изготовления, реализацией оптимальной структуры и поиском новых компонентов материалов. Одним из условий успешного применения таких материалов является исследование их физико-механических характеристик на всех этапах производства.

В общем случае деформированное состояние данных материалов описывается девятью параметрами упругости: тремя модулями упругости, тремя коэффициентами Пуассона и тремя модулями сдвига. Соответственно предельное состояние слоистых композиционных материалов в декартовой системе координат характеризуется девятью параметрами прочности: тремя при растяжении, тремя при сжатии и тремя при сдвиге [3], а также девятью предельными относительными деформациями. Количество независимых параметров прочности и упругости может быть меньше в зависимости от данной структуры композиционного материала.

Наиболее распространенными видами испытаний, при которых получают важные механические характеристики полимерных композиционных материалов, являются испытания на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг. Условия их проведения и определения соответствующих механических характеристик регламентированы рядом стандартов [4–11]. В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с расчетом характеристик прочности и упругости полимерных композиционных материалов при растяжении, сжатии и изгибе, так как именно эти характеристики наиболее часто определяются на практике. В последующих работах планируется рассмотреть также вопросы, связанные с расчетами при испытании на сдвиг. Основными нормативными документами при выполнении работы были стандарты [4–6], которые приняты позже, чем [7–9], однако дополняют последние и содержат некоторые более подробно описанные условия и процедуры испытаний.

Процесс определения механических характеристик полимерных композиционных материалов включает несколько этапов: испытание образцов конкретного материала на соответствующем оборудовании с сохранением исходных экспериментальных данных; их последующая обработка и расчет механических характеристик материала для каждого испытанного образца; статистическая обработка и обобщение полученных результатов. Обработка исходных экспериментальных данных и расчет механических характеристик полимерных композиционных материалов являются трудоемким процессом и осуществляются исследователем индивидуально. Обычно для этого используются электронные таблицы MS Excel. Их использование для определения механических характеристик сопровождается субъективными действиями исследователя по предварительной обработке данных для каждого отдельного образца, последующему расчету параметров прочности и упругости в соответствии с действующими стандартами, визуализации результатов измерений и расчетов и что самое главное требует наличия определенного опыта и навыков. Проведение испытаний и расчет характеристик прочности и упругости в испытательных лабораториях на разных испытательных машинах отдельными исследователями обуславливает высокую вероятность несопоставимости результатов расчетов и появления отдельных ошибок, а также сопровождается значительными временными затратами.

Целью данной работы является автоматизация расчетов характеристик прочности и упругости полимерных композиционных материалов при растяжении, сжатии и изгибе путем разработки и применения специализированного программного обеспечения.

Программа CFRP Strength. Для обработки первичных экспериментальных данных, полученных при механических испытаниях образцов полимерных композиционных материалов, определения их механических характеристик, а также для статистической оценки результатов испытаний разработана программа CFRP Strength (Carbon Fiber Reinforced Plastic). Из всех возможных видов испытаний выбраны испытания на растяжение, сжатие и изгиб как наиболее распространенные, достаточно информативные и предусматривающие определение не только характеристик прочности, но и получение диаграмм деформирования с расчетом соответствующих параметров. Процедуры расчета механических характеристик полимерных композиционных материалов реализовали с учетом требований стандартов [4–6].

Графический интерфейс программы включает несколько отдельных переключаемых страниц, а именно: “Data File”; “Preprocessing”; “Calculating”; “Results”. Работа с программой предполагает переход от одной страницы к следующей в той последовательности, в которой они приведены выше. Для выполнения статистических расчетов прочности с использованием распределения Вейбулла предназначена специальная страница “Weibull Distribution”.

Работа с программой начинается с открытия и чтения файла с исходными экспериментальными данными. Программа обеспечивает чтение обычных текстовых файлов с расширением *.csv или *.txt. Возможен также перенос первичных данных в программу из открытых книг в программах MS Excel, Origin и других путем выполнения операций “Копировать”, “Вставить”.

Исходные экспериментальные данные отображаются в таблице на странице “Data File” (рис. 1). Обычно файл с экспериментальными данными содержит некоторую информативную описательную часть, в которой могут быть приведены условия испытания, описание образца и т.д., а также основную часть с массивами измеренных во времени величин. В программе предусмотрено автоматическое разделение этих частей файла для выполнения последующих расчетов.

Далее необходимо выбрать требуемый вид механического нагружения и соответствующих механических характеристик из возможных вариантов: растяжение, сжа-

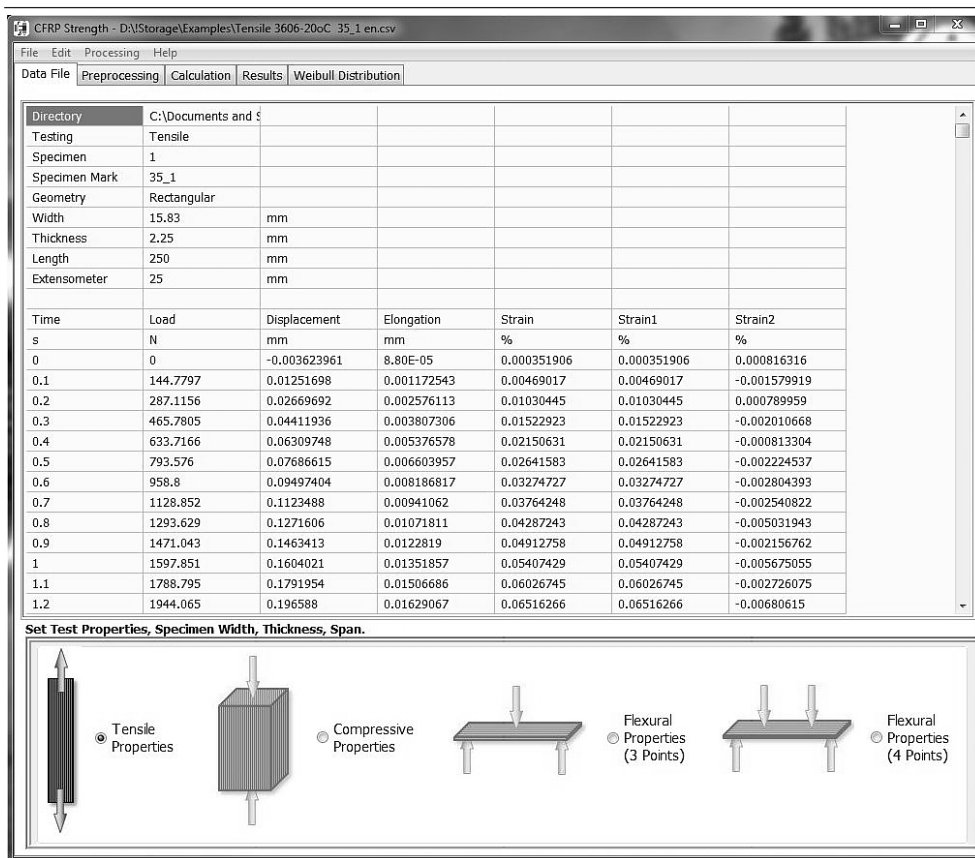


Рис. 1. Внешний вид страницы “Data File” программы CFRP Strength.

тие, трех- или четырехточечный изгиб образцов. Если в описательной части файла имеются номер и размеры образца (ширина b , толщина h), а также величина пролета при изгибе (L), то эти параметры можно ввести в расчет, для чего необходимо выбрать ячейку таблицы с этими параметрами, вызвать контекстное меню и нажать мышкой на его соответствующем пункте.

Предварительная обработка данных. Для предварительной обработки исходных экспериментальных данных предназначена страница “Preprocessing” графического интерфейса программы CFRP Strength (рис. 2). На этой странице расположены таблица “Input Data” с исходными входными данными и таблица “Output Data” с выходными данными конкретной физической величины (усилие, деформация, прогиб образца при изгибе и время, которое является вспомогательной величиной).

Программа обеспечивает выполнение простых, наиболее часто употребляемых процедур обработки данных, в частности линейное преобразование массива исходных входных данных по отдельному каналу в выходной массив определенной физической величины по формуле

$$y = ax + b, \tag{1}$$

где x – массив исходных данных; y – выходной массив данной физической величины; a , b – соответственно параметры масштаба и смещения преобразования.

Зачастую зарегистрированные исходные данные имеют существенную случайную погрешность, что связано с воздействием каких-либо помех и низким уровнем измеряемой величины, который значительно ниже номинального диапазона изме-

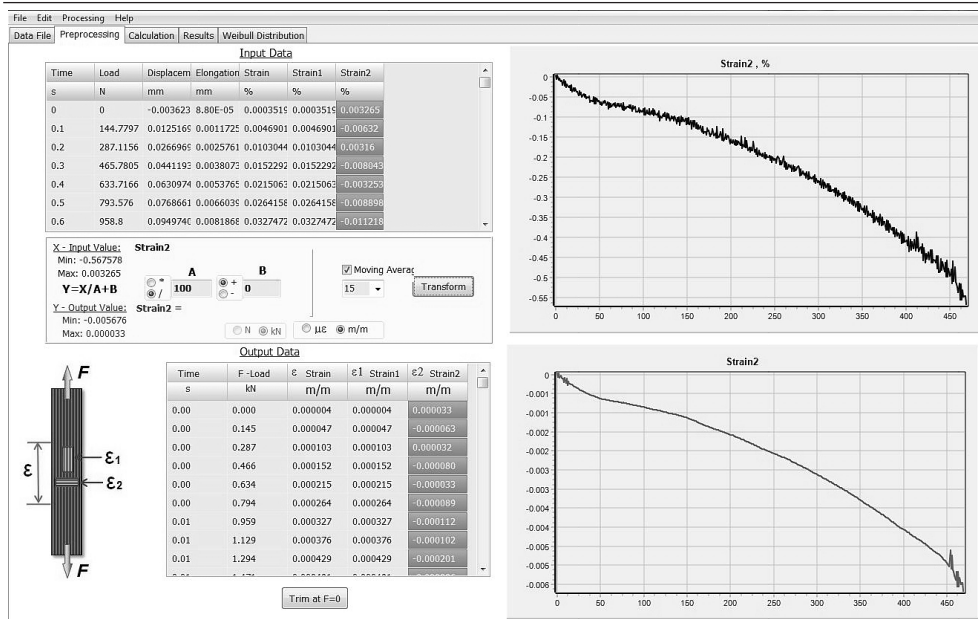


Рис. 2. Внешний вид страницы “Preprocessing” программы CFRP Strength.

рений. Уменьшить случайную составляющую погрешности можно путем усреднения отдельных результатов измерений. С учетом этого программа реализует функцию скользящего среднего, которое вычисляется по формуле

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} P_{t+i}, \quad (2)$$

где SMA_t – простое скользящее среднее в момент времени t ; n – интервал сглаживания (нечетное число 3, 5, 7 и т.д.); P_{t+i} – значение случайной величины в момент $(t+i)$.

Еще одна полезная особенность рассматриваемой программы – наличие функции обрезания части массивов экспериментальных данных, предшествующих моменту начала нагружения с возможностью обнуления (смещения к нулю) в этот момент всех измеренных физических величин.

Последовательность предварительной обработки данных заключается в выборе конкретного выходного массива физической величины (усилие, деформация, прогиб образца) из таблицы “Output Data”, установлении соответствующего входного массива исходных экспериментальных данных из таблицы “Input Data”, осуществлении линейного преобразования входного массива в выходной и выполнении других необходимых функций. Отметим, что программа обеспечивает автоматическую графическую визуализацию как входного массива исходных экспериментальных данных, так и выходного массива физической величины, для чего достаточно один раз нажать мышкой на соответствующей колонке таблиц данных.

Расчет механических характеристик. Для расчета механических характеристик полимерных композиционных материалов предназначена страница программы “Calculating”. На ней размещены панели для определения предела прочности, предельной относительной деформации и модуля упругости при растяжении (сжатии) образцов (рис. 3). Диаграммы деформирования образцов при растяжении представлены на рис. 4. Расчет указанных характеристик проводится согласно стандарту [4]

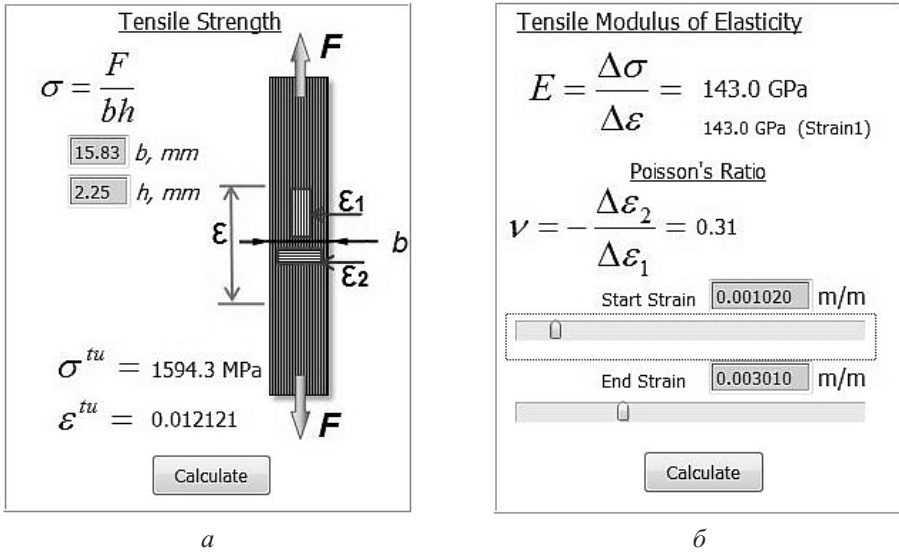


Рис. 3. Внешний вид панелей для определения предела прочности σ^{tu} , предельной относительной деформации ϵ^{tu} (а) и модуля упругости E (б) при растяжении образцов.

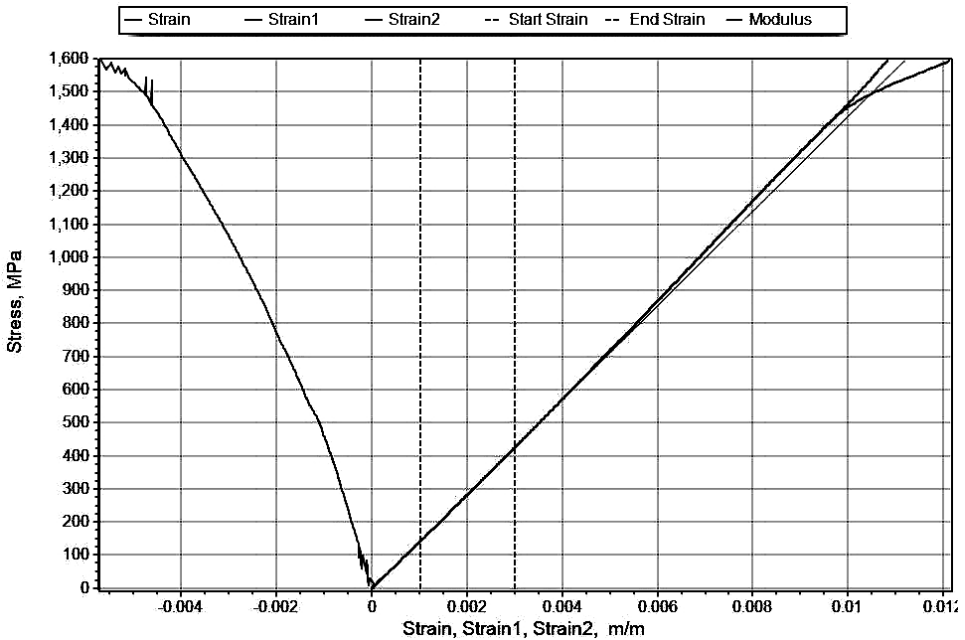


Рис. 4. Диаграммы деформирования при растяжении образцов.

по формулам, приведенным на рис. 3. При вводе размеров испытанного образца и нажатии кнопки “Calculate” происходит расчет напряжений, деформаций, их предельных значений (рис. 3,а) и вывод графика с диаграммами деформирования (рис. 4).

Наиболее сложным и трудоемким в расчете механических характеристик является расчет модуля упругости. Поэтому программа CFRP Strength содержит некоторые специальные процедуры, что позволяет упростить его расчет. На панели (рис. 3,б) размещены два ползунка для установки начального (Start Strain) и конечного (End Strain)

Strain) значений относительных деформаций, между которыми будет определяться значение модуля упругости (угол наклона кривой $\sigma - \varepsilon$ – рис. 4). Согласно стандарту [4] рекомендуется, чтобы начальное и конечное значения относительных деформаций составляли соответственно 0,001 и 0,003 м/м. На графике, показанном на рис. 4, автоматически отображаются установленные начальное и конечное значения деформаций в виде двух вертикальных штриховых линий. При нажатии кнопки “Calculate” происходит расчет и отображение модуля упругости, и по возможности коэффициента Пуассона, на панели (рис. 3,б). Расчет модуля упругости в программе осуществляется с использованием метода наименьших квадратов.

Расчет характеристик прочности и упругости при сжатии образцов проводится согласно стандарту [5]. Этот расчет мало чем отличается от вышеописанного расчета при растяжении образцов. При испытании полимерных композиционных материалов в условиях изгиба важной величиной является прогиб образца. В случае регистрации этой величины можно определить упругие свойства материала при изгибе образцов. Характеристики прочности и упругости при изгибе рассчитываются согласно стандарту [6] по формулам, приведенным на рис. 5 и 3,б. При четырехточечном изгибе принимается, что длина внутреннего пролета между точками приложения нагрузки равна половине длины внешнего пролета L .

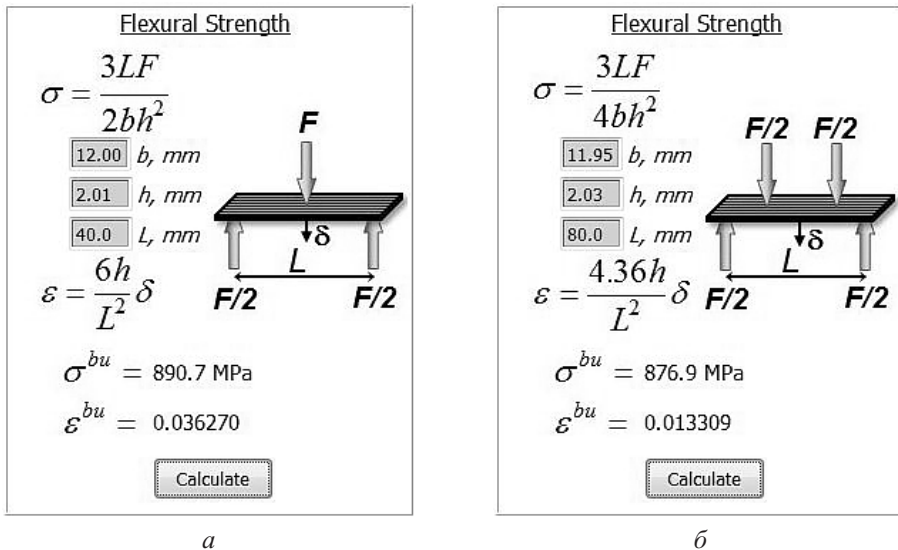


Рис. 5. Внешний вид панелей для определения прочности при трех- (а) и четырехточечном (б) изгибе образцов.

После расчета механических характеристик для отдельного образца их необходимо сохранить, нажав кнопку “Keep Results”, при этом рассчитанные данные помещаются в таблицу “Test Results” (рис. 6). Для продолжения расчетов следует открыть файл с экспериментальными данными, полученными при испытании следующего образца, перейти на страницу “Preprocessing” и повторить необходимые процедуры.

Статистическая обработка данных. Номера испытанных образцов, их размеры и результаты расчета механических характеристик партии образцов сохраняются в таблице “Test Results” (рис. 6). По окончании расчетов программа CFRP Strength позволяет осуществить автоматическую стандартную статистическую обработку полученных результатов, а именно: оценить среднее каждой величины, ее стандартное отклонение и коэффициент вариации в соответствии со стандартами [4–11]. Формулы для расчета статистических параметров приведены на рис. 6. Для выполнения ста-

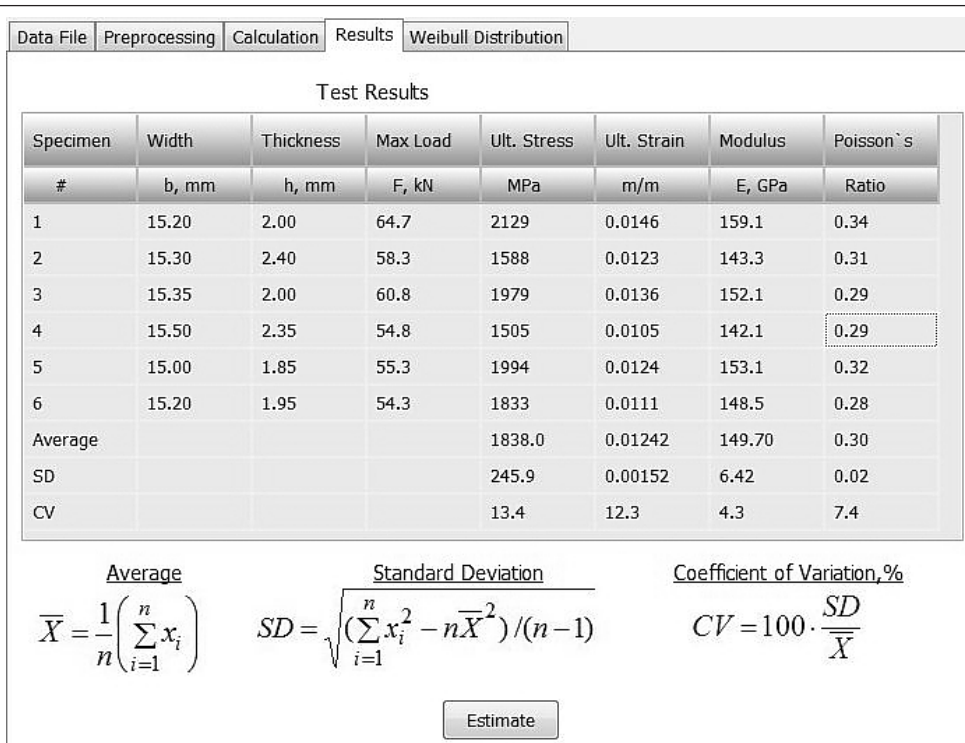


Рис. 6. Таблица результатов испытаний и определения механических характеристик.

статистической обработки всех полученных значений механических характеристик группы образцов и внесения вычисленных параметров в таблицу результатов необходимо нажать кнопку “Estimate” на странице “Results”. Полученные результаты расчетов могут быть сохранены в текстовом файле с расширением *.csv или вставлены в табличном виде через буфер обмена (Clipboard) в документ MS Word или MS Excel.

Важной особенностью программы CFRP Strength является возможность расчета параметров двухпараметрического распределения Вейбулла [12], которое часто используется для статистической оценки прочности материалов. Согласно двухпараметрическому распределению Вейбулла, вероятность разрушения P от величины напряжения σ определяется следующим образом:

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right], \tag{3}$$

где m – параметр формы, или модуль Вейбулла; σ_0 – параметр масштаба.

Плотность вероятности разрушения f от величины напряжения σ описывается выражением

$$f(\sigma) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]. \tag{4}$$

Предполагается, что двухпараметрическое распределение Вейбулла хорошо описывает распределение прочности одиночных углеродных волокон [13, 14], углеродных жгутов [15], а также результаты испытаний на усталость полимерных компози-

ционных материалов [16]. Кроме того, оно используется также для статистической оценки непосредственно прочности образцов из таких материалов и при других видах механического нагружения.

Для расчета параметров двухпараметрического распределения Вейбулла предназначена страница “Weibull Distribution”. На этой странице расположены две таблицы, в первую заносятся экспериментальные данные, во вторую – результаты статистических расчетов (рис. 7). Для выполнения расчетов введенные экспериментальные данные упорядочиваются по возрастанию, и для каждого i -го значения определяется эмпирическая функция вероятности $P_{\text{exp}}(i)$ в соответствии с формулой

$$P_{\text{exp}}(i) = \frac{i - 0,5}{N}, \quad (5)$$

где N – количество испытанных образцов.

Data File	Preprocessing	Calculation	Results	Weibull Distribution	
Weibull Distribution					
Input Data					
1653					
1878					
1702					
1830					
1655					
2060					
1947					
1508					
1882					
1744					
1433					
1926					
1794					
1992					
1950					
2103					
1670					
1651					
1790					
1798					
1893					
	i	S, МПа	Pexp(i)	P(S)	f(S)
	1	1433	0.0152	0.0262	0.0002
	2	1508	0.0455	0.0516	0.0005
	3	1529	0.0758	0.0619	0.0005
	4	1642	0.1061	0.1549	0.0012
	5	1651	0.1364	0.1658	0.0012
	6	1653	0.1667	0.1683	0.0013
	7	1655	0.1970	0.1708	0.0013
	8	1670	0.2273	0.1908	0.0014
	9	1701	0.2576	0.2380	0.0017
	10	1702	0.2879	0.2396	0.0017
	11	1744	0.3182	0.3170	0.0020
	12	1745	0.3485	0.3191	0.0020
	13	1757	0.3788	0.3441	0.0021
	14	1774	0.4091	0.3816	0.0023
	15	1790	0.4394	0.4190	0.0024
	16	1794	0.4697	0.4286	0.0024
	17	1798	0.5000	0.4383	0.0024
	18	1810	0.5303	0.4681	0.0025
	19	1823	0.5606	0.5013	0.0026
	20	1830	0.5909	0.5195	0.0026

Рис. 7. Входные данные и распределение прочности образцов в табличной форме.

Для оценки параметров распределения Вейбулла выражение (3) дважды логарифмируется и приводится к линейной функции:

$$\ln(\ln(1 - P(\sigma))^{-1}) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0). \quad (6)$$

Параметры распределения Вейбулла m и σ_0 находятся из выражения (6) методом наименьших квадратов. Пример функции распределения по Вейбуллу проч-

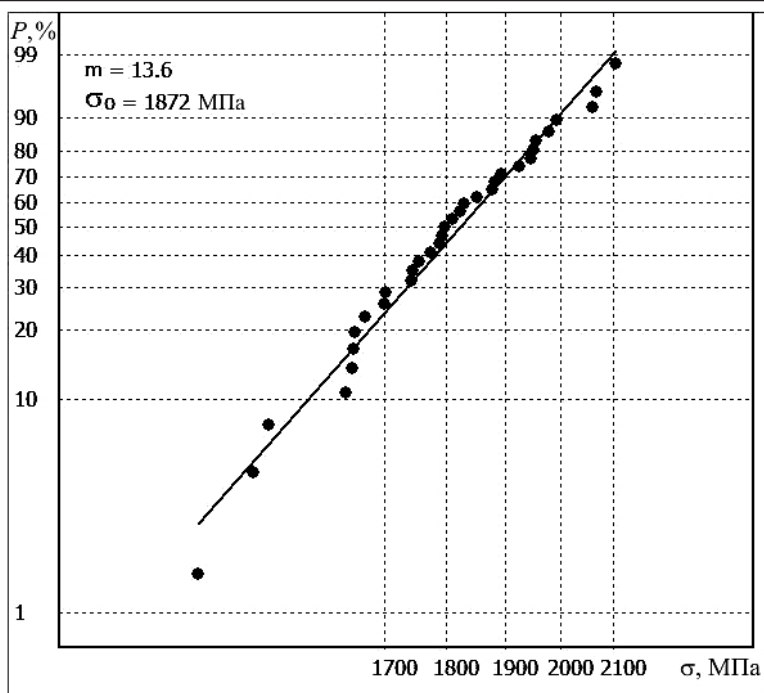


Рис. 8. Распределение прочности образцов при изгибе (точки – значения P_{exp} , сплошная линия – расчет $P(\sigma)$ по формуле (3) при $m = 13,5$ и $\sigma_0 = 186,9 \text{ МПа}$).

ности образцов при изгибе, полученной с помощью программы CFRP Strength, приведен на рис. 8. Результаты расчетов, значения интегральной функции вероятности и функции плотности вероятности распределения Вейбулла, параметры m и σ_0 этого распределения могут быть сохранены в текстовом файле с расширением *.csv либо вставлены в документы MS Word или MS Excel. График распределения прочности образцов может быть скопирован в буфер обмена (Clipboard) и далее вставлен в соответствующие документы.

Заключение. С целью автоматизации расчетов характеристик прочности и упругости полимерных композиционных материалов, снижения трудоемкости и вероятности субъективных ошибок при таких расчетах разработана специализированная программа CFRP Strength. Она позволяет существенно упростить процесс расчета механических характеристик таких материалов при растяжении, сжатии и изгибе, сделать его более наглядным, автоматически отображать результаты расчетов в табличной и графической формах. Программа содержит весьма полезную для расчетов процедуру определения параметров распределения Вейбулла. В дальнейшем в программу могут быть включены функции и процедуры для расчета механических характеристик и при других видах нагружения.

Резюме

Описано програму CFRP Strength, яка дозволяє автоматизувати розрахунки характеристик міцності та пружності полімерних композиційних матеріалів при основних видах навантаження, а саме: при розтязі, стиску та згину відповідно до діючих стандартів на випробування такого класу матеріалів. Програма забезпечує оцінку статистичних характеристик міцності з використанням двопараметричного розподілу Вейбулла.

1. *Holmes M.* Global carbon fibre market remains on upward trend // *Reinf. Plast.* – 2014. – **58**, No. 6. – P. 38–45.
2. *Дегтярев А. В., Коваленко В. А., Потапов А. М.* Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники // *Авиац. косм. техника и технология.* – 2012. – № 2. – С. 34–38.
3. *Daniel I. M. and Ishai O.* *Engineering Mechanics of Composite Materials.* – New York: Oxford University Press, 1994. – 395 p.
4. *ASTM D3039/D3039M-00.* Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000. – 13 p.
5. *ASTM D695-02a.* Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. – 7 p.
6. *ASTM D7264/D7264-15.* Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. – 10 p.
7. *ГОСТ 25.601-80.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введ. 01.07.81.
8. *ГОСТ 25.602-80.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введ. 01.07.81.
9. *ГОСТ 25.604-82.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах. – Введ. 01.01.84.
10. *ASTM D3518 / D3518M-13.* Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. – 7 p.
11. *ASTM D2344 / D2344M-16.* Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. – 8 p.
12. *Weibull W.* A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* – 1951. – **18**. – P. 293–297.
13. *Pardini L. C. and Manhani L. G. B.* Influence of the testing gage length on the strength, young modulus and weibull modulus of carbon fibres and glass fibres // *Mater. Res.* – 2003. – **5**, No. 4. – P. 411–420.
14. *Christensen R., Miyano Y., and Nakada M.* The size dependence of tensile strength for brittle isotropic materials and carbon fiber composite materials // *Compos. Sci. Technol.* – 2015. – **106**. – P. 9–14.
15. *Rosa L. G., Colella A., and Anjinho C. A.* Effect of paraffin oil used as a lubricant in tensile tests of carbon fibre bundles // *Mater. Sci. Forum.* – 2006. – **514-516**. – P. 672–676.
16. *ASTM D3479/D3479M-96.* Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996. – 6 p.

Поступила 04. 10. 2016