

УДК 677.024

DOI 10.47367/0021-3497_2023_4_164

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ОЦЕНКИ МОДУЛЕЙ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И СДВИГА
ПРИ ИЗГИБЕ ЛУБЯНЫХ ВОЛОКОН***

**A SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX USED
TO MEASURE YOUNG'S MODULUS AND SHEAR MODULUS
OF FLAX FIBER DURING BENDING PROCESS**

Е.Л. ПАШИН¹, А.В. ОРЛОВ²

E.L. PASHIN¹, A.V. ORLOV²

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия,
²Костромской государственной университет)

(¹Kostroma State Agricultural Academy,
²Kostroma State University)

E-mail: evgpashin@yandex.ru; aorlov@list.ru

В статье представлены основы функционирования нового программно-аппаратного комплекса для определения модулей сдвига G и продольной упругости E при изгибе лубяных волокон. Информация о них необходима для прогнозирования и проектирования свойств композитов, армированных такими волокнами. Эти характеристики зависят от условий силового нагружения анализируемого образца при изгибе, размеров его сечения и формы. Особенностью предлагаемой схемы испытания при определении модулей G и E является использование двухэтапного трехточечного прогиба образца без потери его контакта с опорами и прогибающим элементом. Кроме этого необходима фиксация возникающего усилия от прогиба на каждом этапе и расчет толщины пробы в местах контакта в зависимости от возникающего усилия, вида и свойств волокна. Оригинальность программно-аппаратного комплекса по определению модулей G и E состоит в использовании электронных весов для оперативной фиксации усилий, узла для двухэтапного перемещения изгибающего элемента и программы для ЭВМ. Алгоритм расчета в программе учитывает особенности изгиба образца при повышенной кривизне с учетом неустойчивости координат точек контакта волокна с поверхностью опор. Он обеспечивает определение искомых модулей на основе значений сил, возникающих при прогибе образца при различном расстоянии между центрами опор.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 23-26-00147).

Article presents the core principles of the new software-hardware complex used to determine shear modulus G and Young's modulus E during the bending of flax fiber. This information is useful in designing composite materials that use natural fibers as reinforcement. Both of those properties depend on the conditions of the bending, as well as the size and shape of the sample. The suggested approach uses three-point bending performed in two stages, without moving the sample itself. Aside from that, it is necessary to register the force applied to the sample during each stage, as well as calculate the sample thickness, which will depend on both the applied force and the fiber properties, such as its ripeness. The innovative part is using electronic weight scale to quickly register the force applied to the sample, paired with software capable of taking into account the change in points of contact between the sample and the supports. This allows measuring the values of G and E using a pair of measurements with different distance between the supports.

Ключевые слова: лубяные волокна, изгиб, модуль упругости, модуль сдвига, двухэтапный прогиб, усилие, толщина пробы, программно-аппаратный комплекс.

Keywords: flax fiber, bending, Young's modulus, shear modulus, two-stage bending, force, sample thickness, software-hardware complex.

Перспективным направлением использования лубяных волокон является их применение в качестве армирующих элементов при производстве гибридных полимерных и биоразлагаемых композитных материалов (КМ) [1-3]. Наличие в наполнителе таких композитов матрицы в виде натуральных волокон или смеси их с другими волокнами снижает стоимость и улучшает механические и иные характеристики готовых изделий, обеспечивая их сопротивление растяжению и изгибу. При таких воздействиях в КМ возникает комплекс нормальных и касательных напряжений, которые в определенной степени будут зависеть от особенностей структуры и свойств лубяных волокон, представляющих собой природный биокомпозит [4-5].

В этой связи представляют интерес знания о механических свойствах лубяных волокон, необходимые для прогнозирования и проектирования содержащих волоконно КМ. Особенно это касается сдвиговой и изгибной жесткости волокон, которые с учетом размеров, формы и структуры элементарных волокнистых комплексов зависят от модулей сдвига G и продольной упругости E [6].

Применительно к КМ разработаны методы испытания для оценки этих характеристик [7]. Однако в каждом из них предусмотрено определение какой-то одной механической характеристики, что не обеспечивает информацию о взаимосвязи ее с другими свойствами КМ в условиях одноосового испытания. Из этого следует, что разработка инструментальных методов комплексной, более информативной оценки изгибной и сдвиговой жесткости лубяных волокон является важной для ряда практических приложений [8].

Исследуя возможность получения комплекса механических характеристик лубяных волокон, в [9] авторы дали обоснование нового метода расчета их изгибной жесткости. С применением метода трехточечного прогиба анализируемого образца относительно закругленных опор решена задача, связанная с учетом непостоянства координат места контакта волокон с поверхностью опор (эффект сползания). При изучении аналогичной схемы нагружения предложен способ комплексной оценки модулей продольной упругости и сдвига лубяных волокон. С учетом этого представляет интерес интеграция указанных методов для создания обобщенного алгоритма

расчета, а на его основе программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего определение механических характеристик при изгибе.

Предложен вариант схемы испытания на основе двухэтапного трехточечного прогиба без потери контакта между испытываемым образцом и прогибающим элементом (рис. 1, а).

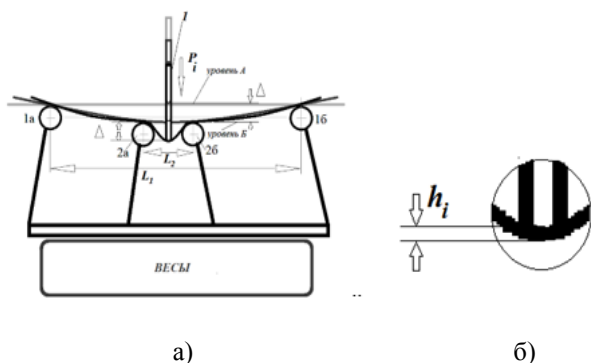


Рис. 1

Согласно схеме конструкция устройства для испытания двухэтапным изгибом содержит основание, на котором закреплены две пары опор равного диаметра d : 1а, 1б и 2а, 2б. Основным отличием их закрепления является межцентровое расстояние и смещение по вертикали линий, соединяющих центры опор каждой из пар. Так, опоры 1а, 1б имеют межцентровое расстояние L_1 , которое больше, чем расстояние L_2 у опор 2а, 2б.

Основание с опорами располагается на платформе электронных весов, имеющих погрешность не более 0,01 г и обеспечивающих контроль усилия P_i , возникающего при изгибе образца прогибающим элементом. Ширина образца b на поверхностях опор и изгибающем элементе постоянна.

Перед испытанием необходима информация о виде стланцевого волокна и его группе цвета ГЦ, а также о возникающей при прогибе силе P , т. е. $h_i = f(P; ГЦ)$.

При указанных условиях испытания проводят следующим образом. Подготовленный образец определенной длины, ширины b и массы укладывают на опоры 1а–1б. Далее посредством перемещения изгибающего элемента 1 из его исходного положения осуществляют прогиб на величину Δ до момента совпадения его рабочей кромки

с уровнем А. По достижении этого прогиба посредством весов фиксируют возникающее усилие P_1 (без учета массы узла для испытания), после чего изгибающий элемент перемещают ниже до совпадения его рабочей кромки с уровнем Б, который совпадает по горизонтали с поверхностью опор 2а–2б. Начиная с этого момента, образец прогибают относительно опор 2а–2б с межцентровым расстоянием L_2 . Прогиб осуществляют на аналогичную для первого этапа величину Δ , по достижении которой определяют усилие P_2 , после чего изгибающий элемент 1 возвращают в исходное положение.

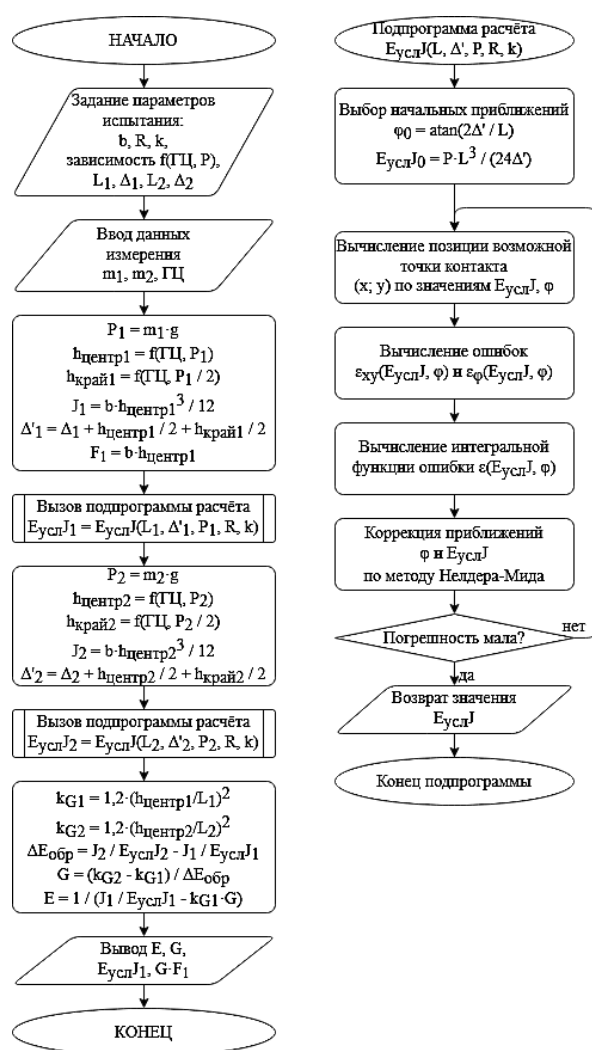


Рис. 2

Для определения модулей продольной упругости E и сдвига G , а также изгибной EI и сдвиговой жесткости GF (на 1 этапе испытания) используют ЭВМ с оригиналь-

ным программным обеспечением, реализующим алгоритм расчетов, основанный на применении комплекса операций, указанных в работе [9]. При этом для каждого вида волокна исходные параметры представлены в виде двух блоков. Один из них составляют неменяющиеся параметры: L_1 ; L_2 ; d ; b ; Δ ; ГЦ; k – коэффициент трения волокна о поверхность опор. Второй блок – изменяющиеся: P_1 и P_2 .

Общая последовательность расчетных операций представлена в виде блок-схемы, указанной на рис. 2.

Опираясь на схему испытания и блок-схему расчетных операций (рис. 1, а и 2), создали программно-аппаратный комплекс, схема которого представлена на рис. 3. При его применении реализуется указанная выше последовательность действий по двухэтапному прогибу и определению возникающих на каждом из этапов усилий P_i .

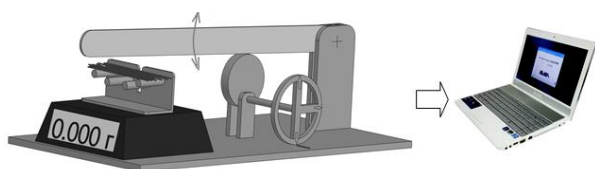


Рис. 3

Далее после включения ЭВМ и вызова специальной программы на мониторе появляется окно (рис. 4), в которое заносят вид волокна, его группу цвета и зафиксированные значения усилий P_1 и P_2 . После запуска расчетов в этом же окне появляются результаты в виде совокупности требуемых характеристик: модуль продольной упругости E , модуль сдвига G и для условий первого этапа испытания изгибная EI и сдвиговая GN жесткость.

Испытания предложенного комплекса проводили с использованием льняного волокна, полученного из стеблей сорта «Томский 16» различной биологической спелости и степени вылежки. Волокно варианта 1 было получено из стеблей соломы, убранных в фазу желтой спелости. Из них была приготовлена недолежалая треста, волокно из которой имело желто-серый цвет, что соответствовало 2 группе; оно характеризовалось также повышенной

лигнификацией, обуславливающей достаточно крепкие связи между элементарными волокнами. Волокно варианта 2 было светло-серое с группой цвета 3, полученное из стеблей, убранных с поля в фазу «ранняя желтая спелость», и выделенное из тресты хорошей вылежки. В сравнении с волокном варианта 1 это волокно явилось более гибким и делимым в продольном и поперечном направлении из-за ослабленных межволоконных связей вследствие разрушения микроорганизмами органических веществ, обеспечивающих склейку волокон [4]. Как видно, испытываемые варианты волокна значительно различались по физико-механическим свойствам, что предполагало и их различия по изгибной и сдвиговой жесткости.

№	Усилие на этапе 1, г	Усилие на этапе 2, г	Группа цвета	E, Н/мм ²	G, Н/мм ²	Eизг, Н*мм ²	GF, Н
1	3,0	24,0	2	17,9	0,625	42,0	5,9
2	2,0	12,0	4	7,0	0,244	25,9	2,7

Рис. 4

Эксперимент проводили при следующих условиях: масса образца волокна составила 0,11 г, его длина – 70 мм, величина прогиба $\Delta = 2$ мм, ширина $b = 5$ мм, межцентровое расстояние (L_i) на первом и втором этапах соответственно 105 и 55 мм. В процессе реализации эксперимента были зафиксированы значения усилий P_1 и P_2 . На первом этапе для волокна вариантов 1 и 2 соответственно 0,03 и 0,02 Н. На втором – 0,24 и 0,12 Н. Расчетами на ЭВМ получены результаты, указанные в табл. 1.

Из анализа результатов следует, что волокно, полученное из недолежалой тресты (вариант 1), характеризуется повышенной сдвиговой и изгибной жесткостью в сравнении с волокном из тресты хорошей вылежки (вариант 2). Логичное объяснение этому вытекает из различия их свойств и структуры вследствие условий получения исходного волокнистого сырья.

Вариант партии волокна	Параметры жесткости волокна			
	Модуль продольной упругости E, Н/мм ²	Модуль сдвиговой жесткости G, Н/мм ²	Для условий изгиба первого этапа	
			изгибная жесткость, E·I, Н·мм ²	сдвиговая жесткость, G·F, Н
1	17,9	0,62	42,0	5,9
2	7,0	0,24	25,9	2,7

ВЫВОДЫ

1. Для прогнозирования и проектирования свойств композитов, армированных волокнами различной природы, включая лубяные, необходимы знания об их сдвиговой и изгибной жесткости. Эти характеристики с учетом условий силового нагружения волокнистой пробы при изгибе, размеров ее сечения и формы зависят от модулей сдвига G и продольной упругости E, что требует разработки инструментального метода их комплексного определения.

2. Особенностью новой схемы испытания при определении модулей G и E является использование двухэтапного трехточечного прогиба образца без потери его контакта с опорами и прогибающим элементом с одновременной фиксацией на каждом этапе возникающего от прогиба усилия и с расчетом толщины образца в местах его контакта в зависимости от возникающего усилия, вида и свойств волокна.

3. Оригинальность программно-аппаратного комплекса для контроля модулей G и E выражается в использовании электронных весов для оперативной фиксации усилия при прогибе и алгоритма расчета на ЭВМ. При реализации расчетов для учета особенностей изгиба образца при повышенной кривизне определяются координаты точки его контакта с поверхностью опор – «эффект сползания контакта», а также искомые модули на основе значений сил от прогиба образца с учетом меняющейся его толщины на опорах, расположенных при разном межцентровом расстоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роговина С.З., Прут Э.В., Берлин А.А. Композиционные материалы на основе синтетических

полимеров, армированных волокнами природного происхождения // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2019. Т. 61. № 4. С. 291...315.

2. *Nabi S.D., Jog J.P.* Natural Fiber Polymer Composites // *Advanced in Polymer Technology: 1999, Vol. 18.* Pp. 351...363.

3. *Cheung Hoi-yan, Ho Mei-po, Lau Kin-tak, Cardona Francisco, Hui David.* Natural fiber reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications // *Journal of Composites: Part B* 40, 2009. Pp. 655...663.

4. *Ордина В.М.* Структура лубоволокнистых растений и её изменение в процессе переработки. М.: Легкая индустрия, 1978.

5. *Горшкова Т.А., Агеева М.В., Сальников В.В. и др.* Стадии формирования лубяных волокон *Linum usitatissimum* (Linaceae) // *Ботанический журнал.* 2003. № 12. Т. 88. С. 1.

6. *Брытков Е.В., Санников В.А.* Механика композиционных материалов: учебное пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 74 с.

7. ГОСТ Р 57921–2017. Композиты полимерные. Методы испытания. Общие требования. М., Стандартинформ, 2017. 38 с.

8. *Olusegun D. S., Stephen A., Timothy A. A.* Assessing Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Composites for Engineering Applications // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering: 2012, 11,* Pp. 780...784.

9. *Разин С.Н., Пащин Е.Л., Орлов А.В.* Метод определения изгибной жесткости льняного волокна для его квалитметрии: обоснование алгоритма испытания // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности.* 2023. № 3(405). С. 81...87.

REFERENCES

1. *Rogovina S.Z, Prut E.V. and Berlin A.A.* ‘Composite materials based on synthetic polymers reinforced with natural fibers’. *Vysokomolekuljarnye soedinenija, series A, vol. 61, no. 4, 2019, Pp. 291...315.*

2. *Nabi S.D., Jog J.P.* Natural Fiber Polymer Composites // *Advanced in Polymer Technology. 1999, Vol. 18.* Pp. 351...363.

3. *Cheung Hoi-yan, Ho Mei-po, Lau Kin-tak, Cardona Francisco, Hui David.* Natural fiber reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications // *Journal of Composites: Part B* 40, 2009. Pp. 655...663.

4. *Ordina V.M.* Structure of bast plants and its changes during processing. Moscow: Legkaja industrija, 1978.

5. *Gorshkova T.A. et al.* 'Stages of growth of bast fibers of *Linum usitatissimum* (Linaceae)', *Botanicheskij zhurnal*, vol. 88, no. 12, 2003, p. 1.

6. *Brytkov E.V. and Sannikov V.A.* *Mechanics of composite materials: a teaching aid*, St. Petersburg, Baltic state technological university, 2012.

7. GOST R 57921–2017. *Polymer composites. Test methods. General requirements*, Moscow, Standartinform, 2017.

8. *Olusegun D.S., Stephen A., Timothy A.A.* *Assessing Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Composites for Engineering Applications* //

Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering: 2012, 11, pp. 780...784.

9. *Razin S.N., Pashin E.L. and Orlov A.V.* 'A method of measuring bending rigidity of flax fiber during its qualimetry: determining properties of a testing algorithm' // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. No 3(405). P. 81...87.

Рекомендована кафедрой технических систем в агропромышленном комплексе Костромской ГСХА. Поступила 12.04.23.
