

УДК 677.014/017:001.891.573

## ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБУВНОЙ ПОЛУСТЕЛЬКИ

А.С. Дягилев, А.С. Лебедкин, Ф.А. Полоник, Н.В. Путеев,  
Т.М. Борисова, В.И. Ольшанский

Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь

*Исследовано формирование композиционного материала, соответствующего по физико-механическим свойствам требованиям, предъявляемым к картону, используемому для изготовления обувной полустельки. Разработана математическая модель, позволяющая реализовать метод неразрушающего контроля однослойного льносодержащего композиционного материала.*

Одной из сфер применения композиционных материалов является обувная промышленность. Композиционные материалы могут использоваться для изготовления деталей, обеспечивающих жесткость геленочной части обуви, которая соответствует наружному своду стопы и играет роль основной опоры. Геленочная часть должна быть хорошо укреплена, иметь определенную жесткость и не прогибаться под воздействием веса тела человека. Для увеличения жесткости геленочной части обуви наряду с геленками применяются полустельки, которые располагаются до зоны изгиба стопы, сохраняя тем самым гибкость стелечного узла. Основным материалом для изготовления полустелек является картон повышенной жесткости [1]

В рамках данной работы проводились исследования по формированию композиционного материала, соответствующего по физико-механическим свойствам требованиям, предъявляемым к обувным картонам, используемым для изготовления обувных полустелек.

Исходя из требований, предъявляемых к полустелечным картонам, важнейшим показателем для них является жесткость при статическом изгибе [2]. На рис. 1 приведены результаты испытания жесткости при статическом изгибе образцов обувного картона для полустелек фирмы «Merckens CJM 188» (Австрия). Средняя толщина исследованного образца составляет 1.7 мм. Жесткость картона определяют как нагрузку, измеряемую в ньютонах, необходимую для изгиба испытываемого образца [2].

При формировании композиционных материалов, армированных текстильной преформой, широко используются стеклянные, карбоновые, арамидные и другие химические волокна. Высо-

кая относительная разрывная нагрузка таких волокон позволяет формировать композиционные материалы, сочетающие малую массу и повышенную прочность. Одним из наиболее распространенных видов волокон, применяемого при создании композиционных материалов, является стекловолокно [3, 4]. Это обусловлено его относительной дешевизной по сравнению, например, с карбоновым волокном, применяемым в изделиях, к которым предъявляются высокие прочностные требования. Серьезным недостатком композиционных материалов, сформированных с использованием химических волокон, является сложность их утилизации и переработки. Так, композиционный материал, сформированный с использованием стекловолокна, не может быть утилизирован сожжением в отличие от материалов, сформированных с использованием натуральных волокон. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных видов натуральных волокон, используемых для производства композиционных материалов, является льняное волокно [5-8].

Республика Беларусь занимает около четверти мирового рынка производства льняного волокна и является одним из крупнейших мировых производителей льняных изделий бытового назначения. При этом отечественными производителе-



Рис. 1. Зависимость нагрузки при изгибе от деформации обувного картона.

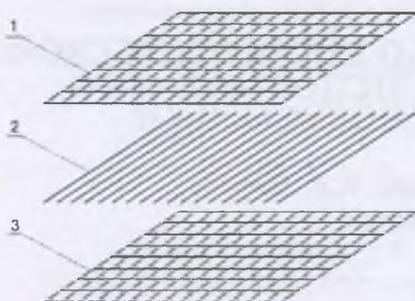


Рис. 2. Структура трехслойного композиционного материала:

1-й и 3-й слой — леняная ткань; 2-й слой — леняное волокно.

лями практически не используется потенциал леняного волокна для производства технического текстиля. В то же время во многих отраслях промышленности растет спрос на композиционные материалы, сформированные с использованием леняных волокон [9-11], к которым относятся сизаль, джут, пенька, лен и др. Такие материалы по прочностным характеристикам могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к материалам в различных отраслях промышленности. Немаловажным достоинством таких материалов является их сравнительно простая утилизация. Они легко могут быть сожжены, в отличие, например, от материалов, содержащих стекловолокно, широко используемое при производстве композиционных материалов. В связи с этим актуальной задачей является разработка новых текстильных материалов технического назначения с использованием отечественного леняного волокна.

При формировании композиционного материала могут использоваться текстильные преформы, сформированные с помощью различных технологий: тканые [12], плетеные [13-15], нетканые [16]. На рис.2 показана структура трехслойного композиционного материала. В качестве 1-го и 3-го слоев может использоваться леняная ткань

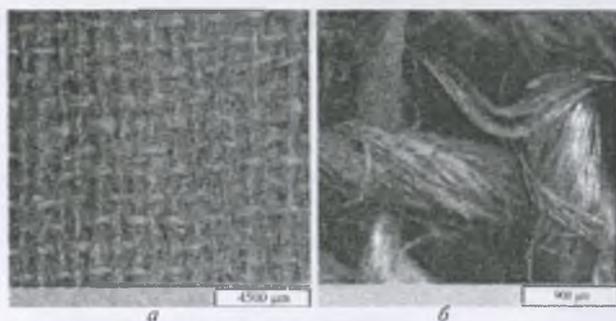


Рис. 3. Фотография чистольняной преформы (а) и раппорта полотняного переплетения (б).

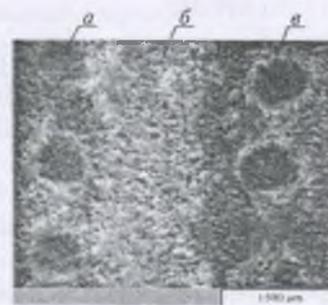


Рис. 4. Трехслойный композиционный материал.

с полотняным переплетением, в качестве 2-го слоя — леняное волокно.

Волокнистый слой позволяет формировать композиционный материал с ярко выраженной анизотропией свойств, который, следовательно, будет обладать наибольшей прочностью в направлении работы волокон на разрыв. Верхний и нижний слои обеспечивают технологическую защиту волокнистого слоя в процессе импрегнирования, препятствуя механическому смещению волокон. Использование леняной ткани в качестве верхнего слоя позволяет создать эффект текстильного материала на поверхности композита.

В рамках данной работы при формировании композиционного материала в качестве преформы 1-го и 3-го слоев использовалась чистольняная ткань полотняного переплетения поверхностной плотностью 258 г/м<sup>2</sup> (рис.3, а).

На рис.3, б приведена макрофотография раппорта полотняного переплетения чистольняной ткани. Структура переплетения леняной преформы может создавать декоративный эффект на поверхности композиционного материала.

Композиционные материалы формировали методом импрегнирования. Использовалась эпоксидная система К153 + ПЭПА. Смола К153 имеет низкую вязкость, высокую адгезию к различным материалам, хорошую совместимость с широким кругом наполнителей, ударопрочность и вибростойкость, диэлектрические свойства, позволяет получать на ее основе полимерные покрытия и различные композиционные материалы с заданным комплексом эксплуатационных свойств. ПЭПА — отвердитель эпоксидно-диановых смол, применяемый также в производстве ионообменных смол и присадок.

На рис.4 приведена макрофотография поперечного сечения трехслойного композиционного материала. В позициях а и б отмечены поперечные сечения леняной пряжи, формирующей леняные преформы, представляющие собой 1-й и 3-й слои композиционного материала. В позиции б отмечены поперечные сечения волокон

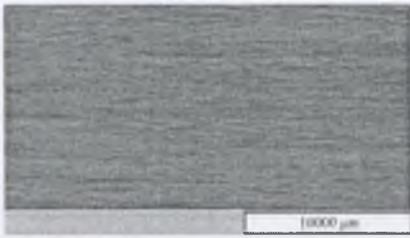


Рис. 5. Слой волокон льняного очеса 6-го номера.

льняного очеса 6-го номера, представляющих собой 2-й слой композиционного материала. На рис.5 приведена фотография слоя волокон льняного очеса 6-го номера.

Толщина сформированного трехслойного композиционного материала составляет 3.84 мм. Среднее значение и 95%-ный доверительный интервал для разрывной нагрузки 15 образцов трехслойного композиционного материала, измеренной вдоль направления волокон среднего слоя, составляет 418 (401, 437) Н. Поскольку эта величина значительно превышает требования, предъявляемые к разрывной нагрузке обувного картона, то применение трехслойной структуры композиционного материала для формирования обувной стельки нецелесообразно. В связи с этим был сформирован образец однослойного композиционного материала с использованием цистольняной преформы. На рис.6, а приведена фотография фронтальной поверхности, на рис.6, б – поперечного сечения однослойного композиционного материала.

На рис.7 показана зависимость нагрузки от деформации однослойного композиционного материала. На рисунке отмечена точка, соответствующая максимальному значению нагрузки, выдерживаемой образцом перед разрушением.

На основе экспериментальной зависимости нагрузки от деформации однослойного композиционного материала была подобрана математическая модель, описывающая зависимость нагрузки от деформации:

$$L = b_0 D e^{b_1 D^2} \quad (1)$$

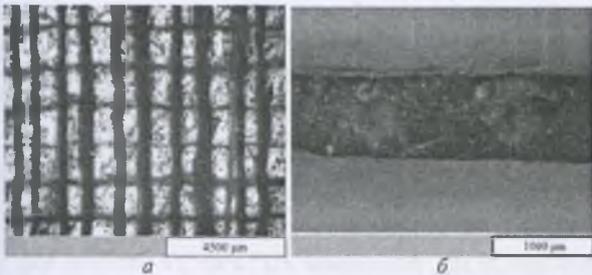


Рис. 6. Микрофотография однослойного композиционного материала:  
а – фронтальная поверхность; б – поперечное сечение.

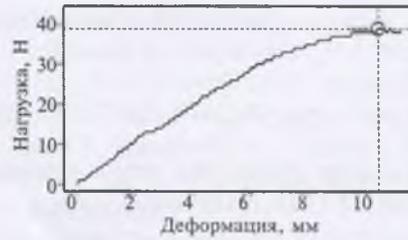


Рис. 7. Зависимость нагрузки от деформации однослойного композиционного материала, оцененная с помощью модели (1).

где  $L$  – нагрузка, Н,  $D$  – деформация, мм;  $b_0, b_1$  – коэффициенты регрессионной модели.

Коэффициенты модели (1) можно оценить методом наименьших квадратов для линейной многофакторной модели [17]:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (2)$$

где  $B$  – вектор оценок коэффициентов регрессионной модели;  $X$  – массив входных данных;  $Y$  – вектор выходных данных.

Для использования вычислительной формулы (2) необходимо провести линеаризацию модели (1) путем замены переменных:

$$x = D^2 \quad (3)$$

и

$$y = \ln(L/D). \quad (4)$$

На рис.8 приведена кривая, описывающая зависимость нагрузки от деформации однослойного композиционного материала, оцененная с помощью модели (1) на основе экспериментальных данных об испытании семи образцов однослойных композиционных материалов.

В результате регрессионного анализа данных по прочности образца однослойного композиционного материала получены оценки коэффициентов модели (1):  $b_0 = 5.515$  ( $p\text{-value} < 2e - 16$ ),  $b_1 = -3.875 \cdot 10^{-3}$  ( $p\text{-value} < 2e - 16$ ).

Для прогнозирования показателей качества на основе анализа модели (1) разработан метод оценки прочностных характеристик формируемых композиционных материалов. Приравнивая

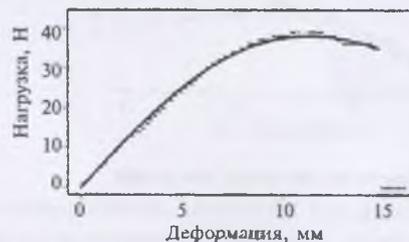


Рис. 8. Зависимость нагрузки от деформации однослойного композиционного материала, оцененная на основе экспериментальных данных

производную по деформации от (1) к нулю, получим:

$$\frac{\partial L(D)}{\partial D} = 0 \Rightarrow b_0 e^{b_1 D^2} + 2b_0 D^2 b_1 e^{b_1 D^2} = 0. \quad (5)$$

Решая полученное уравнение относительно переменной  $D$  (где  $D > 0$ ), получим:

$$D_{\max} = \frac{1}{\sqrt{-2b_1}}, \quad (6)$$

где  $D_{\max}$  – максимальное значение деформации, выдерживаемое образцом композиционного материала до разрушения. Подставив выражение (6) в модель (1), получим:

$$L_{\max} = \frac{b_0}{\sqrt{-2b_1 \cdot e}}, \quad (7)$$

где  $L_{\max}$  – максимальное значение нагрузки, выдерживаемое образцом композиционного материала до разрушения;  $e$  – число Эйлера.

Доверительный интервал для прогнозного значения  $L$

$$\bar{y} \pm t_{f, \alpha/2} S_e \sqrt{1 + f^T(x)(X^T X)^{-1} f(x)}, \quad (8)$$

где  $\bar{y}$  – прогнозные значения для линеаризованной модели;  $t_{f, \alpha/2}$  – квантиль распределения Стьюдента;  $S_e$  – стандартная ошибка регрессии;  $(X^T X)^{-1}$  – дисперсионно-ковариационная матрица;  $f(x)$  – вектор состояний входного параметра.

Подставив значение максимальной нагрузки  $L = D e^{\bar{y}}$  в уравнение (8), получим выражение для оценки доверительного интервала прогнозного значения:

$$L_{\text{conf.lim}} = D e^{(b_0 + b_1 x) \pm t_{f, \alpha/2} S_e \sqrt{1 + f^T(x)(X^T X)^{-1} f(x)}}, \quad (9)$$

где  $L_{\text{conf.lim}}$  – доверительные пределы для прогнозного значения нагрузки.

На рис. 9 приведены результаты оценки максимального значения прочности при изгибе (7), доверительные интервалы прогнозируемого зна-

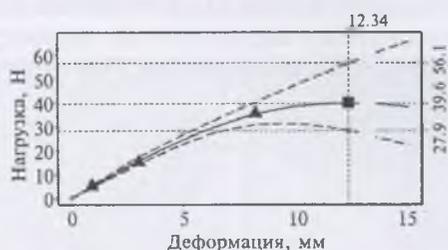


Рис. 9. Прогнозируемое значение нагрузки:

▲ – экспериментальные значения; сплошная линия – прогнозные значения; пунктир – доверительные интервалы для прогноза; ■ – прогноз максимального значения.

чения (9), максимальное значение деформации, выдерживаемое образцом однослойного композиционного материала до разрушения (6).

Для построения прогноза максимального значения нагрузки, выдерживаемой образцом композиционного материала до разрушения, достаточно провести 3 предварительных опыта по нагружению экспериментального образца композиционного материала, не разрушая его.

Результаты оценки прогнозируемого максимального значения нагрузки, выдерживаемой образцом композиционного материала до разрушения, также приведены на рис. 9. На рисунке обозначены: точки, соответствующие экспериментальным значениям нагружения образца однослойного композиционного материала; кривая, описывающая прогнозируемое значение зависимости нагрузки от деформации; линии, описывающие доверительные интервалы для прогнозируемых значений зависимости нагрузки от деформации; точки, соответствующие прогнозу максимального значения нагрузки, выдерживаемой образцом до разрушения; точки, соответствующие 95%-ному доверительному интервалу максимального значения нагрузки, выдерживаемой образцом материала до разрушения.

– Предложенный однослойный композиционный материал, сформированный с использованием льняного волокна, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к прочностным характеристикам обувного картона, применяемого при производстве полустелек для обуви.

– Получена математическая модель, описывающая зависимость нагрузки от деформации льносодержащего однослойного композиционного материала.

– Разработан аналитический метод, позволяющий прогнозировать максимальное значение нагрузки, выдерживаемой образцом однослойного льносодержащего композиционного материала до разрушения.

*Работа выполнена при поддержке гранта Фонда фундаментальных исследований Беларуси № Т19У-004 «Оценка и прогнозирование физико-механических свойств льняных текстильных материалов».*

#### Библиографический список

1. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г и др. // Вестник Казанск. технологич. ун-та. 2014. № 19. – С.150-154.
2. ГОСТ 9187-74. Обувной картон. Метод определения жесткости и изгибостойкости при статическом

изгибе. – М.: Изд. стандартов, 1974.

3. Реймер В., Дягилев А.С. и др. // Хим. волокна. 2018. № 6. – С.61-65.

4. Ramnath B.V., Elanchezhian C. e.a. // Fibers a. Polymers 2014. V 15. № 6. – P.1251-1262. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1251-3>

5. Дягилев А.С., Бизюк А.Н., Коган А.Г // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. 2018. № 6 (378). – С.48-51.

6. Дягилев А.С., Бизюк А.Н., Коган А.Г // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. 2016. № 1 (361). – С.51-54.

7. Дягилев А.С., Петюль И.А. и др. // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. 2016. № 6 (366). – С.69-75.

8. Дягилев А.С., Коган А.Г // Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. 2015. № 2 (356). – С.37-41.

9. Goutianos S., Peijs T e.a. // Appl. Composite Materials. 2006. V 13. № 4. – P 199-215. <https://doi.org/10.1007/s10443-006-9010-2>

10. Foulk J.A., Chao W Y e.a. // J Polymers a. Environment. 2006. V.14. № 1. – P 15-25. <https://doi.org/>

10.1007/s10924-005-8703-1

11. Strohrmann K., Hajek M.J. // J. Materials Sci. 2019. V.54. № 2. – P 1409-1421 <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2912-1>

12. Boisse P., Hamila N. e.a. // Intern. J. Material Forming. 2008. V 1. № 1. – P.21-29. <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0002-7>

13. Reimer V., Dyagilev A.S. e.a. // Fibre Chemistry. 2018. V.49. № 5. – С.330-333.

14. Реймер В., Дягилев А.С., Грис Т // Хим. волокна. 2017 № 5. – С.40-43.

15. Msalilwa L.R. Kyosev Y e.a. In: Recent Developm. in Braiding a Narrow Weaving. 2016. – P.59-67 [https://doi.org/10.1007/978-3-319-29932-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-29932-7_6)

16. Huang X., Bahroloomi D., Xiao X // J. Solid State Electrochem. 2014. V 18. № 1 – P 133-139. <https://doi.org/10.1007/s10008-013-2254-5>

17. Дягилев А.С., Коган А.Г. Методы и средства исследований технологических процессов. – Витебск: ВГТУ 2012. – 206 с.