

Сентюров Н.С., старший преподаватель;
Цайц М.В., кандидат технических наук, доцент;
Курзенков С.В., кандидат технических наук, доцент
*Учреждение образования «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», г. Горки, Республика Беларусь*

ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТЧАТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОЛОТЕН ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования механического поведения сетчатых лент из стекловолокна и полиэфира при комбинированном нагружении, включающем растяжение и изгиб. Разработаны калибровочные зависимости силы от перемещения и многофакторные модели относительного удлинения, а также определены предельные характеристики материалов. Установлены ключевые различия в деформационном поведении материалов, сформулирована замкнутая математическая модель для прогнозирования работоспособности сетчатых лент в технологических установках.

Abstract. This article presents the results of a study of the mechanical behavior of fiberglass and polyester mesh belts under combined loading, including tension and bending. Calibration curves for force versus displacement and multifactor models for relative elongation are developed, and the ultimate material properties are determined. Key differences in the deformation behavior of the materials are identified, and a closed-loop mathematical model for predicting the performance of mesh belts in process installations is formulated.

Ключевые слова: сетчатая лента, стекловолокно, полиэфир, комбинированное нагружение, деформация, математическое моделирование, разрывная нагрузка, относительное удлинение.

Key words: mesh tape, fiberglass, polyester, combined loading, deformation, mathematical modeling, breaking load, relative elongation.

Сетчатые ленты находят широкое применение в технологических установках, включая транспортные системы сельскохозяйственного назначения, например, для очистки вороха льнокуста от минеральных примесей. Механическое поведение таких лент в реальных условиях эксплуатации определяется не только физико-механическими свойствами материала, но и геометрией рабочего участка, а также характером нагружения, который часто является комбинированным (растяжение с изгибом) [5, 6].

В большинстве известных работ рассматривается либо чистое растяжение, либо упрощенные схемы нагружения. При этом установлено, что свойства полимерных композиционных материалов, в частности стеклопластиков и полиэфирных полотен, напрямую зависят от схемы плетения

[1]. Исследованиями [3, 4] показано, что однонаправленные волокна обеспечивают максимальную прочность вдоль нитей, подчиняясь закону Гука, в то время как хаотично распределенные маты обеспечивают изотропность свойств, однако с меньшими пиковыми показателями прочности.

Для целей выделения минеральных примесей из льнокустры наиболее перспективным признано использование транспортера с волнообразной сетчатой лентой, имеющей квадратное сечение ячеек, получаемое осново-вязальным методом [7, 8]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование деформации и разрушения сетчатых лент из стекловолокна и полиэфира при комбинированном нагружении, разработка калибровочных и многофакторных математических моделей, описывающих их поведение, а также формирование замкнутой математической модели системы для прогнозирования ресурса.

Объектами исследований являлись два типа промышленно выпускаемых сетчатых материалов: стекловолоконная сетка и полиэфирная сетка. Испытания проводились на специализированной лабораторной установке, включающей неподвижный и подвижный зажимы с регулируемым расстоянием между ними ($L = 0,02 \dots 0,16$ м), нагружающий элемент (ролик) и систему измерения перемещения и силы. Дополнительные испытания на разрыв для определения предельных характеристик выполнялись на универсальном испытательном стенде Kason WDW-50S с программным обеспечением MaxTest в соответствии со стандартными методиками [9, 10].

В ходе экспериментальной части работы была установлена зависимость силы натяжения сетчатой ленты F от вертикального перемещения нагружающего элемента Δ и длины рабочего участка L . Аппроксимация экспериментальных данных с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,99$ позволила получить следующие квадратичные зависимости:

– для стекловолокна:

$$F(\Delta, L) = (800 - 600 L) \cdot \Delta + 4000 \cdot \Delta^2; \quad (1)$$

– для полиэфира:

$$F(\Delta, L) = (500 - 400 L) \cdot \Delta + 2500 \cdot \Delta^2. \quad (2)$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что стекловолокно является «жестким» материалом: при небольших перемещениях Δ наблюдается линейный рост силы, а при больших Δ – резкое нелинейное увеличение. Полиэфир, напротив, демонстрирует пластичное поведение с плавным ростом силы и меньшей чувствительностью к изменению Δ . Характер разрушения также различается: стекловолоконная сетка разрушается мгновенно по всей ширине, тогда как разрушение полиэфирной сетки носит постепенный, вязкий характер, начинаясь с края, что позволяет прогнозировать его наступление.

Для описания относительного удлинения ε_c образца под действием растягивающей силы F с учетом длины рабочего участка L была построена

многофакторная регрессионная модель. В результате получены адекватные зависимости ($R^2 \geq 0,99$), описывающие рабочую область деформации:

– для стекловолокна:

$$\varepsilon_c = 0,52 \cdot L + 0,0018 \cdot F + 0,0025 L \cdot F + 1,12; \quad (3)$$

– для полиэфира:

$$\varepsilon_c = 0,38 \cdot L + 0,0022 \cdot F + 0,0016 \cdot L \cdot F + 1,05. \quad (4)$$

Проведенный дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость всех факторов, при этом для стекловолокна наибольший вклад в отклик вносит взаимодействие факторов, а для полиэфира – непосредственно нагрузка.

Результаты испытаний на разрыв (табл. 1) показали, что стекловолоконная лента значительно прочнее полиэфирной. Ее усилие при разрыве варьируется от 168,7 Н при длине 0,1 м до 214,7 Н при длине 0,4 м, тогда как для полиэфира эти значения составляют от 82 до 100 Н соответственно. При этом полиэфирная лента менее податлива: при длине 0,4 м ее удлинение при разрыве составляет 0,075 м против 0,105 м у стекловолокна. На основании этих данных были построены линейные модели предельной деформации ($R^2 > 0,95$):

– для стекловолокна:

$$\varepsilon_{кр} = 0,33 - 0,17 \cdot L, F_{кр} = 120 + 280 \cdot L; \quad (5)$$

– для полиэфира:

$$\varepsilon_{кр} = 0,24 - 0,13 \cdot L, F_{кр} = 80 + 200 \cdot L. \quad (6)$$

Таблица 1 – Предельные характеристики сетчатых лент по результатам испытаний на разрыв

Материал	Длина фрагмента (начальная), м	Усилие при разрыве, Н	Удлинение фрагмента при разрыве, м
стекловолокно	0,1	168,67	0,03
	0,2	189,0	0,0613
	0,3	194,0	0,0833
	0,4	214,67	0,1053
полиэфир	0,1	82,0	0,0223
	0,2	88,0	0,0377
	0,3	94,0	0,0537
	0,4	100,0	0,0747

На основании проведенных исследований была сформулирована замкнутая поведенческая модель работоспособности сетчатой ленты:

$$\Phi = L^2 - k \cdot F, \quad (7)$$

где k – эмпирический коэффициент, определяемый типом материала. При этом условие $\Phi < 0$ соответствует рабочей области, $\Phi = 0$ – границе разрушения, а $\Phi > 0$ – области разрушения ленты. Полученные модели могут быть использованы при проектировании ленточных транспортеров и друго-

го оборудования, работающего в условиях комбинированного нагружения, а также для прогнозирования ресурса сельскохозяйственных машин [11, 12].

Заключение. Деформация сетчатой ленты определяется не только величиной нагрузки, но и длиной рабочего участка, при этом взаимодействие факторов является ключевым и отражает перераспределение напряжений в материале.

Стекловолоконная сетка демонстрирует более жесткое и нелинейное поведение, разрушаясь мгновенно при достижении критической нагрузки, тогда как полиэфирная сетка характеризуется большей пластичностью и стабильностью, что делает ее более предпочтительной для систем, где требуется прогнозируемое поведение.

Разработанные калибровочные и многофакторные математические модели с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 \geq 0,95$) адекватно описывают поведение материалов в широком диапазоне нагрузок и могут быть использованы в инженерных расчетах.

Сформированная замкнутая математическая модель позволяет прогнозировать как рабочую область деформации, так и условия разрушения материала, что подтверждено корреляционным анализом экспериментальных данных и может быть применено при проектировании ленточных систем для очистки льнокостры и другого технологического оборудования.

Список использованной литературы

1. Симонов-Емельянов, И. Д. Построение структур полимерных композиционных материалов и их свойства / И. Д. Симонов-Емельянов. – М. : МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2005. – 64 с.
2. Татлыева, Г. З. Исследование физико-механических свойств стеклопластиков на основе полиэфирных смол марки Norpol / Г. З. Татлыева, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 138–142.
3. Aramide, F. O. Evaluation of the Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Polyester Composites / F. O. Aramide, I. O. Oladele, D. O. Folorunso // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2014. – Vol. 2, No. 2. – P. 112–118. – DOI: 10.4236/jmmce.2014.22015.
4. Jayabal, S. Effect of Glass Fiber Orientation on Mechanical Properties of Glass-Polyester Composites / S. Jayabal, S. Sathiyamurthy, K. T. Loganathan // International Journal of Applied Engineering Research. – 2012. – Vol. 7, No. 11. – P. 1245–1252.
5. Патент 2752475 С1 Российская Федерация. Устройство для очистки льнокостры / М. В. Симонов, В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц ; заявитель Вятский государственный университет. – № 2021100782 ; заявл. 15.01.2021 ; опубл. 28.07.2021.
6. Поисковые эксперименты процесса выделения минеральных примесей из вороха льнокостры транспортером с волнообразной колеблющейся сетчатой лентой / В. А. Шаршунов [и др.] // Агропанорама. – 2023. – № 3 (157). – С. 8–13. – DOI: 10.56619/2078-7138-2023-157-3-8-13.
7. Шаршунов, В. А. Обоснование размера ячеек для выделения минеральных примесей из льнокостры / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров // Инновационная деятельность в модернизации АПК : материалы Международной научно-

практической конференции. В 3 ч. Ч. 1. – Курск : Курская государственная сельскохозяйственная академия, 2017. – С. 356–359.

8. Григорьев, Ю. Н. Геосинтетические материалы в дорожном строительстве / Ю. Н. Григорьев, А. П. Лупанов. – М. : МАДИ, 2011. – 112 с.

9. Аналитические исследования рабочей зоны эксцентрика в устройстве очистки льнокостры с колеблющейся сетчатой лентой / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1. – С. 127–132.

10. Теоретическое обоснование кинематики эксцентрикового воздействия на сетчатую ленту транспортера для очистки вороха льнокостры / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2026. – № 1. – С. 100–105.

11. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л. : Колос, 1972. – 168 с.

12. Митков, А. Л. Статистические методы в сельхозмашиностроении / А. Л. Митков. – М. : Машиностроение, 1978. – 360 с.

Summary. Deformation and Strength Characteristics of Polymer Mesh Belts under Combined Loading: Experimental and Mathematical Modeling.

This paper presents the results of a study on the mechanical behavior of glass fiber and polyester mesh belts under combined tensile and bending loading. Calibration relationships of force versus displacement and multifactor models of relative elongation were developed, and the ultimate material characteristics were determined. The analysis reveals that glass fiber mesh exhibits rigid, nonlinear behavior and fails instantaneously, whereas polyester mesh demonstrates greater ductility and stability. The obtained linear and multifactor regression models ($R^2 \geq 0.95$) adequately describe the material behavior under various loading conditions. A closed mathematical model is proposed to predict both the elastic deformation region and failure conditions. The results can be applied in the design of belt conveying systems, including those for flax shive cleaning processes.

УДК 621.9

Леонов С.Л., доктор технических наук, профессор;

Иконников А.М., доктор технических наук, доцент;

Ковальчук А.Е., магистрант; **Иконников Н.А.**, студент

*ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация*

МАГНИТО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА В СОВРЕМЕННОМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы и эффективность применения магнитно-абразивной обработки в производстве деталей сельскохозяйственного машиностроения. Описываются технологические