

УДК 623.5

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_160

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОСТНОЙ АНИЗОТРОПИИ,
А ТАКЖЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
В КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ ИЗ ГИБКОЦЕПНОГО ПОЛИМЕРА**

**RESEARCH OF THE IN-PLANE ANISOTROPY AND THE CORRELATION
BETWEEN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE COMPOSITE
MATERIAL FROM FLEXIBLE POLYMER**

К.О. Каранина, д-р техн. наук Н.М. Сильников, О.С. Новак, Л.С. Жукова

K.O. Karanina, D.Sc. N.M. Silnikov, O.S. Novak, L.S. Zhukova

НПО Спецматериалов

В статье рассматриваются механизмы воздействия воды на нетканый текстильный материал из СВМПЭ-волокна и их влияние на защитные свойства. СВМПЭ-волокна обладают высокой прочностью и легкостью при ограничении их эксплуатационных характеристик, таких как температура плавления (135–190 °С) и воздействие воды. Исследование направлено на проверку гипотезы о наличии прямой корреляции между защитными свойствами и водопоглощением СВМПЭ-волокон. Для этого проведены испытания на водопоглощение и определение противоосколочной стойкости $V_{50\%}$ с использованием осколка в качестве поражающего элемента, что позволило оценить влияние водопоглощения на защитные характеристики материала. Однако тенденция к прямой линейной зависимости показала необходимость в дальнейшем изучении исследуемого явления, основанного в том числе на эффекте капиллярного давления и эффекте набухания полимерных макромолекул.

Ключевые слова: гибкоцепной полимер, волокно из мультифиламента, СВМПЭ-волокна, водопоглощение, защитные свойства, противоосколочная стойкость, закон Гука, модуль Юнга, диаграмма нагружения, анизотропия.

The article considers mechanisms of water influence on non-woven textile material from UHMWPE-fiber and their effect on protective properties. UHMWPE-fiber has high strength and lightness while limiting its operational characteristics, such as melting temperature (135–190 °C) and water exposure. The study is aimed at testing the hypothesis of a direct correlation between protective properties and water absorption UHMWPE-fiber. The water absorption tests were carried out and the shrapnel resistance $V_{50\%}$ was determined using a chip as a target, which allowed to evaluate the effect of water absorption on the protective characteristics of the material. However, the trend towards direct linear dependence has shown the need for further study of the phenomenon under investigation, based on capillary pressure and swelling effect of polymer macromolecules.

Keywords: flexible polymer, multifilament fiber, UHMWPE-fiber, absorption of water, protective properties, fragments resistance, Hooke law, Young module, loading diagram, anisotropy.

Введение

Композитные материалы на основе мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера находят широкое применение в различных областях, включая создание средств общей и индивидуальной защиты [1]. Высокие удельные характеристики гибкоцепного полимера, такие как прочность и стойкость к ударным воздействиям, а также высокая гибкость делают его популярным и универсальным материалом для изготовления легких и эффективных защитных элементов [2, 10, 11].

Одним из ключевых аспектов, определяющих баллистическую эффективность композитного материала из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера, является его структура и, как следствие, анизотропия физико-механических свойств [3]. Анизотропия, то есть зависимость свойств материала от направления, может существенно влиять на его поведение при ударном воздействии, определяя механизм деформации и поглощения энергии [4].

Основная часть

В связи с этим, настоящее исследование посвящено изучению плоскостной анизотропии физико-механических свойств композитного материала из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера. Целью работы является определение степени анизотропии свойств материала в плоскости, а также выявление взаимосвязи между различными физико-механическими характеристиками, а именно между поверхност-

ной плотностью, водопоглощением и средней скоростью имитатора осколка при непробитии мягкого блока из СВМПЭ-волокна после выдержки мягкого блока в воде в течение 1 часа, а также модулем Юнга. Полученные результаты позволят углубить понимание поведения композитного материала из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера при воздействии имитатором осколка на мягкий блок после выдержки в воде в течение 1 часа и оптимизировать их структуру для повышения защитных свойств.

Для исследования степени плоскостной анизотропии физико-механических свойств в мультифиламентном волокне из гибкоцепного полимера было выбрано направление, параллельное намотке материала в рулоне, и перпендикулярное направлению, параллельное ширине материала в рулоне. В произведенном рулоне с мультифиламентным волокном из гибкоцепного полимера в количестве 214 пог. м был произведен забор материала в начале и в конце рулона в количестве по 7 пог. м каждого для проведения всех видов испытания. Для изготовления образцов каждый материал был разлинован на три части вдоль направления намотки в соответствии с ориентацией лево–середина–право, как показано на рис. 1.

На данном этапе были подготовлены образцы на испытания в количестве, установленном в табл. 1.

Для измерения водопоглощения были подготовлены образцы из СВМПЭ-волокна (рис. 2) размером 100×150 мм. Испытания поверхностной плотности проходили по ГОСТ 3811–72 [5],

Таблица 1

Список образцов и испытаний

Вид испытаний Наименование образцов	Водопоглощение, %	Модуль Юнга, МПа	Плотность, г/м ²	$V_{50\%}$ после выдержки в воде в течение 1 часа, м/с
НЛ (начало/ лево)	3	6	3	1
НС (начало/ середина)	3	6	3	1
НП (начало/ право)	3	6	3	1
КЛ (конец/ лево)	3	6	3	1
КС (конец/ середина)	3	6	3	1
КП (конец/ право)	3	6	3	1



Рис. 1. Ориентация в мультифиламентном волокне из гибкоцепного полимера

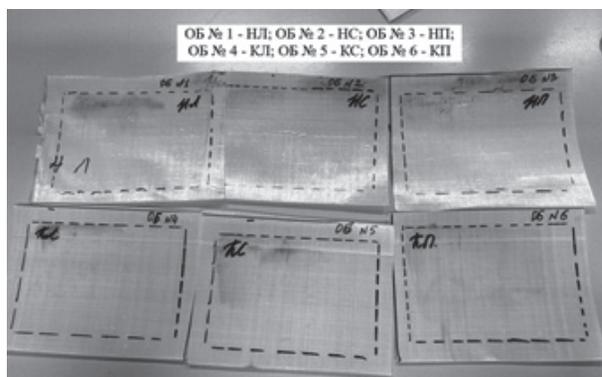


Рис. 2. Образцы из СВМПЭ-волокна для измерения поверхностной плотности и водопоглощения

испытания на водопоглощение проходили по ГОСТ 3816–81 первому способу [6].

Образцы на определение модуля Юнга представляют собой прямоугольники размером 200×10 мм (рис. 3). Испытания проходили по ГОСТ 32656–2017 [7], скорость движения траверсы была выбрана опытным путем и составила 10 мм/мин.

Образцы для баллистических испытаний по классу защиты С2 на определение средней скорости непробития имитатором осколков по ГОСТ Р 55623–2013 представляют собой мягкие блоки размером 320×240 мм с поверхностной плотностью 3,2 кг/м² [8], рис. 4.

Усредненные результаты испытаний на водопоглощение и определение поверхностной плотности представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что между поверхностной плотностью материала и его водопоглощением нет прямой зависимости, поскольку при повышении поверхностной плотности на 8,9 % от среднего по шести значениям, водопоглощение не возрастает, из чего можно сделать вывод о том, что на водопоглощение влияет не удельная масса материала, а иные факторы, которые пред-



Рис. 3. Образцы из СВМПЭ-волокна для определения модуля Юнга

положительно связаны с составом полимерной матрицы, фиксирующей мультифиламентное волокно из гибкоцепного полимера на полимерном экране, а также со спецификой структуры композитного материала.

Поскольку мультифиламентное волокно из гибкоцепного полимера обладает низкой гигроскопичностью, водопоглощение в большей мере происходит не за счет сдвига межмолекулярных связей, а благодаря диффузии воды в поры и микротрещины в структуре композитного мате-

Таблица 2

Усредненные результаты испытаний на водопоглощение и определение поверхностной плотности

Образец	Поверхностная плотность, г/м ²	Водопоглощение, %
ОБ № 1 — КЛ	179,221	2
ОБ № 2 — КС	181,300	3
ОБ № 3 — КП	181,914	2
ОБ № 4 — НЛ	167,782	3
ОБ № 5 — НС	166,383	2
ОБ № 6 — НП	167,467	2

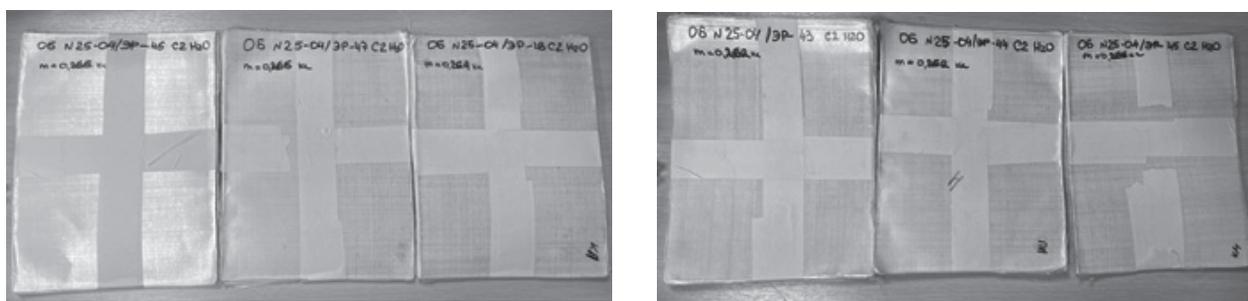


Рис. 4. Образцы из СВМПЭ-волокна для испытаний по классу защиты С2

риала из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера [9].

Диаграммы нагружения образцов представлены на рис. 5–10. Каждый график представляет собой совокупность единичных результатов испытаний. С каждого наименования в материале было подготовлено по 6 образцов. На рис. 5–10 представлены результаты испытаний только тех образцов, растяжение которых происходило в рабочей области образца (рис. 12). Поскольку СВМПЭ-волокна представляют собой поперечно направленный материал, результаты по испытаниям на растяжение получены из слоев, направленных вдоль направления оказываемой в ходе испытаний нагрузки. Факт наличия деформации в рабочей области зафиксирован визуально по внешнему виду поперечного слоя в образце (рис. 11), а также на диаграммах нагружения (рис. 5–10). На продольных слоях структуры визуально зафиксировать растяжение невозможно, что говорит о том, что оно происходит на микроскопическом уровне.

Каждую диаграмму можно разделить на несколько участков, описывающих определен-

ные процессы, происходящие в композитном материале из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера:

- I — участок упругой деформации;
- II — участок предельной упругости;
- III — участок упрочнения;
- IV — участок пластической деформации;
- V — зона разрушения.

На основании вышеперечисленного, можно выдвинуть гипотезу о том, что при воздействии одноосного растяжения на образцы из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера, материал ведет себя так, что в первую очередь происходят упругие деформации за счет растяжения молекул мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера вдоль прикладываемой нагрузки, поскольку структура макромолекулы мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера в стандартных условиях зигзагообразная.

После участка предельной упругости, при котором остаточные деформации не превышают более 0,05 %, начинается участок упрочнения, связанный, предположительно, с наличием слоев

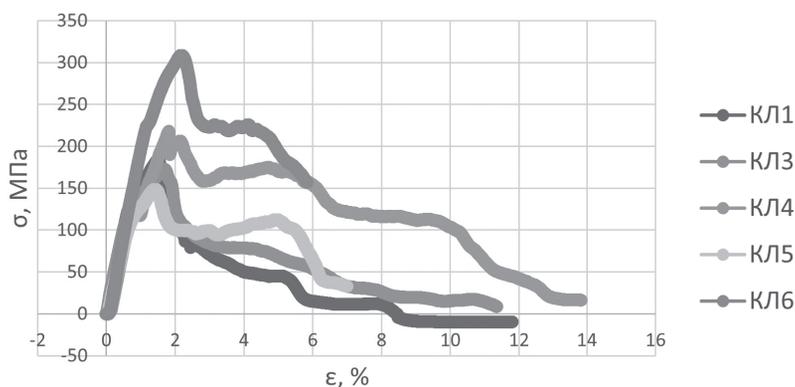


Рис. 5. Диаграмма нагружения образцов, взятых с конца намотки СВМПЭ-волокна в рулоне слева

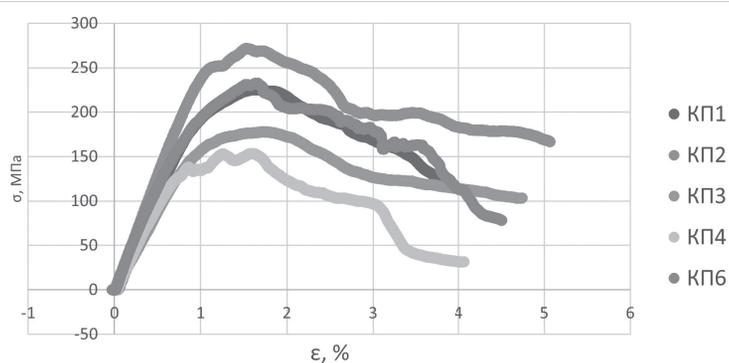


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов, взятых с конца намотки СВМПЭ-волокна в рулоне справа

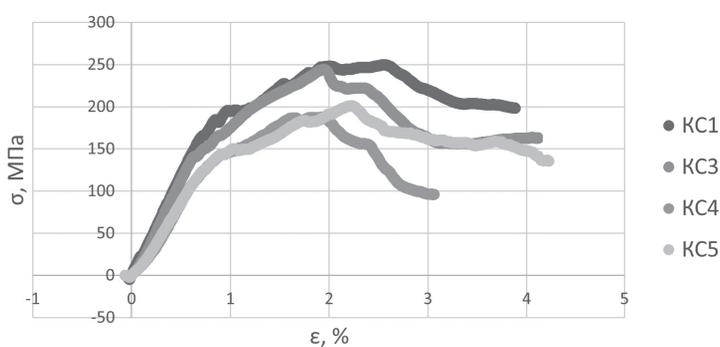


Рис. 7. Диаграмма нагружения образцов, взятых с конца намотки СВМПЭ-волокна в рулоне с середины

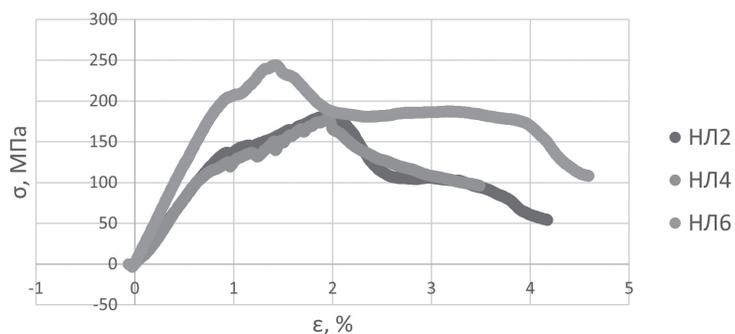


Рис. 8. Диаграмма нагружения образцов, взятых с начала намотки СВМПЭ-волокна в рулоне слева

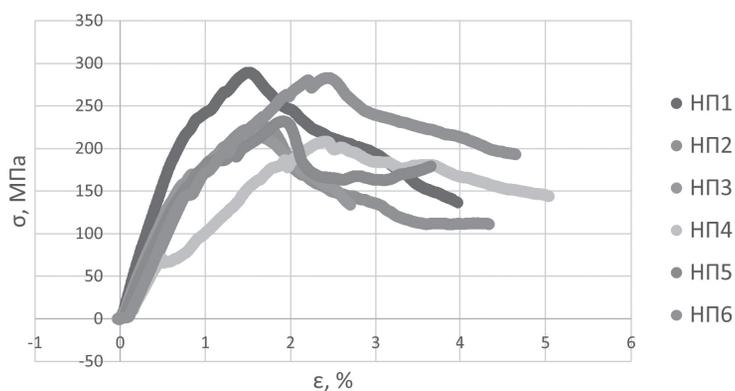


Рис. 9. Диаграмма нагружения образцов, взятых с начала намотки СВМПЭ-волокна в рулоне справа

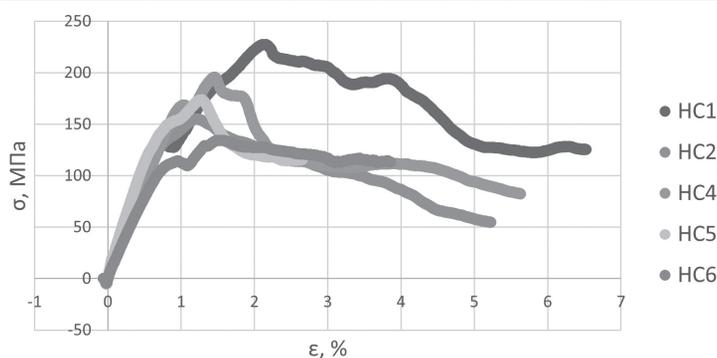


Рис. 10. Диаграмма нагружения образцов, взятых с начала намотки СВМПЭ-волокна в рулоне с середины

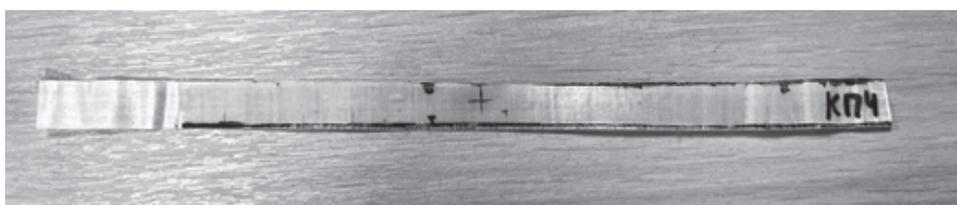


Рис. 11. Пример образца с разрывом в рабочей области

в материале, расположенных поперечно основному и выполняющих армирующую функцию, поскольку помимо растяжения основных слоев растягиваются и поперечно направленные. Для данного участка характерен рост напряжения при небольшом увеличении деформации.

Как только поперечные слои перестают оказывать армирующую функцию, на диаграмме появляется резкий «спад» в напряжении. После данного участка идет область пластической деформации, при которой слои в основном направлении продолжают разрушаться

практически без нагрузки. После области пластической деформации идет разрушение, о чем говорит постоянное снижение нагрузки при увеличении деформации.

Из участка пропорциональности по каждой диаграмме (рис. 6–11) получено уравнение прямой, коэффициент пропорциональности которой по закону Гука равен модулю Юнга (табл. 3).

По каждому наименованию образцов произведен расчет среднеквадратичного отклонения, а также общего среднеквадратического отклонения по модулю Юнга (табл. 3).

Таблица 3

Результаты вычисления среднеквадратичного отклонения по модулю Юнга

	№ образца	КЛ	КС	КП	НЛ	НС	НП	Общее
Модуль Юнга, МПа	1	23336,0	24590,9	22609,7	– ¹	19725,6	31687,8	
	2	– ¹	– ¹	25899,5	15984,7	19523,7	22088,1	
	3	19442,4	24611,3	17820,5	– ¹	– ¹	23685,0	
	4	20947,5	21164,9	21145,5	17544,2	17957,7	18155,14	
	5	17634,4	19493,3	–	– ¹	21170,7	22250,3	
	6	22022,8	– ¹	22022,8	23913,8	14583,0	23114,4	
Среднее значение, МПа		20676,6	22465,1	21900,0	19147,6	18592,2	23496,8	21218,8
S, МПа		2221,3	2559,1	2903,7	4200,7	2513,8	4457,5	3450,9
%		10,7	11,4	13,3	21,9	13,5	19,0	16,3

¹ — Значение отсутствует по причине разрыва образца в зажиме

Разброс по значениям более 10 % приемлем для данного объема выборки. Разница в значениях, предположительно, связана с тем, что комплексная нить из гибкоцепного полимера представляет собой мультифиламент (рис. 12), и каждый поврежденный филамент (пример на рис. 13) влияет на прочностные характеристики как самой комплексной нити, так и материала, выполненного из нее.

Модуль Юнга мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера по значению близок

к бетону, у которого справочное значение по модулю Юнга находится в пределах 14,6–23,2 ГПа.

На основании результатов, табл. 4 были выведены точки на двумерную систему координат, на оси абсцисс которой расположены значения модуля Юнга, а на оси ординат — средняя скорость непробития имитатором осколками (рис. 14). Данный объем выборки демонстрирует нелинейную зависимость между параметрами, однако тенденция восходящая. Тем не менее для того, чтобы сформировать более полное представле-



Рис. 12. Комплексная нить из гибкоцепного полимера под микроскопом SK2009 (Saikedigital) при увеличении в 40 раз

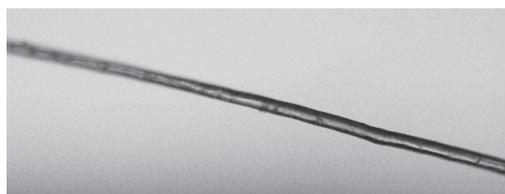


Рис. 13. Филамент комплексной нити из гибкоцепного полимера под микроскопом SK2009 (Saikedigital) при увеличении в 100 раз

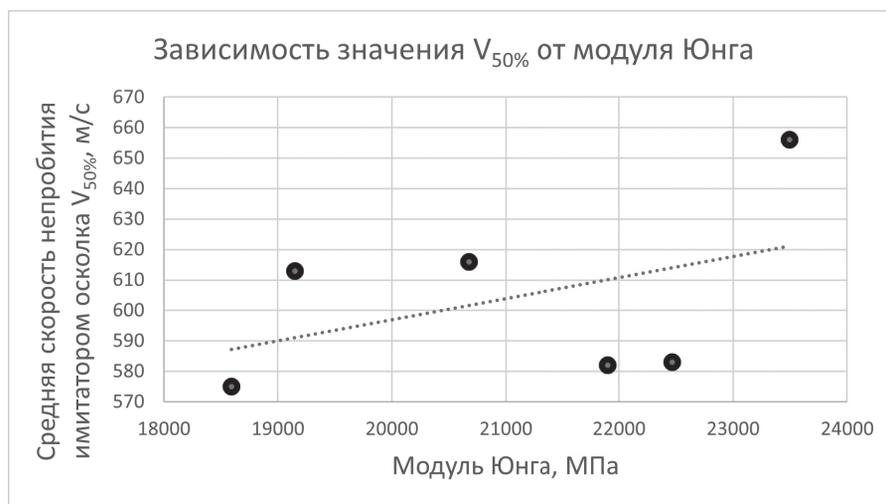


Рис. 14. График зависимости средней скорости непробития имитатором осколков от модуля Юнга

Результаты испытаний мягких блоков из СВМПЭ-волокна по классу защитной структуры С2 после выдержки в воде в течение 1 часа и расчета модуля Юнга

Наименование образца	Масса образца, кг	$V_{50\%}$, м/с	Модуль Юнга, МПа
КЛ	0,262	616	20676,6
КС	0,262	583	22465,1
КП	0,266	582	21900,0
НЛ	0,266	613	19147,6
НС	0,266	575	18592,2
НП	0,264	656	23496,8

ние о характере зависимости, необходимо продолжать дальнейшие испытания.

Заключение

Таким образом, положено начало для исследования взаимосвязи между физико-механическими свойствами мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера. При изучении объема выборки, табл. 1, было определено, что на водопоглощение материала (табл. 2), выполненного из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера, влияет множество факторов, в том числе состав полимерной матрицы, фиксирующей мультифиламентное волокно из гибкоцепного полимера на полимерном экране, а также капиллярное давление, образующееся в порах композитного материала.

К тому же рассмотрено поведение мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера при воздействии одноосного растяжения постоянной скоростью поднятия траверсы разрывной машины (рис. 5–10). При построении диаграммы нагружения образцов видно, что они ведут себя типично для композитного многослойного материала. На основании испытаний на растяжение была выдвинута гипотеза о том, что по участку упрочнения на диаграмме можно судить о степени адгезии между слоями в мультифиламентном волокне из гибкоцепного полимера.

Также на основании построенных диаграмм нагружения по каждому из образцов были получены значения модуля Юнга, которые в данной статье сопоставлены с результатами испы-

таний мягких блоков из СВМПЭ-волокна по классу защиты С2 после выдержки в воде в течение 1 часа. Полученный график зависимости средней скорости имитатора осколков от модуля Юнга, рис. 14, показал восходящую тенденцию, однако для получения более точной зависимости, на основании которой возможно было бы составить уравнение, необходимо продолжать исследование, наращивая объем выборки образцов из мультифиламентного волокна из гибкоцепного полимера.

Список источников

1. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты. СПб.: Фонд «Университет», 2000. 480 с.
2. Сильников Н.М., Рябов В.А., Михайлин А.И. Особенности разработки бронеодежды для скрытого ношения // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9–10. С. 31–36.
3. Многослойная броня: пат. 2579349 Рос. Федерация. № 2015104226/12; заявл. 02.09.15; опубл. 10.04.16, Бюл. № 10. 6 с.
4. M. Jones Robert. Mechanics of composite materials: 2nd ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1999. 538 p.
5. ГОСТ 3811–72. Материалы текстильные. Ткани, нетканые полотна и штучные изделия. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотности. М.: Московский печатник, 1972. 15 с.
6. ГОСТ 3816–81. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водо-

отталкивающих свойств. М.: Московский печатник, 1981. 14 с.

7. ГОСТ 32656–2017. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2017. 31 с.

8. ГОСТ Р 55623–2013. Бронеодежда. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014. 10 с.

9. Rajendra P. Prasad, Prakash J.N., Manjunath L.H. Effect of process parameters on wear behavior and water absorption of UHMWPE fabric reinforced epoxy composites // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 10. № 01. Pp. 543–549. URL: https://www.researchgate.net/publication/331043733_Effect_of_process_parameters_on_wear_behavior_and_water_absorption_of_UHMWPE_fabric_reinforced_epoxy_composites (дата обращения: 21.05.2025)

10. Сильников Н.М., Фомичев А.Б., Гук И.В. и др. Применение сверхвысокомолекулярного полиэтилена «Руссил» для защиты корпусных конструкций судов. Новые технологии в судостроении НТС-2023: сб. тр. / Отраслевая научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 2023. С. 141–146.

11. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных материалов: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2012. 180 с.

References

1. Silnikov M.V., Khimichev V.A. Means of individual armor protection. St. Petersburg: University Foundation, 2000. 480 p.

2. Silnikov N.M., Ryabov V.A., Mikhailin A.I. Features of the development of armor for concealed wear // *Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism*. 2017. No 9–10. Pp. 31–36.

3. Multilayer armor: patent for invention RU 2579349 of 04/10/2016.

4. M. Jones Robert. *Mechanics of composite materials*: 2nd ed. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1999. 538 p.

5. GOST 3816–81. Textile fabrics. Methods for determining hygroscopic and water-repellent properties. Moscow: Moskovsky pechatnik, 1981. 14 p.

6. GOST R 55623–2013. Armour resistance. Test methods. Moscow: Standartinform, 2014. 10 p.

7. GOST 32656–2017. Polymer composites. Test methods. Tensile testing. Moscow: Standartinform, 2017. 31 p.

8. GOST R 55623–2013. Armored clothing. Test methods. Moscow: Standartinform, 2014. 10 p.

9. Rajendra P. Prasad, Prakash J.N., Manjunath L.H. Effect of process parameters on wear behavior and water absorption of UHMWPE fabric reinforced epoxy composites // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 10, № 01. Pp. 543–549. URL: https://www.researchgate.net/publication/331043733_Effect_of_process_parameters_on_wear_behavior_and_water_absorption_of_UHMWPE_fabric_reinforced_epoxy_composites (date of reference: 21.05.2025).

10. Silnikov N.M., Fomichev A.B., Guk I.V. et al. The use of ultra-high molecular weight polyethylene «Russil» for the protection of hull structures of ships. New technologies in shipbuilding NTS-2023: collection of tr. / Branch scientific and technical conference. Saint Petersburg, 2023. Pp. 141–146.

11. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrzhin D.O. *Modern technologies for the production and processing of polymer materials: textbook*. stipend. Tambov: Publishing House of Tambov State Technical University, 2012. 180 p.