

УДК 678(075)

DOI 10.47367/0021-3497_2024_2_213

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНОПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER-FILLED POLYMER COMPOSITIONS***Б.Х. ИСЛАМОВ¹, С.Ш. ТАШПУЛАТОВ^{1,2}, М.Б. ЧОРИЕВА¹, Х.А. МАХМУДОВ³, У.А. ВАХИДОВА¹**B.Kh. ISLAMOV¹, S.Sh. TASHPULATOV^{1,2}, M.B. CHORIYEVA¹, Kh.A. MAKHMUDOV³, U.A. VAKHIDOVA¹**(¹Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан,**²Джизакский политехнический институт, Республика Узбекистан,**³Ошский государственный университет, Республика Кыргызстан)**(¹Tashkent Institute of Textile and Light Industry,**²Jizzakh Polytechnic Institute Republic of Uzbekistan,**³Osh State University, Republic of Kyrgyzstan)*

E-mail: b.x.islamov28@gmail.com; ssht61@mail.ru

В данной статье рассматривается влияние низких температур на деформационно-прочностные свойства композиционных полимерных материалов. В качестве компонентов разрабатываемых композиционных материалов использовали: поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полипропилен (ПП) и волокнистые отходы натуральных волокон (натуральный шелк, шерсть, кенаф, хлопок). Установлено, что разрывная прочность и модуль упругости композитов возрастают при охлаждении от комнатной температуры до криогенной и зависят от состава композиции. Деформационные свойства полимерных композиций на основе полиэтилена весьма чувствительны к низким температурам. Так, например, модуль упругости при $T=77\text{ K}$ заметно повышается по сравнению с его значением при $T=293\text{ K}$. На основании полученных результатов экспериментальных исследований полимеров при низких температурах даны рекомендации для прогнозирования деформационных свойств полимерных материалов для оценки их качества.

This article discusses the influence of low temperatures on the deformation-strength properties of composite polymer materials. The components of the developed composite materials were: polyvinyl chloride (PVC), low-density polyethylene (LDPE), polypropylene (PP) and fibrous waste of natural fibers (natural silk, wool, kenaf, cotton). It has been established that the tensile strength and elastic modulus of composites increase when cooled from room temperature to cryogenic temperature and depend on the composition of the composition. The

deformation properties of polyethylene-based polymer compositions are very sensitive to low temperatures. For example, the elastic modulus at $T=77\text{ K}$ increases noticeably compared to its value at $T=293\text{ K}$. Based on the results of experimental studies of polymers at low temperatures, recommendations for predicting the deformation properties of polymer materials to assess their quality are given.

Ключевые слова: полимеры, структура, свойства, прочность, деформация, полиэтилен, полимерные системы.

Keywords: polymers, structure, properties, strength, deformation, polyethylene, polymer systems.

Широкое применение полимерных материалов в значительной степени обусловлено их ценными механическими свойствами, главным образом высокой прочностью в сочетании со способностью к большим обратимым деформациям. Обычно при эксплуатации полимерные материалы подвергаются различным видам деформирования, поэтому к ним предъявляется комплекс требований.

Для решения некоторых важных вопросов в области текстильного материаловедения, а также физики полимеров особое значение приобретает исследование деформационно-прочностных свойств композиционных материалов при низких температурах [1...4].

Известно, что, когда нет достаточно полных данных о физико-механических свойствах определенного материала, это часто тормозит его внедрение в производство и вынуждает специалиста проявлять определенный консерватизм в его выборе. Значительное количество деталей и изделий из композиционных полимерных материалов эксплуатируется при низких температурах. Несмотря на актуальность вопрос о влиянии низких температур на комплекс физико-механических свойств полимеров мало изучен. Отсутствие литературных данных, необходимых для расчета и изготовления деталей из композиционных полимерных материалов, эксплуатируемых при низких температурах, сильно усложняет внедрение данных материалов в практику. Исходя из вышесказанного необходимо всесторонне изучать механические свойства, в частности, процессы деформи-

рования полимерных материалов при низких температурах [5, 6].

Успешному внедрению полимеров в производство способствует применение разных методов, позволяющих на основе кратковременных испытаний прогнозировать их механические свойства, весь период реальной эксплуатации композиции, а также изучение вопросов, связанных с изменением механических характеристик материала при разных температурах [7, 8].

Как правило, под механической прочностью материалов понимают сопротивление материала разрушению, то есть разрыву связей между элементами тела (атомами, молекулами и т. д.), приводящему к разделению образца на части. Исходя из этого механическая прочность материалов должна определяться энергией связей между элементами тела. Однако прочность реальных материалов в сотни раз меньше теоретических значений, рассчитанных по энергиям связи между атомами. Это вызвано тем, что в реальных материалах имеется большое количество дефектных мест, неоднородностей и трещин. Разрыв же происходит по наиболее слабым местам.

Характер разрушения зависит от того, в каком физическом состоянии находятся полимерные материалы. При нахождении полимерных материалов в высокоэластическом состоянии разрыву образца предшествуют очень большие обратимые деформации, связанные с молекулярными перегруппировками [14, 15]. Для стеклообразного состояния характерно хрупкое разрушение, которому предшествуют только обратимые деформации, и неболь-

шим напряжениям соответствуют малые деформации. В отличие от низкомолекулярных смол стеклообразные полимеры способны сохранять в некотором интервале температур способность подвергаться при приложении больших усилий значительным деформациям и приобретать хрупкость при температурах намного ниже температуры стеклования [16, 17]. Поэтому при определении прочности полимеров очень важно правильно оценить роль физических и химических факторов в процессе разрушения. Продолжительное воздействие деформирующей нагрузки или высокая температура в процессе испытания могут привести к развитию химических процессов, усиливающих структурную неоднородность системы, и способствовать неоднородному распределению напряжений. Развитие химических процессов в напряженном полимере в свою очередь может существенно ускориться в местах перенапряжений, что увеличит опасность возникновения микродефектов и приведет к уменьшению прочности больше, чем протекание чисто физических процессов разрушения. В этом случае развитие процесса разрушения полимеров во времени будет определяться не обычными законами прочности, а кинетикой химических процессов [18, 19].

В настоящее время особое внимание уделяется полимерным материалам, работающим в сложнейших экстремальных природно-климатических условиях. В связи с этим весьма интересно исследование поведения полимерного композиционного материала в различных температурных режимах деформирования.

Материалы и методы исследования

В качестве перспективных компонентов разрабатываемых композиционных материалов использовали: поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полипропилен (ПП) и волокнистые отходы натуральных волокон (натуральный шелк, шерсть, кенаф, хлопок).

Выбор компонентов обусловлен следующими причинами:

- ПЭНП и ПП имеют невысокую температуру размягчения, позволяющую про-

водить формование заготовок при низких температурах. Малый размер частиц ПЭНП обеспечивает равномерное распределение связующего в матрице. Важно и то, что присутствие связующего в композиции необходимо для сохранения формы, размера материала и механической прочности;

- в ПВХ сочетаются многие полезные технические свойства: химическая стойкость в различных средах, хорошие электроизоляционные свойства, нетоксичность. Уникальное сочетание высокой степени упорядоченности, полярности, наличия мезоморфного состояния, небольшая степень кристалличности, а также способность подвергаться разнообразному модифицированию позволяют получить композиционные материалы с широким диапазоном физико-механических свойств;

- использование отходов природных и других волокон в композиционном материале определяется особенностями физико-химического строения, структуры и свойств этих природных полимеров, а также решает вопросы утилизации данных материалов.

Исходные материалы получены двумя способами. Первый способ заключается в механическом смешении отдельных готовых порошков и волокон. Второй способ основан на предварительном высокотемпературном сдвиговом совместном измельчении гранул ПЭНП и волокнистых материалов в определенном соотношении компонент [9, 10].

Изучение деформационно-прочностных характеристик проводили в режиме одноосного растяжения на динамометре типа «Инстрон-1122» со скоростью $5 \cdot 10^{-3}$ м/мин в широком интервале температур. Образцы для испытаний вырубали в виде двухсторонней лопатки шириной 1,4 мм и базой 20 мм. Из экспериментальных диаграмм определяли значение разрушающего напряжения σ_p и относительного удлинения ϵ_p по формулам:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0},$$

где F_p – разрывное усилие; S_0 – площадь поперечного сечения недеформированного образца;

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l}{l_0} * 100\%,$$

где Δl – изменение расчетной длины образца в момент разрыва; l_0 – расчетная длина образца.

Зависимость напряжение-деформация выражают так называемой деформационной кривой, вид которой определяется фазовым и физическим состоянием полимеров. Модуль упругости рассчитывали по наклону кривой зависимости σ - ε в предполагаемой гуконской области деформаций. Полученные из деформированных кривых значения разрушающего напряжения, относительного удлинения и модуля упругости усредняли не менее чем по 5 образцам. Разброс результатов при этом не превышал 12% [11...13].

Для испытания полимерных материалов на одноосное растяжение при низких температурах разработана соответствующая методика, а также сконструирована и

изготовлена криокамера с автоматическим насадочным клапаном, обеспечивающим постоянный температурный режим в рабочей камере. Принцип работы клапана заключается в замыкании электрических контактов вследствие изменения положения поплавка при падении уровня хладагента в криокамере и включении нагревателя, позволяющего перегонять жидкость из сосуда Дьюара в криокамеру. При достижении рабочего уровня контакты замыкаются и перегонка жидкого азота прекращается. В качестве хладагентов использованы твердая углекислота – «сухой лед» и жидкий азот, обеспечивающие получение в рабочей части камеры нужного температурного режима.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты исследований деформационно-прочностных свойств композиционных полимерных материалов.

Т а б л и ц а 1

Полимер	Разрывная прочность σ_r , МПа [11]			Модуль упругости E_p , МПа [12]			Разрывное удлинение ε_p , % [13]		
	Температура (К)								
	293	233	77	293	233	77	293	233	77
ПВХ	55,1	87,2	95,3	2900	3600	5100	14,7	4,5	2,0
ПВХ: Шелк (70:30) %	62,3	90,1	98,4	3200	4350	7200	7,8	3,5	1,1
ПП	36,1	42,3	49,2	900	1100	1400	1250	520	3,1
ПП: Шелк (70:30) %	52,3	59,1	61,3	1400	1520	1610	780	120	2,25
ПЭНП	12,2	23,6	84,5	14,5	132,4	198,1	560,	180,4	4,0
ПЭНП: Шелк (70:30) %	10,3	22	83,3	20,1	170,4	221,3	55,1	8,0	2,2

Результаты исследования полученных композиционных полимерных материалов при низких температурах показали, что разрывная прочность и модуль упругости композитов возрастают при охлаждении от комнатной температуры до криогенной и зависят от состава композиции. Деформационные свойства полимерных композиций на основе полиэтилена весьма чувствительны к низким температурам. Так, например, модуль упругости при $T=77^\circ\text{K}$ заметно повышается по сравнению с его значением при $T=293^\circ\text{K}$.

Для расширения представлений о механизме деформаций композиционных ма-

териалов важное значение имеет наблюдение за характером их разрушения при комнатных и низких температурах. При комнатной температуре из-за хорошей адгезионной связи между полимером и наполнителем, а также достаточной пластичности связующего обеспечивается равномерная передача усилий от компонента к компоненту, и композит ведет себя как монолитный материал. Деформация волокна и полимерной матрицы как единого целого продолжается почти до разрушения. Поэтому наблюдаемая на образце зона разрушения минимальна. Понижение температуры сопровождается ростом внутрен-

них напряжений, при этом прочность наполнителя и связующего возрастает. Следует отметить, что при низких температурах пластичность полимеров уменьшается. В данном случае связующее теряет прочность задолго до момента достижения разрушающего напряжения волокон. Под действием нагрузки и низкой температуры волокна рано освобождаются от растрескавшегося связующего, при этом вся рабочая часть образца превращается в зону разрушения.

ВЫВОДЫ

Исследование деформационно-прочностных свойств композиционных материалов, армированных волокнами, показало, что с понижением температуры от $T=293^{\circ}\text{K}$ до $T=77^{\circ}\text{K}$ увеличивается разрывная прочность и модуль упругости этих материалов с одновременным уменьшением относительного удлинения при разрыве.

Результаты, полученные в работе, рекомендованы для прогнозирования деформационных свойств материалов специального назначения при расчете конструкций из них, а также для оценки их качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодьян Л.А., Варламова И.А., Гиревая Х.Я. и др. Исследование композиционных материалов на основе вторичного полимерного сырья // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 2. С. 15...18.
2. Нутфуллаева Л.Н., Плеханов А.Ф., Шин И.Г. и др. Исследование условий формирования пакета и обеспечения прочности подушек из композитных нетканых волокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 2(380). С. 95...101.
3. Носков Д.В. Модификация вторичных полимеров // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2003. Т. 46. Вып. 1. С. 131...133.
4. Islamov B.Kh., Umarov A.V., Boymuratov F.T. Phase transition in hydrolyzed samples of natural silk // Texas Journal of Multidisciplinary Studies. USA. 2022. Vol. 12. P. 29...31.
5. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. СПб.: Профессия, 2010. 224 с.
6. Nutfullaeva L.N., Nutfullaeva S.N., Tashpulatov S.S. etc. Method of manufacturing working surfaces of ironing tables for wet-heat works of garments from composite materials // Journal of Physics: Conference

Series, 2022, 2388 (1), № 012010. – DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012010.

7. Islamov B.Kh., Mamaeva D.A., Vakhobov K.I. Solid phase dissolution fibroin of natural silk // The American Journal of Engineering and Technology USA. 2023. Vol. 05. Issue 01. P. 01...06.

8. Черунова И.В., Румянцев Е.В., Стефанова Е.Б. и др. Исследование микроструктуры волокнистых материалов для поликомпонентных функциональных утеплителей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. № 5(389). P. 39...45.

9. Islamov B.Kh., Tashpulatov S.Sh., Vakhobov K.I. Fibrous and dispersion-hardened composite materials // Technical science and innovation. 2023. №1 (09). P. 64...69.

10. Akhmetkhanov R.M., Kolesov S.V., Nagumanova E.I. etc. Stabilization of poly(vinyl chloride) by elemental sulfur // Journal of Applied Polymer Science, 2005. 99, 6, 2885-2887.

11. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1986.

12. ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Метод определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. М.: Изд-во стандартов, 2004. 8 с.

13. Тарасенко Л.В., Пахомова С.А., Унчигова М.В., Герасимов С.А. Материаловедение: учеб. пос. для вузов. М.: Инфра-М, 2012. 475 с. – ISBN 978-5-16-004868-0. – <http://znanium.com/bookread.php?book=257400>.

14. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Высшая школа, 1979.

15. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 573 с.

16. Tashpulatov S., Bakhriddinova D., Nutfullaeva S. etc. Examination of the influence of hydrothermal treatment of textile materials on their physical and mechanical properties and development of innovative technology // Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics, 2023, 54, P. 47...66.

17. Peterlin A. Fracture mechanism of drawn oriented crystalline polymere – J. Macromol. Sci., 1973, V 7, N 4, P. 705...725.

18. Шубина Н.И., Гиревая Х.Я. Композиционные материалы на основе вторичного полимерного сырья // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. Т. 1, № 71. С. 282...285.

19. Минченко Т.В. Основы химии и физики полимеров: учеб. пособие. Витебск: ВГТУ, 2005. 252 с.

REFERENCES

1. Bodyan L.A., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya. etc. Research of composite materials based on recycled polymer raw materials // Modern science-intensive technologies. 2015. No. 2. P. 15...18.
2. Nutfullaeva L.N., Plekhanov A.F., Shin I.G. etc. Research of conditions of formation package and ensure the safety of the pillows from composite nonwo-

ven fibers materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. 380 (5). P. 95...101.

3. *Noskov D.V.* Modification of secondary polymers // *Izv. universities Chemistry and chemical technology*. 2003. T. 46. Issue. 1. P. 131...133.

4. *Islamov B.Kh., Umarov A.V., Boymuratov F.T.* Phase transition in hydrolyzed samples of natural silk // *Texas Journal of Multidisciplinary Studies*. USA. 2022. Vol. 12, P. 29...31.

5. *Shevchenko A.A.* Physicochemistry and mechanics of composite materials. St. Petersburg: Profession, 2010. 224 p.

6. *Nutfullaeva L.N., Nutfullaeva S.N., Tashpulatov S.S. etc.* Method of manufacturing working surfaces of ironing tables for wet-heat works of garments from composite materials // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, 2388 (1), № 012010. – DOI: 10.1088/1742-6596/2388/1/012010.

7. *Islamov B.Kh., Mamaeva D.A., Vakhobov K.I.* Solid phase dissolution fibroin of natural silk // *The American Journal of Engineering and Technology USA*. 2023. Vol. 05, Issue 01. P. 01...06. (Journal Impact Factor, SJIF 2022= 6. 456).

8. *Cherunova I.V., Rumyantsev E.V., Stefanova E.B. etc.* Research of the microstructure of fibrous materials for poly-component functional insulators // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2020. 389 (5). P. 39...45.

9. *Islamov B.Kh., Tashpulatov S.Sh., Vakhobov K.I.* Fibrous and dispersion-hardened composite materials // *Technical science and innovation*. 2023. №1 (09). P. 64...69.

10. *Akhmetkhanov R.M., Kolesov S.V., Nagumanova E.I. etc.* Stabilization of poly(vinyl chlo-

ride) by elemental sulfur // *Journal of Applied Polymer Science*, 99, 6, 2885-2887 (2005).

11. GOST 11262-80. Plastics. Tensile test method. M.: Standards Publishing House, 1986.

12. GOST 9550-81. Plastics. Method for determining the modulus of elasticity in tension, compression and bending. M.: Standards Publishing House, 2004. 8 p.

13. *Tarasenko L.V., Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Gerasimov S.A.* Materials science: textbook for universities. Moscow: Infra-M, 2012. 475 p. – ISBN 978-5-16-004868-0. – <http://znanium.com/bookread.php?book=257400>.

14. *Gul V.E., Kuleznev V.N.* Structure and mechanical properties of polymers. M.: Higher School, 1979.

15. *Tager A.A.* Physico-chemistry of polymers. M.: Scientific world, 2007. 573 p.

16. *Tashpulatov S., Bakhridinova D., Nutfullaeva S. etc.* Examination of the influence of hydrothermal treatment of textile materials on their physical and mechanical properties and development of innovative technology // *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*, 2023, 54, P. 47...66.

17. *Peterlin A.* Fracture mechanism of drawn oriented crystalline polymere – *J. Macromol.Sci.*, 1973, B 7, N 4, P. 705...725.

18. *Shubina N.I., Girevaya H.Ya.* Composite materials based on recycled polymer raw materials // *Current problems of modern science, technology and education*. 2013. T. 1, No. 71. P. 282...285.

19. *Minchenko T.V.* Fundamentals of chemistry and physics of polymers: textbook. Vitebsk: VSTU, 2005. 252 p.

Рекомендована кафедрой дизайна костюма Ташкентского института текстильной и легкой промышленности. Поступила 25.09.23.