

ДАЛОВСКИЙ Кирилл Дмитриевич,
магистрант кафедры «Конструирование одежды и обуви»,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»,
e-mail: dalovskiykirill@gmail.com

ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ИНТЕРЕСАХ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. Актуальность исследования состава и структуры сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) обусловлена необходимостью получения прочных и легких композитов для самолето-, автомобиле-, судо-, машиностроения. Проблема состоит в невозможности достижения прочного соединения волокнистых материалов из СВМПЭ с полимерными пропитками для создания композитов, вследствие отсутствия химического взаимодействия между компонентами. Цель исследования – анализ и систематизация особенностей состава и структуры СВМПЭ затрудняющих получение композитов и поиск путей активации СВМПЭ.

Установлено, что состав СВМПЭ характеризуется отсутствием функциональных групп и активных центров, а наличие только повторяющихся связей ($-CH_2-$) не способствует формированию устойчивого химического взаимодействия с пропитками. Структура в виде плоского зигзага ввиду отсутствия боковых ответвлений позволяет макромолекулам СВМПЭ плотно укладываться между собой с взаимодействием посредством водородных и Ван-дер-Ваальсовых связей. Процедура получения волокнистых материалов из порошков СВМПЭ при многократном вытягивании-охлаждении волокна приводит к упаковке макромолекул в упорядоченные кристаллиты, что обеспечивает высокую прочность волокнистым материалам СВМПЭ.

Выявлено, что химическая модификация поверхности волокон из СВМПЭ, кроме высокой ресурсоемкости и низкой экологичности процессов, приводит к нарушению уникальной структуры материала и потере прочности. Приведены перспективы использования микроволновых, ультразвуковых плазменных и др. методов поверхностной активации для получения композитов на основе СВМПЭ. Научная новизна заключается в выявлении особенностей структуры и состава волокнистых материалов из СВМПЭ, ограничивающих их взаимодействие с полимерными пропитками и представлении способов активации СВМПЭ для создания композитов.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, структура, пропитка, композит, волокно, активация, кристаллит, прочность.

DALOVSKIY Kirill Dmitrievich,
Master's student, Department of Clothing and Footwear Design,
Kazan National Research University

CHARACTERISTICS OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF FIBROUS MATERIALS FROM ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE IN THE INTERESTS OF OBTAINING COMPOSITES

Annotation. The relevance of studying the composition and structure of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) stems from the need to produce strong and lightweight composites for aircraft, automobiles, marine, and mechanical engineering. The challenge lies in the impossibility of achieving a strong bond between UHMWPE fibrous materials and polymer impregnations to create composites, due to the lack of chemical interaction between the components. The purpose of this study is to analyze and systematize the compositional and structural features of UHMWPE that hinder composite production and to identify ways to activate UHMWPE.

It was established that UHMWPE lacks functional groups and active sites, and the presence of only repeating bonds (-CH₂-) does not facilitate the formation of stable chemical interactions with impregnations. The flat zigzag structure, due to the absence of side branches, allows UHMWPE macromolecules to tightly pack together, interacting through hydrogen and van der Waals bonds. The process of producing fibrous materials from UHMWPE powders through repeated fiber drawing and cooling results in the packing of macromolecules into ordered crystallites, which provides high strength to UHMWPE fibrous materials.

It has been found that chemical modification of the surface of UHMWPE fibers, in addition to being resource-intensive and unsustainable, disrupts the unique structure of the material and reduces strength. Potential applications of microwave, ultrasonic, plasma, and other surface activation methods for producing UHMWPE-based composites are discussed. The scientific novelty lies in identifying structural and compositional features of UHMWPE fibrous materials that limit their interaction with polymer impregnations and in presenting methods for activating UHMWPE for composite creation.

Key words: ultra-high molecular weight polyethylene, structure, impregnation, composite, fiber, activation, crystallite, strength.

Карбоцепные полимеры, в том числе сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), которые не имеют функциональных групп в составе материала, не могут в полной мере образовывать прочную связь с пропитками и полимерными матрицами при создании композитов за счет отсутствия реакционноспособных компонентов. В то же время композиты на основе карбоцепных полимеров, например волокнистых материалов (ВМ) из СВМПЭ обладают высокой прочностью в сочетании с эластичностью и могут быть использованы в качестве нагруженных и ударопрочных элементов в различных отраслях промышленности [1].

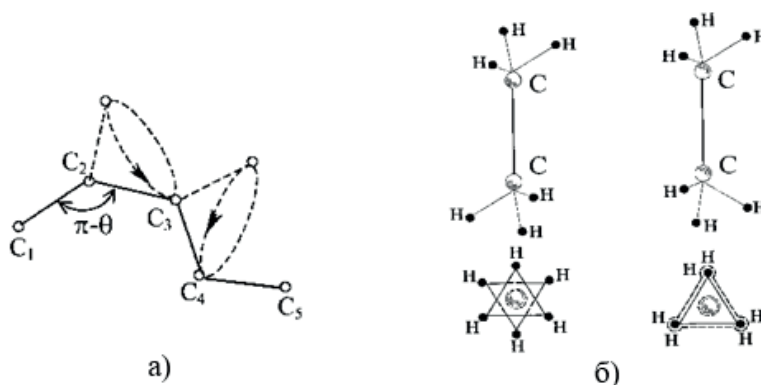
Следует определить ряд важных характеристик полимерной макромолекулы, которые влияют на свойства ВМ из СВМПЭ и могут подвергаться изменениям. Одна из таких характеристик это конфигурация, то есть строгое расположение атомов в молекуле, которое возможно изменить только с разрывом связей в макромолекуле. Изменения свойств СВМПЭ будут зависеть от конфигурации, например, цис- или транс-положения участков макромолекул в полимерах, а также от расположения цепи молекулы, её линейности или разветвленности [2].

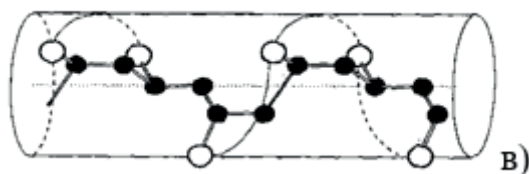
Кроме конфигурации важна конформация СВМПЭ, которая предопределяет движение ато-

мов в рамках одинарной связи под влиянием тепла или внешних воздействий. В отличие от конфигурации, смена конформации не предполагает разрыва химических связей. Кроме того, интерес представляют межмолекулярные связи, которые также влияют на возможные изменения в структуре полимера. Данные связи слабее химических и их силы снижаются при повышении расстояния между элементами молекулы. При этом таких связей достаточно много, так, что в сумме энергия данных связей по длине макромолекулы выше химической.

Среди данных сил межмолекулярного взаимодействия в СВМПЭ можно выделить как силы дальнего действия, которые также называют Ван-дер-Ваальсовы, а также силы, действующие на коротком расстоянии, обусловленные водородными связями. Если рассмотреть структуру полиэтилена, то в ней регистрируются изменения конформации, связанные с подвижностью молекул, вследствие чего формируются поворотные изомеры. При изучении дальнего порядка макромолекулы рассматриваемого полимера, установлено, что конформация в нем будет характеризоваться плоским зигзагом вследствие отсутствия боковых групп, в то время как, например, в полипропилене это будет спираль (рисунок 1) [3].

Рисунок 1. Разнообразие конформационного строения макромолекул гетероцепных полимеров (а, б - плоский зиг-заг в полиэтилене, в - спираль полипропилена).



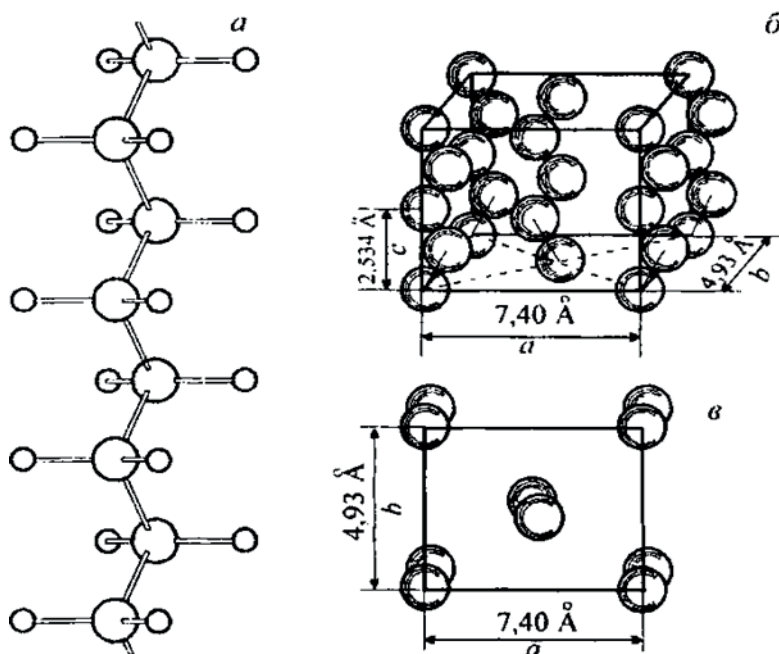


Если рассматривать надмолекулярную структуру полиэтилена, которая обусловлена различными вариантами упорядочения молекул, то можно выделить разнообразие таких структур в части геометрии и размеров: кристаллографическая ячейка – 1-10 Å, монокристаллы – 100-500 Å, полукристаллы – 1000 Å, поликристаллы – от мкм до мм. В части СВМПЭ можно отметить, что он является кристаллизующимся материалом, а степень его кристаллизации будет обусловлена ориентацией, например, в растворе СВМПЭ кристаллитов практически не наблюдается, а при вытяжке (при ориентации) волокна или пленок в нем формируются кристаллические ячейки с определёнными

углами и периодами решётки (рисунок 2) [4].

Например, в СВМПЭ в отсутствии гетероатомов и боковых групп регистрируется плотная упаковка молекул, в виде орторомбических кристаллов, которая формируется за счёт взаимодействия водородных атомов соседних молекулярных цепочек. В зависимости от наличия гетероатомов и боковых групп, структура будет меняться. Дополнительно следует подчеркнуть, что при модификации полимера результат воздействия также будет зависеть от ориентации молекул, как было сказано выше, способствующей кристаллизации и их повышенной упорядоченности вдоль направления вытяжки.

Рисунок 2. Конформация молекулярной цепи полиэтилена (их размещение в кристаллитах (слева) и плоскостная проекция решетки кристаллической ячейки (справа).



Кроме того, в полимерах с высокой молекулярной массой в ходе межмолекулярных взаимодействий образуются различные укрупненные образования, например, складчатые структуры в виде пачек, а также более сложные агрегаты в виде фибрилл. В ходе синтеза СВМПЭ пачечные и фибрилловые структуры являются образованиями, которые предшествуют и впоследствии способствуют формированию более развитых надмолекулярных форм в виде ламелей. Также важно отметить, что в процессе кристаллизации СВМПЭ, например, при ориентации в волокно или плёнку надмолекулярная структура может сохра-

няться в виде фибрилл или преобразовываться в такие ламелярные образования, как наборы пластин или сферолитов, которые, образуясь из фибрилл, развиваются из единого с ними центра с формированием сферической структуры. Данные сферические образования в свою очередь поддерживаются «проходными цепями», представляющими собой элементы макромолекул между рядом расположенными сферолитами [3].

Получают ВМ из СВМПЭ не из традиционного гранулированного сырья, которое впоследствии подвергается плавлению и формованию из расплава. ВМ являются волокном или тка-

нию, которые прошли процесс ориентации, способствующий кристаллизации, вследствие их многократной вытяжки-охлаждения из раствора порошкообразного сырья. В данном случае необходимо понимать, что к СВМПЭ волокну в ходе его получения уже прикладывается внешняя сила, которая из сферической укладки макромолекул преобразует их в более прямые упорядоченные структуры, которые способствуют протеканию кристаллизации.

В зависимости от степени вытяжки и последовательных процессов вытягивания-охлаждения будет формироваться различная степень аморфности или кристалличности. Важно учитывать, что при недостаточной ориентированности ВМ, формируется большое количество частей макромолекул, которые находятся в неупорядоченных аморфных областях с недостаточной ориентацией. Если же рассматривать образец волокна или ткани с высокой степенью вытяжки в процессе ориентации макромолекул в кристаллитах, где практически отсутствуют аморфные области, то тогда в качестве модельной ячейки, повторяющейся в СВМПЭ, можно рассматривать именно кристаллит. Он представляет собой кубическую структуру с известными расстояниями между атомами в цепи полимера, в отличие от аморфных областей, которые обладают большей подвижностью и неоднородностью структуры [5].

В процессах вытяжки-охлаждения фибриллы, имеющиеся в структуре расплава или раствора полимера, приобретают вытянутое строение с формированием монокристалла, который на первых этапах имеет множество дефектов, а далее приобретает более правильную структуру. Такие кристаллы формируются преимущественно в направлении вытяжки. Например, такое преобразование фибриллярной структуры в кристаллиты можно получить в ходе получения формирования СВМПЭ волокон из раствора полимера, в рамках одноэтапной ориентационной вытяжки за счет подбора нужных параметров технологического процесса. Это позволяет получать ориентированные СВМПЭ материалы с высокой стойкостью к разрывным нагрузкам (1,4 ГПа) и упругим деформациям (30 ГПа), что важно для создания высокопрочных ударостойких композитов [6].

Известно, что создание композитов из СВМПЭ материалов, которые сами по себе инертны и не связываются химически с функциональными группами полимерных пропиток, требует активации поверхности волокон или плёнок. Таким образом, в композите будут работать два важных параметра: исходная прочность самих волокнистых или пленочных материалов; сила адгезии между полиэтиленовым образцом и пропиткой, что требует подготовки материала для реализации одновременно и прочности волокна, и работы композита как единого целого [7].

Волокнистый композит – образец, состоящий из полимерной матрицы, армированной волокни-

стыми наполнителями для придания необходимого набора свойств. Варьируя количество и вид наполнителя возможно получение принципиально новых материалов, а изменение ориентации и размера волокон обеспечивает получение новых свойств. Как часть конструкции, ВК испытывает на себе высокие нагрузки. К таким материалам предъявляются повышенные требования износостойкости прочности. Композиты, в которых матрицей является полимерный материал, называют полимерными композиционными материалами. К ним относятся стеклопластики, углепластики, органические пластики, боропластики, текстолиты и другие [8].

Различные отрасли промышленности широко применяют композиты с повышенными прочностными характеристиками. Так, для использования деталей с высокой степенью ответственности в авиационной, самолетостроительной и автомобилестроительной используется высокопрочный углепластик. Кроме прочности, он обладает высокой хемостойкостью. Однако его применение обходится производителям недешево. К тому же, огромную роль в выборе высокопрочного композита играет вес материала. Здесь уместно говорить о применении композита, армированного волокнами из СВМПЭ, обладающего высокими удельными свойствами. Основными преимуществами пластика из СВМПЭ считают высокую хемостойкость, минимальный коэффициент трения и гигроскопичность, диэлектрические свойства, а также высокое шумопоглощение. Одной из важных характеристик композита из СВМПЭ является уникальное повышение прочности при эксплуатации в отрицательных температурах [9].

Согласно информации, представленной выше, свойства СВМПЭ материалов будут зависеть от конформации, конфигурации, надмолекулярной структуры и силы межмолекулярных связей. Основной проблемой остаётся инертность волокнистых материалов из СВМПЭ и их устойчивость к различным вариантам кислотно-щелочной активации, что препятствует их пропитке ПМ для получения высокопрочных композитов различного назначения [10]. Исходный химический состав СВМПЭ характеризуется отсутствием функциональных групп и недостаточной поверхностной энергией ВМ для надлежащего их сцепления с пропитывающими композициями.

Гидрофобность и устойчивость поверхности ВМ из СВМПЭ к химическим воздействиям предопределяет необходимость поиска новых реагентов, что обуславливает усложнение технологии и дороговизну разработки химических активаторов поверхности [11]. Соответственно, основной задачей активации поверхности СВМПЭ материалов для получения композитов будет изменение именно поверхностных свойств без ухудшения высоких характеристик волокна или пленки в объеме образца.

Вследствие этого, достаточное число исследова-

дований направлено на применение физических способов модификации ВМ из СВМПЭ ультразвуковыми, микротоковыми, плазменными и другими облучающими воздействиями [12]. В таком случае реализация задачи активации поверхности СВМПЭ для получения высокопрочных композитов зачастую сопровождается негативным влиянием воздействий на исходные уникальные свойства полимера, в частности на удельную прочность вследствие деструкции материалов как на поверхности, так и в объеме. Известно, что обработка холодной плазмой является методом, который позволяет регулировать свойства поверхности, сохраняя высокие прочностные свойства для их реализации в композитах на основе СВМПЭ [6; 7].

Таким образом, анализ и систематизация научных изысканий по вопросу состава и строения

ВМ из СВМПЭ в интересах создания композитов на их основе позволили выявить, что отсутствие активных групп в полимере для взаимодействия с пропитками усложняет получение композитов, работающих как монолитный материал. При этом многоступенчатая ориентация СВМПЭ в ходе получения ВМ приводит к формированию волокон с высоким уровнем кристалличности, что придает им высокую прочность в сочетании с легкостью и обуславливает перспективность реализации данных характеристик в композите. Сложность и ресурсоемкость процессов химической активации СВМПЭ обеспечивает интерес к дальнейшим исследованиям по электрофизической поверхностной активации ВМ для взаимодействия с пропитками и реализации свойств СВМПЭ в композитах.

Список литературы:

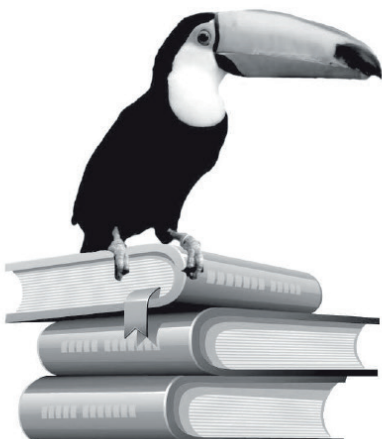
- [1] Сергеева Е.А., Хубатхузин А.А., Даловский К.Д. Износостойкий материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Современные наукоемкие технологии*. – 2025. – № 5. – С. 74-79.
- [2] Кочнев А.М., Заикин А.Е., Галибеев С.С., Архиреев В.П. *Физикохимия полимеров*. – Казань: Изд-во «Фэн», 2003. – 512 с.
- [3] Николаев А.Ф. *Межмолекулярные взаимодействия в полимерах*. – Л.: Изд-во ЛТИ., 1986. – 53 с.
- [4] Николаев А.Ф., Крыжановский В.К., Бурлов В.В. и др. *Технология полимерных материалов*. – СПб.: Профессия, 2008. – 544 с.
- [5] Геллер Б.Э., Геллер А.А., Чиртулов В.Г. *Практическое руководство по физикохимии волоконобразующих полимеров*. – М.: Химия, 1996. – 432 с.
- [6] Сергеева Е.А. *Регулирование свойств синтетических волокон, нитей, тканей и композиционных материалов на их основе с помощью неравновесной низкотемпературной плазмы: дис. ... д-р. техн. наук*. – Казань, 2010. – 432 с.
- [7] Тимошина Ю.А. *Научно-технологические основы создания функциональных синтетических текстильных материалов с защитными свойствами с применением плазмы высокочастотного разряда пониженного давления: дис. ... д-р. техн. наук*. – Казань, 2022. – С. 518.
- [8] Сергеева Е.А., Тихонова Н.В., Даловский К.Д., Гимадеев А.Р. Быстровозводимые модульные конструкции на основе высокопрочных легких композитов // *Перспективы науки*. – 2024. – № 6(177). – С. 138-140.
- [9] Liu J., Li Ch., Yang Y., Wang W., Guo F., Jing K., Wang L. Ultra-high molecular weight polyethylene: From synthesis to applications // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2025. – Vol. 1042. – P. 123870.
- [10] Mohammed A.J., Mohammed A.S., Mohammed A.S. Prediction of Tribological Properties of UHMWPE/SiC Polymer Composites Using Machine Learning Techniques // *Polymers*. – 2023. – № 15 (20). – P. 4057.
- [11] Васильев А.П., Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Дьяконов А.А., Оконешникова А.В., Макаров И.С. Износостойкость композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с комбинированным наполнением // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2023. – Т. 89. – № 8. – С. 76–82.
- [12] Abdul Samad M. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review // *Polymers*. – 2021. – № 13 (4). – P. 608.

References:

- [1] Sergeeva E.A., Khubatkhusin A.A., Dalovsky K.D. Wear-resistant material based on ultra-high molecular weight polyethylene // *Modern science-intensive technologies*. - 2025. - No. 5. - P. 74-79.
- [2] Kochnev A.M., Zaikin A.E., Galibeev S.S., Arkhireev V.P. *Physicochemistry of polymers*. - Kazan: Feng Publishing House, 2003. - 512 p.
- [3] Nikolaev A.F. *Intermolecular interactions in polymers*. - Leningrad: LTI Publishing House, 1986. - 53 p.
- [4] Nikolaev A.F., Kryzhanovsky V.K., Burlov V.V. et al. *Technology of polymeric materials*. – St. Petersburg: Profession, 2008. – 544 p.

- [5] Geller B.E., Geller A.A., Chirtulov V.G. *Practical Guide to the Physicochemistry of Fiber-Forming Polymers*. – Moscow: Chemistry, 1996. – 432 p.
- [6] Sergeeva E.A. *Regulation of Properties of Synthetic Fibers, Threads, Fabrics, and Composite Materials Based on Them Using Nonequilibrium Low-Temperature Plasma: Diss. ... Doctor of Engineering Sciences*. – Kazan, 2010. – 432 p.
- [7] Timoshina Yu.A. *Scientific and Technological Foundations of Creating Functional Synthetic Textile Materials with Protective Properties Using Low-Pressure High-Frequency Discharge Plasma: Diss. ... Doctor of Engineering Sciences*. – Kazan, 2022. – P. 518.
- [8] Sergeeva E.A., Tikhonova N.V., Dalovskiy K.D., Gimadeev A.R. *Rapidly erected modular structures based on high-strength lightweight composites* // *Perspectives of Science*. – 2024. – No. 6(177). – P. 138-140.
- [9] Liu J., Li Ch., Yang Y., Wang W., Guo F., Jing K., Wang L. *Ultra-high molecular weight polyethylene: From synthesis to applications* // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2025. – Vol. 1042. – P. 123870.
- [10] Mohammed A.J., Mohammed A.S., Mohammed A.S. *Prediction of Tribological Properties of UHMWPE/SiC Polymer Composites Using Machine Learning Techniques* // *Polymers*. – 2023. – No. 15 (20). – P. 4057.
- [11] Vasiliev A.P., Danilova S.N., Okhlopko A.A., Dyakonov A.A., Okoneshnikova A.V., Makarov I.S. *Wear Resistance of Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene with Combined Filling* // *Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*. – 2023. – Vol. 89. – No. 8. – P. 76–82.
- [12] Abdul Samad M. *Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE Nanocomposite/UHMWPE Hybrid Nanocomposite Polymer Coatings for Tribological Applications: A Comprehensive Review* // *Polymers*. – 2021. – No. 13 (4). – P. 608.





Юридическое издательство
«ЮРКОМПАНИ»

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, E-Library.

ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru