

УДК 678.8

*М.И. Валужева¹, А.С. Колобков¹, С.С. Малаховский¹***СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН:
РЫНОК, СВОЙСТВА, НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57

Представлены обзор научно-технической информации в области сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), сведения о зарубежных и российских производителях СВМПЭ, формах выпуска, данные по ассортименту и свойствам волокон и тканей из СВМПЭ различных производителей, обзор областей применения, проводимых исследований и перспектив развития работ по указанному направлению. Приводятся данные по активно развивающемуся рынку СВМПЭ-продукции, выпускаемой китайскими производителями, а также по российским разработкам в области СВМПЭ.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), волокна, армирующий наполнитель, полимерные композиционные материалы.

*M.I. Valueva¹, A.S. Kolobkov¹, S.S. Malakhovskiy¹***ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE:
MARKET, PROPERTIES, DIRECTIONS OF APPLICATION (review)**

The article provides an overview of scientific and technical information in the field of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), information on foreign and Russian manufacturers of UHMWPE, release forms, data on the assortment and properties of fibers and fabrics from UHMWPE of various manufacturers, an overview of applications, ongoing research and prospects development of work in this area. Including data is provided on the rapidly developing market of UHMWPE products manufactured by Chinese manufacturers, as well as on Russian developments in the field of UHMWPE.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), fibers, reinforcing filler, polymer composite materials.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие современных направлений материаловедения связано с разработкой и применением перспективных материалов на основе различных исходных компонентов, с привлечением широкого спектра ресурсов и технологий, применяемых методов исследований, проведением модифицирования компонентов с целью получения материалов с улучшенными свойствами или приобретения ими новых функциональных качеств, позволяющих расширить области их применения [1–8].

Перспективным материалом с широким спектром функциональных свойств, применяемым в настоящее время во многих отраслях промышленности для решения различных задач, является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, англ. Ultra-high molecular weight polyethylene – UHMWPE), который относится к термопластичным полимерам [9].

Достоинства СВМПЭ заключаются в сочетании высокой износостойкости, устойчивости к агрессивным средам, низкого коэффициента трения, высокой ударной вязкости, низкой температуры хрупкости, что позволяет применять изделия на его основе в том числе в экстремальных условиях эксплуатации (температура хрупкости материала – до $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$) [10]. Ограничивающими факторами применения СВМПЭ являются невысокая температура плавления ($135\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$), в связи с чем верхний предел температуры эксплуатации материала составляет $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также высокая вязкость расплава полимера, что затрудняет процесс его переработки [11, 12].

Несмотря на то что существуют компании, традиционно занимающиеся выпуском СВМПЭ высокого качества для применения в различных областях, объем производства и количество производителей данного материала, так же как и перечень решаемых исследовательских задач, продолжают расширяться. В частности, обращает на себя внимание динамика развития китайских компаний, активно участвующих в международных выставках и представляющих на рынке СВМПЭ-продукцию (рис. 1).

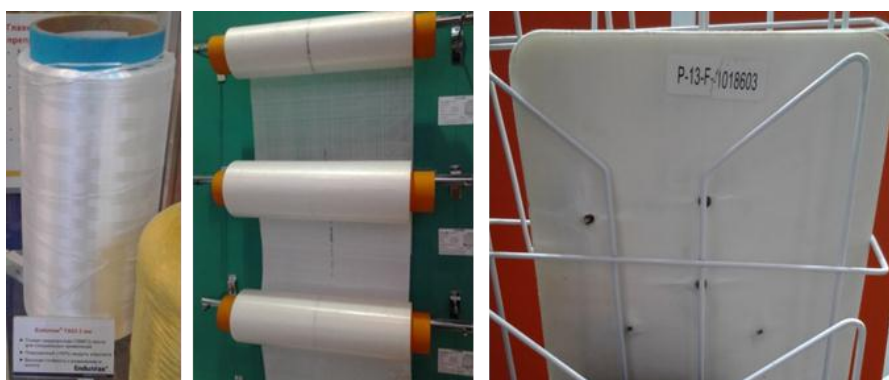


Рис. 1. Текстильные формы сверхвысокомолекулярного полиэтилена (лента, ткань) и бронезащитное изделие на их основе на Международной выставке «Интерполитех» (г. Москва)

В связи со сложившейся ситуацией возникла необходимость в проведении анализа данных научно-технической литературы, технической информации, представленной на сайтах компаний-производителей СВМПЭ, а также результатов проводимых в этой области исследований.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Основные направления применения СВМПЭ

Материалы на основе СВМПЭ широко используются в аэрокосмической и судостроительной отраслях благодаря таким характеристикам, как малая плотность, хорошие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства, высокое сопротивление усталости, износо- и топливостойкость, устойчивость к обледенению, гидрофобность, способность рассеивать электростатический заряд, низкое трение, химическая стойкость и ударопрочность.

В аэрокосмической сфере СВМПЭ используется в дизайне интерьеров (столы для подносов, окна, подлокотники), наружных конструкциях, силовой установке, в конструкции крыла и системе посадки, в качестве материала защиты от космического излучения [13, 14]. В работе [15] показана возможность применения СВМПЭ в сочетании с резиной для изготовления мягких топливных баков вертолетов. Композиты на основе волокон СВМПЭ в настоящее время в обязательном порядке применяются

в кабинах гражданских самолетов в США и Европе, а также в составе пуленепробиваемых элементов конструкций военных кораблей и самолетов [14].

В связи с высокой ударостойкостью СВМПЭ используется в составе средств бронезащиты (бронезилетов, противоударных пластин, шлемов, различных видов техники) [16–18]. Материалы на основе СВМПЭ применяются для облицовки бункеров, кузовов самосвалов, вагонов и конструкций в горнорудной промышленности; в деталях и элементах конструкций, подверженных ударной нагрузке или истиранию, в машиностроении, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности (катки, зубчатые передачи, опорные втулки, направляющие); в сепараторах для автомобильных аккумуляторов; для изготовления скользящих поверхностей спортивного инвентаря (лыжи, сноуборды); в фильтрах для работы в агрессивных средах в пищевой и химической промышленности; в тонкослойных антикоррозионных покрытиях металлических контейнеров и изделий; в морозостойких композиционных материалах для уплотнительных резинотехнических изделий [19]. В таких странах, как США, Канада, Япония, прогнозируется рост спроса на СВМПЭ для фармацевтического применения [16]. В работе [20] показана возможность использования полимерных композиционных материалов на основе волокон СВМПЭ для создания радиопрозрачных диэлектрических покрытий.

Мировые разработки новых СВМПЭ-материалов направлены на создание бронезащитных систем нового поколения – для защиты не только сотрудников, но и различных наземных транспортных средств, морских платформ и воздушных судов, используемых при выполнении опасных заданий. При этом сложная геометрическая форма наземной техники, воздушных и водных судов может конструкционно затруднять интеграцию в нее бронезащиты и приводить к необходимости увеличения количества швов и соединений. Так, компанией Teijin Aramid (Нидерланды) разработан материал Epi-dumax[®] Shield XF33, который может быть получен при низком давлении формования (что позволяет оптимизировать раскрой материала и уменьшить количество стыков) и при этом обладает высоким уровнем баллистических свойств, сохраняя защитные свойства после воздействия повышенной температуры и влажности [21]. Проводятся также многочисленные исследования, направленные на повышение адгезии СВМПЭ-волокна к полимерной матрице – посредством модифицирования как связующих [22], так и волокон СВМПЭ – например, с применением плазменной активации [23]. Для установления возможности повышения упруго-прочностных характеристик СВМПЭ-волокон проводятся комплексные исследования «структура–свойство» на всех стадиях технологического процесса гель-формования волокон [24].

Основные мировые производители СВМПЭ

Впервые СВМПЭ был синтезирован в промышленности фирмой Ruhrchemie AG (Германия) в 1950–1960-х гг. [25].

В настоящее время основными производителями СВМПЭ в мире являются фирмы Dyneema[®] SK (DSM, первое место в мире по объему производства [26]), Teijin Aramid и LyondellBasell Industries N.V. (Нидерланды), Celanese Corporation, Honeywell International Inc. и E. I. du Pont de Nemours and Company (США), Asahi Kasei Corporation, Mitsui Chemicals и Toyobo Co, Ltd (Япония), Braskem S.A. (Бразилия), Quadrant Engineering Plastic Products AG (Швейцария), Rochling Engineering Plastics SE & Co KG (Германия) [13, 21]. Данные компании располагают филиалами во многих странах мира и сосредоточены на увеличении предложения и расширении ассортимента СВМПЭ-продукции для удовлетворения растущего спроса со стороны отраслей конечного использования в Азиатско-Тихоокеанском и Североамериканском регионах [13].

Так, фирма DSM заключила соглашение с Toyobo Co, Ltd о расширении производства СВМПЭ-волокна в Японии, предусматривающее проведение капитального

ремонта и модернизации совместного производства [13]. Фирмой Ticona (Германия) в 2009 г. в Китае организован завод по производству СВМПЭ-порошка до 20 тыс. тонн в год [27]. Компанией Braskem в процессе расширения производства приобретено оборудование для проведения исследований с применением микроскопии и реологических методов анализа, определения термических и физических характеристик. В новом производственном плане компании Celanese Corporation в 2016 г. общая мощность производства увеличена до 30 тыс. тонн в год, а также организовано производство новых марок СВМПЭ для фармацевтического применения [28, 29] – фильтрации, очистки жидких лекарственных форм и механических устройств, используемых для контакта и доставки лекарств. В 2014 г. фирма Celanese Corporation инвестировала средства в технологический и коммерческий центр в Мексике для усиления своего присутствия в Латинской Америке [16]. С учетом производственных баз компании, расположенных в Германии, США, Китае, ее производственные мощности в 2018 г. составили около 108 тыс. тонн в год [26].

В 2018 г. лидерами рынка (более 75% общей доли рынка) являлись компании Braskem (45 тыс. тонн в год [30]), Celanese Corporation и Lyondell Basell [16].

Активно наращивают производственные мощности и представляют свою продукцию на международных выставках китайские производители. В 2018 г. суммарная производственная мощность таких компаний, как Henan Wosen Ultra-high Chemical Industry Science and Technology Co, Ltd; Shanghai Lianle Chemical Industry Science and Technology Co, Ltd; Anhui Tejiain Fine Chemicals Co, Ltd; Jiujiang Zhongke Xinxing New Materials Co, Ltd; Sinopec Qilu Petrochemical Corp. and Nanjing Jinling Plastic Chemical Co, Ltd, а также китайского филиала компании Celanese составила 90 тыс. тонн в год. Компаниями Jiujiang Zhongke Xinxing New Materials Co, Ltd и Hubei Yuhong Advanced Material Technology Co планируется выход на производственные мощности соответственно до 60 и 8 тыс. тонн в год [26].

Переработка СВМПЭ может осуществляться методами спекания, прессования, гель-формования, рэм-экструзии, электростатического и горячепламенного напыления на поверхности изделия [19]. Формами выпуска СВМПЭ являются: порошок, листы, волокна, ткани.

Объем мирового рынка и спрос на СВМПЭ в 2016 г. составили соответственно 221 и 200 тыс. тонн, в 2018 г. – 240 и 250 тыс. тонн (рис. 2) [26]. Объем мирового рынка СВМПЭ в 2018 г. оценивался в 1,6 млрд долларов [16]. Прогнозируется, что к 2021 г. рынок СВМПЭ достигнет 2,16 млрд долларов со среднегодовым темпом роста в 9,9% в период с 2016 по 2021 г. [13]. С учетом роста потребностей в специальных материалах в таких областях, как медицина, автомобилестроение, потребительские товары, в 2025 г. прогнозируется мощность производства СВМПЭ до 600–650 тыс. тонн [26].

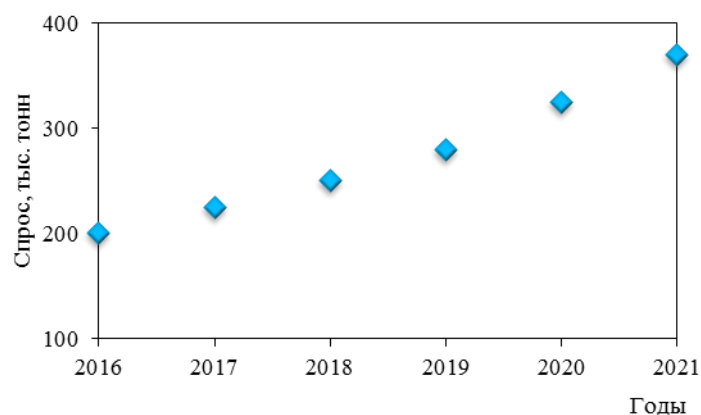


Рис. 2. Динамика спроса на сверхвысокомолекулярный полиэтилен на мировом рынке (2016–2021 гг.) [30]

Мировой спрос на волокно СВМПЭ, являющееся стратегическим и высокотехнологичным материалом, достигает ~70 тыс. тонн при производительности 30 тыс. тонн, к 2025 г. ожидается рост спроса до 200 тыс. тонн. На китайском рынке разрыв между спросом и предложением также остается большим: ежегодная потребность составляет ~30 тыс. тонн волокна СВМПЭ при мощности производства <10 тыс. тонн в год [26].

Наиболее известными в Европе являются СВМПЭ-волокна фирмы DSM (Нидерланды). Волокна имеют диаметр 12–21 мкм, производятся в трех категориях прочности и различных категориях линейной плотности (см. таблицу).

Свойства СВМПЭ-волокон фирмы DSM (Нидерланды) [31]

Свойства	Значения свойств для СВМПЭ-волокна марки			Сохранение свойств, %, СВМПЭ-волокна при воздействии температуры, °С		
	SK25	SK60, SK62, SK65	SK75, SK78	-60	+60	+100
Линейная плотность волокна, текс	750	110–1320	55–2640	–	–	–
Прочность при разрыве, МПа	2200	2400–3300	3300–3900	110	80	55
Модуль упругости, ГПа	52	65–100	109–132	110	85	60
Относительное удлинение при разрыве, %	3–4			90	100	105

Помимо Нидерландов, компания DSM располагает филиалами в США, Бразилии, Сингапуре. Фирма Celanese Corporation выпускает СВМПЭ под торговой маркой GUR® [32], фирма Braskem – UPEC® [33], фирма Lyondell Basell – Lupolen UHM 5000 [34].

Значительный интерес вызывают китайские компании, представляющие в настоящее время свою продукцию на российском рынке. Компания Beijing protech new material science Co, Ltd (Китай) [35] на основе СВМПЭ-ткани с поверхностной плотностью 50–300 г/м² выпускает мягкие защитные композиционные материалы, используемые в основном в легкой пуленепробиваемой броне, пуленепробиваемой и проколостойкой одежде, бронезащите в строительной сфере, бомбоубежищах. Ткани с поверхностной плотностью 115–130 г/м² используются для получения твердых баллистических материалов – пуленепробиваемых жилетов, шлемов, щитов, легкой жесткой брони, бронированных транспортных средств, противовзрывных ограждений [35]. Компания Jiangsu dongrun safety technicology Co, Ltd (Китай) производит СВМПЭ-ткани с поверхностной плотностью 80–160 г/м² для мягкой брони и 130 г/м² – для жесткой брони [36]. На выставке «Интерполитех» также были представлены СВМПЭ-изделия производства китайской компании Jiangxi Great Wall Protection Equipment Industry Co, Ltd [37].

Компания Sinty Sci-Tech Co, Ltd (Sinty Fiber) (КНР), выпускающая СВМПЭ-волокна (марок ХТ) и ткани на их основе (марок STUD) с поверхностной плотностью 75, 130 и 160 г/м² [38], сотрудничает с производителями высокотехнологичного оборудования в Италии и Нидерландах, а также работает с Университетом Донхуа, Шаньдунским научно-политехническим университетом и другими вузами для проведения отраслевых исследований и постоянного совершенствования продукции в соответствии с требованиями клиентов.

В России СВМПЭ в виде тканей (от 100 м²) и волокон (от 1–2 кг) с плотностью 0,97 г/см³ реализуют такие китайские компании, как Jiaxing ACG Composites Co, Ltd; Beijing Landingji Engineering Tech Co, Ltd; Zhejiang Qianxilong Special Fibre Co, Ltd; Dongyang Sanli Fishing Tackle Factory; Shanghai Saint Armor Safety Protection Technology Co, Ltd; Yizheng Huaheng Material Co, Ltd; Shantou Mingda Textile Co, Ltd; Kati Special

Fiber (Shanghai) Co, Ltd; Hunan Zhongtai Special Equipment Co, Ltd. Стоимость текстильных форм СВМПЭ составляет в среднем от 20 долларов за 1 кг волокон или за 1 м² ткани [39].

Производство СВМПЭ в России

В 1998 г. при подготовке к запуску опытно-промышленной установки по производству СВМПЭ ООО «Томскнефтехим» были разработаны первые технические условия (ТУ) с нормированными показателями для одной марки СВМПЭ. В 2006 г. после отработки технологии выпущены ТУ на несколько марок СВМПЭ, классифицируемых по величине молекулярной массы – от $\leq 1,0 \cdot 10^6$ до $\geq 7,1 \cdot 10^6$ кг/кмоль [19].

В 2008 г. объем российского рынка СВМПЭ с учетом импорта составлял 500–550 т [19]. В 2013 г. потребность России в СВМПЭ оценивалась в 1000 тонн в год [40].

В Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН разработан отечественный аналог импортных титано-магниевого катализаторов для производства СВМПЭ – ИКТ-8-20, позволяющий получать конечный продукт с требуемым значением молекулярной массы с размером частиц от 50 до 200 мкм [19, 41], а в г. Новосибирске создано опытное производство катализатора [42].

В настоящее время экспериментальные производства волокон СВМПЭ в Российской Федерации реализуются ГК «Полинит» (лабораторная установка по производству волокна из СВМПЭ по технологии гель-прядения максимальной мощностью 9 тонн в год); волокнообразующий полимер получен в кооперации с ПАО «Казаньоргсинтез», ООО «Томскнефтехим», ПАО «СИБУР Холдинг», Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН; производство опытно-промышленных партий комплексных нитей осуществляется в Дмитровском филиале НПО «Спецтехника и связь» МВД России; АО «ВНИИСВ» (г. Тверь) – опытная линия [42, 43].

Установка по производству СВМПЭ-волокна (используется твердофазная технология формования) производительностью 20 кг за смену принадлежит ООО «Формопласт» (г. Санкт-Петербург): монопить СВМПЭ может быть получена диаметром от 10 мкм до 3 мм, величина диаметра комплексной нити может составлять 10–500 мкм [44].

Проводится также разработка методов модифицирования СВМПЭ, например, путем введения керамических нанодисперсных порошков (Институт химии и химической технологии СО РАН; Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН), опытное производство модифицированного СВМПЭ организовано на базе ООО «Томскнефтехим» (производительность – до 200 тонн в год) [19]. Предлагается использовать материал для защиты летательных объектов (спутников) от космического мусора, изготовления фильтров для работы в агрессивных средах, в производстве средств бронезащиты, для модификации резин с целью повышения стойкости к истиранию и снижения температуры хрупкости. В Казанском научно-исследовательском технологическом университете проведена работа по 3D-проектированию установки по производству СВМПЭ, при создании которой возможно ожидать получения СВМПЭ-порошка с высокой молекулярной массой, оптимальной насыпной плотностью, хорошим выходом готового продукта [40].

В настоящее время из СВМПЭ российского производства изготавливают фильтры для пищевой и химической промышленности, сепарационные пластины для аккумулятора, направляющие ролики для эскалаторов метро, листы с резиновым подслоем для футеровки ударостойкой облицовкой горно-шахтного оборудования, высокопрочные волокна и жгуты [42].

Заключения

СВМПЭ обладает широким спектром функциональных свойств и сегодня является перспективным материалом для применения в аэрокосмической области, строительстве, машиностроении, медицинских изделиях, бронезащитных материалах, спортивной индустрии. Лидерами мирового рынка СВМПЭ-продукции являются крупные компании из Нидерландов, США, Японии, Бразилии, Германии, которые располагают филиалами во многих странах мира, ориентированы на увеличение предложения и расширения ассортимента СВМПЭ-продукции для удовлетворения растущего спроса. При этом отмечается также динамичное развитие, активность и наращивание объемов производства китайскими производителями.

В России имеется несколько опытных установок для получения СВМПЭ-продукции (организации-разработчики и производители указаны выше в настоящем обзоре) с применением различных технологий; разработан состав катализатора; ведутся работы по модифицированию состава, расширению ассортимента и улучшению качественных характеристик материалов, совершенствованию технологии производства.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
5. Ткачук А.И., Терехов И.В., Гуревич Я.М., Григорьева К.Н. Исследования влияния природы модифицирующих добавок на реологические и термомеханические характеристики фотополимерной композиции на основе эпоксивинилэфирной смолы // Авиационные материалы и технологии. 2019. №3 (56). С. 31–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-31-40.
6. Ерасов В.С. Визуализация процессов испытания и экспериментальных данных в 3D-пространстве // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 22–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-22-28.
7. Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Михайлова Н.А. Цифровое оптическое изображение и его зависимость от радиационного изображения при неразрушающем контроле методом цифровой рентгенографии // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 37–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-37-42.
8. Кривушина А.А., Бобырева Т.В., Яковенко Т.В., Николаев Е.В. Методы хранения микроорганизмов-деструкторов в коллекции ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. №3 (56). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-89-94.
9. Валуева М.И. Современные материалы и технологии для получения бронезащитных изделий // Вопросы материаловедения. 2017. №2. С. 197–207.
10. Валуева М.И., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №6. С. 23–29.
11. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. 2003. №3. С. 18–21.
12. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 2) // Полимерные материалы. 2003. №4. С. 24–27.

13. Ultra-high molecular weight polyethylene market (UHMWPE) by form (sheets, rods & tubes), end-use industry (aerospace, defense, & shipping, healthcare & medical, mechanical equipment), region – global forecast to 2021 // MarketsandMarkets Research Private, Ltd. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-market-257883188.html> (дата обращения: 11.11.2019).
14. Gautam Y.R., Singh S., Verma M.K. Application of UHMWPE fiber based composite material // ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/327221940> (дата обращения: 11.11.2019).
15. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Способы получения композитов и изделий на основе ткани из СВМПЭ и резины для производства топливных баков // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №5. С. 101–105.
16. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) market size, share & trends analysis report by product (medical grade & prosthetics, fibers, sheet,r), by application, and segment sorecasts, 2019–2025 // Grand View Research, Inc. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-market> (дата обращения: 11.11.2019).
17. Ianucci L., Pope D.J., Dalzell M. A constitutive model for DYNEEMA UD composites // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/286130335_A_constitutive_model_for_dyneema_UD_composites (дата обращения: 11.11.2019).
18. Marissen R., Duurkoop D., Hoefnagels H., Bergsma O.K. Creep forming of high strength polyethylene fiber prepregs for the production of ballistic protection helmets // Composites Science and Technology. 2010. №70. P. 1184–1188.
19. Галибеев С.С., Хайруллин Р.З., Архиреев В.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета. 2008. №2. С. 50–55.
20. Адашкевич С.В., Бакаев А.Г., Жигулин Д.В., Маркевич М.И., Стельмах В.Ф., Чапланов А.М., Щербакова Е.Н. Свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2016» (Минск, 23–25 нояб. 2016 г.). Минск: БНТУ, 2016. С. 246–247.
21. Продукция // Teijin Aramid B.V. URL: <http://www.tejinaramid.com/ru> (дата обращения: 11.11.2019).
22. Беляева Е.А., Косолапов А.Ф., Осипчик В.С. и др. Влияние модификаторов различной химической природы на эксплуатационные свойства эпоксиаминных связующих для композитов на основе волокон из СВМПЭ // Пластические массы. 2019. №7–8. С. 57–61.
23. Сергеева Е.А., Ибатуллина А.Р., Брысаев А.С. Прочностные характеристики композиционных материалов на основе плазмоактивированных сверхвысокомолекулярных полиэтиленовых волокон // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №18. С. 133–135.
24. Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Голикова А.Ю., Галицын В.П. Структурные перестройки при гель-формовании высокопрочных полимерных волокон // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. №6. С. 994–999.
25. OXEA Werk Ruhrchemie // OXEA GmbH. URL: <http://www.ruhrchemie.de/ueberblick/geschichte.html> (дата обращения: 11.11.2019).
26. Global and China ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) industry. Report, 2019–2025 // MarketResearch.com. URL: <https://www.marketresearch.com/Research-in-China-v3266/Global-China-Ultra-High-Molecular-12403936> (дата обращения: 11.11.2019).
27. Селютин Г.Е., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н., Захаров В.А., Никитин В.Е., Полубояров В.А. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. №18. С. 375–388.
28. Kurtz S.M. Ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement: UHMWPE handbook. Elsevier Academic Press, 2004. 379 p.
29. Вишнякова Е.А., Селютин Г.Е., Гаврилов Ю.Ю. и др. Получение композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, обладающих бактерицидными свойствами // Journal of Siberian Federal University. Chemistry 4. 2013. No. 6. P. 372–379.

30. Global and China ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) industry. Report, 2017–2021 // ResearchInChina.com. URL: <http://www.researchinchina.com/htmls/report/2017/10432.html> (дата обращения: 11.11.2019).
31. Высокопрочное, высокомодульное полиэтиленовое волокно Дунеема® // DSMbrand. URL: http://download.unitextrussia.ru/DSM_Dyneema_factsheet_UHMWPE-RUS.pdf (дата обращения: 11.11.2019).
32. Abrasion and impact resistance with excellent mechanical properties // Celanese Corporation. URL: <https://celanese.com/engineered-materials/products/gur-uhmw-pe.aspx> (дата обращения: 11.11.2019).
33. BraskemUTEC. URL: <https://www.braskem.com.br/utec> (дата обращения: 11.11.2019).
34. Lupolen UHM 5000 // LyondellBasell Industries Holdings B.V. URL: <https://www.lyondellbasell.com/en/polymers/p/Lupolen-UHM-5000/c452d062-5073-4b19-ad79-383bf90a7e90> (дата обращения: 11.11.2019).
35. Продукция и поддержка // Beijing protech new material science Co., Ltd. URL: <http://www.chn-protech.com> (дата обращения: 11.11.2019).
36. Products // Jiangsu Dongrun Safety Technology Co., Ltd. URL: <http://www.dongrun-safety.com> (дата обращения: 11.11.2019).
37. Products // Jiangxi Great Wall Protection Equipment Industry Co., Ltd. URL: <http://www.chinaccgk.com> (дата обращения: 11.11.2019).
38. Sinty UHMWPE fiber // Sinty Sci-Tech Co., Ltd. URL: <http://www.sintyfiber.com> (дата обращения: 11.11.2019).
39. China UHMWPE fiber // Alibaba.com. URL: <https://www.alibaba.com/countrysearch/CN/uhmwpe-fiber.html> (дата обращения: 11.11.2019).
40. Матвеева Н.В., Мусин Р.Р. 3D-проектирование установки производства сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №10. С. 146–147.
41. Ашпина О. Сверхвысокомолекулярный проект // The Chemical Journal. 2006. Сент. С. 30–33.
42. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – материал для экстремальных условий эксплуатации // Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. URL: http://catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1487 (дата обращения: 11.11.2019).
43. Полинит Текстиль // Группа компаний «Полинит». URL: <http://polinit-textile.ru/pdf/spravka.pdf> (дата обращения: 11.11.2019).
44. Волокна СВМПЭ и изделия из них // Формопласт. URL: <http://www.formoplast-spb.ru/volokna-svmp> (дата обращения: 11.11.2019).