

УДК 677.499

М.С. Дориомедов¹

РЫНОК АРАМИДНОГО ВОЛОКНА: ВИДЫ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-48-59

Рассмотрен мировой и российский рынок арамидного волокна. Представлены данные ориентировочного объема производства арамидных волокон в целом и с разбивкой по видам: пара-арамид и мета-арамид. Приведены основные торговые названия арамидных волокон, производственные мощности, ключевые производители арамидов в мире и России, данные по свойствам некоторых торговых марок арамидных волокон, а также ориентировочные процентные доли различных областей их применения в мировом и российском потреблении.

Ключевые слова: арамидные волокна, пара-арамид, мета-арамид, свойства арамидов, объемы производства, производственные мощности.

M.S. Doriomedov¹

ARAMID FIBER MARKET: TYPES, PROPERTIES, APPLICATION

The article is devoted to the consideration of the world and Russian market of aramid fiber. Provides information about the approximate production of aramid fibers in general and by types: para- and meta-aramid. The main trade names of aramid fibers, production facilities, main aramid producers in the world and in Russia, information about the properties of some brands of aramid fiber and indicative percentages of various fields of application in the global and Russian consumption of aramid fibers are given.

Keywords: aramid fibers, para-aramid, meta-aramid, properties of aramids, production volumes, production capacity.

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

Синтетические волокна, содержащие от 85% амидных связей (непосредственно связанных с двумя ароматическими кольцами) и формируемые из полиамидных соединений ($-\text{CO}-\text{NH}-$), относятся к арамидным [1–3]. Арамидные волокна принадлежат классу ароматических полиамидных волокон. Волокна такого происхождения отличаются высокими термической и химической стабильностью, прочностью и модулем упругости. Большинство ароматических полиамидов не плавятся при температуре $>350\text{ }^\circ\text{C}$ и демонстрируют высокую химическую стойкость и низкую воспламеняемость. Эти свойства возникают из-за высокой жесткости цепи, обусловленной ароматическим характером основной цепи полимера. Однако жесткость основной цепи полимера также является причиной нерастворимости арамидов, что ограничивает их применение.

Упоминания об ароматических полиамидах впервые появились в научной литературе в середине XX в., когда компания DuPont (США) опубликовала данные о ряде полимерных композиций [4]. Полимеры были получены реакцией ароматических диаминов (например, полиамидобензимидазол, м-фенилендиамин, п-фенилендиамин, 3,4-оксидианилин) с дихлоридами ароматических двухосновных кислот (например, изофталоилхлорид, терефталоилхлорид, диангидрид пиромеллитовой кислоты) в амидном растворителе [2, 5]. В настоящее время ароматические полиамиды в растворе

получают двумя способами: реакцией между хлорангидами двухосновных кислот и диаминами при низких температурах; прямой конденсацией ароматических двухосновных кислот с диаминами при высоких температурах. В обоих случаях используются апротонные растворители, такие как гексаметилфосфорамид (ГМФТА), N-метил-2-пирролидон (НМП), N,N-диметилформамид (ДМФА), N,N-диметил-ацетамид (ДМА), диметилсульфоксид (ДМСО) и др. Ключевые параметры реакции полимеризации включают безводные условия и высокую чистоту растворителей и мономеров, стехиометрию мономера, интенсивность перемешивания, концентрацию мономера и температуру. Кроме того, для увеличения растворимости за счет уменьшения прочности межцепочечных водородных связей во время процедуры синтеза в реакцию могут быть добавлены соли LiCl и/или CaCl₂ [2].

Массовое использование арамидов в технических устройствах и конструкциях является общемировой тенденцией, обусловленной высокой прочностью и надежностью данных материалов. Композиты на их основе широко применяются в воздушных судах (являются самыми легкими композитами), и объем их потребления растет с каждым годом. Разработка арамидных материалов – одна из важнейших задач материаловедения на период до 2030 г. [6, 7].

Общие сведения по арамидным волокнам

Виды арамидов

Арамидные волокна бывают двух видов: пара-арамида и мета-арамида. Пара- и мета-арамидные волокна получают из полимеров, которые по своей химической структуре относятся к классу ароматических полиамидов. Однако отличие их заключается в том, что амидные группы по отношению к бензольному кольцу (в молекулярной цепи полимера) находятся либо в мета-положении (м-арамида), например гополимер – поли-м-фениленизофталамид (ПФИА), сополимер – полиамидимид (ПАИ, производится волокно Kermel®) [8], либо в пара-положении (п-арамида), например гополимер – поли-п-фенилентерефталамид (ПФТА), сополимеры – сополи-п-фенилен-3,4-дифениловый эфир терефталамида (ОДА/ПФТА, производится волокно Technoga®), сополиамидо-бензимидазолы (СПАБИ) различной структуры [1] (на их основе производятся пара-арамидные волокна российского производства – СВМ, Руслан, Русар, Армос). Вследствие отличия химической и надмолекулярной структур полимерной цепи (рис. 1) различаются и их свойства.

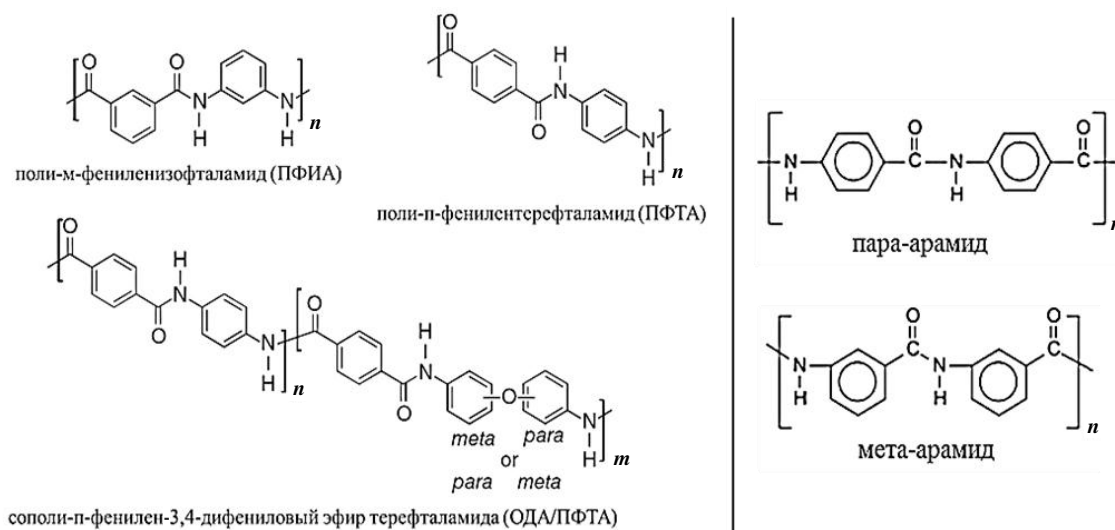


Рис. 1. Химическая формула ароматических полиамидных полимеров [2, 3]

Свойства арамидов от типа волокнообразующего полимера

Пара- и мета-арамиды обладают высокими термическими свойствами (табл. 1) благодаря высокой энергии диссоциации связей С–С и С–N, которые приводят к температурам разложения, превышающим 400 и 500 °С. Из-за водородной связи и высокой жесткости цепи, обусловленной ароматическим характером основной цепи полимера, температуры стеклования могут принимать значения до 270–275 °С для мета-арамидного и 295 °С для пара-арамидного волокна. Низкая воспламеняемость арамидов, которая измеряется кислородным индексом, для мета-арамидных волокон составляет от 30 до 32% с потерей массы при температуре 450 °С и с долгосрочной рабочей температурой от 204 до 250 °С. Кислородный индекс для пара-арамидных волокон составляет от 28 до 40% с выходом полукокса при температуре >450 °С. Пара-арамиды наряду со стойкостью к высоким температурам также обладают высокими механическими свойствами: предел прочности – до 6000 МПа, модуль упругости – до 180 ГПа, что в 6–8 раз больше, чем у мета-арамидов.

Вследствие хороших характеристик мета-арамиды применяются для изготовления защитной одежды, нетканых материалов, рукавов фильтрации горячих газов на промышленных предприятиях; пара-арамиды – для изготовления средств индивидуальной бронезащиты, кабельных изделий, огнезащитной одежды, а также в качестве армирующих наполнителей высокопрочных полимерных композиционных материалов (ПКМ).

Таблица 1

Физические, механические и термические свойства арамидных волокон [2, 9]

Свойства	Полимер				
	мета-арамид		пара-арамид		
	ПФИА	ПАИ	ПФТА	ОДА/ПФТА	СПАБИ
Физические:					
плотность, г/см ³	1,37–1,38	1,34	1,44	1,39	1,44–1,45
поглощение воды при RH 65%, %	5,0–5,2	4,0	3,5–4,5	4,0	<4,0
Механические:					
предел прочности, МПа	590–860	550–650	2700–3800	3300–3500	3800–6000
модуль упругости, ГПа	7,9–12,1	3,6–5,2	70–112	72	110–180
удлинение при разрыве, %	20–45	18–19	2,4–3,6	4,6	2,4–4,4
кислородный индекс, %	28–38	30–32	28–45	25–40	28–45
Термические:					
температура стеклования, °С	270–275	280	–	–	–
температура плавления, °С	365–400	–	>500	>500	>500
температура разложения в N ₂ , °С	400–430	400–430	520–540	500	–
температура разложения в O ₂ , °С	420	400	430–480	–	–

Мировой рынок арамидных волокон

По данным международных консалтинговых компаний, наблюдается непрерывный рост мирового рынка арамидного волокна. По разным оценкам, его объем, включающий производство/применение как пара-арамидных (Kevlar, Twaron, Technora, Руслан, Русар и др.), так и мета-арамидных волокон (Nomex, Newstar, Teijinconex и др.), находится в диапазоне ~(96–120) тыс. тонн в год и ~(3,0–3,5) млрд долл. (рис. 2). Доля пара-арамидных волокон составляет ~(63–65)% и 60–78 тыс. тонн, доля мета-арамидных волокон: ~(35–37)% и 36–42 тыс. тонн. Совокупный среднегодовой прирост прогнозируется в диапазоне 3,5–7,5%. Это свидетельствует о том, что до 2024 г. объем рынка должен быть обеспечен на уровне ~5 млрд долл. и ~(130–145) тыс. тонн в год [10–13].

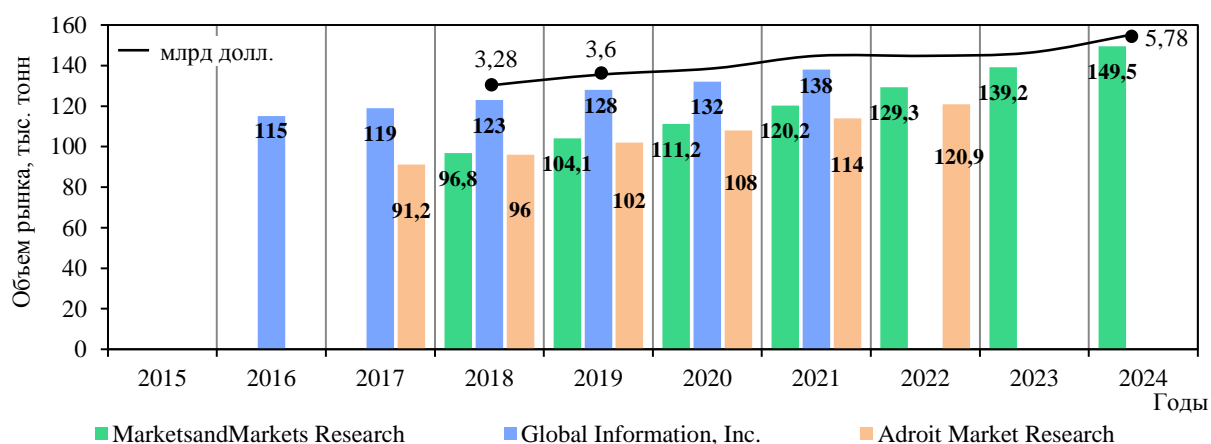


Рис. 2. Мировой рынок арамидного волокна

Основные производители арамидных волокон приведены в табл. 2, ориентировочные производственные мощности производителей арамидов – в табл. 3.

Таблица 2

Производители арамидных волокон и их торговые названия

Производитель	Страна	Пара-арамид	Мета-арамид
Yantai Tayho Advanced Materials Co, Ltd	Китай	Tararan®	Newstar®
X-FIPER New Material Co, Ltd	Китай	–	X-Fiper®
China Bluestar Chengrand Co, Ltd	Китай	Staramid F-218*	–
Suzhou Zhaoda Specially Fiber Technical Co, Ltd	Китай	Aramid 1414	–
Hyosung Advanced Materials (Hyosung Corp.)	Южная Корея	Alkex®	–
Kolon Industries Inc.	Южная Корея	Heraclon®	–
Huvis Co	Южная Корея	–	MetaOne®
Taekwang Industrial Co, Ltd	Южная Корея	Aramid	–
DuPont	США	Kevlar®	Nomex®
DuPont-Toray Co, Ltd. (Toray Industries Inc.)	Япония	Kevlar®	(Arawin®)
Kermel	Франция	–	Kermel®
Teijin Aramid B.V.	Нидерланды	Technora® Twaron®	Teijinconex®
АО «Каменскволокно»	Россия	Руслан®, Артек®, AuTx®	–
ООО НПП «Термотекс»	Россия	Русар®, Русар-С®, Русар-SX®, Русар-НТ®	–
ООО «Лирсот»	Россия	Армос®	–

* Без ® – торгового названия нет.

Россия является одной из стран мира, которая наряду с США, Южной Кореей, Японией, Китаем владеет технологиями производства термостойких пара-арамидных волокон. При этом их химический состав и принятая в России технология производства обеспечивают более высокие свойства пара-арамидных волокон, чем у зарубежных аналогов. Производство мета-арамидных волокон в России отсутствует, а их ежегодные закупки достаточно высоки: более 200 тонн в год [14]. По различным экспертным данным, объем импорта может достигать 500–800 тонн. Следует отметить, что мета-арамидное волокно под маркой Фенилон производилось в СССР (разработчик –

«ВНИИСВ», г. Тверь) в г. Кустанай (Казахстан). Однако в 1996 г. завод был полностью остановлен, а оборудование продано китайской компании, которая выпускает волокно под маркой Newstar®.

Таблица 3

Мировые производственные мощности производителей арамидных волокон [2, 7–8, 15–20]

Тип волокна	Коммерческое название	Мощность производства, тонн в год	Формование	Производитель
Пара-арамид	Tararan®	1000	Сухо-мокрое	Yantai Tayho
	Staramid F-218	1000	Мокрое	China Bluestar Chengrand
	Aramid 1414	1000	Мокрое	Suzhou Zhaoda Specially
	Alkex®	5000	Сухо-мокрое	Hyosung Advanced Materials
	Heraclon®	5500	Сухо-мокрое	Kolon Industries Inc.
	Aramid	1000	–	Taekwang Industrial Co
	Kevlar®	32000	Сухо-мокрое	DuPont
	Kevlar®	2500	Сухо-мокрое	DuPont-Toray Co
	Technora®	2000	Мокрое	Teijin Aramid B.V.
	Twaron®	9500*	Сухо-мокрое	Teijin Aramid B.V.
	Руслан®	~300	Мокрое	АО «Каменскволокно»
	Русар®	~40	Сухо-мокрое	ООО НПП «Термотекс»
	Армос®	~10	Сухо-мокрое	ООО «Лирсот»
	Всего	~60850 и более		
Мета-арамид	Newstar®	7000	Мокрое	Yantai Tayho
	X-Fiper®	500–1000	–	X-FIPER New Material
	MetaOne®	1500	Мокрое	Huvis Corp.
	Nomex®	18000	Сухое	DuPont
	Tejinconex®	3500	Мокрое	Teijin Aramid B.V.
	Kermel®	2000	–	Kermel
	Arawin®	2500	Сухое	Toray Industries Inc.
	Всего	~35500 и более		

* Мощности производства Twaron® могут достигать 23000 тонн в год (по источнику [21]).

На рис. 3 представлены доля производителей арамидного волокна на мировом рынке и региональное распределение его производства, а на рис. 4 и 5 – распределение производства арамидного волокна по отдельным видам.

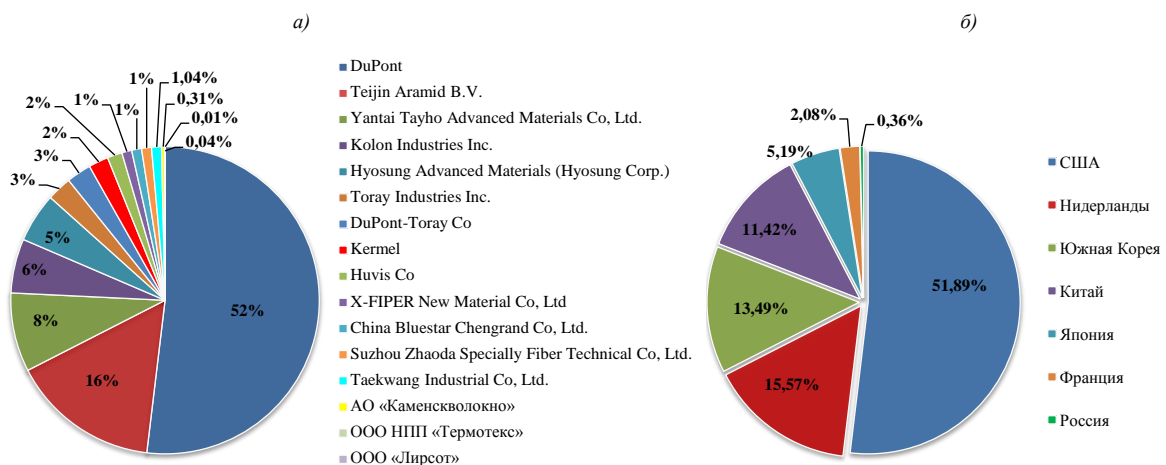


Рис. 3. Доля производителей арамидного волокна на мировом рынке (а) и региональное распределение его производства (б)

Анализ производственных мощностей производителей арамидов позволяет сделать следующий вывод. От 87 до 90% мирового рынка арамидного волокна (включает DuPont-Toray Co) занимают пять крупных производителей: DuPont (США), Teijin Aramid B.V. (Нидерланды; входит в состав Teijin Ltd (Япония)), Kolon Industries Inc. и Hyosung Co (Южная Корея), а также Yantai Tayho Advanced Materials Co (Китай). Компании DuPont и Teijin Aramid B.V. доминируют на рынке арамидов, занимая 68–70% рынка. Кроме того, DuPont, Teijin Aramid B.V. и Yantai Tayho Advanced Materials Co производят пара- и мета-арамидные волокна (табл. 2 и 3).

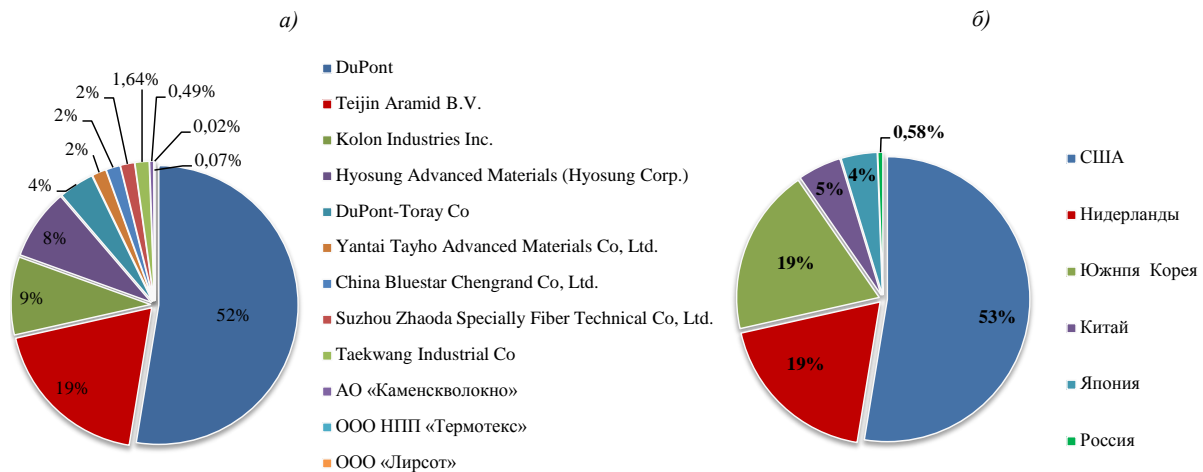


Рис. 4. Доля производителей пара-арамидного волокна на мировом рынке (а) и региональное распределение его производства (б)

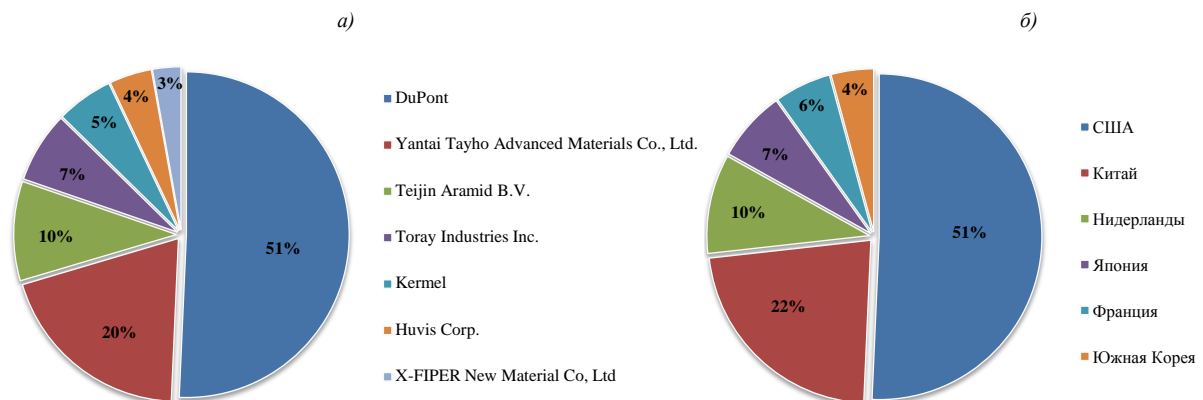


Рис. 5. Доля производителей мета-арамидного волокна на мировом рынке (а) и региональное распределение его производства (б)

Как видно, одним из крупнейших производителей пара-арамидного и мета-арамидного волокон являются США, занимающие 51–53% мирового рынка соответственно. Китай – крупный производитель мета-арамидного волокна (22% рынка), но его доля на рынке пара-арамидного волокна пока незначительна – всего 5%. Мета-арамидное волокно в Китае в основном применяется для изготовления высокотемпературных фильтрующих материалов, средств защиты, изоляционной бумаги и т. д., среди которых фильтрующие материалы составляют более 50% от общего спроса на мета-арамидные волокна. Нидерланды с объемом 11,5 тыс. тонн в год занимают 19% на рынке пара-арамидного и 10%, или 3,5 тыс. тонн в год, на рынке мета-арамидного волокон.

**Механические свойства известных торговых марок
арамидного волокна**

Вследствие отличия химической и надмолекулярной структур полимерной цепи пара- и мета-арамидов различаются и их свойства. Сравнительная характеристика арамидных волокон различных торговых марок представлена в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Свойства пара-арамидных волокон различных торговых марок

Торговая марка волокна	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Температура разложения в O ₂ , °C	Влагопоглощение, %
Tararan 629 [22]	1,44	3300	96	3,4	–	–
Staramid F-218	1,44	1270–3050	45–70	2,5–4,2	505	–
Alkex AF 1000	1,44	2669–3177	70–102	2,8–4,2	500	4,5
Alkex AF 2000	1,44	3178–3686	80–101	3,5–3,7	–	–
Heraclon HF100	1,44	3240–3440	85–113	2,9–3,9	–	–
Heraclon HF200	1,44	2930–3050	83–109	2,8–3,6	500	–
Heraclon HF300	1,44	2740–2930	84–118	2,5–3,4	–	–
Kevlar 29 [23, 24]	1,44	2920–3620	70,3	3,6	–	3,5–4,5
Kevlar 49 [23, 24]	1,45	3000–3620	112	2,4	–	3,5
Kevlar 129 [25]	1,45	3400	99	3,3	500	–
Kevlar 149 [23, 24]	1,47	3450	179	1,5–2,0	500	–
Technora [26]	1,39	3200–3500	65–85	3,9–4,5	500	1,9
Twaron [26]	1,44–1,45	2700–3600	60–145	2,3–4,2	500	2–7
Руслан [9]	1,44–1,45	4500–5200	110–180	2,4–4,4	>500	<4,0
Русар [9]	1,44–1,45	5000–6000	140–180	2,4–4,4	>500	
Армос [9]	1,44–1,45	3600–4000	110–140	2,4–4,4	>500	

Таблица 5

Свойства мета-арамидных волокон различных торговых марок

Торговая марка волокна	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Температура разложения в O ₂ , °C	Влагопоглощение, %
Newstar	1,37–1,38	–	–	15–30	400–420	4,0–5,0
X-Fiber	1,37–1,38	–	–	25–60	400	–
MetaOne	1,38	–	–	34	–	4,0–4,5
Nomex 430 [25]	1,38	595–630	10–12	30–31	>400	4,5
Nomex 450 [25]	1,37	349–370	–	22		
Nomex 455/462 [25]	–	310–330	–	21		
Nomex N301 [25]	–	340	–	19		
Teijinconex [26]	1,38	510–860	7,9–13	28–45	–	5,0–5,5
Kermel [27]	1,34	550–650	3,6–5,2	18–19	>380	4,0
Arawin	1,38	–	–	40–50	>400	5,0–6,0
Фенилон	1,37–1,38	–	–	15–30	400–420	4,0–5,0

Как видно из данных, приведенных в табл. 4 и 5, величины предела прочности и модуля упругости пара-арамидных волокон в несколько раз выше, чем у мета-арамидных. Наибольшие значения механических свойств наблюдаются у пара-арамидов российского производства – максимальные значения модуля упругости (180 ГПа) и предела прочности (6000 МПа). Аналогичная ситуация и для такого показателя, как относительное удлинение при разрыве, который характеризует увеличение длины нити под действием усилия: для мета-арамидов он составляет ~15–30%, для пара-арамидов – не более 4,5%.

В целом арамидные волокна каждого вида обладают наряду с отличными, применительно к данным условиям, также и отрицательными свойствами. Однако сочетание в изделии разных видов волокон позволяет взаимно компенсировать свойства

и получать нить с оптимальными для данного назначения характеристиками. Путем сочетания разнородных волокон возможно изменение не только физических и механических свойств изделий, но также и их стоимости.

Методы производства арамидных волокон

В зарубежной практике в промышленном масштабе реализованы три метода получения арамидных волокон – сухое, мокрое и сухо-мокрое формование из раствора полимера. Рассмотрим зарубежную технологию получения арамидных волокон Kevlar и Twaron методом сухо-мокрого формования.

Процесс производства волокон начинается с получения соответствующего полимера как товарного продукта реакцией ароматического диамина (ПФТА; основная составляющая – мономер-А) с ароматической двухосновной кислотой (терефталойлхлоридом; кислотная составляющая – мономер-Б) в среде апротонного растворителя (диметалацатамида) и с добавлением хлорида лития. Мономеры вступают в реакцию (с выделением в раствор побочного вещества – хлористого водорода HCl) и образуют полимер в виде геля, который с помощью дополнительных методов обработки превращается в порошковый полимер. Синтезированный полимер растворяют в концентрированной серной кислоте при температуре 80 °С [28], и при достижении концентрации полимера 18–20% он переходит в жидкокристаллическое анизотропное состояние. Нагретый до 80 °С жидкокристаллический раствор экструдируют через фильеру, где практически сформированное волокно перед тем как попасть в осадительную ванну проходит через воздушный зазор (2–20 мм). Волокно экструдируется в воздухе и затем попадает в осадительную ванну, оказывающую значительное влияние на скорость диффузии растворителя и нерастворителя и, следовательно, на морфологию поверхности волокна, его внутреннюю структуру и физические свойства [29].

При сухом формовании полимерная смесь выходит из фильеры, обдувается потоком горячего газа (N₂, CO₂, воздухом или их смесью), тем самым обеспечивая испарение растворителя, и образует волокно. При мокром формовании полимерная смесь выходит из фильеры в осадительную ванну, содержащую низкомолекулярные вещества, совместимые с растворителем, но не растворяющие полимер. Температура ванны может варьироваться от 2 до 90 °С. В осадительной ванне полимер, осаждаясь, образует волокно [2, 29].

Производство отечественных арамидных волокон осуществляется без растворения полимера в концентрированной серной кислоте [30–33].

Применение арамидных волокон

Арамидные волокна обладают уникальными свойствами, поэтому применяются в различных отраслях: оборонной, авиакосмической, атомной, нефтегазовой промышленности, металлургии, автомобилестроении, в сфере телекоммуникаций, при производстве средств индивидуальной защиты и резинотехнических изделий (рис. 6).

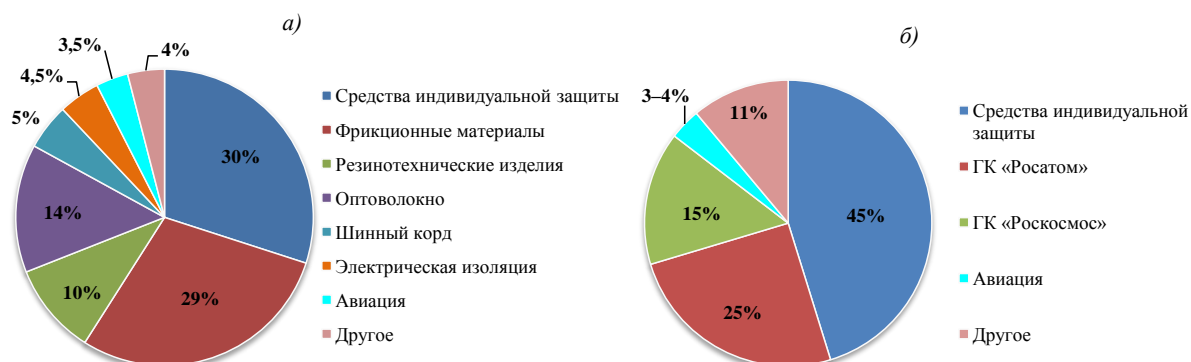


Рис. 6. Доли различных отраслей в потреблении арамидного волокна в мире (а) и России (б) [2, 7]

Из сравнения диаграмм, представленных на рис. 6, следует, что мировыми сегментами применения арамидных волокон являются восемь областей, в то время как Российская Федерация представлена пятью укрупненными группами. Отсутствие в открытых источниках информации об использовании в России арамидных волокон в аналогичных мировым областях может быть связано с неразвитостью соответствующих направлений в нашей стране.

Основным сегментом мирового и российского рынков арамидного волокна с точки зрения объема являются средства индивидуальной защиты: 30% – в мире, 45% – в России. Благодаря высокой прочности, термостойкости, устойчивости к истиранию арамиды используются для изготовления защитной одежды, бронежилетов, касок и брони для транспортных средств. Сходство в доле применения арамидных волокон наблюдается и в авиации: 3,5% – в мире, 3–4% – в России.

Следует отметить, что авиация – один из важнейших секторов экономики, где арамидные волокна являются стратегическим материалом. Органопластики, армированные арамидным волокном, широко применяются в конструкциях самолетов и вертолетов, – самые легкие композиционные материалы (они также играют важную роль для снижения массы, расхода топлива воздушного судна и т. п.). Во ФГУП «ВИАМ» на основе российских арамидных волокон СВМ, Руслан, Русар НТ разработаны конструкционные органопластики (Органит 11ТЛ, Органит 12Т(М)-Рус, ВКО-19, ВКО-24 и др.), которые используются для изготовления конструктивных элементов самолетов и вертолетов. Для перегородки кабины экипажа самолета Sukhoi Superjet 100 и других защитных элементов конструкций разработаны ударо-, баллистически стойкие органопластики ВКО-2ТБ, ВКО-20, обеспечивающие защиту от пуль легкого ручного оружия, осколков взрывных устройств и механизмов при возникновении нештатной ситуации. Примеры применения конструкционных органопластиков в российской авиационной технике приведены в работах [7, 34–41].

Фрикционные материалы являются вторым крупным мировым сегментом применения арамидных волокон (29% рынка). Высокий спрос поддерживается потребностью в легких транспортных средствах для сокращения расхода топлива и выбросов CO₂. Резинотехнические изделия, армированные арамидным волокном (шланги, канаты, резиновый компенсатор), занимают ~10% рынка. Рынок оптоволокна является самым быстрорастущим (14%) из-за высокой потребности в надежных оптических кабелях для подключения к телекоммуникационным сетям. Основное отличие российского рынка арамидных волокон заключается в доле их использования в государственных корпорациях «Росатом» и «Роскосмос».

Заключения

Актуальность дальнейшего совершенствования характеристик и технологий получения арамидных волокон не вызывает сомнения, так как сфера и объем их применения будут расти с каждым годом. Одна из ключевых задач в этой области – снижение затрат на производство конечной продукции, поскольку требует значительных вложений в технологии, оборудование и поставки сырья. Для России важными задачами в среднесрочной перспективе являются увеличение объемов производства параарамидного волокна и снижение его стоимости, а также создание собственного производства метаарамидного волокна ввиду его значительного импорта. Импорт метаарамидной продукции определяет зависимость России от зарубежных поставщиков и влияние внешнеполитического фактора может быть значительным.

Благодарность

Автор выражает признательность сотруднику ФГУП «ВИАМ» Г.Ф. Железиной за предложения при подготовке статьи.

Библиографический список

1. Сергеева Е.А., Костина К.Д. Анализ ассортимента арамидных волокон и их свойства // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. №14. С. 124–125.
2. Trigo-López M., García J.M., Ruiz J.A.R. et al. Encyclopedia of Polymer Science and Technology. 4th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2018. P. 1–51. DOI: 10.1002/0471440264.pst249.pub2.
3. Ertekin M. Arabic fibers // Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites. Elsevier, 2017. P. 153–167. DOI: 10.1016/b978-0-08-101871-2.00007-2.
4. Mulder K.F. A battle of giants: the multiplicity of industrial R&D that produced high-strength aramid fibers // Technology in Society. 1999. Vol. 21 (1). P. 37–61. DOI: 10.1016/s0160-791x(98)00036-0.
5. Fink J.K. Aramids // High Performance Polymers. 2th edition. Elsevier, 2014. P. 301–320. DOI: 10.1016/b978-0-323-31222-6.00013-3.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Дориомедов М.С., Железина Г.Ф. Российский рынок арамидного наполнителя // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №3–4 (27). Ст. 09. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 01.09.2020).
8. Yang H.M. Arabic Fibers // Comprehensive Composite Materials. Elsevier, 2000. P. 199–229. DOI: 10.1016/B0-08-042993-9/00044-9.
9. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Дориомедов М.С. Арамидные органопластики, состояние и перспективы // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2017. С. 79–91.
10. Aramid Fiber Market by Type (Para-Aramid Fiber, Meta-Aramid Fiber), Application (Security & Protection, Frictional Materials, Industrial Filtration, Optical Fibers, Rubber Reinforcement, Tire Reinforcement), Region – Global Forecast to 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/aramid-fibers-market-112849061.html> (дата обращения: 10.02.2020).
11. Global and China Aramid Fiber Industry Report, 2017–2021. URL: <https://www.giiresearch.com/report/rinc320244-global-china-aramid-fiber-industry-report.html> (дата обращения: 10.02.2020).
12. Global Aramid Fibers Market Size 2017 Product (Meta-aramid, Para-aramid, Others), Application (Aerospace, Frictional Materials, Security & Protection, Electrical Insulation, Tire Reinforcement, Optical Fiber, Rubber Reinforcement, and Others), By Region and Forecast 2018 to 2025. URL: <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/aramid-fibers-market> (дата обращения: 02.09.2020).
13. Global and China Aramid Fiber Industry Report, 2014–2017. URL: <http://www.prnewswire.com/news-releases/global-and-china-aramid-fiber-industry-report-2014-2017-300018091.html> (дата обращения: 10.02.2020).
14. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №6–7 (89). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
15. History, Awards and Certificates. Kolon Industries, Inc. URL: http://kolonindustries.com/Eng/Product/product02_06.asp (дата обращения: 10.09.2020).
16. Профиль компании Techtextil 2019 – Yantai Tayho Advanced Materials Co, Ltd. URL: <https://techtextil.messefrankfurt.com/frankfurt/en/exhibitor-search.detail.html/yantai-tayho-advanced-materials-coltd.html> (дата обращения: 10.09.2020).

17. Company Profile Taekwang Industrial Co, Ltd. URL: <http://www.taekwang.co.kr/en/about/introduction.asp> (дата обращения: 10.09.2020).
18. Product brochure: Hyosung Corp. URL: http://www.hyosung.com/downloads/brochure/2018_Brochure_en.pdf (дата обращения: 10.09.2020).
19. Aramid (Bluestar) – ARAMID F-2. About China Bluestar Chengrand Co, Ltd. URL: <http://paraaramid.com/news/html/?394.html> (дата обращения: 10.09.2020).
20. Global Aramid Fibers Market Size 2017 Product (Meta-aramid, Para-aramid, Others), Application (Aerospace, Frictional Materials, Security & Protection, Electrical Insulation, Tire Reinforcement, Optical Fiber, Rubber Reinforcement, and Others), By Region and Forecast 2018 to 2025. URL: <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/aramid-fibers-market> (дата обращения: 10.09.2020).
21. Tagawa K. Super fibers. Stronger than steel, lighter than aluminum // *Industrial Fabric Products Review*. 2007. October. P. 32–36. URL: <http://www.matrixyarns.com/pdf/Super-Fibers.pdf> (дата обращения: 31.08.2020).
22. Li Y., Li Ch., Zheng J. et al. Effects of water on the ballistic performance of para-aramid fabrics: three different projectiles // *Textile Research Journal*. 2015. Vol. 86 (13). P. 1372–1384. DOI: 10.1177/0040517515612355.
23. Puttegowda M., Rangappa S.M., Jawaid M. et al. Potential of natural/synthetic hybrid composites for aerospace applications. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. Elsevier, 2018. P. 315–351. DOI: 10.1016/b978-0-08-102131-6.00021-9.
24. Gowayed Y. Types of fiber and fiber arrangement in fiber-reinforced polymer (FRP) composites // *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) composites for Civil Engineering*. Woodhead Publishing, 2013. P. 3–17. DOI: 10.1533/9780857098955.1.3.
25. DuPont™ Nomex® 455 (NOMEX III) Aramid Staple Fiber // MatWeb: material property data. URL: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=920f9c539b394c2cbdce6ee3d1c257d4> (дата обращения: 01.09.2020).
26. Product brochure: Twaron®. URL: <https://www.tejinaramid.com/en/product-details/twaron-staple-fiber> (дата обращения: 31.08.2020).
27. Волокна Kermel. ООО «Кермель арамид Солюшэнз». URL: <http://www.kermel.ru/?id=5> (дата обращения: 01.09.2020).
28. Manufacturing of fibre-polymer composite materials // *Introduction to Aerospace Materials*, Book, Woodhead Publishing, 2012. P. 303–337. DOI: 10.1533/9780857095152.303.
29. Gupta B.S., Afshari M. Polyacrylonitrile fibers // *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*. 2nd edition. Elsevier, 2018. P. 545–593. DOI: 10.1016/b978-0-08-101272-7.00015-8.
30. Способ получения нитей и волокон из ароматического сополиамида: пат. 2285071 Рос. Федерация. №2005127107/04; заявл. 29.08.05; опубл. 10.10.06.
31. Способ получения волокон, нитей, пленок из гетероциклических ароматических полиамидоимидов, содержащих бензимидазольные фрагменты, и ткань на основе этих нитей: пат. 2409710 Рос. Федерация. №2009135095/05; заявл. 22.09.09; опубл. 20.01.11.
32. Способ получения высокопрочных высокомодульных арамидных нитей (варианты): пат. 2478143 Рос. Федерация. №2011117117/05; заявл. 04.05.11; опубл. 10.11.12.
33. Способ получения высокопрочных высокомодульных арамидных нитей: пат. 2531822 Рос. Федерация. №2013119905/05; заявл. 30.04.13; опубл. 27.10.14.
34. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. №7–8. С. 54–58.
35. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
36. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
37. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Каримбаев Т.Д., Чернышев А.А. Арамидные органопластики для корпусов вентиляторов авиационных двигателей // *Вопросы материаловедения*. 2017. №32 (90). С. 153–165.

38. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364.
39. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е., Бова В.Г., Войнов С.И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. 2019. №3–4. С. 43–47.
40. Железина Г.Ф., Бова В.Г., Войнов С.И., Кан А.Ч. Перспективы использования гибридных тканей на основе углеродных и арамидных волокон в качестве армирующего наполнителя полимерных композиционных материалов // Вопросы материаловедения. 2019. №2 (98). С. 86–95.
41. Петров А.В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №8. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.