

УДК 677.494

## НЕТКАНЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЕМ ПОЛИАНИЛИНА И КРУПНОТОННАЖНЫХ ПОЛИМЕРОВ

© 2025 г. С. Н. Малахов<sup>1,\*</sup>, Ю. Н. Малахова<sup>1,2</sup>, С. Н. Чвалун<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: s.malakhov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2024 г.

После доработки 14.10.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Получены электропроводящие микро- и нановолокнистые нетканые материалы методом электроформования растворов смесей полианилина и ряда крупнотоннажных полимеров (полиамида-6, полилактида, полистирола, полиэтиленоксида). Средний диаметр волокон находится в диапазоне 0.5–6 мкм, при этом введение полианилина в формовочный раствор приводит к снижению диаметра волокон. Состав полученных материалов подтвержден методом ИК-спектроскопии. Установлено, что в процессе электроформования наблюдается изменение надмолекулярной структуры полиамида-6 и полилактида (переход от  $\alpha$ -фазы к  $\gamma$ - и аморфной фазам соответственно), при этом полианилин не образует кристаллических структур. Показано, что удельная электропроводность полученных нетканых полотен может достигать  $10^{-3}$  См/см, что позволяет применять их как в тканевой инженерии, так и в органической электронике.

DOI: 10.31857/S0023476125010144, EDN: ISJNTB

### ВВЕДЕНИЕ

Нетканые материалы обладают уникальными физико-химическими характеристиками, обеспечивающими широкий спектр применения как в научно-исследовательских, так и в коммерческих целях. Получение подобных материалов методом электроформования (вытягивания волокон из раствора или расплава полимера под действием мощного электрического поля) в настоящее время актуально в областях генерации и хранения энергии, водоочистке и восстановлении окружающей среды, здравоохранении и биомедицине [1]. При этом “традиционные” крупнотоннажные термо- и реактопласты являются диэлектриками, так же как и нетканые полотна на их основе. В то же время в ряде случаев (например, в области органической электроники) необходимо, чтобы такие волокна были электропроводящими [2].

Получать проводящие волокнистые материалы можно различными способами. Один из них – создание композитных волокон, содержащих проводящий наполнитель. В качестве таких наполнителей могут быть использованы сажа [3, 4], углеродные нанотрубки [5–7], графен и его производные [8–10], металлы, их оксиды [10–13] и т.д. Другой подход заключается в покрытии волокон слоем

металлов или сплавов, что также придает им электропроводность. При этом могут быть использованы как сталь или алюминий, так и благородные металлы типа золота, серебра или платины [14, 15]. Наконец, возможно использовать полимеры, имеющие собственную проводимость [16].

К настоящему времени известен ряд проводящих полимеров [17], одним из наиболее удобных по совокупности свойств (проводимость, легкость получения и переработки, стоимость) является полианилин [18]. Однако в чистом виде полианилин не формируется в волокна из-за низкой вязкости растворов, поэтому наиболее простой способ получения материалов на его основе – электроформование из смеси с волокнообразующим полимером [19–21]. При выборе волокнообразующего полимера стоит учитывать весьма ограниченную растворимость полианилина, а также необходимость его допирования – например, камфорсульфоновой или *пара*-толуолсульфонокислотой.

Цель настоящей работы – получение гибридных нетканых электропроводящих материалов на основе полианилина, исследование их морфологии, структуры и свойств в зависимости от использованного волокнообразующего полимера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения волокон использовали полистирол (ПС) 525М (Нижнекамскнефтехим, Россия) с показателем текучести расплава (ПТР) 10.2; полилактид (ПЛА) 4032D (Nature Works LLC, США) с ПТР 7.0; полиамид-6 (ПА) Волгамид-27 (Куйбышевазот, Россия) с относительной вязкостью 2.74 и полиэтиленоксид (ПЭО) с молекулярной массой 2 000 кДа (Sigma-Aldrich, США). В качестве проводящей компоненты использовали полианилин (ПАНИ) в форме эмеральдинового основания (Sigma-Aldrich, США) с молекулярной массой 10 кДа и камфорсульфоновую кислоту (КСК) (99%, Acros Organics). Растворы готовили в хлороформе (ХФ) (хч, Компонент-реактив, Россия) и гексафторизопропаноле (ГФИП) (99%, ПиМ-Инвест, Россия).

Формовочные растворы готовили путем перемешивания требуемого количества волокнообразующего полимера и растворителя (ХФ для ПС, ПЛА и ПЭО, ГФИП для ПЛА и ПА) на магнитной мешалке в течение 24 ч. Проводящие формовочные растворы готовили в две стадии: сначала растворяли 200 мг ПАНИ и 260 мг КСК в 10 мл ХФ или ГФИП, перемешивали на магнитной мешалке в течение 24 ч. Полученный раствор фильтровали для удаления нерастворившихся частиц, после чего добавляли волокнообразующий полимер и перемешивали еще 24 ч.

Электроформование из раствора проводили с использованием лабораторной установки (рис. 1а) на основе высоковольтного источника Spellman

SL130PN30, шприцевого насоса Висма-Планар ДШ-08 в качестве дозирующего устройства, а также алюминиевого диска диаметром 50 см, на который попадал готовый материал. Проводящие материалы также получали на стеклянные измерительные ячейки с предварительно напыленными электродами (рис. 1б). Приложенное напряжение составляло 18 кВ, межэлектродное расстояние – 20 см, скорость подачи раствора – 3 мл/ч.

Микрофотографии нетканых материалов получали с использованием растрового электронного микроскопа Thermo Fisher Scientific Phenom XL при ускоряющем напряжении 5 кВ без напыления токопроводящего покрытия. Обработку изображений и определение диаметров волокон проводили в программе ImageJ 1.49. ИК-спектроскопию выполняли на ИК-фурье-спектрометре Thermo Fisher Scientific Nicolet iS5 с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения iD5 ATR. Регистрацию спектров проводили в области 4000–550 см<sup>-1</sup>. Рентгеноструктурный анализ образцов проводили на пропускание с использованием дифрактометра Rigaku SmartLab (CuK<sub>α</sub>-излучение, λ = 1.5408 Å). Краевые углы измеряли с помощью системы анализа формы капли KRUSS DSA30E.

Проводимость получаемых нетканых материалов изучали с помощью системы измерения параметров полупроводников Keithley 4200-SCS при напряжении 1 В. Удельную проводимость конечного гибридного материала рассчитывали исходя из массы и геометрии образца.

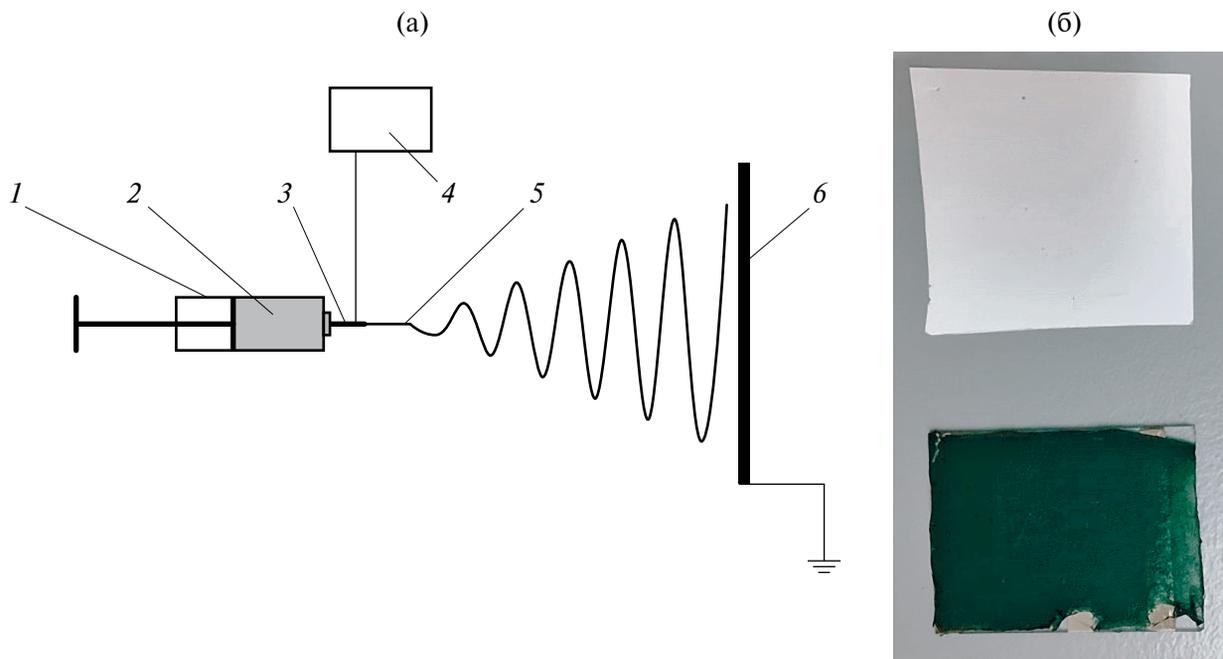


Рис 1. Схема экспериментальной установки для получения нетканых материалов (а): 1 – подающее устройство, 2 – раствор полимера, 3 – капилляр, 4 – источник высокого напряжения, 5 – первичная струя, 6 – приемное устройство. Полученные материалы (б) из чистого ПЭО (вверху) и ПЭО–ПАНИ/КСК, сформованные на пластину с нанесенными металлическими электродами (внизу).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения высокой электропроводности конечных волокон необходима минимальная доля волокнообразующего полимера в них. В этой связи первым шагом было электроформование из чистых полимеров для определения минимальной концентрации, при которой возможно стабильное образование волокон. Так, электроформование из растворов ПА в ГФИП проводили в диапазоне концентраций 2–6 мас. %. При формовании из 2%-ного раствора происходил переходный процесс от электрораспыления к электроформованию, в результате чего образующийся материал состоял из частиц диаметром 2–3 мкм, соединенных фрагментами волокон. Увеличение концентрации полимера до 4 мас. % приводит к получению волокон диаметром ~500 нм, также содержащих некоторое количество веретенообразных дефектов. При использовании 6%-ного раствора образуются бездефектные волокна средним диаметром 0.7 мкм. Формование из смеси ПА–ПАНИ/КСК (при концентрации ПА 6 мас. %) приводит к получению бездефектных волокон средним диаметром 0.6 мкм (рис. 2а).

Для получения волокон из ПЛА использовали растворы в ГФИП (концентрацией 3–9 мас. %) и ХФ (4–10 мас. %). При электроформовании 3%-ного раствора ПЛА в ГФИП были получены волокна с большим количеством дефектов, при этом средний диаметр волокон составил 0.8 мкм, увеличение доли полимера до 6 мас. % привело к образованию бездефектных волокон со средним диаметром 1.3 мкм, до 9 мас. % – 3.2 мкм. Формование из смеси ПЛА–ПАНИ/КСК (при 6%-ной концентрации волокнообразующего полимера) приводит к снижению среднего диаметра волокон до 0.45 мкм. При формовании из растворов ПЛА в ХФ при концентрации полимера 4 мас. % наблюдается лишь электрораспыление, при 6% происходит образование волокон, однако они содержат большое количество веретенообразных дефектов, при 8% формируются круглые бездефектные волокна со средним диаметром 7.5 мкм. Однако добавление ПАНИ/КСК в 8%-ный раствор ПЛА приводит к переходу в

электрораспыление с образованием лишь обрывочных фрагментов волокон, в связи с чем концентрация ПЛА была увеличена до 9 мас. %. Из такого раствора были получены гибридные проводящие нетканые полотна смеси ПЛА–ПАНИ/КСК со средним диаметром волокон менее 2 мкм.

ПЭО при формовании из ХФ позволяет получать волокна со средним диаметром 1.2 мкм уже при содержании полимера 0.7 мас. %. Добавление ПАНИ–КСК приводит к минимальному изменению среднего диаметра волокон до 1.1 мкм (рис. 2б).

Электроформование из растворов ПС концентрацией 5–10 мас. % приводило лишь к образованию частиц размером до 50–70 мкм (т.е. происходил процесс электрораспыления). При использовании 15%-ного раствора образующийся материал состоял из волокон (средний диаметр – 3.2 мкм) с большим количеством веретено- и гантелеобразных дефектов. Увеличение концентрации до 20 мас. % позволяет получить бездефектный материал с волокнами лентообразной формы средней шириной 12 мкм и толщиной 4 мкм, что по площади сечения эквивалентно круглым волокнам диаметром 8 мкм. Формование из смеси ПС–ПАНИ/КСК приводит к снижению эквивалентного диаметра волокон до 6 мкм (рис. 2в).

Таким образом, гибридные ПАНИ-содержащие нетканые материалы могут быть получены с использованием любого из использованных в работе волокнообразующих полимеров. В то же время из-за существенных различий в концентрации полимера, необходимой для начала волокнообразования, доля ПАНИ в материалах будет существенно различаться (наименьшая – в материале с ПС (5.8%), наибольшая – в материале с ПЭО (35.7%)). Это отражается и на внешнем виде нетканых полотен – все они имеют зеленый цвет (характерный для ПАНИ в форме эмеральдинового основания), однако разную интенсивность окраски из-за различного содержания проводящего компонента. Так, полотна ПС–ПАНИ/КСК имеют светло-зеленую окраску, ПА– и ПЛА–ПАНИ/КСК – ярко-зеленую, а ПЭО–ПАНИ/КСК (рис. 1б) – темно-зеленую.

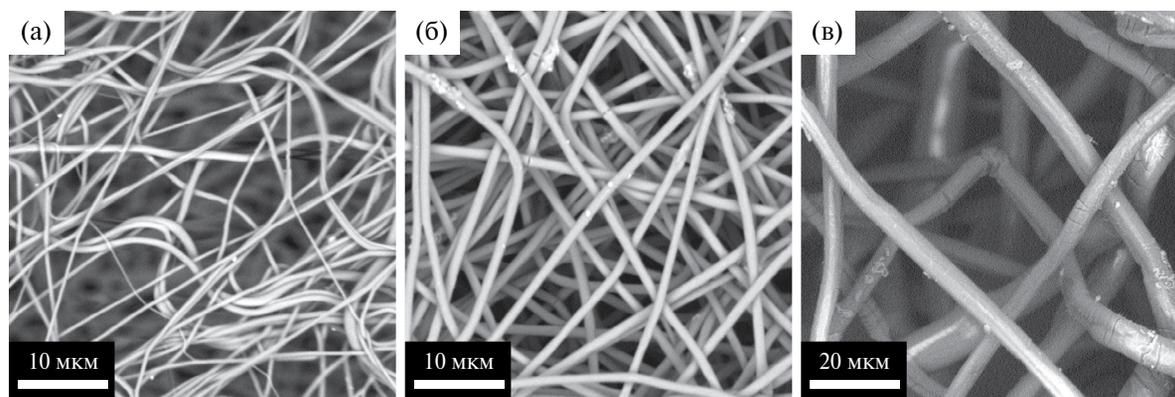
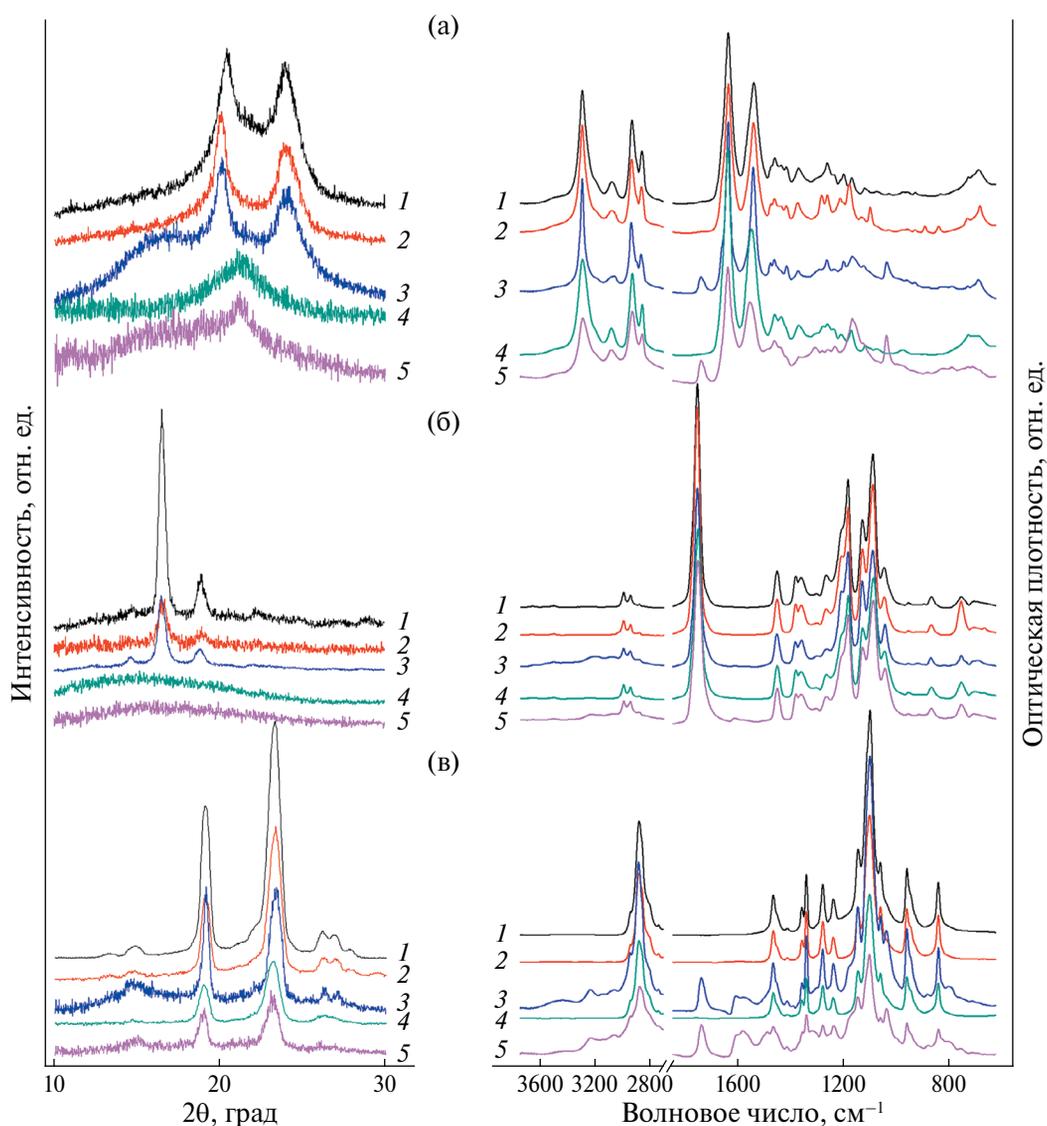


Рис. 2. Микрофотографии нетканых гибридных электропроводящих материалов на основе ПА (а), ПЭО (б) и ПС (в).

Смачиваемость нетканых материалов является важной характеристикой, влияющей на их практическое применение. Полученные нетканые материалы из ПЛА и ПС характеризуются высокой гидрофобностью (краевой угол – более  $130^\circ$ ), она сохраняется и в проводящих материалах ПЛА–ПАНИ/КСК и ПС–ПАНИ/КСК. Нетканый материал из ПА сразу после получения также демонстрирует гидрофобные свойства (краевой угол около  $140^\circ$ ), однако после выдерживания в воде и высушивания материал необратимо теряет их [26]. В отличие от полотен из чистого ПА гибридный проводящий материал ПА–ПАНИ/КСК изначально демонстрирует влаговпитывание, что позволяет применять его в сферах, где необходимо хорошее смачивание жидкостью (например, в тканевой инженерии).

Полимерная струя в процессе электроформования подвергается высокоскоростному вытягиванию в электрическом поле, что может приводить к изменению надмолекулярной структуры полимеров. Из анализа большеугловых дифрактограмм видно, что исходный полиамид-6 характеризуется присутствием кристаллитов преимущественно  $\alpha$ -формы, которой соответствуют рефлексы (200) при  $2\theta = 20.4^\circ$  и (002)/(202) при  $23.9^\circ$  [25, 26]. В процессе электроформования происходит переход к метастабильной  $\gamma$ -форме в волокнах (рефлекс (200) при  $21.3^\circ$ ), в то время как в пленках, полученных поливом формовочного раствора, сохраняется  $\alpha$ -форма кристаллов (рис. 3а). Схожая картина наблюдается для полилактида (рис. 3б): исходный полимер является частично кристаллическим



**Рис. 3.** Большеугловые дифрактограммы (слева) и ИК-спектры (справа) образцов на основе полиамида (а), полилактида (б) и полиэтиленоксида (в): 1 – исходный полимер, 2 – пленка из полимера, 3 – пленка из полимера с ПАНИ/КСК, 4 – нетканый материал из полимера, 5 – нетканый материал из полимера с ПАНИ/КСК.

с присутствием рефлексов (110)/(200) при  $16.5^\circ$  и (203) при  $18.9^\circ$ , характерных для  $\alpha$ -фазы [27, 28]. При электроформовании в волокне образуется лишь аморфная фаза с соответствующим гало на дифрактограммах, а в отлитых пленках сохраняется исходная кристаллическая структура полимера. Полиэтиленоксид и полистирол, напротив, не демонстрируют значимых изменений надмолекулярной структуры в процессе электроформования. Так, для всех образцов на основе ПЭО (рис. 3в) наблюдаются рефлексы, соответствующие моноклинной кристаллической фазе, наиболее интенсивными из которых являются (120) при  $19.1^\circ$  и (112) при  $23.3^\circ$  [29, 30], а для ПС, являющегося аморфным полимером, на дифрактограммах наблюдается лишь широкое гало с центром при  $19.4^\circ$  [31, 32].

Известны различные модели кристаллической структуры ПАНИ/КСК, основанные на анализе дифрактограмм материалов с различной степенью упорядоченности макромолекул [33]. Одна из них – триклинная структура из двойных слоев цепей ПАНИ, разделенных двойными слоями анионов КСК [34]. На степень кристалличности полных из растворов пленок ПАНИ/КСК значительно влияет используемая система растворителей [35], при этом для ГФИП и ХФ обнаружено снижение интенсивности пика, связанного с межмолекулярными  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействиями.

Несмотря на то что ПАНИ, допированный КСК, способен образовывать кристаллические структуры, в полученных образцах не наблюдается соответствующих рефлексов (рис. 3, кривые 3 и 5). Вероятно, использование смесей ПАНИ/КСК с волокнообразующими полимерами нарушает образование упорядоченных кристаллических областей в процессе электроформования волокон. Схожая ситуация описана в [36] при исследовании образцов на основе смеси допированного ПАНИ с ПЭО, где наблюдали только рефлексы волокнообразующего полимера. В [37] для смесей ПЛА с ПАНИ, допированным *para*-толуолсульфоново́й кислотой, было показано, что на дифрактограммах пленочных образцов присутствуют слабый широкий рефлекс в области  $8.4^\circ$ – $9.5^\circ$  и очень слабые рефлексы при  $27.2^\circ$ ,  $29^\circ$ ,  $31.4^\circ$ , относящиеся к допированному ПАНИ, которые не наблюдаются для соответствующих нетканых материалов. Таким образом, отсутствие рефлексов ПАНИ/КСК в нетканых материалах может быть объяснено значительным вкладом аморфной составляющей и высокой неупорядоченностью структуры цепей ПАНИ [38].

В ИК-спектрах всех образцов присутствуют полосы поглощения, характерные для волокнообразующих полимеров. В случае ПА (рис. 4а) это валентные колебания N–H ( $3297\text{ см}^{-1}$ ), полосы Амид I ( $1638\text{ см}^{-1}$ ) и Амид II ( $1541\text{ см}^{-1}$ ), валентные ( $2934$  и  $2822\text{ см}^{-1}$ ) и деформационные ( $1463$  и  $1170\text{ см}^{-1}$ ) колебания C–H [25, 26]; для ПЛА (рис. 4б) характерны валентные колебания карбонильной

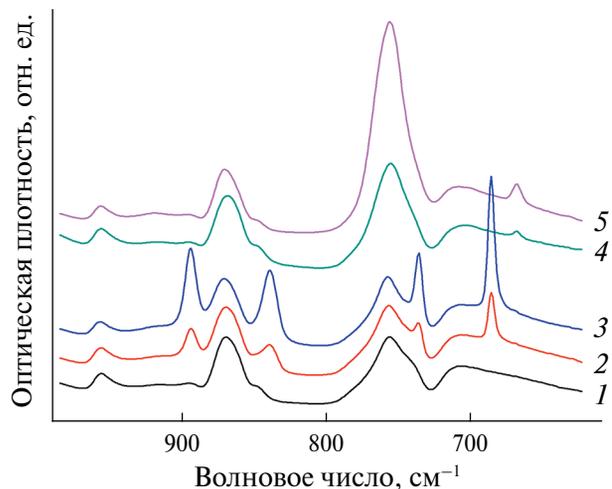
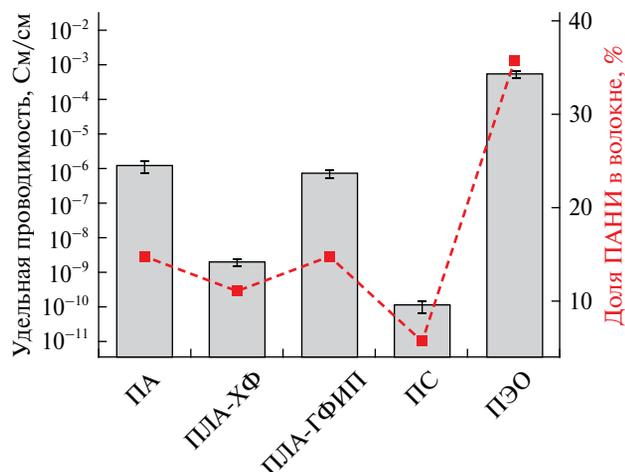


Рис. 4. ИК-спектры образцов на основе полилактида в области  $1000$ – $600\text{ см}^{-1}$ : 1 – исходный полимер; 2, 3 – нетканый материал и пленка, полученные из раствора в ХФ; 4, 5 – нетканый материал и пленка, полученные из раствора в ГФИП.

группы ( $1756\text{ см}^{-1}$ ), валентные колебания C–O ( $1200$ – $1000\text{ см}^{-1}$ ), валентные ( $2995$  и  $2945\text{ см}^{-1}$ ) и деформационные ( $1454$ ,  $1383$  и  $1361\text{ см}^{-1}$ ) колебания C–H [24, 28]. ПС характеризуется наличием валентных колебаний C–H в ароматическом кольце ( $3100$ – $3000\text{ см}^{-1}$ ) и в метиленовых группах ( $2923$  и  $2850\text{ см}^{-1}$ ), колебаний ароматического кольца ( $1601$  и  $1493\text{ см}^{-1}$ ), деформационных колебаний C–H в метиленовых группах ( $1452\text{ см}^{-1}$ ); веерных колебаний C–H в мономещенном ароматическом кольце ( $757$  и  $698\text{ см}^{-1}$ ) [31, 32]. В ИК-спектрах ПЭО (рис. 4в) наблюдаются валентные ( $2946$  и  $2884\text{ см}^{-1}$ ) и деформационные ( $1467$ ,  $1360$ ,  $1342$ ,  $1280$ ,  $1241$ ,  $962$  и  $843\text{ см}^{-1}$ ) колебания C–H, а также валентные колебания связей C–O и C–C ( $1147$ ,  $1100$  и  $1061\text{ см}^{-1}$ ) [23, 30].

Кроме этого, спектры проводящих материалов, полученных из смесей с ПАНИ/КСК, содержат дополнительные полосы поглощения, характерные для ПАНИ, допированного КСК: валентные колебания N–H при  $3235\text{ см}^{-1}$ , валентные колебания C–H в ароматическом кольце при  $3070$ – $3060\text{ см}^{-1}$ , деформационные колебания хиноидных и бензоидных колец при  $1582$  и  $1491\text{ см}^{-1}$ , валентные колебания C=N при  $1378$  и  $1304\text{ см}^{-1}$ , валентные колебания карбонильной группы при  $1740\text{ см}^{-1}$  и сульфогруппы при  $1040\text{ см}^{-1}$  [22–24]. При этом часть из них может перекрываться более интенсивными полосами соответствующего волокнообразующего полимера.

Отметим, что в материалах, получаемых электроформованием растворов, возможно сохранение остаточного растворителя даже после длительного выдерживания на воздухе. На рис. 4 представлены фрагменты ИК-спектров образцов на основе ПЛА (пленок и волокон), полученных из ГФИП и ХФ.



**Рис. 5.** Удельная электропроводность полученных материалов и доля ПАНИ в волокне в зависимости от использованного волокнообразующего полимера.

Присутствие ХФ подтверждается наличием полосы поглощения в области  $669\text{ см}^{-1}$ , а также значительным увеличением интенсивности полосы при  $755\text{ см}^{-1}$  (где происходит наложение полос поглощения ПЛА и ХФ) [39], присутствие ГФИП – наличием полос поглощения при  $894, 839, 736$  и  $686\text{ см}^{-1}$  [40]. Таким образом, в случае использования подобных волокнистых материалов для задач биологии и медицины необходима дополнительная стадия удаления остаточного растворителя для уменьшения их цитотоксичности.

Результаты измерения электропроводности полученных материалов, а также доля ПАНИ в соответствующих волокнах представлены на рис. 5. Как видно из полученных результатов, проводимость образцов возрастает по мере увеличения доли ПАНИ в волокне. Так, материалы ПС–ПАНИ/КСК характеризуются и минимальным содержанием проводящего компонента (5.8 мас. %), и наименьшей проводимостью ( $\sim 10^{-10}$  См/см). Образцы состава ПА–ПАНИ/КСК и ПЛА–ПАНИ/КСК (при получении из ГФИП, где возможно образование волокон при меньшей концентрации ПЛА) демонстрируют проводимость  $\sim 10^{-6}$  См/см, что позволяет использовать их как матрицы для электростимулируемого роста клеточных культур [24]. Наибольшей проводимостью (до  $\sim 10^{-3}$  См/см) обладают нетканые полотна состава ПЭО–ПАНИ/КСК, где доля проводящего компонента максимальна (35.7 мас. %). Материалы с подобной проводимостью уже могут быть использованы в органической электронике – например, в качестве сенсоров [23].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены и охарактеризованы нетканые материалы на основе полианилина и ряда крупнотоннажных волокнообразующих полимеров.

Показана возможность получения проводящих нетканых материалов со средним диаметром волокон  $0.5\text{--}6\text{ мкм}$ . Добавление ПАНИ/КСК в формовочный раствор приводит к снижению среднего диаметра волокон по сравнению с раствором волокнообразующего полимера, что может быть связано со снижением вязкости при введении ПАНИ. В процессе электроформования происходит изменение надмолекулярной структуры полиамида-6 (переход от  $\alpha$ - к  $\gamma$ -фазе) и полилактида (переход от  $\alpha$ - к аморфной фазе), при этом сам ПАНИ не образует кристаллических структур. Проводимость полученных материалов возрастает с увеличением доли ПАНИ в волокне и может достигать  $10^{-3}$  См/см, что позволяет применять их как в тканевой инженерии, так и в органической электронике.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” с использованием оборудования ресурсных центров (ОМС, ЭФМ) НИЦ “Курчатовский институт”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kenry, Lim C.T. // Prog. Polym. Sci. 2017. V. 70. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002>
2. Wang X.X., Yu G.F., Zhang J. et al. // Prog. Mater. Sci. 2021. V. 115. P. 100704. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100704>
3. Hwang J., Muth J., Ghosh T. // J. Appl. Polym. Sci. 2007. V. 104. P. 2410. <https://doi.org/10.1002/app.25914>
4. Victor F.S., Kugarajah V., Bangaru M., Dharmalingam S. // J. Electrostat. 2022. V. 119. P. 103738. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2022.103738>
5. Mazinani S., Aji A., Dubois C. // J. Polym. Sci. B. Polym. Phys. 2010. V. 48. P. 2052. <https://doi.org/10.1002/polb.22085>
6. Yang T., Wu D., Lu L. et al. // Polym. Compos. 2011. V. 32. P. 1280. <https://doi.org/10.1002/pc.21149>
7. Naeem F., Prestayko R., Saem S. et al. // Nanotechnology. 2015. V. 26. P. 395301. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/39/395301>
8. Bao Q., Zhang H., Yang J.X. et al. // Adv. Funct. Mater. 2010. V. 20. P. 782. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901658>
9. Azarniya A., Eslahi N., Mahmoudi N., Simchi A. // Compos. A. Appl. Sci. Manuf. 2016. V. 85. P. 113. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.011>
10. Li Y., Zhang P., Ouyang Z. et al. // Adv. Funct. Mater. 2016. V. 26. P. 2122. <https://doi.org/10.1002/adfm.201504533>
11. Liu Y., Teng H., Hou H., You T. // Biosens. Bioelectron. 2009. V. 24. P. 3329. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.04.032>
12. Zhu H., Du M., Zhang M. et al. // Sensor. Actuat. B. Chem. 2013. V. 185. P. 608. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.05.062>

13. *Alegre C., Busacca C., Di Blasi A. et al.* // *J. Energy Storage*. 2019. V. 23. P. 269.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.04.001>
14. *Jur J.S., Sweet III W.J., Oldham C.J., Parsons G.N.* // *Adv. Funct. Mater.* 2011. V. 21. P. 1993.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.201001756>
15. *Климова С.А., Аткин В.С., Усачев А.Н. и др.* // *Хим. волокна*. 2017. № 3. С. 66.
16. *Das T.K., Prusty S.* // *Polym.-Plast. Technol.* 2012. V. 51. P. 1487.  
<https://doi.org/10.1080/03602559.2012.710697>
17. *Namsheer K., Rout C.S.* // *RSC Adv.* 2021. V. 11. P. 5659.  
<https://doi.org/10.1039/D0RA07800J>
18. *Majeed A.H., Mohammed L.A., Hammoodi O.G. et al.* // *Int. J. Polym. Sci.* 2022. V. 2022. P. 9047554.  
<https://doi.org/10.1155/2022/9047554>
19. *Zhang Y., Rutledge G.C.* // *Macromolecules*. 2012. V. 45. P. 4238.  
<https://doi.org/10.1021/ma3005982>
20. *Das S., Sharma M., Saharia D. et al.* // *Biomed. Mater.* 2017. V. 12. P. 045025.  
<https://doi.org/10.1088/1748-605X/aa7802>
21. *Farkhondehnia H., Amani Tehran M., Zamani F.* // *Fiber. Polym.* 2018. V. 19. P. 1813.  
<https://doi.org/10.1007/s12221-018-8265-1>
22. *Frontera P., Busacca C., Trocino S. et al.* // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2013. V. 13. P. 4744.  
<https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7196>
23. *Li C., Chartuprayoon N., Bosze W. et al.* // *Electroanal.* 2014. V. 26. P. 711.  
<https://doi.org/10.1002/elan.201300641>
24. *Yao J., Chen Y., Li W. et al.* // *RSC Adv.* 2019. V. 9. P. 5610.  
<https://doi.org/10.1039/C8RA10495F>
25. *Liu Y., Cui L., Guan F. et al.* // *Macromolecules*. 2007. V. 40. P. 6283.  
<https://doi.org/10.1021/ma070039p>
26. *Малахов С.Н., Чвалун С.Н.* // *Российские нанотехнологии*. 2020. Т. 15. № 4. С. 477.  
<https://doi.org/10.1134/S1992722320040093>
27. *Hsieh Y.T., Nozaki S., Kido M. et al.* // *Polym. J.* 2020. V. 52. P. 755.  
<https://doi.org/10.1038/s41428-020-0343-8>
28. *Малахов С.Н., Малышкина А.М., Чвалун С.Н.* // *Журн. прикл. химии*. 2022. Т. 95. № 9. С. 1179.  
<https://doi.org/10.31857/S0044461822090109>
29. *Deitzel J.M., Kleinmeyer J.D., Hirvonen J.K., Tan N.B.* // *Polymer*. 2001. V. 42. P. 8163.  
[https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00336-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00336-6)
30. *Малахова Ю.Н., Малахов С.Н., Камышинский Р.А. и др.* // *Журн. прикл. химии*. 2017. Т. 90. № 9. С. 1252.
31. *Chae D.W., Kim B.C.* // *Polym. Adv. Technol.* 2005. V. 16. P. 846.  
<https://doi.org/10.1002/pat.673>
32. *Малахов С.Н., Кузнецов Н.М., Вдовиченко А.Ю. и др.* // *Хим. волокна*. 2023. № 6. С. 56.
33. *Al-Gharram M., Jum'h I., Telfah A., Al-Hussein M.* // *Colloid. Surf. A.* 2021. V. 628. P. 127342.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127342>
34. *Śniechowski M., Borek R., Piwowarczyk K., Łuźny W.* // *Macromol. Theor. Simul.* 2015. V. 24. P. 284.  
<https://doi.org/10.1002/mats.201400105>
35. *Garrudo F.F.F., Ferreira L.V., Ferraria A.M. et al.* // *Synthetic Met.* 2024. V. 301. P. 117523.  
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2023.117523>
36. *Olvera-Gracia M., Aguilar-Hernandez J.R.* // *J. Appl. Res. Technol.* 2014. V. 12. P. 598.  
[https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)71638-4](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)71638-4)
37. *Picciani P.H., Medeiros E.S., Pan Z. et al.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 2009. V. 112. № 2. P. 744.  
<https://doi.org/10.1002/app.29447>
38. *Ucar N., Kizildag N., Onen A. et al.* // *Fiber. Polym.* 2015. V. 16. P. 2223.  
<https://doi.org/10.1007/s12221-015-5426-3>
39. *Костина Ю.В., Бондаренко Г.Н., Алентьев А.Ю., Ямпольский Ю.П.* // *Высокомогл. соед. Сер. А*. 2006. Т. 48. № 1. С. 41.
40. *Moseti K.O., Yoshioka T., Kameda T., Nakazawa Y.* // *Molecules*. 2019. V. 24. P. 3945.  
<https://doi.org/10.3390/molecules24213945>

## ELECTRICALLY CONDUCTIVE NONWOVEN MATERIALS PRODUCED BY ELECTROSPINNING OF POLYANILINE AND BULK POLYMERS

S. N. Malakhov<sup>a,\*</sup>, Yu. N. Malakhova<sup>a,b</sup>, S. N. Chvalun<sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>b</sup>MIREA – Russian Technological University, M.V. Lomonosov Moscow State Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow, Russia

\*E-mail: s.malakhov@mail.ru

**Abstract.** Electrically conductive micro- and nanofibrous nonwoven materials were obtained by electrospinning of solutions of polyaniline and a number commodity polymers (polyamide-6, polylactic acid, polystyrene, polyethylene oxide). The average fiber diameter is in the range of 0.5–6 μm, while the addition of polyaniline into the spinning solution leads to a decrease in fiber diameter. The composition of the obtained materials was confirmed by IR spectroscopy. It was found that during the electrospinning process the supramolecular structure of polyamide-6 and polylactide changes (from α-phase to γ- and amorphous phases, respectively), and polyaniline does not form crystalline structures. The specific electrical conductivity of the obtained nonwoven fabrics can reach 10<sup>-3</sup> S/cm, which allows their application both in tissue engineering and in organic electronics.