

УДК 678

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-2-297-49-56

*И. К. Некрасов^{1,2}, И. Ш. Абдуллин², Ф. Р. Сагитова³***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ВЧЕ РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ
НА АППРЕТИРОВАННЫЕ СВМПЭ-ВОЛОКНА**¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет² ООО «Плазма-ВСТ»³ Казанский национальный исследовательский технологический университет

e-mail: igor05071997@mail.ru; plasma.vst@gmail.com; farida_sagitova@mail.ru

В статье рассмотрена плазменная модификация в ВЧЕ разряде пониженного давления аппретированных СВМПЭ-волокон. Показана возможность удаления аппрета с поверхности полимера с помощью плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления. В результате плазменного воздействия увеличены предел прочности при растяжении СВМПЭ волокон на 19 % по сравнению с волокнами, имеющими покрытие-аппрет. Проведены ТГ-ДСК исследования, по результатам которых положение пиков термодеструкции на кривых ДСК и ТГА свидетельствует о том, что плазмоактивированные СВМПЭ волокна обладали большей длительной термостойкостью.

Ключевые слова: СВМПЭ-волокна, аппрет, плазма, ВЧЕ разряд

*I. K. Nekrasov^{1,2}, I. Sh. Abdullin², F. R. Sagitova³***INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PLASMA EFFECT
OF LOW-PRESSURE CCP DISCHARGE ON APPRETIZED UHMWPE FIBERS**¹ Kazan (Volga Region) Federal University² LTD "Plasma-VST"³ Kazan National Research Technological University

The article deals with plasma modification in HCE discharge of reduced pressure of appretized UHMWPE fabric. The possibility of removing the appretizer from the polymer surface by means of plasma of low-pressure CCP discharge is shown. The tensile strength of UHMWPE fibers was increased by 19 % and tensile elastic modulus by 30 % as compared to the fibers with an apprette coating. DSC-TG studies have been carried out, and according to the results of which the position of thermal destruction peaks on DSC and TGA curves indicate that plasma-activated UHMWPE fibers had higher long-term thermal stability.

Keywords: UHMWPE fibers, appret, plasma, CCP discharge

Введение

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен является одним из передовых синтетических полимеров из-за своих высоких удельных прочностных характеристик [1]. Его применение в составе композиционных материалов ограничено лишь одним существенным недостатком – низкой поверхностной энергией, что проявляется в малом адгезионном взаимодействии. В связи с этим эффективная и равномерная пропитка широким классом полимерных связующих СВМПЭ материалов невозможна [2]. Достижение высокой степени адгезионной прочности матрицы к СВМПЭ позволит создать композиционный материал нового поколения.

Для решения данной проблемы мировое научное сообщество активно использует различные методы модификации поверхности СВМПЭ. Основным направлением модификации поверхности СВМПЭ является химическая

модификация за счет травления [3], присоединения полярных функциональных групп [4] или связующих агентов [5].

До недавнего времени единственным производителем СВМПЭ на территории Российской Федерации был ВНИИСВ в Твери. Однако промышленное производство так и не было запущено. Основными поставщиками СВМПЭ на территорию РФ являются производители Китайской Народной Республики (КНР). СВМПЭ поставляется в виде однонаправленной ткани и тканей полотняного и саржевого переплетений.

До недавнего времени СВМПЭ китайского производства поставлялся абсолютно гидрофобным. Однако в последнее время стал поставляться СВМПЭ волокнистый материал (ткани полотняного и саржевого переплетений), который смачивается водой и различными связующими. Это свидетельствует об наличии об-

работки поверхности ткани. На сегодняшний день текстильные производства обладают и практикуют следующие технологии: нанесение полиуретана на поверхность СВМПЭ [6] и широкого спектра других аппретов с целью антистатического эффекта, защиты волокон и оборудования и т. д. [7].

Нанесение различных аппретов может быть ответственно за изменение смачиваемости СВМПЭ волокнистых материалов. Однако при создании композиционного материала на основе аппретированного СВМПЭ нанесенный аппрет вносит изменение в межфазное взаимодействие между волокном и матрицей в составе композиционного материала. Возникает вопрос в эффективности применения тканей СВМПЭ с подобными покрытиями в составе композиционных материалов.

Нанесение полиуретана на поверхность одноплазменного СВМПЭ тканей используется при создании ЮД пластин, однако полиуретан не обладает гидрофильным эффектом [8]. Поэтому данная технология не может быть ответственной за увеличение смачиваемости поставляемой из КНР СВМПЭ ткани.

В работах [9,10] освоена технология покрытия СВМПЭ ткани плотняного переплетения нейлоном 6 и 6,6. Это позволяет увеличить стойкость к порезам и антистатический эффект. Несмотря на то, что большинство нейлоновых материалов обладают низкой гигроскопичностью, широко распространенный нейлон 6,6 способен впитывать влагу. Вследствие данного факта СВМПЭ с нейлоновым покрытием может быть пропитан различными связующими для создания на его основе композиционного материала.

Известным методом обработки СВМПЭ является плазменный метод обработки в высокочастотном емкостном (ВЧЕ) разряде пониженного давления [11–13]. Благодаря ему удалось придать лиофильность поверхности СВМПЭ волокон без ухудшения прочностных характе-

ристик, эффект модификации сохранялся на длительный срок [14].

В связи с этим является актуальным установление причины смачиваемости СВМПЭ ткани, поставляемой из КНР, возможности модификации такой СВМПЭ ткани плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления, а также сравнении физико-механических характеристик исходной СВМПЭ ткани и ткани после плазменной модификации в ВЧЕ разряде пониженного давления.

Материалы и методы исследования

В качестве нитей СВМПЭ взяты нити фирмы Nitex из ткани H1000D-PE240.

Плазменная модификация производилась в установке ВЧЕ разряда пониженного давления (рис. 1). Основными характеристиками разряда являлись плотность ионного тока на образец – до $1,5 \text{ А/м}^2$ [14], энергия ионов 50–100 эВ [14], температура нагрева ткани не превышала 40°C . Входными параметрами разряда являлись расход газа в $0,04 \text{ г/с}$, подаваемая в разряд мощность от 400 до 600 Вт, давление от 10 до 100 Па (в зависимости от состава плазмообразующего газа и мощности, подаваемой в разряд), длительность обработки от 1 до 6 минут. Режимы модификации представлены в табл. 1.

Выбор экспериментальных режимов плазменной модификации для проведения исследований осуществляли на основе анализа имеющихся в научно-технической литературе данных [11–15], а также результатов собственных исследований взаимодействия СВМПЭ волокнистых материалов с плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления.

ИК-исследования проводили на ИК-Фурье спектрометре ФСМ 1202. Спектры снимались методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) с кристаллом из ZnSe в рабочем диапазоне $650\text{--}4000 \text{ 1/см}$, разрешение $4,0 \text{ 1/см}$.

Таблица 1

Режимы модификации СВМПЭ нитей

№	Мощность, Вт	Плазмообразующий газ	Время, мин
1	400	Аргон	3
2	400	Воздух	3
3	400	Пропан-бутан	3
4	400	Пропан-бутан	4
5	400	Аргон	6
6	600	Аргон	3
7	Исходный	–	–

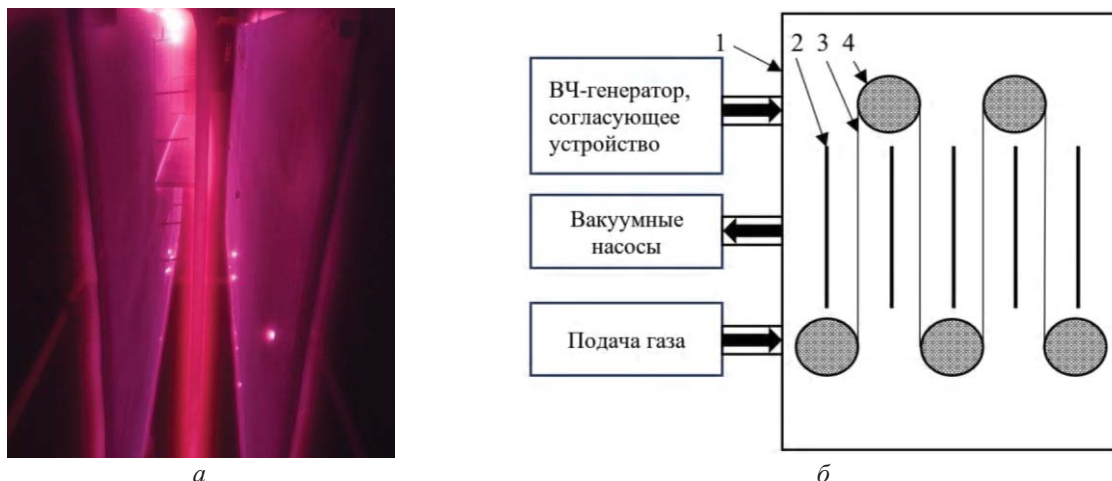


Рис. 1. ВЧЕ разряд пониженного давления (а) и блок-схема процесса обработки (б)

Для проведения *томографических исследований* использовали микро и нанофокусная исследовательская рентгеновская система для компьютерной томографии General Electric V|tome|X S 240. Для проведения исследования из центральных частей каждой полученной 3D модели ткани были вырезаны области $100 \times 100 \times 500$ вокселей. Для каждой изученной области получены рентгенотомографические срезы образца в трех плоскостях пространства и трехмерная визуализация структуры волокон, общий объем волокон, объемную долю сплетенных пучков волокон в общем объеме образца, площадь поверхности волокон и удельную площадь поверхности волокон.

Исследовали следующие параметры волокон: объем волокон, объемная доля волокон в общем объеме образца, площадь поверхности и удельная площадь поверхности волокон.

Объем волокон представлял собой объемную меру всего объема волокон.

Объемная доля волокон в общем объеме образца — это соотношение объема волокон к общему объему изученного образца, включающего в себя межволоконное пространство. Площадь поверхности — это мера площади общей поверхности внешних границ волокон, которая находится на контакте с воздухом (в пределах разрешения микротомографии). Удельная площадь поверхности пор — отношение площади поверхности волокон к объему образца.

Термический анализ проводился методом дифференциально-сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа. Использовался дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК) DSC 823е фирмы Mettler Toledo, с погрешностью измерений $\pm 0,2$ °C, воспроиз-

водимостью $\pm 0,1$ °C. Производили программируемый нагрев от 25 до 600 °C, скорость нагрева 5 °C/мин, среда — воздух.

Также для оценки термических характеристик применялся термоанализатор синхронный STA 6000 — измерительный комплекс, в котором сочетаются функции ДСК и высокочувствительных аналитических весов. Это позволяло проводить одновременно в одном эксперименте и на одном образце измерение калориметрических величин при различных термических переходах, определять температуры и энергии переходов и регистрировать изменение массы образца. Программа математической обработки сигнала и получать графическую интерпретацию расчетов. Анализ проводили в интервале температур нагрева от 30–600 °C, скорость нагрева 10 °C/мин, тигли платиновые с крышками и без, среда — воздух.

При определении нагрузки и удлинения многофиламентных волокон использовали ГОСТ 10213.2–2002. Для определения прочности при растяжении из СВМПЭ-волокон использовали испытательная машина ZDM 200 фирмы Rauenstein, Германия.

При измерении предела прочности при растяжении концы СВМПЭ волокон, а также углеродных волокон в связи с их высокой хрупкостью, пропитывали эпоксидной смолой марки ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Отверждение законцовок осуществляли при добавлении отвердителя ПЭПА в количестве 7–10 % в эпоксидную смолу ЭД-20; выдерживали при комнатной температуре до 48 ч до завершения процесса гелеобразования, после чего проводили термообработку при температуре 80 °C в течение 4 ч.

С целью избежания проскальзывания волокон в матрице, их концы подвергали плазменной обработке в следующем режиме: плазмообразующий газ – аргон, время обработки – 2 минуты, мощность – 400 Вт, в то время как средняя часть волокна изолировали от плазменного воздействия. Согласно работе [15] при данных параметрах обработки не происходило изменение физико-механических характеристик волокон, однако повышалась адгезия. Повышение адгезии необходимо для предотвращения выскальзывания волокон из матрицы при последующей пропитке при исследовании предела прочности при растяжении. Далее концы изолировали от воздействия плазмы, в то время как средняя часть волокон подвергали плазменной обработке согласно режиму обработки табл. 1.

Предел прочности при растяжении определяли по формуле:

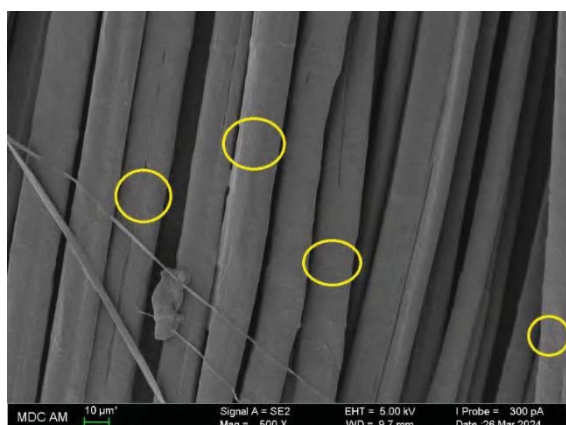
$$\sigma = \frac{P_{\max}}{S},$$

где $P_{\max}$ – максимальная разрывающая нагрузка, S – площадь сечения.

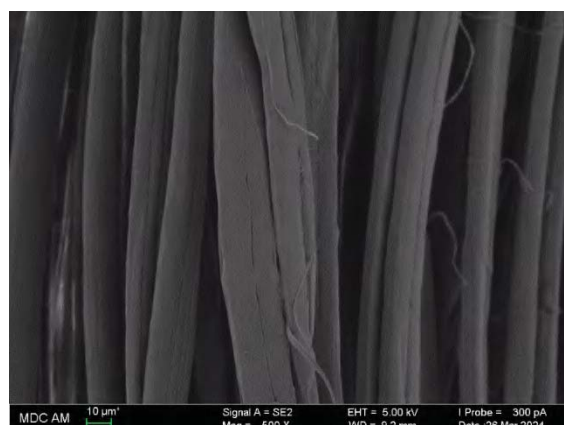
Для оценки диаметра филаментов и подсчета их количества в многофиламентных волокнах, с целью последующего определения диаметра волокна, использовали интерферометр Линника МИИ-4.

Результаты и их обсуждения

При исследовании структуры поверхности волокон выявлено, что на поверхность СВМПЭ-волокон нанесена аппрет в виде пленки. Из микрофотографий видно, что пленка покрывает большинство поверхности СВМПЭ нити (рис. 2, а). После плазменного воздействия наблюдалась филаментная структура (рис. 2, б), которую изначально скрывала пленка.



а



б

Рис. 2. Микрофотографии СВМПЭ с аппретом (а) и после плазменного воздействия (режим № 4 табл. 1) (б)

Полоса 2915 см^{-1} (рис. 2) относится к асимметричным валентным колебаниям CH_2 -групп. Полоса 2850 см^{-1} относится к симметричным валентным колебаниям CH_3 -групп. Полосы поглощения с максимумами 1470 и 1462 см^{-1} относятся к ножничным колебаниям CH_2 -групп и асимметричным деформационным колебаниям CH_3 -групп соответственно. Полоса поглощения 729 см^{-1} относится к деформационным колебаниям CH групп, а 717 см^{-1} к маятниковым колебаниям CH_2 -групп. Исследованное вещество по набору полос в ИК-спектре относится к насыщенным углеводородам.

На ИК-Фурье спектрах (рис. 3) аппретированных СВМПЭ волокон, подвергнутых плазменному воздействию, сохраняются вышеперечисленные полосы поглощения и дополнительно наблюдаются полосы с максимумами 1747

и 1715 см^{-1} , относящиеся к карбонильным соединениям.

На рисунке 3 так же приведены ИК-спектры полиуретана [16] и нейлона 6,6 [9]. Сравнение полученных спектров со спектром полиуретана позволяют исключить возможность нанесения последнего на СВМПЭ ткань, как было упомянуто во введении. Для нейлона 6 есть совпадения со спектром аппретированного волокна по пикам 1641 и $1541,5 \text{ см}^{-1}$. По пикам 2933 и 2867 см^{-1} совпадение трудно различимо. Это может быть связано с высокой интенсивностью основных пиков от СВМПЭ по отношению к возможным пикам от нейлона, находящихся в этом же диапазоне.

Таким образом на ИК-спектре образца СВМПЭ ткани с аппретом наблюдался интегральный спектр от СВМПЭ и аппрета-пленки,

а на ИК-спектре плазмобработанного образца – СВМПЭ с дополнительными функцио-

нальными группами, пришитыми в результате воздействия потока ионов и радикалов

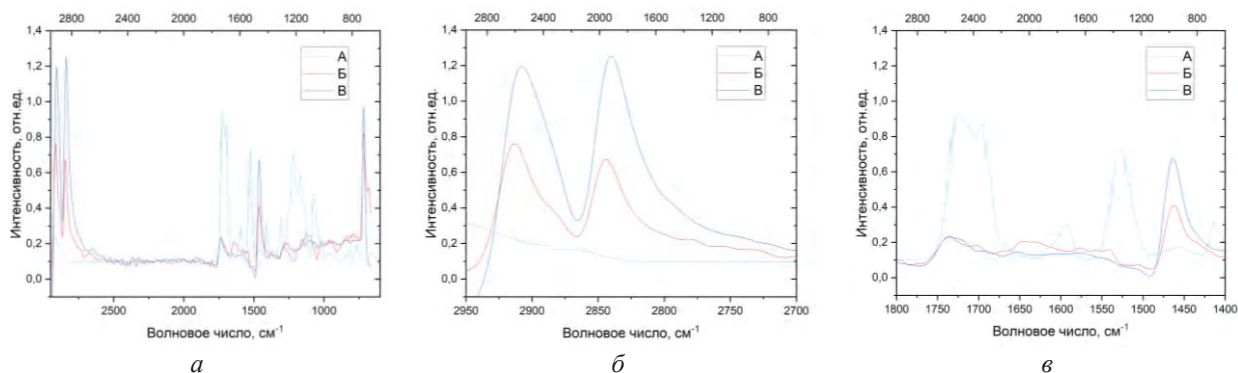


Рис. 3. ИК-спектры полиуретана (А), аппретированного СВМПЭ (Б), плазмобработанного СВМПЭ (В) (режим № 2 табл. 1):

а – ИК-спектр в области 600–2950 см⁻¹; б – ИК-спектр в области 2700–2950 см⁻¹; в – ИК-спектр в области 1400–1800 см⁻¹

Томография. Для понимания и объяснения процесса удаления пленки с поверхности СВМПЭ волокна проведено томографическое исследование межфиламентного пространства СВМПЭ волокон. Ортогональные рентгенплотные срезы образцов в плоскостях ХУ, ХZ, YZ и трехмерная визуализация изученных об-

ластей контрольного и обработанного образцов представлено на рис. 4, а, б соответственно.

Сегментированные структуры волокон представлены на рис. 4, в, г. В результате исследований получены следующие характеристики для контрольного и обработанного образцов (табл. 3).

Таблица 2

Полученные значения для изученных образцов ткани

Название образца	Объем волокон, мм ³	Объемная доля волокон, д.е.	Площадь поверхности волокон, мм ²	Удельная площадь поверхности волокон, мм ⁻¹
Контрольный	0,1605	0,2336	25,1024	156,3665
Обработанный	0,0972	0,1414	15,8191	162,7619

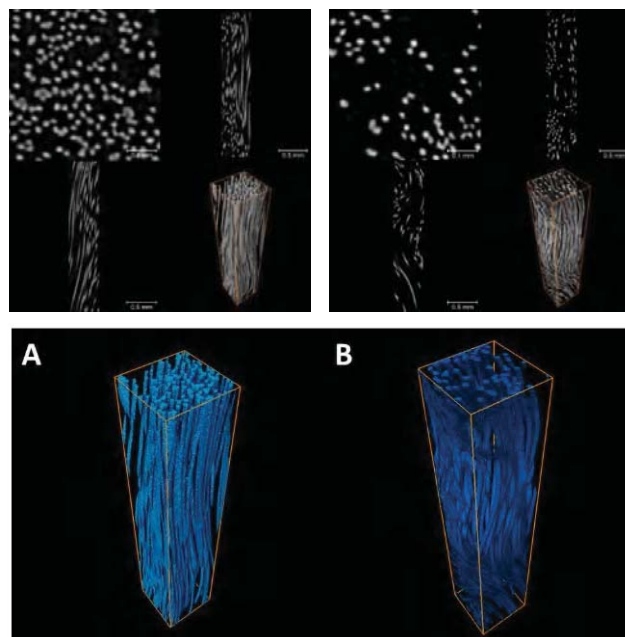


Рис. 4. Томографические изображения.

Слева – ХО СВМПЭ, справа – плазмобработанный СВМПЭ (режим № 2 табл. 1)

Исследование пучков волокон с использованием рентгеновской компьютерной томографии позволило получить данные о структуре образцов. Сравнение контрольного и обработанного образцов показало, что обработанный образец имеет меньший объем волокон и меньшую площадь поверхности волокон (в контрольном объеме $100 \times 100 \times 500$ вокселей) и большую удельную площадь поверхности волокон по сравнению с контрольным образцом, т.е. образец имеет большую поверхность при том же объеме.

На представленных фотографиях наблюдались две отличительные особенности обработанного волокна от волокна с аппретом-пленкой. Первой особенностью является больший изгиб волокон, обработанных плазмой. Пленка ограничивала подвижность волокон, в результате чего увеличивается вероятность излома волокон при приложении нагрузки. Удаление пленки позволило волокнам проявлять большую гибкость, что непосредственно влияет на предел прочности на изгиб. Второй особенностью, прямо вытекающей из первой, являлось увеличение межволоконного пространства. Увеличение межволоконного пространства позволяет улучшить пропитку волокон связующим за счет увеличения площади взаимодействия между ними. Данная особенность особо важна для связующих, имеющих малое время полимеризации, при последующем создании композиционного материала на основе СВМПЭ.

Исследование предела прочности при растяжении волокон СВМПЭ.

Проведены испытания на предел прочности при растяжении волокон СВМПЭ с аппретом, а также после плазменного воздействия. Результаты исследования представлены на рис. 5 и табл. 3. Установлено, что для большинства режимов плазменного воздействия наблюдается незначительное увеличение предела прочности при растяжении СВМПЭ волокон. Наибольшее увеличение достигнуто в 2,144 ГПа (режим № 4 табл. 1), тогда как для контрольного образца значение составляло 1,804 ГПа. Превосходство режима обработки № 4 над контрольным образцом составило 19 %.

Плазменное воздействие сводилось к следующим физическим процессам. Ионы и радикалы удаляли пленку с поверхности СВМПЭ волокна как за счет химического травления, так и за счет физического распыления. После уда-

ления пленки с поверхности СВМПЭ ионы и радикалы воздействовали непосредственно с самим волокном, изменяя его физическую и химическую структуру. Волокно имело не идеальную структуру: изломы, аморфные области, раздвоения впадины и т. д. (рис. 2). Энергия, вносимая ионами и радикалами, позволяла устранить данные дефекты и тем самым уменьшить риск преждевременного разрушения волокна.

Таблица 3

Зависимость предела прочности при растяжении и модуля упругости волокон СВМПЭ от режима плазменной модификации в сравнении с исходным волокном

Режим обработки, №	Предел прочности при растяжении, ГПа
1	2,018
2	1,921
3	2,027
4	2,144
5	1,232
6	1,989
7 (контрольный)	1,804

При сравнении режимов № 1 и 5 табл. 1, отличавшихся длительностью плазменной обработки, наблюдалось уменьшение предела прочности при растяжении при обработке длительностью в 6 минут по сравнению с 3 минутами. Ионы и радикалы попадали в области кристалличности СВМПЭ-волокна, что приводило к деструкции данных областей.

В результате происходили два конкурирующих процесса созидания и деструкции, упомянутых выше.

Исследования на ДСК-ТГА. При исследовании термических характеристик методом ДСК и ТГА исходных СВМПЭ волокон и обработанных в плазме (режим № 1 табл. 1), установлено, что пики плавления и перекристаллизации наблюдаются в тех же областях, что свидетельствует о сохранении внутренней структуры волокна, но пики термодеструкции смещаются в более высокотемпературную область (рис. 6).

По результатам ДСК можно говорить о том, что внутренняя структура СВМПЭ-волокон после плазменной обработки не изменяется, так как эндотермический пик плавления с минимумом в 154,73 °С на кривой ДСК совпадают.

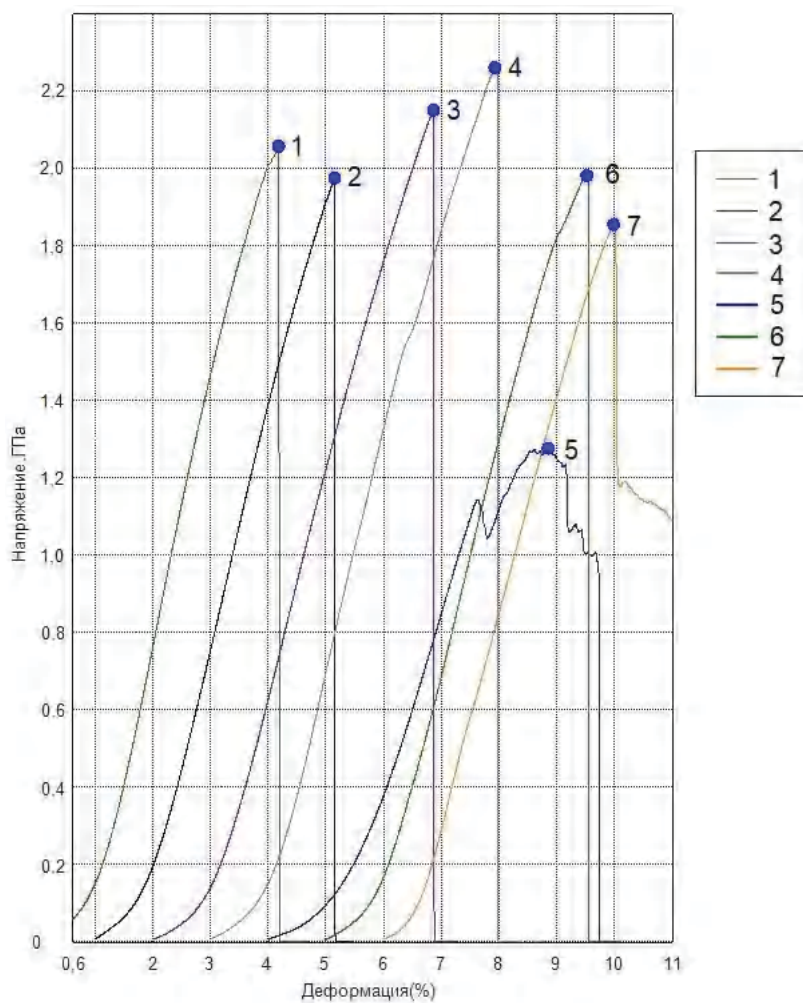


Рис. 5. Исследование предела прочности при растяжении волокон СВМПЭ от режима модификации плазмой ВЧЕ разряда пониженного давления

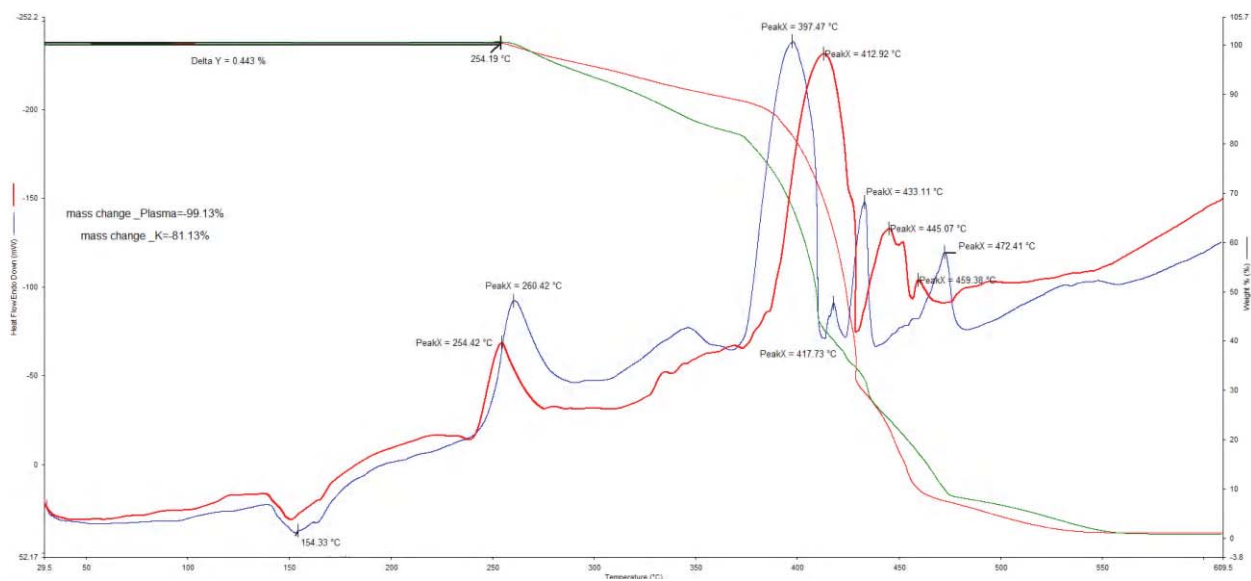


Рис. 6. Термоаналитические кривые ТГ-ДТГ, ДТА.
ДТА-кривая: красная – контрольный образец, синяя – плазмообработанный образец;
ТГ-кривая: красная – контрольный образец, зеленая – плазмообработанный образец

Также совпадает температура начала потери массы на кривой ТГА, составляющая ~ 254,19 °С. Однако, появление пиков термодеструкции, где образец начинал интенсивно терять массу, свидетельствовало о возникновении на поверхности активированных волокон более термостабильных структур, например, сшивок, двойных связей, термостойких групп, в результате пик температуры интенсивной потери массы на кривой ТГА смещается с 397,47 °С для исходных волокон до 412,92 °С для обработанных плазмой волокон после плазменного воздействия.

В целом положение пиков термодеструкции на кривых ДСК и ТГА свидетельствуют о том, что плазмоактивированные СВМПЭ волокна обладали большей длительной термостойкостью.

Выводы

Установлено, что поверхность поставляемой из КНР ткани СВМПЭ покрыта аппретом. С помощью плазмы ВЧЕ разряда пониженного давления удалось удалить нанесенное покрытие, пришить полярные функциональные группы, а также увеличить на 19 % предел прочности при растяжении плазмообработанных нитей по сравнению с аппретированными СВМПЭ-волокнами. Положение пиков термодеструкции на кривых ДСК и ТГА свидетельствуют о том, что плазмоактивированные СВМПЭ волокна обладали большей длительной термостойкостью.

Таким образом, применение плазменной модификации в ВЧЕ разряде пониженного давления является актуальным и необходимым этапом при проектировании композиционных материалов на основе СВМПЭ волокнистых материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Валуева, М. И.* Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) / М. И. Валуева, А. С. Колобков, С. С. Малаховский // Труды ВИАМ. – 2020. – № 3 (87). – С. 49–57.
2. *Ибатуллина, А. Р.* Обзор производителей и сравнение свойств сверхпрочных высококомодульных волокон / А. Р. Ибатуллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 19. – С. 136–139.
3. *Dayyoub, T.* Treating UHMWPE surface for enhancing the adhesion properties by cellulose grafting // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2020. – Т. 98. – P. 102535.
4. *Chukov, D. I.* Surface modification of carbon fibers and its effect on the fiber–matrix interaction of CBMPЭ based composites // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Т. 586. – P. 459–463.
5. *Liu, N.* Chemical modification on UHMWPE micro-particles to improve the interfacial and tribological properties of UHMWPE/carbon fabric/phenolic laminate in water environment // Surface and Interface Analysis. – 2016. – Т. 48. – № 1. – P. 40–46.
6. *Ido Meshi.* Delamination behavior of UHMWPE soft layered composites / Ido Meshi, Iris Amarilio, Dana Benes, Rami Haj-Ali // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Т. 98. – С. 166–175.
7. *Пяткова, В. Е.* Аппретирование тканей как одна из основных операций заключительной отделки материалов / В. Е. Пяткова // Экологические проблемы региона и пути их разрешения. – 2019. – С. 290.
8. *Заводских, К. Ю.* Мембраны из полиуретанового нановолокна для очистки сточных вод методом мембранной дистилляции / К. Ю. Заводских, А. А. Горбунов // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Нанотехнологии и наноматериалы». – 2020. – С. 257–263.
9. *Firouzi D.* Nylon-coated ultra high molecular weight polyethylene fabric for enhanced penetration resistance / D. Firouzi, D. A. Foucher, H. Bougherara // Journal of Applied Polymer Science. – 2014. – Т. 131. – № 11.
10. *Hassanein N.* In-vitro evaluation of the bioactivity and the biocompatibility of a novel coated UHMWPE biomaterial for biomedical applications / N. Hassanein, H. Bougherara, A. Amleh // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2020. – Т. 101. – P. 103409.
11. *Abdullin I. S.* Experimental and Theoretical Study of the Interaction of a Low-Energy Ion Flow with Chemical Fibers / I. S. Abdullin, V. S. Zheltuhin, I. K. Nekrasov, F. R. Sagitova // High Energy Chemistry. – 2023. – Т. 57. №1. – pp.132–136.
12. *Abdullin I. S.* Modification of the surface of high-modulus polyethylene with low-energy low-intensity ion streams: theory and experiment / I. S. Abdullin, V. S. Zheltuhin, I. K. Nekrasov, F. R. Sagitova // PPOR. – 2022. – V. 23. № 4. – Pp. 525–543.
13. *Абдуллин, И. Ш.* Особенности формирования слоя положительного заряда при модификации изделий в струе высокочастотного емкостного разряда в условиях динамического вакуума / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, И. К. Некрасов, М. Ф. Шаехов, Ф. Р. Сагитова // Физика и химия обработки материалов. – 2024. – № 1. – С. 30–40.
14. *Абдуллин, И. Ш.* Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / И. Ш. Абдуллин, В. С. Желтухин, Н. Ф. Кашапов. – Казань : Изда-во Казан. ун-та. – 2000. – 348 с.
15. *Кудинов, В. В.* Оценка физико-химического взаимодействия между волокном и матрицей при получении композиционных материалов, армированных высокопрочными высококомодульными полиэтиленовыми волокнами / В. В. Кудинов, Н. В. Корнеева, М. Ф. Шаехов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 6. – С. 58–61.
16. *Rosu D., Rosu L., Cascaval C. N.* IR-change and yellowing of polyurethane as a result of UV irradiation // Polymer Degradation and Stability. – 2009. – Т. 94. – № 4. – С. 591–596.