УДК 614.89
DOI 10.47367/0021-3497_2025_5_239

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛООТРАЖАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНОГО НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

OBTAINING OF HEAT-REFLECTIVE MATERIALS FOR FIRE-FIGHTER COMBAT CLOTHING BASED ON MAGNETRON SPUTTERING METHOD

В.А. ТИТОВ, И.А. ЛЕГКОВА, А.Л. НИКИФОРОВ, А.М. БАУСОВ, С.Н. УЛЬЕВА

V.A. TITOV, I.A. LEGKOVA, A.L. NIKIFOROV, A.M. BAUSOV, S.N. ULYEVA

(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)

(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia)

E-mail: titov25@gmail.com, legkovai@mail.ru, anikiforoff@list.ru

Применение технологии магнетронного распыления для нанесения поверхностных покрытий на полимерные пленки и ткани привлекает все большее внимание исследователей. В последние 20 лет исследования и разработки в этом направлении были сосредоточены главным образом на создании материалов, способных экранировать электромагнитное излучение, обладающих хорошими теплоотражающими свойствами, антибактериальной активностью, регулируемыми гидрофильными или гидрофобными свойствами и т. д. Важным шагом стало создание промышленного оборудования, которое позволяет использовать процесс магнетронного распыления для нанесения покрытий из металлов, сплавов или соединений (оксидов и нитридов) на широкие пленочные материалы и текстильные полотна в непрерывном режиме. В статье дан краткий обзор публикаций, отражающих прогресс в этой области.

The use of magnetron sputtering technology for applying surface coatings to polymer films and fabrics is of increasing interest to researchers. Over the past 20 years, research and development in this area have focused primarily on creating materials capable of shielding electromagnetic radiation, possessing good heat-reflecting properties, antibacterial activity, adjustable hydrophilic or hydrophobic properties, etc. An important step was the creation of industrial equipment that allows the use of the magnetron sputtering process for applying coatings from metals, alloys or compounds (oxides and nitrides) to wide-film materials and textiles in a continuous mode. The article provides a brief overview of publications reflecting progress in this area.

Ключевые слова: полимер, ткань, неравновесная плазма, магнетронное распыление, модифицирование, теплоотражение.

Keywords: polymer, fabric, nonequilibrium plasma, magnetron sputtering, modification, heat reflection.

Введение

Прогресс в области обеспечения пожарной и аварийной безопасности в значительной мере связан с разработкой и широким использованием новых материалов и технологий. Это касается как строительных и интерьерных материалов, так и материалов спецодежды для защиты персонала (пожар-

ных, металлургов, работников горячих цехов, сварщиков и т. д.).

Большое внимание сегодня уделяется развитию технологий придания огнезащитных и теплозащитных (теплоотражающих) свойств полимерным пленочным и текстильным материалам [1…8].

Многие задачи модифицирования полимеров могут быть решены с использованием неравновесной плазмы пониженного или атмосферного давления [9…13]. В частности, в работе [13] на основе анализа современных публикаций показаны возможности использования низкотемпературной плазмы для придания огнезащитных свойств полимерным материалам.

Одним из эффективных методов придания новых функциональных свойств текстильным материалам или пластикам является нанесение на поверхность нанослоев металлов или их соединений с использованием ионного распыления мишеней в вакууме [14, 15], в том числе при наложении на область плазмы магнитного поля (так называемое магнетронное распыление) [15…19].

Цель данного обзора – рассмотреть возможности и перспективы использования магнетронного ионно-плазменного распыления для модификации поверхности полимерных пленок и тканей, включая получение теплоотражающих покрытий. Первоначально будут кратко рассмотрены физические основы и преимущества метода магнетронного распыления. Далее будет представлена информация об оборудовании, которое позволяет сегодня реализовать процесс в промышленных масштабах, а также приведены примеры материалов, полученных с использованием ионно-плазменной технологии.

Ионно-плазменная металлизация полимерных материалов: основы метода и его достоинства

Метод магнетронного распыления с 70-х годов прошлого века применяется в технологии производства изделий микроэлектроники. Однако до недавнего времени этот метод не использовался для модифицирования поверхности пленочных полимерных и текстильных материалов, поскольку для его реализации в текстильном производстве требовалось решение ряда серьезных проблем как фундаментального научного, так и инженерного характера, которые были отмечены в работе [18]. Выделим основные из них.

Волокнообразующие полимерные материалы, как правило, обладают низкой поверхностной энергией и вследствие этого невысокими адгезионными характеристиками. Для обеспечения хорошей адгезии покрытий к полимерной основе требуется предварительная активация поверхности.

Другая проблема связана со значительным газовыделением при обработке текстильных материалов в плазме при низком давлении в результате удаления сорбированной воды и образования газообразных продуктов взаимодействия плазмы с полимерами. Это предъявляет особые требования к вакуумному оборудованию и режиму обработки материалов.

Отсутствие опыта ионно-плазменной металлизации текстильных материалов, обладающих пористой структурой, потребовало изучения закономерностей взаимодействия плазмы с такими материалами, включая определение зависимости свойств полученных покрытий не только от условий нанесения и химической природы волокнообразующего полимера, но и от особенностей структуры текстильного материала.

Как показала практика, нанесение покрытий методом магнетронного распыления удачно сочетается с плазмохимической активацией поверхности, и эти процессы могут быть реализованы в едином технологическом цикле в одной промышленной установке [20].

На рис. 1 (1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система охлаждения; 4 – корпус катодного узла; 5 – постоянный магнит; 6 – стенка вакуумной камеры; 7 – силовые линии магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода; 10 – поверхность, на которую наносится покрытие) приведена принципиальная схема магнетронной распылительной системы. Ее основными элементами являются катод, изготовленный из распыляемого материала, анод, магнитная система и система охлаждения электродов.

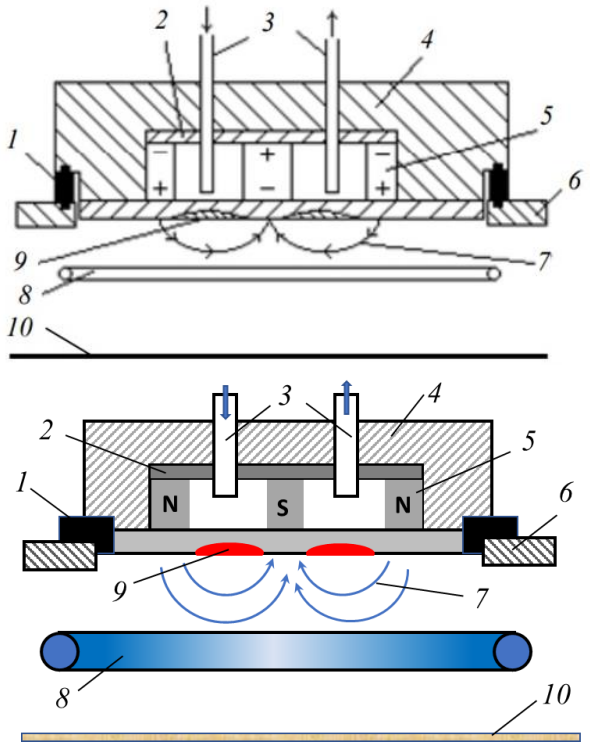

Рис. 1

В магнетронных распылительных системах возникает аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Электроны, испускаемые катодом-мишенью под действием ионной бомбардировки, совершают циклоидальное движение вокруг силовых линий магнитного поля. В результате увеличивается частота столкновений электронов с атомами рабочего газа, резко растет степень ионизации газа и плотность тока ионов на поверхности распыляемого катода (примерно в 100 раз по сравнению с диодными распылительными системами без магнитного поля). Это приводит к существенному увеличению скорости распыления. Рост частоты ионизации за счет наложения внешнего магнитного поля позволяет снизить давление плазмообразующего газа до ~0,1 Па и улучшить условия транспорта распыляемого вещества к подложке (текстильному материалу) благодаря уменьшению рассеяния распыленных частиц в столкновениях с молекулами газа. Это положительно сказывается не только на скорости осаждения покрытий, но и на их качестве. При этом распылительное устройство работает при напряжении между электродами порядка 500 В, что меньше, чем в типичных диодных распылительных системах (~ 2…3 кВ) [21].

Можно отметить следующие достоинства метода магнетронного распыления:

- универсальность, то есть возможность получать пленки металлов, сплавов, полупроводников и диэлектриков;
- высокая скорость осаждения распыляемого материала и возможность ее регулирования в широких пределах;
- сохранение соотношения основных компонентов при распылении веществ сложного состава;
- высокая чистота получаемых покрытий и хорошая адгезия их к подложке;
- возможность изменения структуры и свойств покрытий за счет регулирования мощности разряда, давления и состава газовой среды;
- более низкое по сравнению с обычными диодными распылительными системами радиационное и тепловое воздействие на обрабатываемые материалы;
- возможность проведения процесса в химически активной среде, что позволяет получать пленки нитридов, карбидов, оксидов и других соединений;
- более высокая энергетическая эффективность процесса по сравнению с обычными распылительными системами диодного и триодного типов;
- возможность создания линий полунепрерывного действия, поскольку мишени обладают достаточно большим запасом распыляемого материала.

Нанопокрытия из металлов или их соединений на поверхности текстильных материалов могут быть получены с помощью химического осаждения из паровой фазы [22], из растворов [23, 24], методами золь-гель синтеза [25] и магнетронного распыления [26]. При этом метод магнетронного распыления имеет ряд преимуществ, включая высокую чистоту продукта, возможность управления толщиной слоя, высокую скорость процесса при низкой температуре, хорошую адгезию, экологичность процесса и т. д. [27, 28].

В ряде исследований показано, что технология магнетронного распыления позволяет наносить металлические или неметал-

лические пленки на поверхность подложек из текстиля, трикотажа, нетканых материалов или пленок из полиэфира, хлопка, льна, шелка, шерсти, полиамида, полимолочной кислоты и полипропилена при выборе соответствующего режима распыления, материала мишени и плазмообразующих газов [29, 30]. Материалами мишеней для распыления являются металлы (Cu, Ti, Ag, Al, W, Ni, Sn, Pt) или неметаллы, такие как кремний, графит, а также оксиды (TiO_2, Fe_2O_3, WO_3, ZnO, SiO_2). Для распыления диэлектриков используется разновидность метода с высокочастотным распылением. Метод также позволяет наносить керамические материалы и одно- или многослойные композитные нанопленки, образованные полимерами (полиимид, политетрафторэтилен).

В результате возможно получение многофункциональных полимерных материалов, обладающих такими функциями, как электромагнитное экранирование, защита от УФ-излучения, отражательная способность в видимом и инфракрасном диапазонах спектра, электропроводность, а также антистатическими, антибактериальными и регулируемыми гидрофильными или гидрофобными свойствами [23…35]. В табл. 1 приведены составы покрытий, получаемых методом магнетронного распыления, и их функциональное назначение при нанесении на ткани или полимерные пленки [15, 36…43].

Таблица 1

№	Материал покрытия	Функции и свойства покрытия
1	Cu, Ag, Ti, Al, Ni, TiO_2, ZnO, WO_3, V_2O_5, Al_2O_3, ITO, AZO	Экранирование электромагнитного излучения, антистатические покрытия, электропроводящие покрытия
2	Cu, Ag, Ti, Al, Ni, Pt, TiO_2, ZnO, MgO, ITO, AZO PTFE и т.д	Отражение УФ- или ИК-излучения
3	Cu, Ag, Zn, Ti, TiO_2, Pt, ZnO, MgO, CuO, латунь	Антибактериальные свойства
4	Al, Ni, TiO_2, PTFE, TiN, SiO_2	Гидрофильные или гидрофобные свойства
5	TiO_2, ZnO, MgO, SnO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3	Адсорбция газов, газовые сенсоры
6	Ti, Al, TiO_2, WO_3, SiO_2, SnO_2, TiN	Структурные цветовые эффекты (отражение, пропускание, коэффициент преломления)
7	SiO_2, Al_2O_3, LaB_6	Теплостойкость, теплоизоляция
8	Cu, Ag, Pt	Улучшение стойкости окраски (светостойкость, устойчивость к стирке)

Промышленные установки для нанесения нанопокрытий на текстильные и пленочные полимерные материалы

Один из основных факторов, в течение долгого времени сдерживающих широкое применение метода магнетронного распыления для металлизации текстильных материалов в промышленных масштабах, – сложность создания высоковакуумного оборудования для реализации такого процесса. Однако в 2005 году совместными усилиями лаборатории ионно-плазменных процессов ИГХТУ и ООО «Ивтехномаш» была создана установка магнетронного напыления УМН-180, принципиальная схема которой показана на рис. 2 (1 – вакуумная камера; 2 — диффузионный насос; 3 – форвакуумный насос; 4 – накатный ролик; 5 – обрабатываемый материал; 6 – раскатный ролик; 7 – магнетрон; 8 – блок питания магнетрона; 9 – система напуска аргона; 10 – система напуска газов; 11 – блок питания разряда для активации поверхности; 12 – электродная система) [17]. Следующей модификацией оборудования стала установка ММ-180, которая отличается большей производительностью и высоким уровнем автоматизации. Эти установки с вакуумными камерами объемом 15 $м^3$ позволяют в режиме перемотки материала из рулона в рулон со скоростью до 40 м/мин наносить покрытия на пленочные или текстильные полотна шириной до 1800 мм. Основные технические характеристики этих промышленных установок приведены в табл. 2 [17].

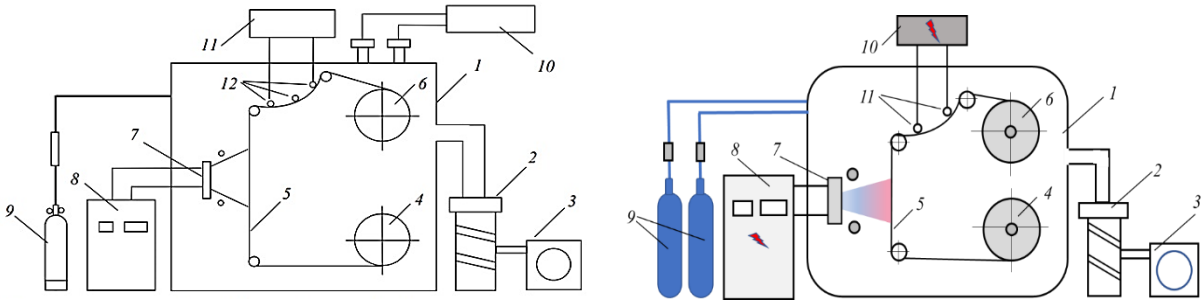

Рис. 2

Таблица 2

Параметр	УМН-180	ММ-180
Рабочая ширина, мм	1800	1800
Максимальный диаметр загружаемого рулона, мм	700	700
Объем вакуумной камеры, м^3	15	15
Количество магнетронов	2	4
Рабочее давление, мм рт. ст.	$(0,5 - 3)\times10^{-3}$	$(0,5 - 3)\times10^{-3}$
Ток разряда (для одного магнетрона), А	1 ... 25	1 ... 25
Скорость движения материала, м/мин	0 ... 20	0 ... 40
Производительность*, м/месяц	2000 ... 21000	4000 ... 41000

*Производительность установки зависит от напыляемого металла и текстильного материала или пленки.

Установка УМН-180 снабжена двумя магнетронными распылительными устройствами длиной 2088 мм, которые обеспечивают равномерность толщины покрытий по площади материала не ниже ±10% при ширине полотен до 180 см. Двухступенчатая система вакуумирования позволяет откачивать воздух из рабочего объема с загруженным рулоном ткани или пленки доостаточного давления $5\cdot10^{-5}$ мм рт. ст. Точность поддержания потока и давления рабочего газа (или смеси газов) в процессе обработки составляет ±5%. Установка снабжена вспомогательными охлаждаемыми электродами для возбуждения тлеющего разряда с целью активации поверхности перед нанесением покрытия. Система протяжки материала обеспечивает его равномерное движение через зону плазмохимической обработки и осаждения покрытий и адаптирована для проводки как текстильных полотен, так и пленок или листовых материалов толщиной от 12 мкм до 5…7 мм со скоростью до 20 м/мин.

Теплоотражающие материалы и покрытия

Нанесение нанопокрытий на текстильные материалы существенно изменяет их теплоотражающие свойства. В ряде работ исследовано изменение отражательной способности в ближнем ИК-диапазоне [44…46]. Для этих целей на поверхность текстильных материалов наносили как металлы (Ag, Ti, Al), так и неорганические соединения (TiO_2, ZnO, AZO) [47…49]. Высокие коэффициенты отражения в ближнем ИК-диапазоне показали металлические пленки (Ag, Cu, Ti и Al), а также многослойные пленки, содержащие прозрачные оксидные слои (ПОС) и слой металла (ПОС/металл/ПОС), нанесенные на стекло методом магнетронного распыления [50]. Авторы работы [51] с помощью магнетронного распыления изготовили полиэфирные ткани с покрытием из серебра с максимальным коэффициентом отражения ИК-излучения 30% и хорошей адгезией. В работах [52, 53] описаны полученные полиэфирные ткани с покрытием AZO (30 нм)/Ag (13 нм)/AZO (30 нм) и AZO (30 нм)/Cu (20 нм)/AZO (30 нм), которые показали отражательную способность в ИК-диапазоне (4…20 мкм) около 95% и 60% соответственно. Испытаны также покрытия из меди и титана толщиной 200 нм, нанесенные на хлопчатобумажные и полиэфирные ткани методом магнетронного распыления. Ткани с покрытием из меди показали более высокую отражатель-

ную способность по отношению к ИК-излучению (20…30%) по сравнению с тканями без покрытия (5…10%), в то время как ткани с покрытием из титана показали такую же отражательную способность к ИК-излучению, как и ткани без покрытия [47].

В работе [17] представлены данные о прохождении теплового излучения через экран из металлизированной алюминием полиэфирной ткани. Как видно из рис. 3 (1 – без экрана; 2 – с экраном из полиэфирной ткани; 3 – с экраном из полиэфирной ткани, покрытой слоем алюминия) , зачерненная металлическая пластина, защищенная от действия ИК-излучения мощностью 250 Вт экраном из металлизированной алюминием полиэфирной ткани, за 25 мин нагревается до 30 °С. Аналогичный объект, защищенный тканью без металлизации, нагревается при тех же условиях до 56 °С, а незащищенный объект – до 83 °С.

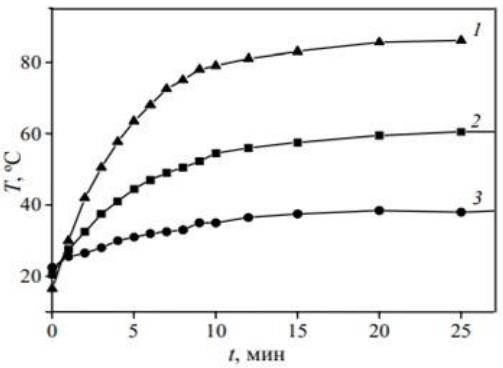

Рис. 3

Следует отметить, что тонкие металлические покрытия обладают хорошей адгезией к текстильным материалам и не изменяют их воздухо- и паропроницаемость. Это открывает перспективы широкого использования металлизированных тканей для изготовления спецодежды для персонала, работающего в условиях повышенной тепловой нагрузки, а также комфортной одежды, сохраняющей тепло, для работы в условиях пониженных температур.

Заключение

Технология модификации поверхности материалов путем нанесения нанослоев металлов и их соединений методом магнетронного распыления экологически безопасна, так как все процессы осуществляются в вакууме без применения химических реактивов. Вода для охлаждения оборудования не загрязняется и может быть использована для производственных нужд или в замкнутом технологическом цикле для охлаждения.

Текстильные и пленочные материалы, изготовленные с применением этой технологии, обладают уникальными свойствами и могут быть использованы для изготовления широкого круга изделий, включая защитную одежду пожарных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mamay Daget T., Birlie Kassie B., Tadesse Abate M. etc.* Eco-friendly and bio-based approaches for flame-retardant functionalization of textile materials: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. 63 (14), P. 1887…1916.

2. *Chanchal Kumar Kundu, Zhiwei Li, Lei Song, Yuan Hu.* An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications // European Polymer Journal. 2020. Vol. 137. P. 109911.

3. *Lazar S.T., Kolibaba T.J. & Grunlan J.C.* Flame-retardant surface treatments // Nat Rev Mater. 2020. 5, P. 259…275.

4. *Киселев А.М., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Румянцева В.Е.* Современные технологии получения текстильных материалов со специальными свойствами и области их применения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2(398). С. 121…133.

5. *Ульева С.Н., Никифоров А.Л., Румянцева В.Е. и др.* Защита целлюлозных материалов от воздействия высоких температур и открытого пламени // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. № 2. С. 207…212.

6. *Спиридонова В.Г., Сорокин Д.В., Никифоров А.Л., Циркина О.Г.* Обоснование актуальных подходов к оценке пожароопасных свойств текстильных материалов и способов огнезащиты тканей различного функционального назначения // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 125…132.

7. *Сырбу С.А., Циркина О.Г., Салихова А.Х. и др.* Проблемные вопросы придания текстильным материалам специальных защитных свойств // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. №2 (47). С. 133…140.

8. *Никифоров А.Л., Легкова И.А.* Новый подход к огнезащите текстильных материалов, древесины и ее производных // Современные пожаробезопасные материалы и технологии. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ, 2024. С. 281…286.

9. *Radetić M., Marković D.* A review on the role of plasma technology in the nano-finishing of textile materials with metal and metal oxide nanoparticles // Plasma Processes Polym. 2022; 19: e2100197.

10. *Jang HJ, Jung EY, Parsons T, Tae H-S, Park C-S.* A review of plasma synthesis methods for polymer films and nanoparticles under atmospheric pressure conditions. Polymers. 2021; 13(14): 2267.

11. *Zill A., Oliveira F.R., Souto A.P.* Plasma treatment in textile industry // Plasma Processes and Polymers. 2014. 12 (2), P. 98…131.

12. *Горберг Б.Л., Титов В.А.* Ионно-плазменные и плазмохимические процессы в производстве новых материалов // Пожарная и аварийная безопасность. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ, 2019. С. 4…7.

13. *Титов В.А., Ульева С.Н., Никифоров А.Л., Баусов А.М.* Использование низкотемпературной плазмы для придания пожаробезопасных свойств полимерным материалам // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2025. № 2(416). С. 56…65.

14. *Липин Ю.В., Рогачев А.В., Харитонов В.В.* Вакуумная металлизация полимерных материалов. Л.: Химия, 1987. 152 с.

15. *Tan X-Q, Liu J-Y, Niu J-R, Liu J-Y, Tian J-Y.* Recent Progress in Magnetron Sputtering Technology Used on Fabrics // Materials. 2018; 11(10): 1953.

16. *Kosari Mehr A., Kosari Mehr A.* Magnetron sputtering issues concerning growth of magnetic films: a technical approach to background, solutions, and outlook. Appl. Phys. A 129, 662 (2023).

17. *Горберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В. и др.* Модифицирование текстильных материалов нанесением нанопокрытий методом магнетронного ионно-плазменного распыления // Российский химический журнал. 2011. Т. 55, № 3. С. 7…13.

18. *Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V., etc.* Modification of textile materials by the deposition of nanocoatings by magnetron ion-plasma sputtering // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V. 83, № 1. P. 157…163.

19. *Латушкина С.Д., Посылкина О.И., Артемчик А.Г.* Исследование особенностей формирования металлопокрытий методом магнетронного распыления на огнезащищенных тканевых материалах // Вестник университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. Т. 5, № 4. С. 418…424.

20. Пат. РФ 2398045. Способ модификации поверхности текстильного материала.

21. *Kelly P.J., Arnell R.D.* Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. 2000. V. 56. P. 159…172.

22. *Lomov S.V., Wicks S., Gorbatrkh L.* Compressibility of nanofibre-grafted alumina fabric andyarns: Aligned carbon nanotube forests. Compos. Sci. Technol. 2014, 90, P. 57…66.

23. *Lu Y.* Electroless copper plating on 3-mercaptopropyltriethoxysilane modified PET fabric challenged by ultrasonic washing. Appl. Surf. Sci. 2009, 255, P. 8430…8434.

24. *Choi K.K., Lee J.Y., Lee W.B.* Chemical vapor deposition carbon film as a capping layer in 4H-SiC based mosfets. J. Nanosci. Nanotechnol. 2018, 18, P. 5868…5875.

25. *Pan C., Shen L., Shang S.* Preparation of superhydrophobic and UV blocking cotton fabric via solgel method and self-assembly. Appl. Surf. Sci. 2012, 259, P. 110…117.

26. *Ellmer K.* Magnetron sputtering of transparent conductive zinc oxide: Relation between the sputtering parameters and the electronic properties. J. Phys. D Appl. Phys. 2000, 33, P. 17…32.

27. *Vaideki K., Jayakumar S., Rajendran R.* Investigation on the effect of RF air plasma and neemleaf extract treatment on the surface modification and antimicrobial activity of cotton fabric. Appl. Surf. Sci. 2008, 254, P. 2472…2478.

28. *Xue C.H., Wang R.L., Zhang J.* Growth of ZnO nanorod forests and characterization of ZnO coated nylonfibers. Mater. Lett. 2010, 64, P. 327…330.

29. *Liu J.Y., Cheng K.B., Hwang J.F.* Study on the electrical and surface properties of polyester, polypropylene, and polyamide 6 using pen-type RF plasma treatment. J. Ind. Text. 2011, 41, P. 123…141.

30. *Hegemann D., Amberg M., Ritter A.* Recent developments in Ag metallised textiles using plasma sputtering. Mater. Technol. 2009, 24, P. 41…45.

31. *Kelly P.J., Arnell R.D.* Magnetron Sputtering: A Review of recent developments and applications. Vacuum. 2000, 56, P. 159…172.

32. *Yuan X., Wei Q., Chen D.* Electrical and optical properties of polyester fabric coated with Ag/TiO2 composite films by magnetron sputtering. Text. Res. J. 2016, 86, P. 887…894.

33. *Chen Y., Hsu C., He J.* Antibacterial silver coating on poly(ethylene tterephthalate) fabric by using high power impulse magnetron sputtering. Surf. Coat. Technol. 2013, 232, P. 868…875.

34. *Baghriche O., Kiwi J., Pulgarin C.* Antibacterial Ag-ZrN surfaces promoted by subnanometric Zr N-clusters deposited by reactive pulsed magnetron sputtering. J. Photochem. Photobiol. A Chem. 2012, 229, P. 39…45.

35. *Shahidi S., Ghoranneviss M.* Plasma sputtering for fabrication of antibacterial and ultraviolet protective fabric. Cloth. Text. Res. J. 2015, 34, P. 37…47.

36. *Wu Y., Zhang L., Min G.* Surface functionalization of nanostructured LaB6-coated poly trilobal fabric by magnetron sputtering. Appl. Surf. Sci. 2016, 384, P. 413…418.

37. *Depla D., Segers S., Leroy W.* Smart textiles: An explorative study of the use of magnetron sputter deposition. Text. Res. J. 2011, 81, P. 1808…1817.

38. *Yip J., Jiang S., Wong C.* Characterization of metallic textiles deposited by magnetron sputtering and traditional metallic treatments. Surf. Coat. Technol. 2009, 204, P. 380…385.

39. *Sanjines R., Ruales C., Castro C.* Antimicrobial Cu-functionalized surfaces prepared by bipolar asymmetric DC-pulsed magnetron sputtering (DCP). J. Photochem. Photobiol. A Chem. 2011, 220, P. 70…76.

40. *Hegemann D., Hossain M.M., Balazs D.J.* Nanostructured plasma coatings to obtain multifunctional textile surfaces. Prog. Org. Coat. 2007, 58, P. 237…240.

41. *Zhang H., Zhang H.* Silver plating on hollow glass microsphere and coating finishing of PET/cotton fabric. J. Ind. Text. 2013, 42, P. 283…296.

42. *Lai K., Sun R.J., Chen M.Y.* Electromagnetic shielding effectiveness of fabrics with metallized polyester filaments. Text. Res. J. 2007, 77, P. 242…246.

43. *Weickmann H., Tiller J.C., Thomann R.* Metallized organoclays as new intermediates for aqueous nanohybrid dispersions, nanohybrid catalysts and antimicrobial polymer hybrid nanocomposites. Macromol. Mater. Eng. 2005, 290, P. 875…883.

44. *Qiao Hu, Jie Wang, Yuehui Lu etc*. Sputtering-Deposited Thin Films on Textiles for Solar and Heat Managements: A Mini-Review // Physica Status Solidi. A. 2022. V. 219, № 3. P. 2100572.

45. *Wang W., Wen H., Huan X. etc.* Sol. RRL 2020, 4, 2000055.

46. *Pakdel E., Naebe M., Sun L., Wang X.* ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 13039.

47. *Miao D., Jiang S., Liu J. etc.* Sci. Mater. Electron. 2017, 28, 9852.

48. *Wong A., Daoud W.A., Liang H.H., Szeto Y.S.* Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2015, 134, 425.

49. *Miao D., Li A., Jiang S., Shang S.* Ceram. Int. 2015, 41, 6312.

50. *Wang Y.P., Lu J.G., Bie X. etc.* Appl. Surf. Sci. 2011, 257, 5966.

51. *Jiang S., Miao D., Yang G. etc.* Sci. Mater. Electron. 2015, 26, 3364.

52. *Miao D., Zhao H., Peng Q. etc.* Ceram. Int. 2015, 41, 1595.

53. *Miao D., Jiang S., Zhao H. etc.* Sci. Mater. Electron. 2015, 26, 1198.

R E F E R E N C E S

1. *Mamay Daget T., Birlie Kassie B., Tadesse Abate M. etc.* Eco-friendly and bio-based approaches for flame-retardant functionalization of textile materials: a review // Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. 63 (14), P. 1887…1916.

2. *Chanchal Kumar Kundu, Zhiwei Li, Lei Song, Yuan Hu*. An overview of fire retardant treatments for synthetic textiles: From traditional approaches to recent applications // European Polymer Journal. 2020. Vol. 137. P. 109911.

3. *Lazar S.T., Kolibaba T.J. & Grunlan J.C.* Flame-retardant surface treatments // Nat Rev Mater. 2020. 5, P. 259…275.

4. *Kiselev A.M., Rumyantsev E.V., Odintsova O.I., Rumyantseva V.E.* Modern technologies for obtaining textile materials with special properties and their fields of application // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 2 (398). P. 121…133.

5. *Ulieva S.N., Nikiforov A.L., Rumyantseva V.E. etc.* Protection of cellulose materials from exposure to high temperatures and open flame // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024. No. 2 (410). P. 207…212.

6. *Spiridonova V.G., Sorokin D.V., Nikiforov A.L., Tsirkina O.G.* Substantiation of current approaches to assessing the fire-hazardous properties of textile materials and methods of fire protection of fabrics of various functional purposes // Modern problems of civil protection. 2023. №2 (47). P. 125…132.

7. *Syrbu S.A., Tsirkina O.G., Salikhova A.Kh. etc.* Problematic Issues of Giving Special Protective Properties to Textile Materials // Modern Problems of Civil Protection. 2023. № 2 (47). P. 133…140.

8. *Nikiforov A.L., Legkova I.A.* A new approach to fire protection of textile materials, wood and its derivatives // Modern fire-safe materials and technologies. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia, 2024. P. 281…286.

9. *Radetić M., Marković D.* A review on the role of plasma technology in the nano-finishing of textile materials with metal and metal oxide nanoparticles // Plasma Processes Polym. 2022; 19: e2100197.

10. *Jang HJ, Jung EY, Parsons T, Tae H-S, Park C-S.* A review of plasma synthesis methods for polymer films and nanoparticles under atmospheric pressure conditions. Polymers. 2021; 13(14): 2267.

11. *Zill A., Oliveira F.R., Souto A.P.* Plasma treatment in textile industry // Plasma Processes and Polymers. 2014. 12 (2), P. 98…131.

12. *Gorberg B.L., Titov V.A.* Ion-plasma and plasma-chemical processes in the production of new materials // Fire and Emergency Safety. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia, 2019. P. 4…7.

13. *Titov V.A., Uleva S.N., Nikiforov A.L., Bausov A.M.* Using low-temperature plasma to impress fire-resistant properties to polymeric materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025. No. 2(416). P. 56...65.

14. *Lipin Yu.V., Rogachev A.V., Kharitonov V.V.* Vacuum Metallization of Polymer Materials. Leningrad: Khimiya, 1987. 152 p.

15. *Tan X-Q, Liu J-Y, Niu J-R, Liu J-Y, Tian J-Y.* Recent Progress in Magnetron Sputtering Technology Used on Fabrics // Materials. 2018; 11(10): 1953.

16. *Kosari Mehr A., Kosari Mehr A.* Magnetron sputtering issues concerning growth of magnetic films: a technical approach to background, solutions, and outlook. Appl. Phys. A 129, 662 (2023).

17. *Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V., etc.* Modification of textile materials by the deposition of nanocoatings by magnetron ion-plasma sputtering // Russian Journal of General Chemistry. 2011. T. 55, № 3. C. 7…13.

18. *Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V. etc.* Modification of textile materials by the deposition of nanocoatings by magnetron ion-plasma sputtering // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V. 83, № 1. P. 157…163.

19. *Latushkina S.D., Posylkina O.I., Artemchik A.G.* Research of the Features of Metal Coatings Formation by Magnetron Sputtering on Fire-Resistant Fabric Ma-

terials // Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. Vol. 5, № 4. 2021. P. 418…424.

20. Patent 2398045. Method of modifying the surface of a textile material.

21. *Kelly P.J., Arnell R.D.* Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications // Vacuum. 2000. V. 56. P. 159…172.

22. *Lomov S.V., Wicks S., Gorbatrkh L.* Compressibility of nanofibre-grafted alumina fabric andyarns: Aligned carbon nanotube forests. Compos. Sci. Technol. 2014, 90, P. 57…66.

23. *Lu Y.* Electroless copper plating on 3-mercaptopropyltriethoxysilane modified PET fabric challenged by ultrasonic washing. Appl. Surf. Sci. 2009, 255, P. 8430…8434.

24. *Choi K.K., Lee J.Y., Lee W.B.* Chemical vapor deposition carbon film as a capping layer in 4H-SiC based mosfets. J. Nanosci. Nanotechnol. 2018, 18, P. 5868…5875.

25. *Pan C., Shen L., Shang S.* Preparation of superhydrophobic and UV blocking cotton fabric via solgel method and self-assembly. Appl. Surf. Sci. 2012, 259, P. 110…117.

26. *Ellmer K.* Magnetron sputtering of transparent conductive zinc oxide: Relation between the sputtering parameters and the electronic properties. J. Phys. D Appl. Phys. 2000, 33, P. 17…32.

27. *Vaideki K., Jayakumar S., Rajendran R.* Investigation on the effect of RF air plasma and neemleaf extract treatment on the surface modification and antimicrobial activity of cotton fabric. Appl. Surf. Sci. 2008, 254, P. 2472…2478.

28. *Xue C.H., Wang R.L., Zhang J.* Growth of ZnO nanorod forests and characterization of ZnO coated nylonfibers. Mater. Lett. 2010, 64, P. 327…330.

29. *Liu J.Y., Cheng K.B., Hwang J.F.* Study on the electrical and surface properties of polyester, polypropylene, and polyamide 6 using pen-type RF plasma treatment. J. Ind. Text. 2011, 41, P. 123…141.

30. *Hegemann D., Amberg M., Ritter A.* Recent developments in Ag metallised textiles using plasma sputtering. Mater. Technol. 2009, 24, P. 41…45.

31. *Kelly P.J., Arnell R.D.* Magnetron Sputtering: A Review of recent developments and applications. Vacuum. 2000, 56, P. 159…172.

32. *Yuan X., Wei Q., Chen D.* Electrical and optical properties of polyester fabric coated with Ag/TiO2 composite films by magnetron sputtering. Text. Res. J. 2016, 86, P. 887…894.

33. *Chen Y., Hsu C., He J.* Antibacterial silver coating on poly(ethylene tterephthalate) fabric by using high power impulse magnetron sputtering. Surf. Coat. Technol. 2013, 232, P. 868…875.

34. *Baghriche O., Kiwi J., Pulgarin C.* Antibacterial Ag-ZrN surfaces promoted by subnanometric Zr N-clusters deposited by reactive pulsed magnetron sputtering. J. Photochem. Photobiol. A Chem. 2012, 229, P. 39…45.

35. *Shahidi S., Ghoranneviss M.* Plasma sputtering for fabrication of antibacterial and ultraviolet protective fabric. Cloth. Text. Res. J. 2015, 34, P. 37…47.

36. *Wu Y., Zhang L., Min G.* Surface functionalization of nanostructured LaB6-coated poly trilobal fabric by magnetron sputtering. Appl. Surf. Sci. 2016, 384, P. 413…418.

37. *Depla D., Segers S., Leroy W.* Smart textiles: An explorative study of the use of magnetron sputter deposition. Text. Res. J. 2011, 81, P. 1808…1817.

38. *Yip J., Jiang S., Wong C.* Characterization of metallic textiles deposited by magnetron sputtering and traditional metallic treatments. Surf. Coat. Technol. 2009, 204, P. 380…385.

39. *Sanjines R., Ruales C., Castro C.* Antimicrobial Cu-functionalized surfaces prepared by bipolar asymmetric DC-pulsed magnetron sputtering (DCP). J. Photochem. Photobiol. A Chem. 2011, 220, P. 70…76.

40. *Hegemann D., Hossain M.M., Balazs D.J.* Nanostructured plasma coatings to obtain multifunctional textile surfaces. Prog. Org. Coat. 2007, 58, P. 237…240.

41. *Zhang H., Zhang H.* Silver plating on hollow glass microsphere and coating finishing of PET/cotton fabric. J. Ind. Text. 2013, 42, P. 283…296.

42. *Lai K., Sun R.J., Chen M.Y.* Electromagnetic shielding effectiveness of fabrics with metallized polyester filaments. Text. Res. J. 2007, 77, P. 242…246.

43. *Weickmann H., Tiller J.C., Thomann R.* Metallized organoclays as new intermediates for aqueous nanohybrid dispersions, nanohybrid catalysts and antimicrobial polymer hybrid nanocomposites. Macromol. Mater. Eng. 2005, 290, P. 875…883.

44. *Qiao Hu, Jie Wang, Yuehui Lu etc.* Sputtering-Deposited Thin Films on Textiles for Solar and Heat Managements: A Mini-Review // Physica Status Solidi. A. 2022. V. 219, № 3 P. 2100572.

45. *Wang W., Wen H., Huan X. etc.* Sol. RRL 2020, 4, 2000055.

46. *Pakdel E., Naebe M., Sun L., Wang X.* ACS Appl. Mater. Interfaces 2019, 11, 13039.

47. *Miao D., Jiang S., Liu J. etc.* Sci. Mater. Electron. 2017, 28, 9852.

48. *Wong A., Daoud W.A., Liang H.H., Szeto Y.S.* Sol. Energy Mater. Sol.Cells 2015, 134, 425.

49. *Miao D., Li A., Jiang S., Shang S.* Ceram. Int. 2015, 41, 6312.

50. *Wang Y.P., Lu J.G., Bie X. etc.* Appl. Surf. Sci. 2011, 257, 5966.

51. *Jiang S., Miao D., Yang G. etc.* Sci. Mater. Electron. 2015, 26, 3364.

52. *Miao D., Zhao H., Peng Q. etc.* Ceram. Int. 2015, 41, 1595.

53. *Miao D., Jiang S., Zhao H. etc.* Sci. Mater. Electron. 2015, 26, 1198.

Рекомендована кафедрой государственного надзора и экспертизы пожаров (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Поступила 07.07.25.