

УДК 621.763

О.Г. Девойно<sup>1</sup>, А.П. Пилипчук<sup>2</sup>**ОСОБЕННОСТИ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ПАРААРАМИДНУЮ ТКАНЬ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-41-46

*Выполнен анализ способов повышения баллистической стойкости параарамидных тканей. Отмечено определяющее значение трения между нитями баллистической ткани, которое способствует деформации пули и ее остановке. Обоснована целесообразность использования газопламенного напыления для создания покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) на поверхности параарамидных тканей. Осуществлен выбор материала и оборудования для газотермического напыления. Определены технологические параметры газотермического напыления СВМПЭ на поверхность параарамидных тканей. Показано, что применение газопламенного напыления позволяет создавать поверхностные слои произвольной формы.*

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), газопламенное напыление, покрытие, параарамидная ткань, технологические параметры.

O.G. Devoino<sup>1</sup>, A.P. Pilipchuk<sup>2</sup>**SPECIFIC FEATURES OF GAS-FLAME SPRAYING OF ULTRA-HIGH MOLECULAR POLYETHYLENE ON PARA-AMID FABRIC**

*The analysis of methods for increasing the ballistic resistance of para-aramid fabrics has been carried out. The defining value of friction between the threads of ballistic fabric, which contributes to the deformation of the bullet and its stopping, is noted. The expediency of using gas-flame spraying to create coatings from UHMWPE on the surface of para-aramid fabrics has been substantiated. The choice of material and equipment for gas-thermal spraying has been made. The technological parameters of gas-thermal spraying of UHMWPE on the surface of para-aramid fabrics have been determined. It is shown that the use of gas-flame spraying makes it possible to create surface layers of arbitrary shape.*

**Keywords:** ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), gas-thermal spraying, coating, para-aramid fabric, technological parameters.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет [Belarusian National Technical University]; e-mail: polytech@bntu.by

<sup>2</sup>Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь» [The Educational Establishment «Military Academy of the Republic of Belarus»]; e-mail: varb@mod.mil.by

**Введение**

В настоящее время для защиты военной техники и личного состава войск широко применяется текстильная броня, представляющая собой защитную структуру из слоев ткани на основе волокон из ароматических полиамидов или сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) [1, 2]. Для текстильной брони наряду с физическими свойствами волокон ткани важное значение в процессе замедления снаряда имеет трение между волокнами и слоями ткани при взаимодействии с поражающим элементом. В работе [3] отмечено, что в процессе этого взаимодействия возникают три силы трения – между поражающим элементом и тканью, между тканями в системе и между нитями, при этом определя-

ющее значение имеет трение между нитями (трение пряжи). Трение между волокнами способствует отслоению оболочки и деформации пули и в конечном счете ее остановке.

**Материалы и методы**

На основании данного анализа сформулирована гипотеза о перспективности поверхностной обработки параарамидных тканей, что позволит управлять процессом сухого трения между нитями и повысить защитные свойства тканевых структур [4–6]. Реализация данного подхода позволит создавать защитные структуры, в наружных слоях которых будет преобладать динамическая фаза при трении тканей, а в тыльных слоях – фрикционная, низкоскоростная, что снижает

прогиб тыльной стороны защитного пакета [6]. Примером является разработанный способ обработки ткани марки Twaron погружением в высокомолекулярный предварительно вулканизированный латекс с последующей сушкой в течение ~10 ч при комнатной температуре [3]. В работе [7] для модифицирования поверхности ткани марки Kevlar использован этиленакрилатный эластомер Vamac®, при этом детали процесса нанесения не раскрываются. В результате отмечено, что модифицированные ткани дают наибольшую энергию вытягивания среди всех исследованных образцов. В работе [8] представлены экспериментальные исследования влияния типа волокна, структуры ткани, ориентации слоев ткани и толщины на характеристики баллистической стойкости композитного ламината из арамидной ткани и СВМПЭ. Ламинат изготавливают с помощью процесса автоклавного отверждения (рис. 1). В результате серии баллистических испытаний показано, что однонаправленные композитные ламинаты демонстрируют более высокие баллистическую предельную скорость и поглощение энергии на единицу массы по сравнению с другими ламинатами.

Компания «Гейджин Арамид» (Teijin Aramid) в 2017 г. выпустила арамидную ткань марки Twaron ComForte SB3, которая является одним из самых легких материалов для изготовления индивидуальной бронезащиты. Эта ткань обеспечивает эффективную защиту от экспансивных пуль с высокой энергией, а также низкую запреградную травму и повышенный комфорт. Новая ткань соответствует жестким требованиям для уровней защиты II и IIIA по стандарту NIJ 0101.06 [9]. Данная разработка основана на использовании технологии ламинированной ткани (Laminated Fab-



Рис. 1. Этап формирования ламината из арамидной ткани и СВМПЭ [6]

ric Technology – LFT), которая позволяет формировать ламинат (рис. 2), состоящий из слоев ткани, зажатых между слоями ультратонкой полиэтиленовой пленки [10].

Рассмотренные способы позволяют получать на поверхности ткани сплошные слои покрытий с использованием сложного технологического оборудования. Альтернативным способом нанесения покрытий из СВМПЭ в настоящее время является газопламенное напыление [11–14]. Данный способ отличается простотой и универсальностью применяемого оборудования и позволяет создавать покрытия из широкой номенклатуры материалов (металлы, полимеры, керамика). Так, в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН установлено влияние наноразмерных керамических наполнителей на физико-механические свойства покрытий из СВМПЭ [15]. В работе [16] представлены результаты исследований физико-механических свойств композиционных газопламенных покрытий на основе СВМПЭ с добавлением карбида кремния. Напыление покрытий на стальные подложки проводили газопламенным методом. Показано, что данное композиционное покрытие на основе СВМПЭ характеризуется значительной прочностью при ударе. Выполненный анализ подтверждает целесообразность использования газопламенного напыления для создания покрытий из СВМПЭ на поверхности параарамидных тканей и продолжения исследований особенностей этого процесса.

### Результаты и обсуждение

Выполнены работы по исследованию закономерностей формирования слоев на основе арамидных тканей и СВМПЭ методами газопламенного напыления. На основе анализа

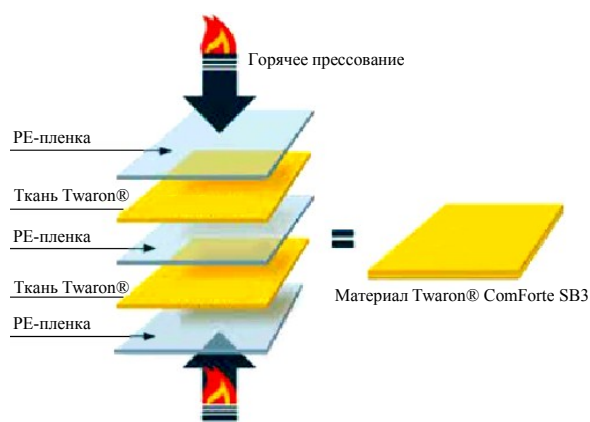


Рис. 2. Формирование ламината на основе технологии ламинированной ткани [8]

Таблица 1

Основные характеристики СВМПЭ марки GUR 4120 по стандарту ISO 527-1/-2 (<http://tools.celanese.com/>)

Свойства	Значения свойств
Модуль упругости при растяжении, МПа	680
Напряжение в точке текучести, МПа	20
Удлинение в точке текучести, %	13
Номинальное удлинение при разрыве, %	>50

Таблица 2

Основные технические характеристики установки ТРУ-БПИ

Основные параметры	Значения параметров
Полезный объем питателя, л	0,7
Размер напыляемых частиц, мкм	30–150
Максимальная производительность, кг/ч: – на пропан-бутане – на ацетилене	6 9
Расход газов, м <sup>3</sup> /ч: – кислород – пропан-бутан – обдувающий газ	1,0–2,5 0,5–1,0 0,5–0,6
Масса установки, кг: – термораспылительного пистолета – пульта управления	1,5 6,5
Коэффициент использования порошкового материала, %	До 95

научно-технических литературных источников выбран СВМПЭ марки GUR 4120 (табл. 1).

Данный материал с молекулярной массой  $4,4 \cdot 10^6$  является базовой маркой СВМПЭ для прессования. В качестве основы использована ткань Twaron [2] полотняного плетения. Для газопламенного напыления СВМПЭ выбрана установка ТРУ-БПИ (рис. 3), которая предназначена для напыления широкой номенклатуры порошковых материалов (табл. 2).

Установка состоит из термораспылительной горелки пистолетного типа и пульта управления, снабженного контролирующими

приборами, вентилями для регулировки рабочих газов, системой автоматики и газораспределения. Отличительной особенностью конструкции горелки является использование обдувающего газа для устранения непосредственного контакта порошкового материала с открытым пламенем, что позволяет избежать перегрева и выгорания материала. Газопламенное напыление полимера на поверхность ткани выполнено с использованием смеси пропан-бутан+кислород. В процессе напыления контроль температуры осуществляли при помощи инфракрасного



Рис. 3. Установка ТРУ-БПИ



Рис. 4. Газопламенное напыление СВМПЭ



Рис. 5. Выгорание поверхности ткани



Рис. 6. Примеры заданного профиля СВМПЭ

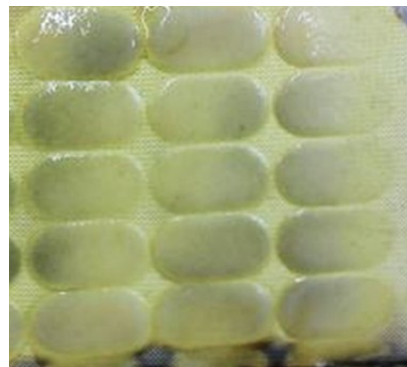


Рис. 7. Дискретное покрытие СВМПЭ

термометра «НИМБУС-530» (рис. 4), что позволило поддерживать параметры процесса напыления, обеспечивающие отсутствие выгорания поверхности ткани (рис. 5).

Определены основные технологические параметры процесса: давление кислорода 0,2 МПа, давление горючего газа 0,05 МПа, давление сжатого воздуха для обдува 0,22 МПа, дистанция напыления 300–350 мм, температура поверхности 150–180 °С. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, имеющих целью определение параметров газопламенного напыления СВМПЭ, обеспечивающих формирование требуемой формы поверхности. Применение газопламенного напыления позволяет создавать поверхностные слои произвольной формы (рис. 6 и 7) с использованием соответствующих металлических масок. По результатам исследований определены параметры технологического процесса формирования дискретных слоев, которые имеют области динамического и фрикционного взаимодействия нитей.

Одним из преимуществ газопламенного напыления является возможность формирования требуемого уровня свойств поверхностного слоя в результате создания новых составов для напыления на основе стандартных материалов, а также за счет включения конструктивных элементов из специальных материалов или сплавов. Данная особенность использована при формировании структур с углепластиковыми (ВКУ-25) и стальными элементами (рис. 8, а), при формировании сетчатой структуры (рис. 8, б).

Возможной областью применения предлагаемого способа напыления может быть создание многослойных покрытий из СВМПЭ на поверхности параарамидных тканей [17] и защитных структур на основе максимального использования энергетической поглотительной способности разрушаемого материала [18].

### Заключения

Выполнен анализ способов повышения баллистической стойкости арамидных

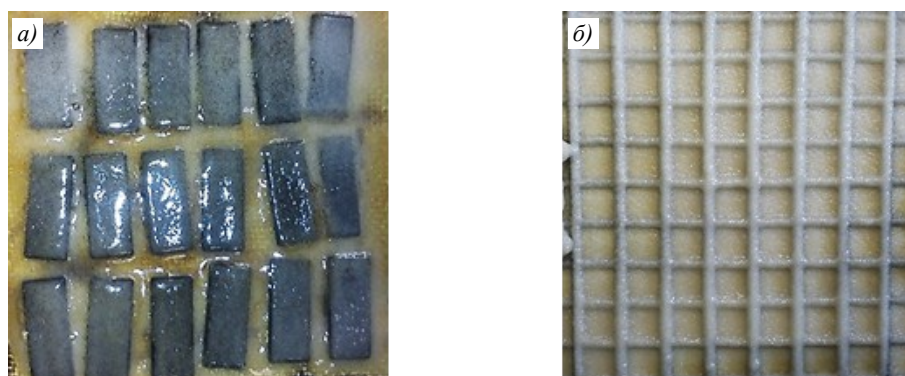


Рис. 8. Структура со стальными элементами (а) и с сеткой (б)

тканей. Отмечено определяющее значение трения между нитями баллистической ткани, которое способствует деформации пули и ее остановке. Обоснована целесообразность использования газопламенного напыления для создания покрытий из СВМПЭ на поверхности параарамидных тканей.

Осуществлен выбор материала и оборудования для газопламенного напыления. Определены технологические параметры газопла-

менного напыления СВМПЭ на поверхность параарамидных тканей: давление кислорода 0,2 МПа, давление горючего газа 0,05 МПа, давление сжатого воздуха для обдува 0,22 МПа, дистанция напыления 300–350 мм, температура поверхности 150–180 °С.

Установлено, что применение газопламенного напыления позволяет создавать поверхностные слои произвольной формы, а также формировать комбинированные структуры.

#### Библиографический список

1. Легкие баллистические материалы / под ред. А. Бхатнагара. М.: Техносфера, 2011. 392 с.
2. Беспалов И.А., Алексеев М.О., Купрюнин Д.Г. Легкие защитные структуры. М.: РадиоСофт, 2017. С. 368.
3. Ahmad M.R., Ahmad W.Y.W., Samsuri A., Salleh J., Abidin M.H. Blunt trauma performance of fabric systems utilizing natural rubber coated high strength fabrics // Proceeding of the International Conference on Advancement of Materials and Nanotechnology. 2010. Vol. 1217. No. 1. P. 328–334. DOI: 10.1063/1.3377838.
4. Сильников М.В., Сильников Н.М., Спивак А.И., Барков Д.Д. Разработка пулестойкого материала из баллистической ткани за счет многоступенчатой обработки химическими составами // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2020. №3–4 (141–142). С. 135–139.
5. Васильев Н.Н., Спивак А.И., Барков Д.Д. К вопросу повышения защитных свойств тканевых защитных структур // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2019. №3–4 (129–130). С. 130–133.
6. Игнатова А.В., Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Шаблей А.А. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика. 2017. №4. С. 121–137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.
7. Gawandi A. Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric // Journal of Materials Science. 2011. Vol. 46. No. 1. P. 77–89. DOI: 10.1007/s10853-010-4819-3.
8. Karahan M., Jabbar A., Karahan N. Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2015. Vol. 34 (1). P. 37–48.
9. Teijin Aramid introduces Twaron ComForte SB3, light weight ballistic fabric for body armor. URL: <https://www.tejinaramid.com/en/teijin-aramid-introduces-twaron-comforte-sb3-light-weight-ballistic-fabric-for-body-armor> (дата обращения: 18.06.2020).
10. Ballistic materials handbook. URL: [https://www.tejinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ\\_Handbook\\_Ballistics\\_2019\\_DEF.pdf](https://www.tejinaramid.com/wp-content/uploads/2019/11/TEIJ_Handbook_Ballistics_2019_DEF.pdf) (дата обращения: 18.06.2020).
11. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. 2003. №3. С. 18–21.
12. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 4) // Полимерные материалы. 2003. №7. С. 16–19.

13. Еренков О.Ю., Ковальчук С.А. Инновационные технологии полимерных композиционных материалов. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2016. 187 с.
14. Адашкевич С.В., Бакаев А.Г., Жигулин Д.В. Свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Приборостроение-2016: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 23–25 нояб. 2016 г.). Минск: Белорусск. нац. техн. ун-т, 2016. С. 246–247.
15. Селютин Г.Е., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н. и др. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. №18. С. 375–388.
16. Белоцерковский М.А., Дубкова В.И., Таран И.И. Получение композиционных покрытий на основе полиэтилена газопламенным методом // Актуальные вопросы машиноведения. 2015. Вып. 4. С. 327–330.
17. Девойно О.Г., Володько А.С., Пилипчук А.П. Формирование многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параарамидных тканей методом газопламенного напыления // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. Минск: БНТУ, 2020. Вып. 32. С. 13–18.
18. Cherkaev A. Principles of Optimization of Structures Against an Impact // Journal of Physics: Conference Series. 2011. Vol. 319. DOI: 10.1088/1742-6596/319/1/012021.