

14. Владимиров, Б. В., Микродуговое оксидирование магниевых сплавов (обзор) / Б. В. Владимиров, Б. Л. Крит, В. Б. Людин, Н. В. Морозова, А. Д. Российская, И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд / ЭОМ. 2014. №3. С.1–38.

15. Каданер, Л. И. Равномерность гальванических покрытий / Л. И. Каданер. – Харьков : Изд-во Харьк. ун-та, 1960. – 414 с.

УДК 621.793

Девойно О.Г.¹, Володько А.С.¹, Пилипчук А.П.², Девойно Д.Г.²,

Мишин А.А.², Исак В.Г.²

**ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ
ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ
ПАРААРАМИДНЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ГАЗОПЛАМЕННОГО
НАПЫЛЕНИЯ**

1. Белорусский национальный технический университет

2. Военная академия Республики Беларусь

Минск, Беларусь

Разработана технология формирования многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параарамидных тканей методом газопламенного напыления. Данная технология позволяет получать материалы с удельной прочностью на уровне конструкционных сталей. Представлены результаты испытаний полученных материалов.

Постановка задачи

Перспективным материалом для создания покрытий в настоящее время является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, UHMWPE – Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene). Это полимер линейной структуры с очень длинными цепями, не имеющими боковых ответвлений [1, 2]. Ведущими производителями СВМПЭ являются Mitsui Petrochemical Ind., Япония и Ticona Engineering Polymers for Technical Solutions, Германия. Основной особенностью СВМПЭ являются длинные линейные параллельно ориентированные цепочки полиэтилена (рис. 1) со сверхвысокой массой молекул (до 6 млн.) и относительно слабыми связями между (10–20 кДж/моль) [3] по сравнению, например, с тканями Kevlar™, Twaron™, имеющим короткие молекулы и сильные связи между ними. Эта особенность способствует более эффективной передаче и распределению нагрузки на материал, что обеспечивает высокую жесткость и ударопрочность СВМПЭ, превосходящий по данному показателю любой другой термопластичный полиэтилен.

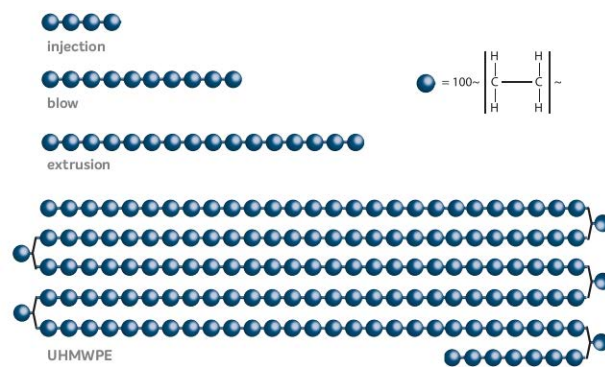


Рис. 1. Длина молекулярной цепи различных полиэтиленов

В линейной структуре СВМПЭ практически не имеется боковых ответвлений и дополнительных двойных связей, не содержатся группы, вступающие в реакцию с агрессивными химическими веществами. Это обеспечивает его нетоксичность, устойчивость к действию большинства химических веществ и ультрафиолетовому излучению. СВМПЭ обладает высокой прочностью, ударной вязкостью в широком диапазоне температур, от -200 до $+100$ °С, очень высокой химической стойкостью к агрессивным средам, высокой светостойкостью, высокими показателями по скольжению, высокой износостойкостью. Специфические свойства СВМПЭ обуславливают и особые области применения – его используют там, где обычные марки полиэтиленов и многих других термопластов не выдерживают жестких условий эксплуатации. СВМПЭ и его композиции используются при получении износостойких и уплотнительных систем, при изготовлении защитных антикоррозионных покрытий горно-обогатительного оборудования, деталей и элементов конструкций, подвергающихся ударной нагрузке, фильтров для пищевой и химической промышленности. Области применения СВМПЭ непрерывно расширяются по мере увеличения его выпуска. В целом СВМПЭ можно определить как конструкционный полимерный материал с уникальными физико-механическими свойствами для разнообразных областей применения, в том числе в экстремальных условиях [4].

Широкому применению СВМПЭ препятствует трудность его переработки вследствие высокой вязкости расплава. Материал не плавится при температуре выше точки плавления его кристаллической фазы (136 °С), а только переходит в вязкоэластичное состояние. Лист из СВМПЭ при температуре выше 150 °С можно сравнить с листом из мягкой резины. Для переработки СВМПЭ в изделия традиционно используется горячее прессование в полуфабрикаты, которые затем подвергаются механической обработке до получения изделия требуемой формы. Прессование в настоящее время остается основным методом переработки СВМПЭ – примерно 60 % всей выпускаемой продукции, методом плунжерной экструзии получают 35 % деталей, червячной экструзия – 4 %, литьем под давлением – 1 %. Таким образом, переработка СВМПЭ в изделие возможна с использованием специализированного оборудования. В результате исследований, посвященных разработке и совершенствованию технологий переработки СВМПЭ, в промышленном масштабе освоены такие способы переработки, как спекание, рэм-экструзия, напыление (горячепламенное, электростатическое) [5], а для получения волокна – гель-формование. Перспективным методом создания градиентных материалов является газотермическое напыление. В настоящее время разработаны технологии нанесения пленочных защитных покрытий из СВМПЭ методом газотермического напыления. Данный метод отличается простотой и универсальностью применяемого оборудования, позволяющий создавать покрытия из широкой номенклатуры материалов (металлы, полимеры, керамика). Так, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН установил влияние нано-размерных керамических наполнителей на фи-

зико-механические свойства покрытий из СВМПЭ [4]. В работе [5] 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. Результаты данных исследований подтверждают возможность использования газопламенного напыления для создания покрытий из СВМПЭ. Представляется целесообразным использовать газопламенное напыление для создания покрытий из СВМПЭ на поверхности из высокопрочных параарамидных тканей Kevlar™, Twaron™. Принимая во внимание отмеченную выше особенность строения выбранных материалов (для СВМПЭ – длинные линейные параллельно ориентированные цепочки и относительно слабыми связями между, для тканей – короткие молекулы и сильные связи между ними) возможно получение бистабильной структуры [6] которые могут быть стабильными даже при частичном разрушении.

Цель исследования:

Целью исследования является разработка технологии формирования многослойных покрытий из СВМПЭ на поверхности из высокопрочных параарамидных тканей методом газопламенного напыления.

Результаты исследований

В научно-исследовательской инновационной лаборатории плазменных и лазерных технологий проводятся работы по исследованию закономерностей формирования слоев на основе арамидных тканей и СВМПЭ методами газопламенного напыления. Для проведения экспериментальных исследований на основе анализа литературных источников выбран СВМПЭ GUR 4120 (таблица 1). Данный материал с молекулярной массой 4,4*10⁶ является базовой маркой СВМПЭ для прессования. В качестве основы использована ткань Twaron саржевого плетения [7] (<http://www.campusplastics.com>).

Таблица 1 – Основные характеристики СВМПЭ GUR 4120

Механические свойства	Значение	Единица	Стандарт
Модуль упругости при растяжении	720	МПа	ISO 527-1/-2
Напряжение в точке текучести	17	МПа	ISO 527-1/-2
Удлинение в точке текучести	20	%	ISO 527-1/-2
Номинальное удлинение при разрыве	>50	%	ISO 527-1/-2
Модуль упругости при ползучести, 1h	460	МПа	ISO 899-1
Модуль упругости при ползучести, 1000h	230	МПа	ISO 899-1

Для газопламенного напыления СВМПЭ выбрана установка ТРУ-БПИ. Данная установка предназначена для напыления широкой номенклатуры порошковых материалов, основные технические характеристики установки ТРУ-БПИ представлены в таблице 2. Установка состоит из пульта управления, снабженного контролирующими приборами, вентилями для регулировки рабочих газов, системой автоматики и газораспределения, термораспылительной горелки пистолетного типа. Отличительной особенностью конструкции горелки является использование обдувающего газа для устранения непосредственного контакта порошкового материала с открытым пламенем, что позволяет избежать перегрева и выгорание материала.

Таблица 2 – Основные технические характеристики установки ТРУ-БПИ

Основные характеристики	Значения параметров
Полезный объем питателя, (л)	0,7
Размер напыляемых частиц (мкм)	30 - 150
Максимальная производительность (кг/час):	6
- на пропан-бутане	
- на ацетилене	9
Расход газов (м ³ /ч)	1,0 - 2,5
а) кислород	
б) пропан-бутан	0,5 - 1,0
в) обдувающий газ	0,5 - 0,6
Масса установки (кг)	1,5
а) термораспылительного пистолета	
б) пульта управления	6,5
в) удлинительной насадки	1,7
Коэффициент использования порошкового материала (%)	до 95
Дистанция напыления (мм)	100 - 200

Основными технологическими операциями формирования многослойных покрытий из СВМПЭ на поверхности из высокопрочных параарамидных тканей являются: подготовка материала для напыления; газопламенное напыление полимера на поверхность ткани (рис. 2), при этом число слоев ткани и полимера определяется требованиями к изделию; выдержка полученного изделия под нагрузкой 10 МПа (прессование) для обеспечения требуемой геометрии (рис. 3).



Рис. 2. Установка газопламенного напыления ТРУ-БПИ



Рис. 3. Установка для выдержки изделия под нагрузкой

Механические свойства полученного материала определялись в ходе испытаний на растяжение по стандартной методике [8] на разрывной машине ИР-5047-50 (рис. 4). Испытываемый образец состоял из 6 слоев СВМПЭ и 5 слоев ткани Twaron, плотность равнялась 0,86 гр/см³, поперечное сечение 90 мм². Испытание было остановлено при достижении нагрузки 9 кН. Анализ образца после испытания (рис. 5) показывает, что произошло разрушение полиэтиленовой матрицы, при этом слои ткани сохранили ра-

ботоспособность. Подобный характер разрушения свойственен материалам с бистабильной структурой [6]. Удельный предел прочности (максимальная длина нити из материала постоянного сечения, которая в однородном гравитационном поле может висеть вертикально вниз, без обрыва под своим собственным весом) полученного материала [9, стр. 50] составил 11,6 км, что соответствует конструкционным сталям [10].



Рис. 4. Испытание на растяжение на разрывной машине ИР-5047-50



Рис. 5. Образец после испытания

Выводы

Разработана технология формирования многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параарамидных тканей методом газотермического напыления.

Представлены результаты испытаний полученного материала. Установлено, что удельная прочность материала составила 11,6 км, что соответствует конструкционным сталям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашпина, О. Сверхвысокомолекулярный проект // The Chemical Journal Сентябрь 2006 – С. 30–33.
2. Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) www.braskem.com/usa.
3. Свойства композита на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Адашкевич [и др.] // 9-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение – 2016» Секция 3. Физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения С. 246–247.
4. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г. Е. Селютин [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития, 2010, №18. – С. 375–388.
5. Получение композиционных покрытий на основе полиэтилена газопламенным методом / М. А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. 2015. выпуск 4 – С. 327–330.
6. Cherkaev, A. Principles of Optimization of Structures Against an Impact // Journal of Physics: Conference Series 319. – 2011. / doi: 10.1088/1742-6596/319/1/012021.
7. Беспалов, И. А. Легкие защитные структуры. / И. А. Беспалов, М. О. Алексеев, Д. Г. Купрюнин. – М.: РадиоСофт, 2017. – С. 368.
8. Опыт исследования механических свойств высокопрочного волокна на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Степашкин А. А. [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – № 6, 2013 г. С. 106–169.

10. Биргер, И. А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.

11. Расхожев, К. Т. Технологичность и сравнительная удельная прочность конструкционных материалов / К. Т. Расхожев, М. А. Жукова, Е. З. Степанов // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием / ФГАОУВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (Санкт-Петербург) 2015 г. С. 153-155

УДК 621.791.72

Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И.

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И СВОЙСТВА 2D МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Раскрыт механизм формирования 2D мультимодальных покрытий из разнородных материалов лазерной наплавкой. Установлена периодичность изменения микротвердости в поперечном сечении 2D мультимодального покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы.

В современных машинах и механизмах практически повсеместно используются высокие скорости и нагрузки, что значительно повышает риск преждевременного износа деталей и поломки узлов. По этой причине постоянно растет потребность в высокоизносостойких материалах. В тоже время, пределы упрочнения однокомпонентных материалов уже практически близки к исчерпанию. Поэтому возрастает роль композиционных материалов, в том числе композиционных упрочняющих покрытий, позволяющих значительно увеличить износостойкость. Среди композиционных покрытий в последнее время исследователи начали выделять такой их вид, как мультимодальные покрытия, которые показывают особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Модой считается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, вида материала), которое встречается наиболее часто. Если имеют место несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, покрытие считается мультимодальным (бимодальным).

Поперечные сечения валиков, наносимых лазерной наплавкой невелики и сравнимы с размером лазерного пятна на поверхности наплавки, тепловой вклад процесса лазерной наплавки в прилегающие области покрытия при этом минимален. Важно также то, что при лазерной наплавке перемешивание материала наплавляемых валиков с материалом подложки и с материалом соседних валиков поддерживается достаточно низким, наплавленные валики имеют прочное сцепление между собой и с подложкой. В то же время, диапазон технологических параметров лазерной наплавки достаточно велик, что дает возможность выбирать параметры нанесения покрытия в широких пределах [3, 4].

Упомянутые свойства лазерной наплавки определяют возможность ее использования для создания мультимодальных покрытий, модами в которых будут являться разнородные материалы. При этом существует реальная возможность заранее задавать пространственное положение мод из различных материалов в объеме мультимодального покрытия и, соответственно придавать покрытиям заранее заданные свойства. Естественно, для нанесения таких покрытий требуется использовать координат-