

УДК 678

Влияние типа армирующего наполнителя и состава матрицы на свойства композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Никитина Ирина Владимировна^{1(*)}

irina.nikitina.2001@mail.ru

Солохова Кира Сергеевна²

kirapaninamgtu@mail.ru

SPIN-код: 9284-4110

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² АО «НИИГрафит», Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с полиуретановым связующим. Изучено влияние двух типов армирующей структуры — послойного армирования волокном и тканью полотняного переплетения, а также концентрации полимерной матрицы на физико-механические характеристики композитов. Проведены комплексные механические испытания и микроструктурные исследования для установления количественных зависимостей между составом композиции и ее свойствами.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиуретановый каучук, архитектура армирования

The effect of the type of reinforcing filler and the composition of the matrix on the properties of composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene

Nikitina Irina Vladimirovna^{1(*)}

irina.nikitina.2001@mail.ru

Solokhova Kira Sergeevna²

kirapaninamgtu@mail.ru

SPIN-code: 9284-4110

¹ BMSTU, Moscow, Russia² JSC "Research Institute of Structural Materials based on Graphite" NIIgrafit", Moscow, Russia

Abstract. The paper presents the results of a study on polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) with a polyurethane binder. The influence of two types of reinforcing structures — layer-by-layer fiber reinforcement and plain-weave fabric reinforcement — as well as the concentration of the polymer matrix on the physical and mechanical properties of the composites has been studied. Comprehensive mechanical tests and microstructural studies were carried out to establish quantitative relationships between the composition of the composite and its properties.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polyurethane binder, reinforcement architecture

Введение. Современные отрасли промышленности предъявляют все более высокие требования к конструкционным материалам, которые должны соче-

тать высокие показатели физико-механических характеристик, минимальный вес и повышенные эксплуатационные свойства [1–3]. Перспективным направлением разработки являются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Высокопрочные высокомодульные волокна СВМПЭ демонстрируют рекордные значения удельной прочности и ударной вязкости, а также исключительную стойкость к абразивному износу и химическим воздействиям [4]. Актуальными являются исследования, направленные на изучение влияния архитектуры армирующего наполнителя и состава полимерной матрицы на структурно-механические характеристики материала с целью максимальной реализации уникального комплекса свойств волокон в композиционном материале [5].

Целью данной работы является выявление закономерностей влияния архитектуры армирующего наполнителя и состава матрицы на физико-механические характеристики композиционных материалов на основе СВМПЭ.

Материалы и методы. Для изготовления экспериментальных образцов использовались следующие материалы:

– волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена в виде комплексной нити производства ООО «Формопласт», г. Санкт-Петербург (ТУ 22.21-006-27408634–2018) (рис. 1, а), характеристики указаны в табл. 1;

– ткань полотняного переплетения из СВМПЭ волокна марки «ПЭ-2» с поверхностной плотностью 80 г/м² (рис. 1, б);

– клей полиуретановый (ПУ) марки «УР-600» (ТУ 2252-021-13238275–01, ООО «НПП Рогнеда») в качестве полиуретанового связующего.

Таблица 1

Упруго-прочностные свойства СВМПЭ волокна

Показатель	Прочность при растяжении σ_b , МПа	Модуль упругости E , ГПа	Относительное удлинение при разрыве ε , %
Значение	2770,7	108,4	3,3

Объектами исследования являлись два типа композиционных материалов на основе СВМПЭ, различающиеся архитектурой армирующего наполнителя. Для получения слоистых композитов первого типа использовался однонаправленный препрег с параллельной укладкой волокон СВМПЭ с полиуретановым связующим; слои препрегов укладывались под углами 0°/90° относительно друг друга, формируя многослойную структуру. Для изготовления композиционных материалов второго типа в качестве армирующего наполнителя использовалась ткань полотняного переплетения в направлении по утку из волокон СВМПЭ, предварительно пропитанная полиуретановым связующим. Оба типа композиционных материалов подвергались отверждению по единому режиму прессования: давление 2 МПа, температура 120 °С, время выдержки 5 минут.

Определение содержания связующего в композиционном материале проводилось согласно ОСТ 92-0903–78. Метод основан на определении потерь массы образца в процессе деструкции связующего при нагревании в азотной кислоте.

Механические испытания по определению упруго-прочностных свойств при растяжении проводились в соответствии с ГОСТ 56785–2015 на универсальной испытательной машине Zwick Roell Z010. Образцы были изготовлены из 5 слоев ткани (ширина $(25 \pm 0,5)$ мм, длина 250–255 мм).

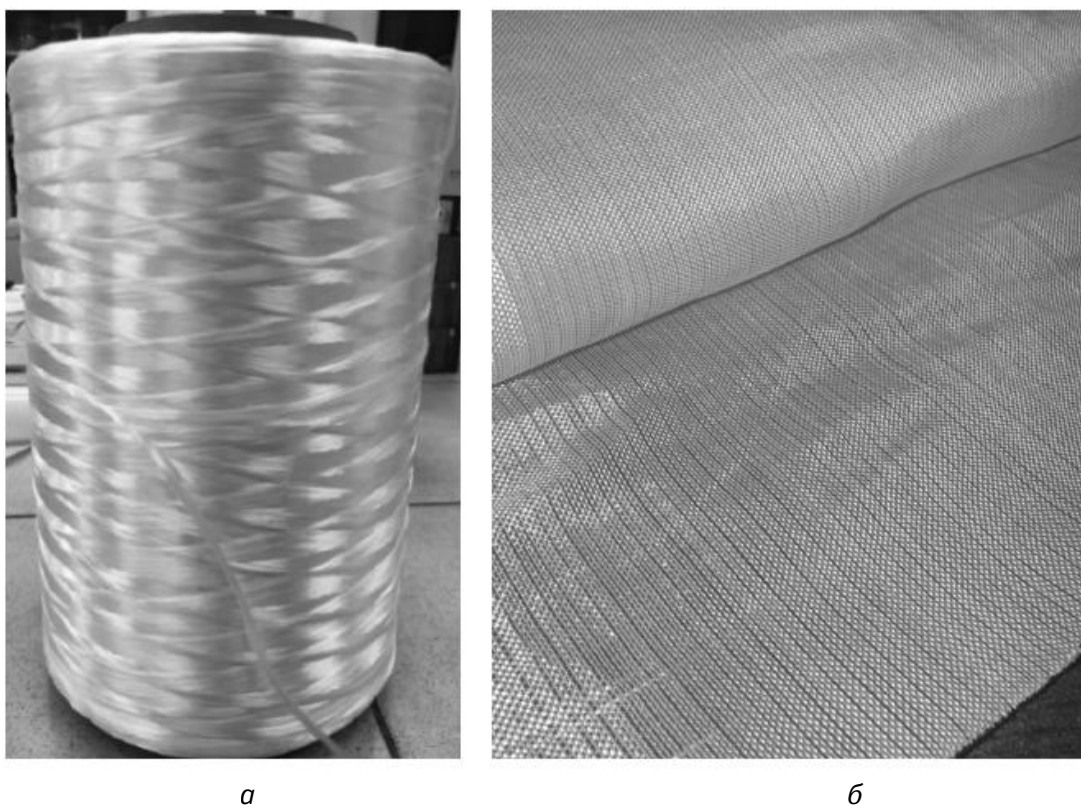


Рис. 1. Используемые материалы:

а — комплексная нить СВМПЭ на катушке; *б* — ткань из СВМПЭ волокна полотняного переплетения

Определение плотности композиционных материалов проводилось согласно ГОСТ 15139–69 по методу градиентной колонки.

Исследование структуры образцов было проведено с использованием сканирующего электронного микроскопа flexSEM 1000 Hitachi HT.

Результаты. На рис. 2 представлены результаты микроструктурного анализа исследуемых композиционных материалов, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

В ходе испытаний были выявлены зависимости физико-механических характеристик образцов от состава матрицы и архитектуры армирующего наполнителя. Составы образцов представлены в табл. 2, результаты испытаний проиллюстрированы графиками (рис. 3, 4).

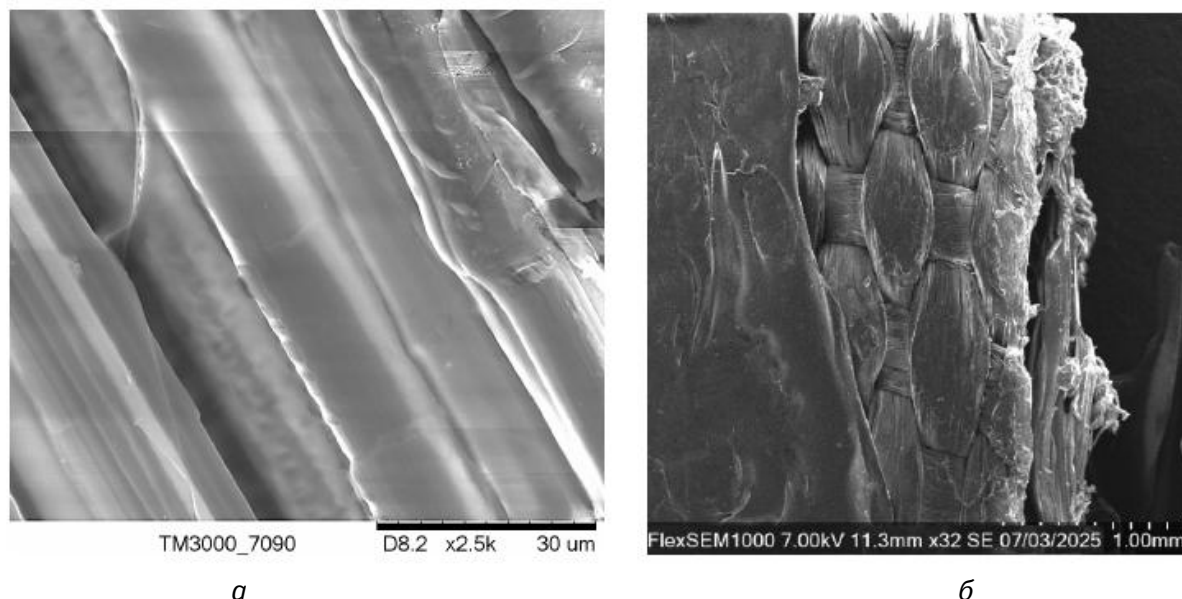


Рис. 2. Изображения микроструктуры композиционных материалов:
а) послойно армированный СВМПЭ волокном; б) на основе тканого наполнителя

Таблица 2

Состав полимерной матрицы образцов композиционных материалов

Содержание ПУ в композиционном материале, % масс.	Тип армирующего наполнителя
5–7	Препрег (0°/90°)
	Ткань
9–11	Препрег (0°/90°)
	Ткань
28–30	Препрег (0°/90°)
	Ткань
51–53	Препрег (0°/90°)
	Ткань

Обсуждение полученных результатов. На графиках зависимости упруго-прочностных свойств при растяжении наблюдается снижение прочностных характеристик при содержании полиуретана 9–11 % для обоих типов армирования. При данной концентрации эффективность передачи напряжений в материале снижена вследствие нарушения непрерывности обеих фаз: армирующей и матричной, относительное удлинение максимально вследствие проскальзывания и переориентации волокон в направлении нагрузки. В области низких концентраций полиуретана (5–7 %) формируется структура с максимальным содержанием волокон в объеме материала, способных воспринимать нагрузку, при больших концентрациях (28–30 %) формируется объемная матричная фаза, эффективно перераспределяющая напряжения.

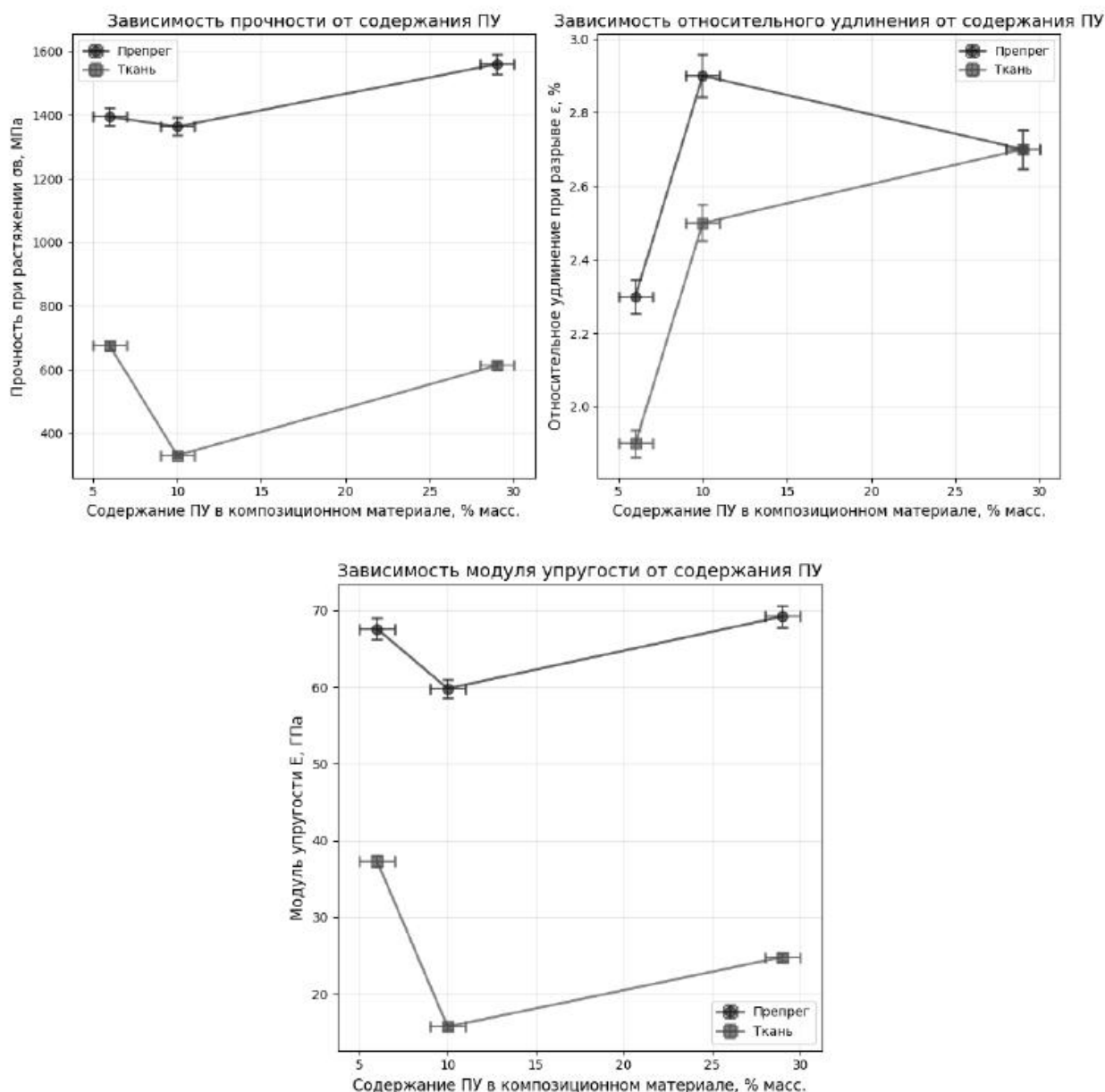


Рис. 3. Влияние состава матрицы и архитектуры армирующего наполнителя на упруго-прочностные свойства при растяжении образцов композиционных материалов

Композиционные материалы с послойным армированием волокном СВМПЭ имеют прочностные характеристики, значительно превышающие (в 2–4 раза в зависимости от содержания полиуретана) материалы на тканой основе. Этот результат связан с различными механизмами разрушения ткани и волокна, а также их структурными особенностями (рис. 2). В случае послойного армирования с укладкой слоев препрегов ($0^\circ/90^\circ$) достигается максимальная эффективность восприятия механических нагрузок благодаря прямой ориентации волокон, отсутствию концентраторов напряжений, сохранению их непрерывности и исходной прочности. Тканая архитектура создает зоны концентрации напряжений вследствие переплетения нитей основы и утка, также прочность волокон снижается в процессе ткачества.

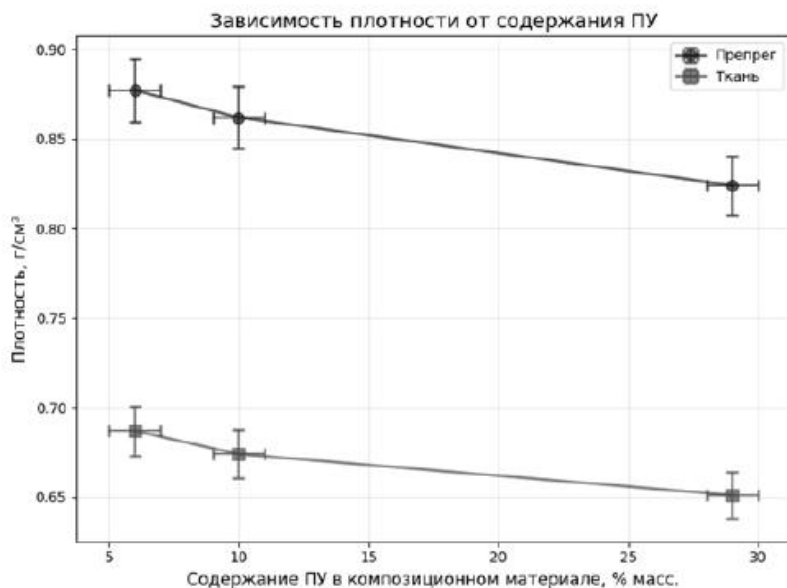


Рис. 4. Влияние состава матрицы и архитектуры армирующего наполнителя на плотность образцов композиционных материалов

Сравнения полученные в ходе испытаний результаты с прочностными характеристиками СВМПЭ волокна (табл. 1) можно сделать вывод о реализации прочностного потенциала волокна в композиционном материале. Наибольшая эффективность достигается при использовании послойного типа армирования (максимальная достигнутая прочность 1559 МПа при содержании ПУ 28–30 % составляет ~56 % от прочности исходного волокна), что обусловлено сохранением непрерывности и прямолинейности волокон. ПКМ на основе тканого наполнителя реализует ~24 % прочности вследствие извитости волокон.

Установлена зависимость плотности композиционных материалов для обоих типов армирования: композиты с послойным армированием волокном СВМПЭ имеют большую плотность в сравнении с материалами на основе тканого наполнителя. Этот результат связан с различиями в морфологии армирующих структур. В случае послойного армирования достигается максимальное объемное содержание армирующей фазы благодаря плотной упаковке параллельно ориентированных волокон и минимальной пористости. Тканая структура характеризуется наличием микропор, которые формируются при переплетении нитей основы и утка, что снижает плотность, но не приводит к деградации механических свойств.

Заключение. Проведено комплексное исследование влияния состава матрицы и архитектуры армирующего наполнителя на физико-механические свойства композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Установлено, что наилучшим сочетанием упруго-прочностных характеристик обладают послойно армирование волокном СВМПЭ композиционные материалы с содержанием полиуретана 28–30 % (прочность при растяжении 1551,9 МПа, модуль упругости 69,2 ГПа). Для материалов на ос-

нове тканого наполнителя максимальные показатели достигаются при содержании полиуретана 5–7 % (прочность при растяжении 674,9 МПа, модуль упругости 37,3 ГПа). Однако ПКМ на основе ткани превосходят волокнистые композиты по удельным прочностным характеристикам благодаря меньшей плотности (0,651–0,687 г/см³ против 0,824–0,877 г/см³ у послойно армированных аналогов). Данное преимущество делает тканые композиты предпочтительными для применений, где требования к минимизации массы являются критическими.

Список источников

- [1] Распопов Л.Н., Белов Г.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Синтез и свойства. *Пластмассы*, 2008, № 5, 16 с.
- [2] Михайлин Ю.А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург, Научные основы и технологии, 2010, 822 с.
- [3] Перепелкин К.Е. *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. Санкт-Петербург, Научные основы и технологии, 2009, 380 с.
- [4] Андреева А.В. *Основы физикохимии композитов*. Москва, Радиотехника, 2001, 192 с.
- [5] Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра. *Металлы Евразии*, 2015, № 1, с. 36–39.