

# Свойства сэндвич-конструкций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена

## Development and investigation of the properties of sandwich structures based on ultrahigh molecular weight polyethylene

*А.Э. КАЗАНЧЯН<sup>1,2</sup>, В.С. ОСИПЧИК<sup>1</sup>, Д.А. ВАРАКИНА<sup>3</sup>, О.И. КЛАДОВЩИКОВА<sup>1</sup>*

*A.E. KAZANCHYAN<sup>1</sup>, V.S. OSIPCHIK<sup>1</sup>, D.A. VARAKINA<sup>3</sup>, O.I. KLADOVSHCHIKOVA<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «Аккапол», Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО «ГАММА-ПЛАСТ», Москва, Россия

<sup>1</sup> Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Akkapol LLP, Moscow, Russia

<sup>3</sup> GAMMA-PLAST LLC, Moscow, Russia

kladovshchikova.o.i@muctr.ru

Разработан метод, позволяющий создавать сэндвич-конструкционные материалы с оригинальной структурой на основе бинарной смеси сверхвысокомолекулярного полиэтилена и сополимера этилена с пропиленом Vistamaxx с последующим наложением пленки Evolam и ткани из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Исследованы деформационно-прочностные свойства полимерных сэндвич-конструкционных материалов и показано, что разработанные технологичные материалы обладают улучшенной морозостойкостью и способны перерабатываться современными высокоэффективными методами.

*Ключевые слова:* сэндвич-конструкции, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, этиленпропиленовый сополимер Vistamaxx 6502, полимер-полимерные композиции, ткань СВМПЭ

A method has been developed that allows the creation of sandwich structural materials with an original structure based on a binary mixture of ultra-high molecular weight polyethylene and Vistamaxx ethylene-propylene copolymer, followed by the application of Evolam film and ultra-high molecular weight polyethylene fabric. The deformation and strength properties of polymer sandwich structural materials are investigated and it is shown that the developed advanced materials have improved frost resistance and can be processed using modern highly efficient methods.

*Keywords:* sandwich constructions, ultra-high molecular weight polyethylene, ethylene-propylene copolymer Vistamaxx 6502, polymer-polymer compositions, UHMWPE fabrics

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-05-27-30

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – уникальный полимер, представляющий собой настоящий прорыв в материаловедении, особенно в областях, требующих сочетания высокой прочности, износостойкости и морозостойкости. Его применение актуально в условиях экстремально низких температур и агрессивных сред, где традиционные материалы быстро выходят из строя. Проблема нехватки таких материалов остра: согласно статистике, около 30% отказов узлов трения в технике происходит именно из-за воздействия экстремальных условий – низких температур, агрессивных химических веществ и интенсивного износа. Это приводит к дорогостоящим простоям оборудования и значительному снижению эффективности производства. СВМПЭ демонстрирует впечатляющую работоспособность при температурах значительно ниже нуля, что подтверждается многочисленными исследованиями [1–3]. Его молекулярная структура, характеризующаяся сверхдлинными цепями полиэтилена, обеспечивает высокую прочность на разрыв, ударную вязкость и низкий коэффициент трения. Однако для достижения максимального потенциала СВМПЭ и продления срока его службы необходимо улучшить его стойкость к окислению и повысить механические характеристики. Этого удастся добиться путем специальной обработки, в частности, радиационного сшивания. Радиационное облучение СВМПЭ вызывает образование сшивок между полимерными цепями, значительно увеличивая его прочность, жесткость и термостойкость [4–5].

Одним из путей создания экструзионного материала на основе СВМПЭ является производство мультимодального полиэтилена, который представляет собой смесь компонента с высокой молеку-

лярной массой и компонента с низкой молекулярной массой. Высокомолекулярный компонент придает системе повышенные механические свойства, в то время как низкомолекулярный компонент обеспечивает возможность переработки материала экструзионным методом [6–8].

Известно [9–10], что введение текучего составляющего в количестве от 20% до 40% позволяет получить полимер-полимерные композиции, обладающие достаточной текучестью для аддитивных методов переработки.

Особое место среди изделий из полимерных композиционных материалов занимают сэндвич-панели. Это многослойные конструкции, состоящие из двух облицовочных слоёв (часто из металла, пластика или композитных материалов) и внутреннего слоя утеплителя (минеральная вата, пенополиуретан, пенополиизоцианурат и др.). Такая конструкция обеспечивает высокую прочность на изгиб и сжатие, отличные теплоизоляционные свойства и относительно низкую стоимость по сравнению с традиционными материалами. Широкий спектр применения сэндвич-панелей включает в себя строительство быстровозводимых зданий различного назначения: от промышленных цехов и складских помещений до торговых комплексов, жилых домов, детских садов и даже медицинских учреждений. Применение полимерных композиционных материалов и сэндвич-панелей на их основе – это современный и эффективный подход к строительству, обеспечивающий высокое качество, долговечность и экономическую выгоду [11].

Для получения материала, пригодного к переработке методом экструзии, был предложен метод совмещения СВМПЭ с низкомолекулярным этиленпропиленовым сополимером Vistamaxx 6502,

имеющим высокую текучесть [12], что позволило обеспечить введение сверхвысокомолекулярного полиэтилена до 85 масс.%, и метод получения полимерных сэндвич-конструкционных материалов на основе порошка СВМПЭ, ткани СВМПЭ и связующего полимерного материала ЭВА.

В качестве объектов исследования в работе использованы СВМПЭ марки UTEC6540, имеющий молекулярную массу  $8 \cdot 10^6$  г/моль (Braskem, Бразилия), ПТР (190°C/21,6 кг) не определяется, плотность 0,925 г/см<sup>3</sup>. В качестве эластомера использовали Vistamaxx 6502 (ExxonMobil Chemical, Техас, США), плотность 0,865 г/см<sup>3</sup>, ПТР (190°C/2,16 кг) 21 г/10 мин., полученный с применением запатентованной металлоценовой каталитической технологии ExxonMobil Chemical. Для создания сэндвич-конструкций использовали высококачественную пленку на основе этиленвинилацетата марки Evalam 80/120 (EVALAM, Pujol Group, Испания), а также ткань СВМПЭ DRS-160 (Китай), толщина 0,20±0,02 мм, плотность 160±5 г/м<sup>2</sup>, твердость по Бриннелю 45 МПа.

Для получения сэндвич-конструкций была использована технология, представляющая собой следующие процессы:

1. Механическое перемешивание порошка СВМПЭ с гранулами эластомера Vistamaxx в смесителе в течение 30 мин. при содержании Vistamaxx от 10 до 40 масс.%.  
2. Смешение компонентов в расплаве на двухшнековом экструдере Labtech LTE 16-36 FAC/00, диаметр шнеков – 16 мм, L/D – 32, температура экструзии составляла 220°C, скорость вращения шнеков – 100 об/мин., и последующее гранулирование полученных стренг, предварительно охлажденных с использованием ванны.  
3. Прессование образцов из смесей в лабораторном ручном прессе с усиленным смыканием при температуре 230°C в течение 10 минут при 100 МПа и последующем охлаждении до 20°C под давлением.  
4. Отпрессованные образцы каждого композита в виде пластин спрессовывались с тканью СВМПЭ и пленкой ЭВА в лабораторном ручном прессе при температуре 80°C в течение 10 минут при давлении прессования 100 МПа и последующем охлаждении до 20°C под давлением.

Структуру образцов экструзионных полимерных двухкомпонентных композиционных материалов СВМПЭ – Vistamaxx изучали в работе методом ДСК (прибор DSC 214 Polyma, NETZSCH, Германия), скорость нагрева и охлаждения – 10 градусов в минуту, данные получены по второму нагреву, навеска образца от 10 мг до 15 мг (в среднем 12,5 мг), температурный диапазон испытания варьировали от 30°C до 250°C. Результаты ДСК представлены на рис. 1. Сравнительный анализ ДСК-термограмм композиций показывает, что совмещение СВМПЭ и сополимера пропилена с этиленом приводит к образованию однофазной системы, дополнительных пиков не обнаружено, что характерно для всего ряда полимерных смесей. Наблюдается уменьшение площади пика, но увеличение его ширины, что может свидетельствовать об уменьшении количества сферолитов и о росте их среднего размера с увеличением содержания низкомолекулярной аморфной части композиции.

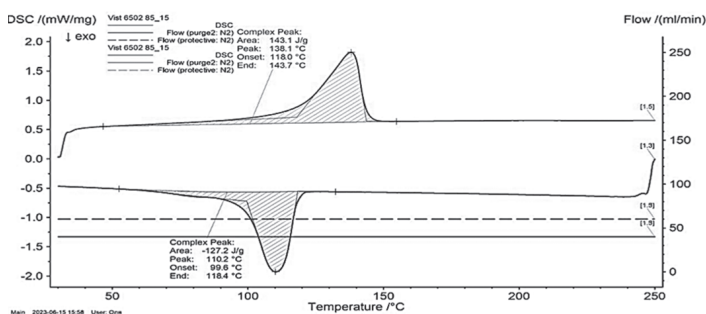


Рис. 1. ДСК-термограмма композиции СВМПЭ – Vistamaxx (15% Vistamaxx).

Поскольку СВМПЭ не обладает текучестью в условиях переработки промышленных термопластов, то нами проводилось исследование технологических свойств полимерных композиций СВМПЭ – Vistamaxx на основе оценки величины показателя текучести расплава полимерных смесей (ГОСТ 11645–2021, метод А). Анализ полученных материалов (таблица 1) показал, что при увеличении содержания сополимера Vistamaxx 6502 показатель

текучести расплава композиции резко растет, очевидно, за счет увеличения низкомолекулярной высокотекучей части смесевого материала.

Следовательно, модификация СВМПЭ эластомером Vistamaxx позволяет перерабатывать такие полимерные материалы экструзией и литьем под давлением.

Таблица 1. Значения показателей текучести расплава композиций при температуре 220°C и массе груза 21,6 кг.

Состав композиционного материала	ПТР, г/10 мин
СВМПЭ – Vistamaxx (40% Vistamaxx)	22,62
СВМПЭ – Vistamaxx (30% Vistamaxx)	19,53
СВМПЭ – Vistamaxx (25% Vistamaxx)	13,97
СВМПЭ – Vistamaxx (20% Vistamaxx)	10,21
СВМПЭ – Vistamaxx (15% Vistamaxx)	8,61
СВМПЭ – Vistamaxx (10% Vistamaxx)	–

Влияние СВМПЭ на деформационно-прочностные характеристики полимерных экструзионных композиций оценивалось по изменению прочности и модуля упругости при растяжении и изгибе (рис. 2–5) при комнатной (плюс 20°C) и низкой (минус 70°C) температуре.

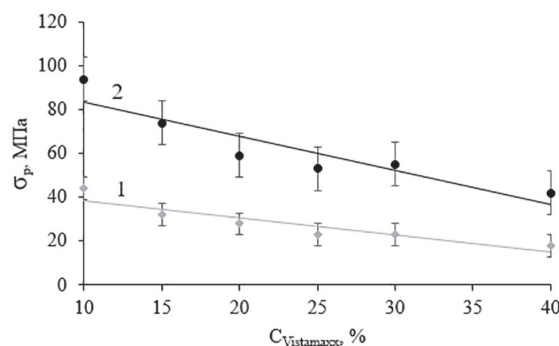


Рис. 2. Зависимость показателя прочности при растяжении композиций от содержания Vistamaxx: 1 – плюс 20°C, 2 – минус 70°C.

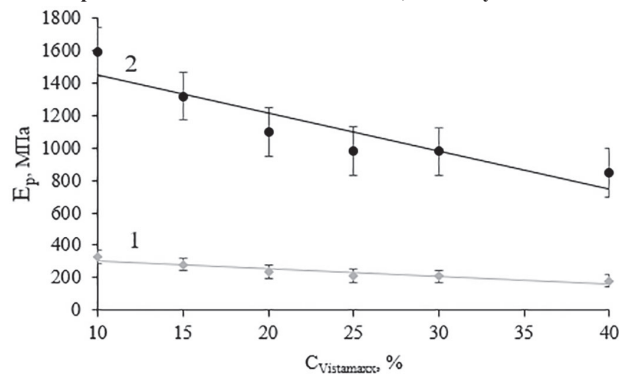


Рис. 3. Зависимость модуля упругости при растяжении композиций от содержания Vistamaxx: 1 – плюс 20°C, 2 – минус 70°C.

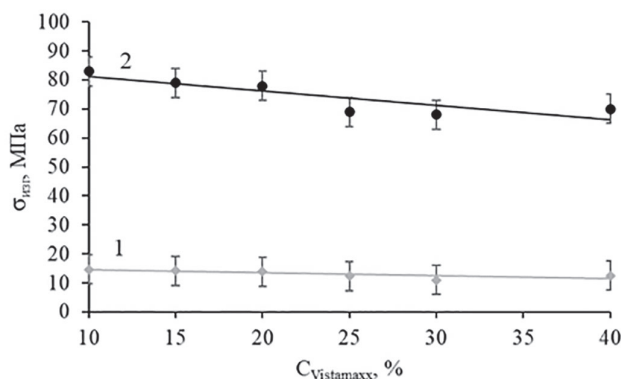


Рис. 4. Зависимость показателя прочности при изгибе композиций от содержания Vistamaxx при: 1 – плюс 20°C, 2 – минус 70°C.

Результаты измерений показывают, что увеличение содержания СВМПЭ в смеси приводит к заметному росту предела текучести при растяжении и изгибе. Это можно связать с тем, что сверхвысо-

коммолекулярный полиэтилен имеет большое количество зацепленных макромолекул в своей структуре и меньшую их подвижность по сравнению с Vistamaxx. Поэтому при увеличении содержания малоподвижной фазы в смеси снижается общий показатель эластичности материала и растут прочностные показатели.

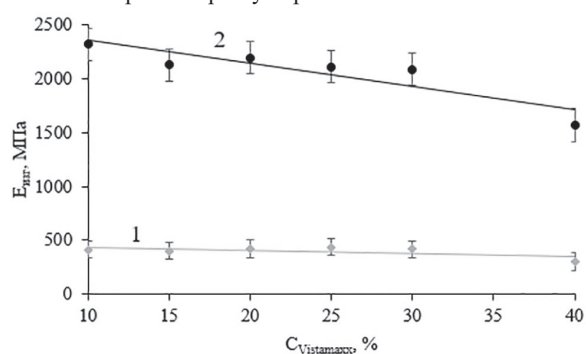


Рис. 5. Зависимость модуля упругости при изгибе композиций от содержания Vistamaxx при: 1 – плюс 20°C, 2 – минус 70°C.

Однако, как видно, при минус 70°C прочностные характеристики всех композиций увеличиваются в несколько раз по сравнению с данными для плюс 20°C, при этом значения модуля при изгибе несколько снижаются. Полученные результаты свидетельствуют о том, что СВМПЭ сохраняет высокую механическую прочность и структурную целостность при низких температурах, не становится хрупким и не ломается. Это делает композиционный материал идеальным для использования в экстремальных условиях, таких как арктические и субарктические регионы.

Как было сказано выше, основная задача наших исследований заключалась в разработке технологии производства сэндвич-композиционных полимеров, обладающих улучшенным комплексом свойств в сравнении с исходным материалом.

Термодинамически несовместимые полимерные материалы образуют прочное адгезионное соединение за счёт формирования новых химических связей на границе раздела фаз. Результаты исследований образцов композитов на расслоение приведены в таблице 4. Более высокий результат показал образец на основе СВМПЭ и Vistamaxx, возможно, за счет высокой подвижности системы и того, что данный композиционный материал имеет большое количество пор на поверхности, что позволяет лучше «затекать» в объем образца сложному эфиру ЭВА.

Таблица 4. Значения усилия при расслоении сэндвич-композиционного материала в условиях растяжения.

Структура образца	Предел прочности при расслаивании, Н/см
(СВМПЭ УТЕС6540 + Vistamaxx) + Evalam 80/120	2,50
Ткань СВМПЭ DRS160 + Evalam 80/120	0,99

Таблица 5. Прочность и модуль упругости при растяжении сэндвич-композиционных материалов.

Матрица	Прочность при растяжении, МПа		Модуль упругости при растяжении, МПа	
	20°C	-70°C	20°C	-70°C
СВМПЭ 90% + Vistamaxx 10%	328	324	1356	1412
СВМПЭ 85% + Vistamaxx 15%	297	303	1220	1400
СВМПЭ 80% + Vistamaxx 20%	265	280	1215	1403
СВМПЭ 75% + Vistamaxx 25%	256	240	1100	1367
СВМПЭ 70% + Vistamaxx 30%	211	153	1082	1304
СВМПЭ 60% + Vistamaxx 40%	76	78	606,4	1279

Влияние состава сэндвич-конструкций на деформационно-прочностные характеристики полимерных композиционных материалов оценивалось по изменению прочности и модуля упругости при растяжении и изгибе. Результаты представлены в таблицах 5 и 6, испытания также проводились при разных температурах: плюс 20°C и минус 70°C.

Таблица 6. Прочность и модуль упругости при изгибе сэндвич-композиционных материалов.

Матрица	Прочность при изгибе, МПа		Модуль упругости при изгибе, МПа	
	20°C	-70°C	20°C	-70°C
СВМПЭ 90% + Vistamaxx 10%	36,2	91,5	809	1991
СВМПЭ 85% + Vistamaxx 15%	25,4	87,5	760	1748
СВМПЭ 80% + Vistamaxx 20%	20,3	78,4	724	1702
СВМПЭ 75% + Vistamaxx 25%	15,7	74,4	662	1642
СВМПЭ 70% + Vistamaxx 30%	10,0	72,0	644	1632
СВМПЭ 60% + Vistamaxx 40%	8,6	69,0	636	1578

При оценке влияния состава композиционных материалов на деформационно-прочностные характеристики сэндвич-композиционных полимерных материалов на основе СВМПЭ можно сделать вывод, что при армировании композиции тканями СВМПЭ в изделиях не наблюдается существенного изменения свойств.

В результате проведенных исследований разработан состав, который позволяет создавать сэндвич-конструкционные материалы с оригинальной структурой на основе бинарной смеси СВМПЭ, сополимера этилена с пропиленом Vistamaxx, с последующим наложением пленки Evolam и ткани СВМПЭ, обладающие улучшенными свойствами при низких температурах и способные перерабатываться современными высокоэффективными методами.

## Литература

- Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // ТРУДЫ ВИАМ. 2020. Т. 3, В. 87. С. 49–57. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57.
- Шадрин Н.В., Гоголев В.Д. Реологические и физико-механические свойства морозостойких смесевых эластомеров // Материаловедение. – 2022. Т. 9. С. 22–28. DOI: 10.31044/1684-579X-2022-0-9-22-28.
- Bracco P, Bellare A, Bistolfi A, Affatato S. Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: Influence of the Chemical, Physical and Mechanical Properties on the Wear Behavior. A Review // Materials. 2017. Vol. 10, Issue 7. 791. 22 p. DOI: 10.3390/ma10070791.
- Sobieraj M.C., Rimnac C.M. Ultra high molecular weight polyethylene: mechanics, morphology, and clinical behavior // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2009. V.2 PP. 433–443. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2008.12.006.
- Теряева Т.Н., Костенко О.В., Исмагилов З.Р., Пилин М.О. Свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена // IV Всероссийская конференция «Химия и химическая технология: достижения и перспективы». 27–28 ноября 2018, Кемерово. КГТУ им. Т.Ф. Горбачева. С. 313.1–313.5.
- Данилова С.Н., Оконешникова А.В., Охлопкова А.А. Полимерные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: структура и свойства // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. Т. 24. №4. С. 631–642. DOI: 10.31242/2618-9712-2022-27-4-631-642.
- Pat. WO 2014/091501 A1 IN, Int. Cl C08L 53/00, C08F 110/02, C08F 14/22. Easily processable ultrahigh molecular weight polyethylene and a process for preparation thereof/ Uma Sankar; Satya Srinivasa Rao; Ajit Behari; Raksh Vir; Krishna Renganath; Assignee Equistar Chemicals, LP, Houston, TX (US). – № 09/401,472; filed: 13.12.2013; published 19.06.2014. 40 p.
- Pat. WO2015121161 A1 IN, Int. Cl C08L 23/04 Cl C08L 23/06. Blend of bimodal polyethylene with unimodal ultrahigh molecular weight polyethylene with improved mechanical properties/ Qizheng Dou, Alexandra Romina ALBUNIA, Yi Liu; Assignee BOREALIS AG [AT/AT]; Wagramer Strasse 17-19, A-1220 Vienna (AT). – № PCT/EP2015/052479; filed: 06.02.2015; published 20.08.2015. 32 p.

9. Панин С.В., Буслевич Д.Г., Корниенко Л.А., Донцов Ю.В., Иванова Л.Р. Двухкомпонентные полимер-полимерные композиции на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для аддитивных производственных технологий // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, №3. С. 377–386. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.014.
  10. Mingjin Cao, Li Chen, Rongzheng Xu, Qin Fang. Effect of the temperature on ballistic performance of UHMWPE laminate with limited thickness. // *Composite Structures*. 2021. N277. 114638. 11 p. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114638.
  11. Голушкова О.В., Комарова С.Л., Янович Д.Д. Сэндвич-панели как альтернатива классическим строительным материалам и оценка их конкурентоспособности // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2015. №3(48). С. 127–134.
  12. Кладовщикова О.И., Тихонов Н.Н., Ущехо И.С. Исследование свойств сополимера на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр.* Том XXXV. – 2021. С. 25.
- 
-