

На правах рукописи



Буслович Дмитрий Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА ЭКСТРУДИРУЕМЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ СВМПЭ
КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕТОДОМ ШНЕКОВОЙ
ЭКСТРУЗИИ**

Специальность: 2.6.17 - Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Панин Сергей Викторович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Соколова Марина Дмитриевна**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» обособленное подразделение «Институт проблем нефти и газа Сибирское отделение Российской академии наук», директор института;

Мелентьев Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра прикладной механики и материаловедения, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (г. Саранск).

Защита диссертации состоится «01» июля 2022 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.03 созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета, а также на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Андрей Геннадиевич Тюрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает высокой износостойкостью, прочностью, долговечностью, ударной вязкостью, низким коэффициентом трения, биосовместимостью, что определяет исключительные области его промышленного применения. Несмотря на высокие физико-механические свойства СВМПЭ, получение изделий из него сопряжено с рядом технических проблем. Прежде всего, по причине сверхбольшой молекулярной массы ($1,5 \div 11$ млн. г/моль) и сверхвысокой вязкости СВМПЭ практически не способен перерабатываться методами литья под давлением и экструзии. Сложность переработки СВМПЭ в первую очередь связана с тем, что этот материал переходит в высокоэластичное, но не в вязкотекучее состояние, необходимое для реализации процессов экструзии. Изготовление же объемных изделий из СВМПЭ другими методами экономически крайне затратно и/или требует использования сложного и дорогостоящего технологического оборудования.

Проведенный анализ научной литературы показывает, что, одним из вариантов решения данной проблемы является применение композитов на основе СВМПЭ, содержащих пластифицирующие добавки (наполнители). Это позволит значительно улучшить технологические свойства и получать изделия традиционными для полимеров методами: литья под давлением, экструзии и др. Однако введение подобных добавок неизбежно сопровождается снижением физико-механических характеристик. В связи с этим актуально создание экструдированных износостойких полимерных композитов на основе СВМПЭ, не уступающих по свойствам ненаполненному полимеру, включая повышение прочностных свойств введением армирующих волокон. Это требует проведения дополнительных систематических исследований, посвященных влиянию введения различного рода пластифицирующих наполнителей на изменение реологических и физико-механических свойств композитов на его основе (для экструзионного изготовления изделий). Важным аспектом при проведении подобных исследований является анализ формирующейся структуры композитов во взаимосвязи со свойствами.

Степень разработанности темы исследования. Исследования в данном направлении известны в научно-технической литературе. Следует отметить работы авторов - *G. Liu, E.M. Lee*, О.И. Скульского, *S. Kurtz, M.F. Diop, Z. Guo*, А.Ю. Беданоква, *L.M. Fang*, А.А. Охлопковой, *K.L.K. Lim, M. Xie*, Ю.Е. Дорошенко, *L.F.M. Rocha, M. Ahmad*, и др. Однако опубликовано не так много работ, посвященных взаимосвязи структуры и механических и трибологических свойств композитов на основе СВМПЭ, полученных методами экструзии. Представляет значительный научный и практический интерес к проведению систематического исследования структуры, механических и трибологических свойств СВМПЭ-композитов, полученных одношнековой экструзией фидстиков, сформированных двухшнековым компаундированием (совмещением).

Рассматриваются различные подходы к переработке и изготовлению СВМПЭ-композитов. В работах *S. Kurtz* сообщается, что плунжерная экструзия

и горячее прессование позволяют консолидировать порошок СВМПЭ, обеспечивая величину остаточной пористости менее 1%. Данными методами спекают порошок СВМПЭ в условиях повышенной температуры и высокого давления, прикладываемых в течение длительного времени (до нескольких часов). Однако такие условия формования увеличивают риск разрушения молекулярных цепей и окисления, в результате чего может существенно снизиться способность к длительному сохранению структуры и свойств консолидированного полимера и изделий из него. Кроме того, указанные методы спекания приводят к появлению дефектов на границах структурных элементов (например, сферолитов). Это может быть причиной инициации трещин и вызывать разрушение при приложении длительных статических, циклических и ударных нагрузок, что наблюдалось в работах *S. Tower*. Кроме того, сцепление молекул полимера существенно ограничивает подвижность молекулярных цепей. В этом контексте, одним из путей повышения технологичности (перерабатываемости) СВМПЭ является, например, уменьшение количества переплетений на единицу молекулярной цепи. Для этого может использоваться растворение полимера в подходящем органическом растворителе в условиях ниже, так называемой «концентрации перекрытия», обычно превышающей 50% от содержания СВМПЭ.

Другим направлением решения указанной проблемы является смешивание СВМПЭ с низковязкими полимерами, такими как ПЭВП, ПП, полиэтиленгликоль и др. В этом случае возникает проблема, связанная с эффективным диспергированием низковязких полимеров вследствие значительного несоответствия между их вязкостью. В работах Диопа (*Diop*) был предложен метод твердофазного сдвигового распыления. Продемонстрирована эффективность смешивания при содержании СВМПЭ в смеси с ПЭВП до 50 мас. %. Далее такие смеси легко перерабатываются путем обычной экструзии или литья под давлением, обеспечивая достижение высоких механических свойств, включая высокую ударную вязкость и трещиностойкость.

Цели и задачи. Целью диссертационного исследования является разработка составов экструдированных износостойких композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена для переработки методом одношнековой экструзии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Исследовать влияние введения порошков различных полиолефинов на экструдированность, формирование структуры и механические свойства композитов на основе СВМПЭ при их изготовлении методом горячего прессования.

2. Разработать состав и способ получения фидстока с последующим изготовлением экструдированного износостойкого композита на основе смеси СВМПЭ *GUR 2122* – ПП21030, обладающего совокупностью физико-механических свойств, не уступающих ненаполненному СВМПЭ. Оценить влияние условий трибонагружения на трибологические характеристики разработанного композита на основе СВМПЭ в условиях сухого трения и граничной смазки.

3. Исследовать влияние содержания наполнителей ПЭВП-прив-ВТМС и ПП21030 на экструдруемость, формирование структуры и механические свойства трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ *GUR 2122*, полученных одношнековой экструзией фидстоков, сформированных двухшнековым компаундированием.

4. Разработать состав экструдруемого износостойкого композита на основе смеси «СВМПЭ + ПЭВП-прив-ВТМС + ПП», армированного стекловолокнами, и определить оптимальное аспектное соотношение (в интервале 15 мкм – 3 мм) и содержание волокон путем установления взаимосвязи между структурой и механическими/трибологическими характеристиками.

Научная новизна:

1. Предложен подход к дисперсному упрочнению СВМПЭ мелкодисперсными включениями ПП, реализуемый посредством жидкофазного диспергирования частиц размером несколько сотен микрометров в расплаве порошка СВМПЭ в двухшнековом экструдере, что позволило одновременно обеспечить необходимую экструдруемость композита и повышение его механических и трибологических свойств.

2. Впервые развита методика определения рационального состава и режима изготовления экструдруемых композитов СВМПЭ-ПП, основанная на построении поверхностей эффективных (технологических, механических и трибологических) характеристик от значений управляющих параметров: а) содержания пластифицирующего компонента (полипропилена ПП21030) и б) количества переработок смеси в экструдере, использующая метод линейной интерполяции ограниченного количества экспериментальных данных с применением полинома Лагранжа.

3. В рамках представлений о материалах с иерархически организованной структурой разработан экструдруемый износостойкий композит на основе СВМПЭ, армированный стекловолокнами и упрочненный мелкодисперсными включениями полипропилена, обладающий высокими механическими характеристиками, а также сопротивлением изнашиванию при различных нагрузочно-скоростных параметрах трибоиспытаний.

Теоретическая значимость работы. Полученные результаты расширяют представления материаловедения полимеров в области закономерностей формирования структуры СВМПЭ-композитов при компаундировании компонентов с различными температурами кристаллизации.

Практическая значимость работы. По совокупности всех исследованных физико-механических и трибологических свойств, включая результаты испытаний на растяжение, измерения показателя текучести расплава, износ при сухом трении, состав на основе мелкодисперсного порошка *GUR 2122* «СВМПЭ + ПЭВП-прив-ВТМС + ПП+МСВ» рекомендуется для изготовления направляющих для роликовых и пластинчатых цепей, для конвейеров, а также для производства труб методами шнековой экструзии. По результатам выполнения исследований получен акт внедрения от ООО «НИОСТ» (г. Томск). На состав разработанного экструдруемого антифрикционного композита на осно-

ве сверхвысокомолекулярного полиэтилена получен Патент на изобретение №2674019 (дата выдачи 04.12.2018 г.).

Методология и методы исследования. Основными методами исследования в работе являлись растровая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, инфракрасная спектроскопия на основе Фурье-преобразования, а также дифференциальная сканирующая калориметрия. Используются методы измерения механических свойств и трибологических испытаний, а также методы планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика жидкофазного диспергирования крупноразмерных (сотни мкм) частиц ПП в матрице СВМПЭ, основанная на их компаундировании в двухшнековом экструдере и последующей переработке фидстока одношнековой экструзией, обеспечивающая однородное распределение частиц пластифицирующего компонента в виде включений размером до 10 мкм вследствие развития интенсивных сдвиговых деформаций и различия температур плавления полимеров.

2. Состав и способ получения экструдированного износостойкого композита «СВМПЭ *GUR 2122* + 20 вес. % ПП 21030», реализуемый одношнековой экструзией гранулята компаундированной смеси полимерных порошков, в котором дисперсное упрочнение мелкими частицами ПП обеспечивает повышение как прочностных свойств по сравнению с чистым СВМПЭ, так и сопротивления изнашиванию в условиях сухого трения и граничной смазки в диапазоне нагрузочно-скоростных параметров трибоиспытаний $P = 60 - 140$ Н, $V = 0,1 - 0,5$ м/с.

3. Рациональный состав экструдированного фидстока для получения износостойких композитов «СВМПЭ + 17 вес.% ПЭВП-прив-ВТМС + 12 вес. % ПП + 5 вес.% МСВ», определенный методом линейной интерполяции с использованием полинома Лагранжа, позволяющий при переработке одношнековой экструзией обеспечить повышенные механические свойства за счёт преимущественной ориентации стекловолокон и компатибилизации компонентов вследствие наличия в ПЭВП привитых силановых групп.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных исследовательских методов и оборудования, систематическим характером проведения экспериментов и измерений, обработкой данных, а также согласием полученных результатов с данными работ других авторов.

Результаты работы были представлены на международных и всероссийских семинарах, симпозиумах и конференциях: Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Современные технологии и материалы новых поколений» 09 – 13 октября 2017 г., Томск, Россия; XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» 21 – 25 мая 2018 г., Екатеринбург, Россия; XVII Международный научно-исследовательский конкурс «Лучшая научно-исследовательская работа 2018» 20 ноября 2018 г., Пенза, Россия; IX Международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производ-

ства» 26 – 28 февраля 2019 г., Омск, Россия; XII Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» 29 октября – 1 ноября 2019 г., Томск, Россия; X Международная научно-техническая конференция "Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства" 26 – 29 февраля 2020 г., Омск, Россия.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, проведении структурных исследований, а также механических и трибологических испытаний, статистической обработке полученных результатов. Постановка задач, обсуждение всех научных результатов и положений, изложенных в работе, проведено совместно с научным руководителем профессором С.В. Паниным. По результатам исследования написаны статьи в соавторстве и сделаны доклады на научных конференциях.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 11 публикациях, из них 8 статей опубликованы в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, 3 статьи - в журналах, включенных в библиографические базы данных цитирования Web of Science и Scopus, и в одном патенте на изобретение РФ.

Соответствие паспорту заявленной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 2.6.17 - Материаловедение (в соответствии с предыдущей редакцией номенклатуры паспорта специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)): 1) «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий» (п. 1); 2) «Разработка физико-химических и физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой» (п. 4).

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка публикаций по теме диссертации и списка литературы из 150 использованных источников, а также 3х приложений. Всего 171 страница, в том числе 75 рисунков и 39 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень ее разработанности, определена цель исследований и задачи, решение которых необходимо для её достижения, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, показана связь с государственными программами, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе приведен литературный обзор источников, в которых отражены основные сведения о способах получения и перемешивания экстру-

дируемых и износостойких композитов на основе СВМПЭ. Приведены сведения о наполнителях различной природы и размеров, рассмотрены результаты исследований, посвященных повышению экструзируемости СВМПЭ путем введения пластифицирующих наполнителей. Проанализированы работы, посвященные исследованиям механических свойств и износостойкости в зависимости от способов изготовления СВМПЭ, а также при введении различных наполнителей. На основании проведенного анализа различных методов переработки композитов на основе СВМПЭ, включая сопротивление изнашиванию формируемых полимерных композиционных материалов, делается постановка задач исследований.

Во второй главе описаны исходные материалы и методы исследований. В качестве материала матрицы использовали 3 марки СВМПЭ с одинаковой молекулярной массой ~4,5 млн., а именно «мелкодисперсный» *GUR-2122* размером частиц 5÷15 мкм, «среднедисперсный» *GUR-4120* размером частиц ~150 мкм, «крупнодисперсный» *GUR-4022-6* размером частиц ~330 мкм. В качестве наполнителей применяли молотый гранулят привитого полиэтилена высокой плотности (ПЭВП-прив-ВТМС) со средним размером частиц ~ 450 мкм; порошок полипропилена марки ПП₂₁₀₃₀ (ПТР = 3,0 г/10 мин) ~ 450 мкм; порошок полипропилена марки ПП₂₁₀₀₇ (ПТР = 0,7 г/10 мин) ~ 350 мкм; блок-сополимер полипропилена с полиэтиленом низкой плотности (ПП-б-ЛПЭНП) с размером частиц ~ 450 мкм; сшитый полиэтилен СПЭ-б с размером частиц ~ 450 мкм; полые стеклянные сферы (ПСС) с размером частиц ~15 – 200 мкм (аспектное отношение - 1); молотое стекловолокно (МСВ) средней длиной волокон ~200 мкм (Ø 10 мкм, аспектное отношение - 20), рубленое стекловолокно (РСВ) средней длиной волокон ~3000 мкм (Ø 10 мкм, аспектное отношение - 300).

Экструзионное компаундирование (совмещение) проводили в двухшнековом экструдере «*Rondol*» (*Twin Screw Extruder, Rondol*, Франция). Заготовки размером 50×12 мм для последующего изготовления образцов для механических и трибологических испытаний получали в пресс-форме методом горячего прессования порошковых смесей (ГП-ПС) и гранулята (ГП-Гр) при давлении 10 МПа и температуре 200 °С. Методом одношнековой экструзии на лабораторном одношнековом экструдере «*Filabot Original*» (*single screw extruder, Filabot*, США) с установленной на нем пресс-формой изготовлены образцы прямоугольной формы и высотой 10 мм. Показатель текучести расплава (ПТР, г/10 мин) оценивали согласно ГОСТ 11645–73 (*ASTM D1238*) на приборе ИИРТ-5М с внутренним диаметром капилляра 2,1 мм при температуре 190 °С и нагрузке 212 Н. Испытания на растяжение проводили на электромеханической машине «*Instron–5582*».

Триботехнические испытания в режиме сухого трения скольжения (износостойкость), а также граничной смазки проводили на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «вал-колодка» в соответствии со стандартом *ASTM G 77-98*. Коэффициент трения образцов определяли по схеме «шар-по-диску» на трибометре *CSEM CH2000*. Исследование топографии поверхностей дорожек трения проводили на оптическом микроскопе *Neophot 2*. Структурные исследо-

вания выполняли на растровом электронном микроскопе *LEO EVO 50* (ЦКП ИФПМ СО РАН, Томск).

В третьей главе описаны результаты, полученные при введении в СВМПЭ пластифицирующих (полимерных) добавок. Использовали порошки ПП₂₁₀₃₀, ПЭВП-прив-ВТМС, ПП-б-ЛПЭНП и СПЭ. Показано (рисунок 1), что введение ПП₂₁₀₃₀ в количестве 20 вес.% позволяет повысить ПТР смеси СВМПЭ-ПП 10 раз, а введение ПП-б-ЛПЭНП в 5 раз относительно чистого СВМПЭ. Отсутствие химической связи между СВМПЭ и ПП обуславливает снижение предела прочности и удлинения при разрыве (таблица 1). Наполнение СВМПЭ ПП-б-ЛПЭНП обеспечивает как формирование межфазной связи, так и достаточно высокий ПТР (0,30 г/10 мин); однако это сопровождается снижением прочностных характеристик композита (твёрдость, модуль упругости, пределы текучести и прочности) по сравнению с исходным полимером.

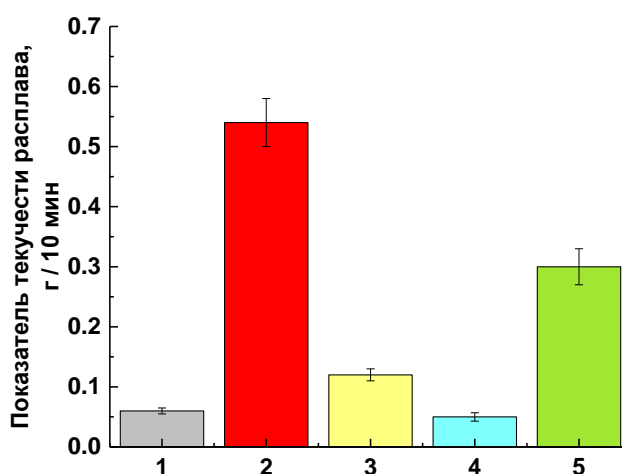


Рисунок 1 - Показатель текучести расплава СВМПЭ (1) и композитов «СВМПЭ +20 % ПП» (2), СВМПЭ +20% ПЭВП-прив-ВТМС (3), «СВМПЭ +20% СПЭ-б» (4), «СВМПЭ +20% ПП-б-ЛПЭНП» (5)

Таблица 1 - Механические свойства СВМПЭ и композитов на его основе, содержащих 20 вес. % полимерных наполнителей

| № | Содержание наполнителя, вес.% | Плотность ρ , г/см ³ | Твердость по Шору D | Модуль упругости E , МПа | Предел текучести σ_T , МПа | Предел прочности σ_B , МПа | Удлинение при разрыве ε , % |
|---|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 1 | СВМПЭ | 0,934 | 57,7±0,6 | 711±40 | 21,6±0,6 | 42,9±3,1 | 485±28 |
| 2 | 20 ПП ₂₁₀₃₀ | 0,921 | 58,3±0,8 | 888±33 | 24,8±0,2 | 23,2±0,3 | 154±31 |
| 3 | 20 ПЭВП-прив-ВТМС | 0,931 | 57,3±0,9 | 776±51 | 22,9±0,2 | 30,9±1,1 | 426±24 |
| 4 | 20 СПЭ-б | 0,941 | 56,5±0,4 | 746±53 | 22,9±0,4 | 29,7±2,1 | 411±43 |
| 5 | 20 ПП-б-ЛПЭНП | 0,935 | 54,7±0,5 | 558±64 | 19,4±0,1 | 24±2,1 | 299±47 |

Проведен анализ структуры (рисунок 2). При введении ПП (рисунок 2,а) его частицы оказываются «впрессованы» в СВМПЭ (включение в центре кад-

ра), причем вокруг частиц ПП не формируется сплошная граница раздела с материалом матрицы. Это определяет снижение механических характеристик такого композита. Включения блок-сополимера ПП-б-ЛПЭНП выглядят достаточно «рыхлыми», что вызвано наличием в них переплавленных диспергированных частиц СВМПЭ размером до 10 мкм (рисунок 2,б).

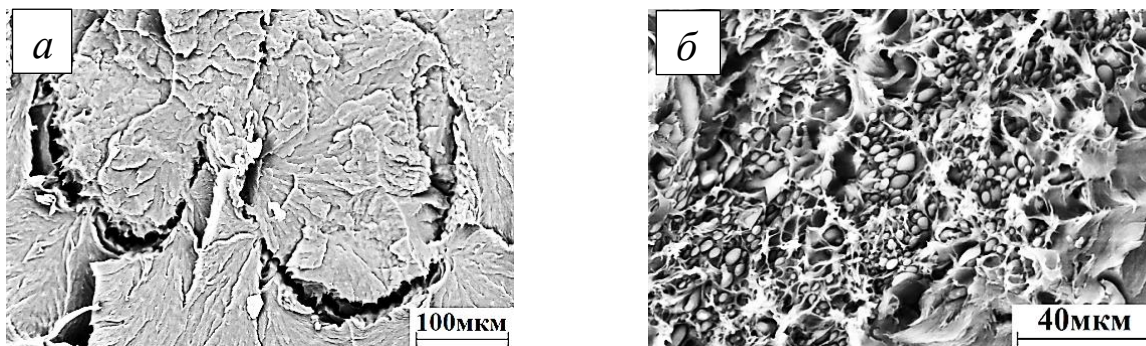


Рисунок 2 – РЭМ - изображения структуры композитов: «СВМПЭ + 20 вес. % ПП₂₁₀₃₀» (а); «СВМПЭ +20 вес.% ПП-б-ЛПЭНП (б)

В четвертой главе представлены результаты, полученные при варьировании типа вводимого порошка ПП (с различным ПТР), а также размера исходных частиц СВМПЭ. Кроме того, исследованы структура, механические и трибологические свойства композитов на основе смеси СВМПЭ-ПП, сформированной двухшнековым компаундированием полимеров.

В таблице 2 приведены физико-механические характеристики двухкомпонентных композитов. Видно, что при введении ПП₂₁₀₀₇ значение ПТР возрастает в 3 раза по сравнению с чистым СВМПЭ, что меньше чем при введении ПП₂₁₀₃₀. Также наблюдается значительное снижение модуля упругости, предела текучести, предела прочности (по сравнению с ненаполненным СВМПЭ и СВМПЭ+20 вес. % ПП₂₁₀₃₀). Таким образом, более высокими деформационно-прочностными свойствами, а также величиной ПТР обладает именно композит СВМПЭ + 20 вес.% ПП₂₁₀₃₀.

Таблица 2 - Механические характеристики СВМПЭ и композиций на его основе при варьировании марки полипропилена (горячее прессование порошков)

| № | Состав, вес. % | Модуль упругости E , МПа | Предел текучести σ_t , МПа | Предел прочности σ_b , МПа | Удлинение при разрушении ε , % | Показатель текучести расплава, г/10 мин |
|---|------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| 1 | СВМПЭ GUR 2122 | 711±40 | 21,6±0,6 | 42,9±3,1 | 485±28 | 0,06 |
| 2 | СВМПЭ+20 ПП ₂₁₀₀₇ | 653±45 | 20,8±1,4 | 20,1±0,6 | 173±35 | 0,19 |
| 3 | СВМПЭ+20 ПП ₂₁₀₃₀ | 888±33 | 24,8±0,2 | 23,2±0,3 | 154±31 | 0,54 |

Выполнено сопоставительное сравнение механических характеристик двухкомпонентных композитов при использовании разных марок СВМПЭ. При этом варьировался размер частиц исходного порошка СВМПЭ: 10мкм, 150мкм, 330мкм. На фотографиях структуры (рисунок 3) видно, что с увеличением ис-

ходного размера частиц СВМПЭ структура композита становится менее однородной: наблюдается дефектность, трещины, расслоения.

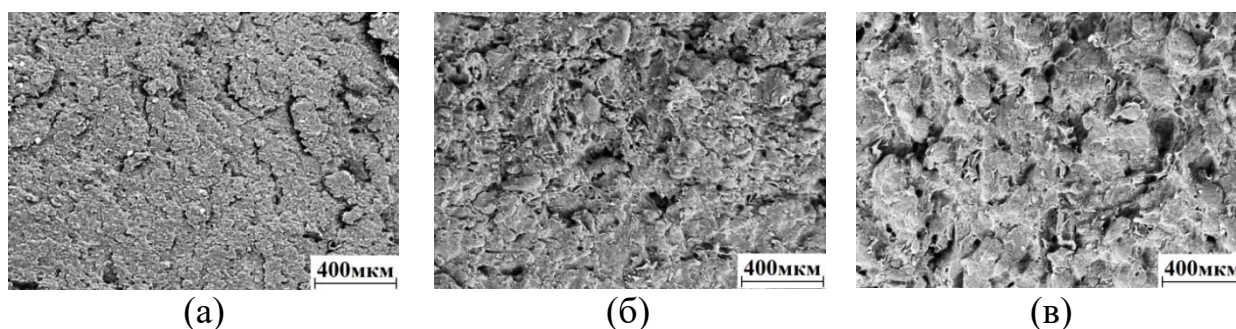


Рисунок 3 – РЭМ-изображения структуры композитов «СВМПЭ + 20 вес. % ПП₂₁₀₃₀», полученных методом одношнековой экструзии: а) *GUR 2122*, б) *GUR 4120*, в) *GUR 4022-6*.

Рассчитаны коэффициенты, характеризующие отношение механических свойств композитов, сформированных одношнековой экструзией, относительно ненаполненных СВМПЭ (таблица 3). Наилучшими показателями с позиции сохранения механических свойств, а также обеспечения приемлемой текучести расплава обладает композит на основе мелкодисперсного СВМПЭ *GUR₂₁₂₂*.

Проанализированы структура, механические и трибологические свойства СВМПЭ *GUR₂₁₂₂* – ПП₂₁₀₃₀ композитов в условиях варьирования содержания ПП₂₁₀₃₀ (компаундирование фидстоков проводили в двухшнековом экструдере). Показано, что независимо от количества вводимого ПП минимальное значение модуля (624 МПа) характерно для порошковой смеси (ГП – ПС); более высокие свойства характерны для композита, сформированного горячим прессованием гранулята (ГП - Гр). Наконец, максимальный модуль (1152 МПа) характерен для одношнековой экструзии гранулята (ОЭ - Гр).

Таблица 3 - Механические характеристики СВМПЭ и композиций на его основе при варьировании марки СВМПЭ (одношнековая экструзия гранулята)

| Состав, вес. % | Модуль упругости E , МПа | Предел текучести σ_T , МПа | Предел прочности σ_B , МПа | Удлине- ние при разруше- нии ε , % | Суммар- ные ко- эффици- енты |
|--------------------------------|----------------------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| СВМПЭ <i>GUR 2122</i> | 711±40 | 21,6±0,6 | 42,9±3,1 | 485±28 | |
| СВМПЭ <i>GUR 2122</i> +20 ПП | 1037±34 | 25,5±0,2 | 27,3±1,7 | 227±63 | 3,74 |
| СВМПЭ <i>GUR 4120</i> | 624±61 | 20,2±0,8 | 33,7±4,1 | 420±33 | |
| СВМПЭ <i>GUR 4120</i> +20 ПП | 819±24 | 23,9±0,6 | 20,9±1,9 | 124±35 | 3,4 |
| СВМПЭ <i>GUR 4022-6</i> | 826±45 | 23,7±0,3 | 44,5±3,5 | 429±41 | |
| СВМПЭ <i>GUR 4022-6</i> +20 ПП | 1152±74 | 25,2±0,2 | 24,1±1,1 | 116±18 | 3,26 |

Данный результат обусловлен следующей причиной. В случае порошковой технологии формируется гетерогенный композит (рисунок 4, а, г). После компаундирования в двухшнековом экструдере удается равномерно диспергировать ПП (рисунок 4, б, д) в матрице СВМПЭ. Однако при последующем го-

рячем прессовании не реализуются сдвиговые деформации, поэтому включения ПП сохраняются в том же виде, как после компаундирования в двухшнековом экструдере. При переработке одношнековой экструзией материал фидстока испытывает дополнительную степень сдвиговой деформации как внутри экструдера, так и при выходе в пресс-форму. В результате удается дополнительно перемешать смесь компонентов (рисунок 4, в, е).

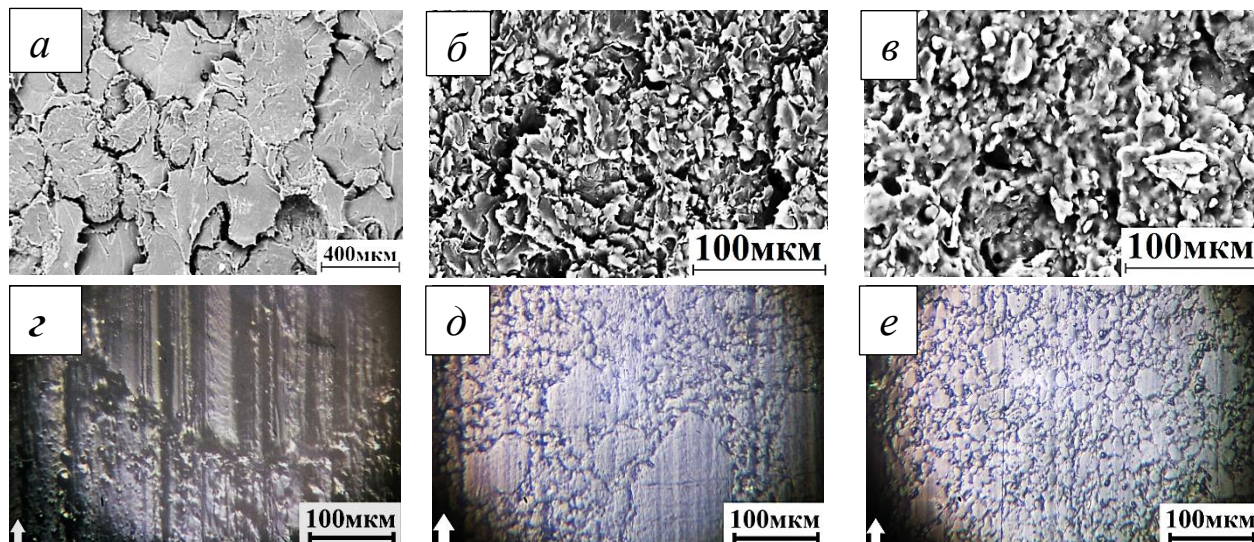


Рисунок 4 - Изображения структуры и поверхностей трения композитов «СВМПЭ + 20 вес. % ПП»: ГП-ПС (а, г), ГП-Гр (б, д), ОЭ-Гр (в, е)

Развитие сдвиговых деформаций позволяет уменьшить размер частиц ПП с 450 мкм до 20 мкм при двухшнековом компаундировании и до 10 мкм при последующей одношнековой экструзии (рисунок 5). Таким образом, достигнутое повышение деформационных характеристик композитов «СВМПЭ GUR 2122 +n вес. % ПП» связано с более равномерным распределением мелкодиспергированных частиц ПП₂₁₀₃₀ в СВМПЭ матрице (фактически, ее дисперсным упрочнением) и формированием более однородной структуры при экструзионном перемешивании компонентов.

Для определения рационального состава, обладающего совокупностью рациональных деформационно-прочностных и трибологических свойств, не уступающих ненаполненному СВМПЭ, был использован метод линейной интерполяции с использованием полинома Лагранжа. Предлагаемый способ получения материалов с заданными свойствами заключается в построении поверхностей, отражающих зависимости эффективных характеристик от управляющих параметров, различие состоит в самом способе построения поверхностей, которые строятся не на основе полученных функций, а на основе прямого использования экспериментальных данных, и получаются совмещением контурных кривых (изолиний). На основании анализа литературных данных в качестве пороговых значений использованы следующие количественные показатели физико-механических и трибологических свойств: модуль упругости $E > 1000$ МПа; предел текучести $\sigma_T > 25$ МПа; предел прочности $\sigma_s > 27$ МПа; удлинение при разрыве $\varepsilon = 225$ %; коэффициент трения - 0,11; интенсивность изнашивания $\leq 1,0 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м.

Наиболее эффективным составом композита с позиции придания технологических характеристик (достижения необходимого уровня ПТР) и повышения механических и трибологических характеристик является «СВМПЭ + 20 вес. % ПП», сформированный методом одношнековой экструзии (рисунок 6). Исследованы трибологические характеристики композита «СВМПЭ + 20 вес. % ПП» в интервале нагрузок и скоростей $P=60-140$ Н и $V=0,1-0,5$ м/с в условиях сухого трения скольжения (схема «вал-колодка») и граничной смазки с целью определения допустимых интервалов эксплуатации.

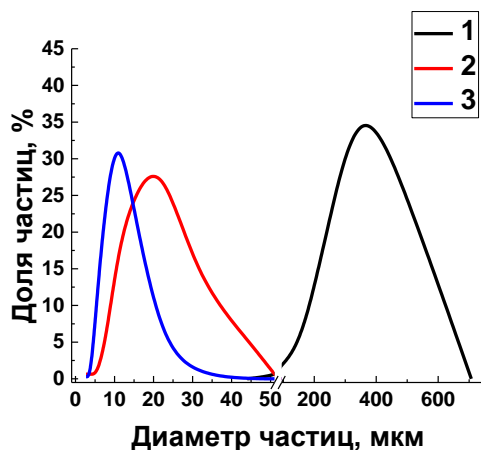


Рисунок 5 - Дифференциальная кривая распределения частиц полипропилена по размерам: 1 – ГП-ПС, 2 – ГП-Г, 3 – ОЭ-Г

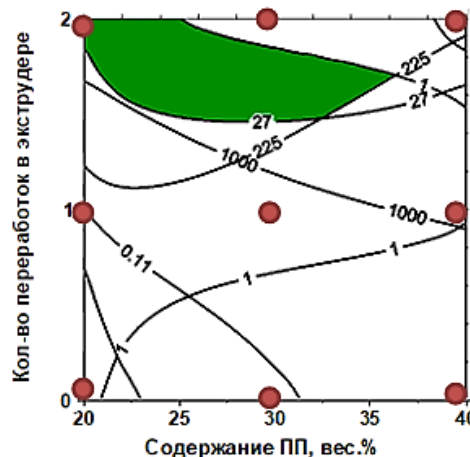


Рисунок 6 – Области, определяющие содержание полипропилена ПП21030 и количество переработок композитов на основе СВМПЭ GUR-2122 в экструдере (0 – для порошковой смеси, 1 - для ГП гранулята; 2 - для ОЭ гранулята), необходимые для получения композитов с заданными свойствами

В таблице 4 приведены данные о сопротивлении изнашиванию и температуре контртел для режима 140 Н и 0,5 м/с. Видно, что интенсивность изнашивания композитов, полученных экструзионным компаундированием фидстока с последующей одношнековой экструзией, ниже, чем для ненаполненного СВМПЭ. На поверхности трения чистого СВМПЭ при трибоиспытаниях за счет фрикционного нагрева контртела (таблица 4,а) фиксируется размягчение и пластическое течение материала поверхностного слоя. Наличие в составе композита 20 вес. % ПП в виде мелкодисперсных включений приводит к заметному снижению температуры контртела, а поверхность образца трения становится более гладкой. При испытаниях в граничной смазке получено, что интенсивность изнашивания композита заметно выше, чем при сухом трении скольжения (таблица 4). Однако, величина интенсивности износа композита, сформированного одношнековой экструзией ниже, чем ненаполненного СВМПЭ всего на ~10%.

На основании полученных результатов в рамках последующих трибологических испытаний использовали только «СВМПЭ+20 вес. % ПП» (ОЭ - Г).

Таблица 4 - Интенсивность изнашивания и температура контртел СВМПЭ и СВМПЭ+20 вес. % ПП; режим $P=140$ Н, $V=0,5$ м/с

| Состав, вес. % | Интенсивность изнашивания, 10^{-6} мм ³ /Н×м | Температура контртела, °С |
|------------------|---|---------------------------|
| Сухое трение | | |
| СВМПЭ (а) | 3,30±0,39 | 58,4±2 |
| СВМПЭ+20 ПП (б) | 2,81±0,12 | 42,5±2 |
| Граничная смазка | | |
| СВМПЭ (в) | 2,18±0,18 | 26,5±2 |
| СВМПЭ+20 ПП (г) | 1,98±0,06 | 26,0±2 |

Показано, что минимальная интенсивность износа $1,09 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м (рисунок 7) характерна для $P \times V = 60 \times 0,1$ м/с, в то время как максимальная $1,98 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м – при $P \times V = 140 \times 0,5$ м/с. В то же время по абсолютной величине отличие не превышало 2-х раз. С позиции изменения температуры контртела (нержавеющая сталь) наличие граничной смазки минимизирует нагрев как самого

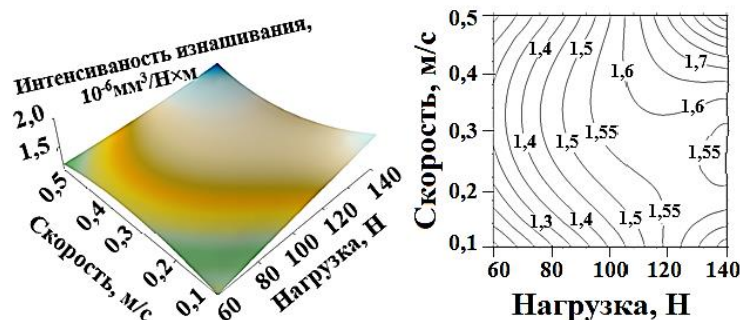


Рисунок 7 - Зависимость интенсивности изнашивания образцов на основе СВМПЭ от нагрузки и скорости испытания в граничной смазке, схема «вал-колодка»

контртела, так и полимерных композитов. В результате, фактор температуры может быть исключен из списка параметров способных оказывать влияние на величину интенсивности износа. Таким образом, наличие граничной смазки фактически нивелирует влияние нагрузочно-скоростных параметров трибоиспытаний.

В пятой главе исследовано влияние варьирования содержания ПП и ПЭВП-прив-ВТМС (в диапазоне 10-20 вес. %) на экструдруемость, структуру и механические свойства композитов на основе СВМПЭ (GUR2122). Рассчитана и построена область значений ПТР в зависимости от количества пластифицирующих компонентов (рисунок 8,а). Видно, что общее содержание наполнителей должно быть не менее 25 вес.%. Отметим, что задача подбора состава композита СВМПЭ имеет целью достижение взаимно противоположных целей. С одной стороны, ненаполненный СВМПЭ имеет высокие характеристики физико-механических и трибологических свойств, что определяется, прежде всего, однородной структурой. По этой причине введение разных по размеру и составу компонентов (включая несовместность СВМПЭ и ПП) заметно ухудшает гомогенность структуры и сопровождается уменьшением комплекса механических свойств.

Закрашенная область на рисунке 8,б, а именно состав «СВМПЭ + 17 % ПЭВП-прив-ВТМС +12 % ПП», обеспечивает соответствие всех эффективных

свойств композиции заданным ограничениям (по механическим и трибологическим характеристикам находится на уровне или выше чистого СВМПЭ).

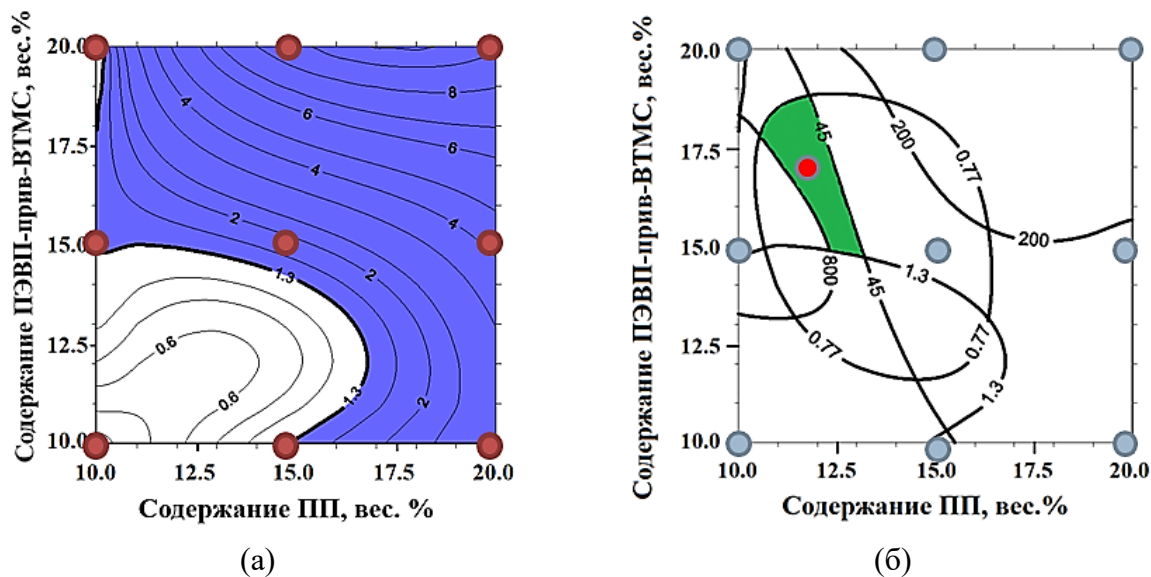


Рисунок 8 - Области, определяющие содержание полипропилена ПП21030 и ПЭВП-прив ВТМС, необходимые для получения композитов с заданными свойствами: а) ПТР, б) механических и трибологических характеристик

Показано, что величины предела прочности, удлинения при разрыве, предела текучести, модуля упругости образцов, полученных методом одношнековой экструзии, превосходят в среднем на 10-15 % соответствующие характеристики композитов, изготовленных горячим прессованием порошковой смеси.

Указанное отличие свойств обусловлено различным характером сформированной структуры при указанных методах получения. При горячем прессовании порошковых смесей (рисунок 9,а) формируется неоднородная структура с крупными включениями ПП, размер которых соответствует исходному размеру порошинок.

Таблица 5 - Механические характеристики СВМПЭ и композиции «СВМПЭ + 17 вес. % ПЭВП-прив-ВТМС + 12 вес. % ПП»

| Состав, вес. % | Модуль упругости E , МПа | Предел текучести σ_T , МПа | Предел прочности σ_B , МПа | Удлинение при разрушении ε , % | Ударная вязкость a_k , кДж/м ² | ПТР, г/10 мин |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|---|---------------|
| СВМПЭ | 711±40 | 21,6±0,6 | 42,9±3,1 | 485±28 | 151±11 | ≥0 |
| СВМПЭ +17 ПЭВП-прив-ВТМС +12 ПП (ГП) | 814±41 | 24,9±0,3 | 22,9±1,2 | 203±28 | 55±5 | 1,7 |
| СВМПЭ +17 ПЭВП-прив-ВТМС +12 ПП (ОЭ) | 948±58 | 26,9±0,4 | 31,1±0,8 | 381±24 | 115±27 | 1,7 |

В композите, полученным методом ОЭ, за счет реализованного совмещения полимерных компонентов в двухшнековом экструдере формируется достаточно однородная структура. В ней изначально крупные частицы ПП оказываются мелко диспергированными (рисунок 9,в) до размера 10 мкм (рисунок 10).

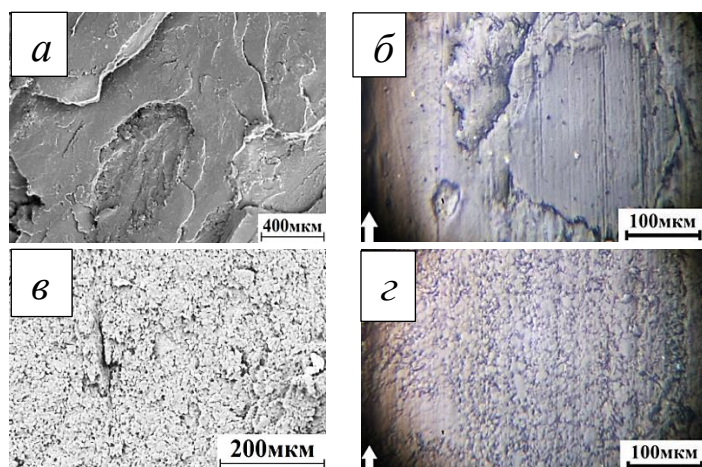


Рисунок 9 - Изображения структуры (а, в) и поверхностей дорожек трения (б, г) композитов: «СВМПЭ +17 % ПЭВП-прив-ВТМС +12 % ПП»: горячее прессование порошковых смесей (а, в), одношнековая экструзия гранулята (б, г)

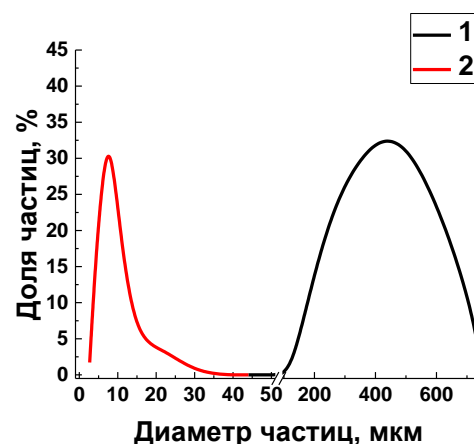


Рисунок 10 - Дифференциальная кривая распределения частиц полипропилена по размерам: 1 – горячее прессование порошковых смесей, 2 – одношнековая экструзия гранулята

В шестой главе приведены результаты исследований по разработке рационального состава высокопрочного, экструдированного, износостойкого композита на основе матрицы «СВМПЭ + 17 % ПЭВП-прив-ВТМС + 12 % ПП» с добавлением полых стеклосфер и стекловолокон. На рисунке 11 видно, что с увеличением содержания ПСС происходит увеличение модуля упругости при некотором повышении интенсивности износа. Можно констатировать нецелесообразность введения более 5 вес. % ПСС.

С увеличением содержания МСВ до 5 вес. % модуль упругости повышается до 1200 МПа, и при этом происходит незначительное повышение интенсивности износа. Дальнейшее повышение количества этого наполнителя не сопровождается увеличением модуля упругости.

В случае введения РСВ при увеличении его содержания с 5 до 10 вес. % модуль упругости повышается в 1,7 раза и в 1,4 раза по сравнению с ненаполненным СВМПЭ и СВМПЭ+17 % ПЭВП-прив-ВТМС+12 % ПП, соответственно. Однако повышение количества наполнителя до 10% сопровождается повышением интенсивности износа в 1,5 раза (с 1,04 до $1,46 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м), а также интенсивным изнашиванием контртела (при незначительном повышении модуля упругости). Таким образом, в армированных композитах на основе экструдированной матрицы СВМПЭ+17 вес. % ПЭВП-прив-ВТМС+12 вес. % ПП независимо от аспектного отношения (ПСС, МСВ и РСВ) оптимальным содержанием стеклонаполнителя является 5 вес. %. Данное содержание обеспечивает повышение прочностных характеристик многокомпонентной экструдированной матрицы, высокую износостойкость композиций и необходимую текучесть расплава для шнековой экструзии. Экструдированный композит предполагается

использовать для изготовления изделий методом одношнековой экструзии, в частности направляющих конвейеров или портовых отбойников.

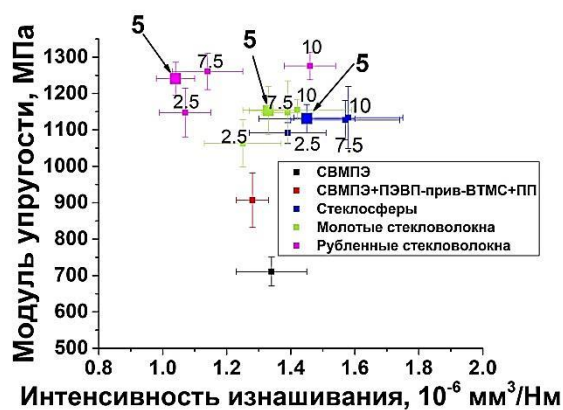


Рисунок 11 - Зависимость модуля упругости при растяжении E (МПа) и интенсивности изнашивания от варьирования содержания стеклонаполнителя (от 2,5 до 10 вес. %); схема «вал-колодка» - 60 Н×0,3 м/с; ГП гранул

Проведен краткий обзор количественных показателей, которые различные производители приводят в качестве паспортных данных для таких изделий. На его основе установлены пороговые количественные показатели физико-механических и трибологических свойств: модуль упругости $E > 1200$ МПа; предел текучести $\sigma_T > 25$ МПа; предел прочности $\sigma_e > 24$ МПа; удлинение при разрыве $\epsilon = 200$ %; коэффициент трения - 0,10; интенсивность изнашивания при $P=60$ Н и $V=0,3$ м/с $\leq 1,1 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м; при $P=140$ Н и $V=0,5$ м/с $\leq 2,2 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н×м. Далее проводили выбор рациональных значений технологических

(управляющих) параметров, а именно количества переработок СВМПЭ в экструдере и аспектного соотношения стеклонаполнителя. На рисунке 12 приведена область пересечения изолиний всех механических и трибологических характеристик после их наложения друг на друга (в данном случае количество переработок в экструдере – это не количество последовательно проведенных компаундирований, а число обработок, связанных с совмещением в двухшнековом экструдере и при одношнековой экструзии). Видно, что в выделенную область попадает только композит, полученный методом одношнековой экструзии (рисунок 12). Данный результат объясняется возможностью равномерного распределения волокон при их преимущественной ориентации в полимерной матрице

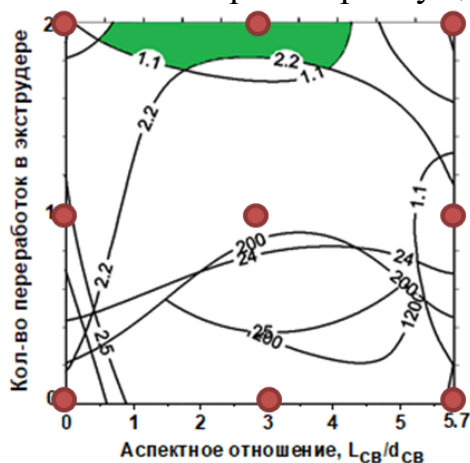


Рисунок 12 - Области, определяющие количество переработок СВМПЭ (0 – для порошковой смеси, 1 - для ГП гранулята; 2 - для ОЭ гранулята) и длину стекловолокон, необходимых для получения композиций с требуемыми свойствами

(рисунок 13) (наличия привитых групп ВТМС) это позволяет достичь высоких механических и триботехнических свойств. Использование ПСС (размером 15-200 мкм) не обеспечивает попадание в область заданных параметров в основном по причине высокой интенсивности износа. С другой стороны, рубленые стекловолокна (длиной ~ 3000 мкм), выступающие над поверхностью полимерной матрицы оказывают режущее воздействие на поверхность контртел, что также приводит к возрастанию интенсивности изнашивания. Это исключает возможность их эффективного использования в качестве направляющих (конвейеров) в изделиях машиностроения.

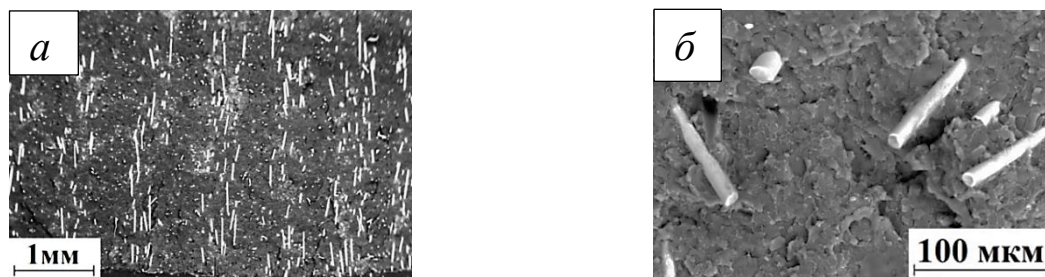


Рисунок 13 - РЭМ-изображения структуры композита СВМПЭ+17 вес.% ПЭВП-прив-ВТМС+12 вес.% ПП+5 вес.% МСВ, полученного одношнековой экструзией

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что введение в СВМПЭ (*GUR2122*) порошка ПП21030 в количестве ~20 вес. % позволяет существенно повысить показатель текучести расплава смеси (до 10 раз) по сравнению с чистым СВМПЭ. Однако формирующаяся при горячем прессовании порошковых смесей гетерогенная структура с включениями ПП размером ~450 мкм и отсутствие межфазной адгезии определяют существенное снижение деформационно-прочностных характеристик таких композитов.

2. Установлено, что изготовление композитов СВМПЭ *GUR2122* - ПП21030 методом одношнековой экструзии фидстоков, сформированных двухшнековым компаундированием, позволяет повысить модуль упругости на 50%, предел текучести на 20%, сопротивление изнашиванию на 60% при сухом трении и на 10% в условиях граничной смазки относительно чистого СВМПЭ. Это достигается за счёт формирования однородной структуры, а также диспергирования частиц полипропилена (до размеров 10-15 мкм), выполняющих роль упрочняющих включений.

3. Показано, что экструзионное двухшнековое совмещение смеси «СВМПЭ + 17 вес.% ПЭВП-прив-ВТМС + 12 вес.% ПП» с последующим формированием заготовок одношнековой экструзией за счёт эффективного диспергирования частиц полимерных наполнителей обеспечивает формирование однородной мелкодисперсной структуры и повышение значений модуля упругости, предела текучести в среднем на 25-30 % по сравнению с ненаполненным СВМПЭ.

4. Показано, что равномерное распределение и преимущественная ориентация стекловолокон, а также их адгезия к полимерной матрице в многокомпонентном композите «СВМПЭ + 17 вес.% ПЭВП-прив-ВТМС + 12 вес.% ПП + 5 вес.% РСВ», изготовленном одношнековой экструзией гранулята, обеспечивают прочностные (модуль упругости до 1500 МПа, предел текучести до 30 МПа) и трибологические свойства (интенсивность изнашивания до 1×10^{-6} мм³/Н×м), значительно превосходящие таковые для ненаполненного СВМПЭ.

5. Высокопрочный экструдруемый износостойкий композит «СВМПЭ + 17 вес.% ПЭВП-прив-ВТМС + 12 вес.% ПП», наполненный 5 вес. % молотыми стекловолокнами (МСВ), рекомендуется для изготовления методом шнековой экструзии направляющих для роликовых и пластинчатых цепей, конвейеров, а также производства труб для перекачки агрессивных жидкостей.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, позволяют рекомендовать полученные композиты на основе СВМПЭ для изготовления методами шнековой экструзии направляющих для роликовых и пластинчатых цепей, конвейеров, узлов трения, а также производства труб для перекачки агрессивных жидкостей. Изготовление объемных изделий методами шнековой экструзии более целесообразно экономически и не требует использования сложного и дорогостоящего технологического оборудования по сравнению с традиционным методом получения изделий сложной формы (компрессионным спеканием порошковых смесей). При дальнейшем развитии темы исследования диссертационной работы следует обратить внимание на факторы, обеспечивающие повышение равномерности распределения частиц наполнителей по всему объему композитов с целью дальнейшего повышения их механических и трибологических характеристик. Одним из направлений дальнейших исследований, связанных с результатами данной работы, является выявление влияния различных сред и условий испытаний на изменение структуры, механических и трибологических свойств композитов, сформированных шнековой экструзией. Дополнительное воздействие на материал отрицательных температур, агрессивных сред (кислот и щелочей) и т. п., вероятно, приведет к деградации ряда механических и трибологических характеристик. Ключевым аспектом при проведении подобных исследований является обеспечение возможности управления функциональными (эксплуатационными) свойствами через контролируемое формирование наперед заданной структуры композитов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК:

1. Панин, С.В. Экструдруемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко, Д. Г. Буслович, Ю. В. Донцов // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2018. - Т. 19 (1). – С. 16–23.
2. Панин, С.В. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. В. Панин, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко, Д. Г. Буслович, Н. Н. Валентюкевич // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2018. – Т. 61 (11). – С. 88–95.
3. Панин, С.В. Структура, трибологические и механические свойства экструдруемых полимер-полимерных СВМПЭ композитов для 3D печати / С. В. Панин, Д. Г. Буслович, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко, Ю. В. Донцов, С. В. Шилько // Трение и износ. – 2019. – Т. 40 (2). - С. 143–152.
4. Панин, С.В. Компьютерный дизайн состава экструдруемых полимер-полимерных СВМПЭ композитов с заданными антифрикционными и механическими свойствами / С. В. Панин, С. А. Бочкарева, Д. Г. Буслович, Л. А. Корниенко, Б.А. Люкшин, И. Л. Панов, С.В. Шилько // Трение и износ. -2019. – Т. 40 (6). – С. 661–672.

5. Панин, С.В. Двухкомпонентные полимер-полимерные композиции на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) для аддитивных производственных технологий / С. В. Панин, **Д. Г. Буслевич**, Л. А. Корниенко, Ю. В. Донцов, Л. Р. Иванова, // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2019. – Т. 16 (3). – С. 377–386.

6. Бочкарева, С.А. Разработка износостойкого экструдированного композитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с заранее заданными свойствами / С.А. Бочкарева, Н.Ю. Гришаева, **Д.Г. Буслевич**, Л.А. Корниенко, Б.А. Люкшин, С.В. Панин, И.Л. Панов, Ю.В. Донцов // *Механика композитных материалов*. – 2020. – Т. 56 (1). – С. 27–43.

7. Панин, С.В. Сравнительный анализ трибологических и механических свойств экструдированных полимер-полимерных СВМПЭ композитов, полученных методами 3D-печати и горячего прессования / С. В. Панин, **Д. Г. Буслевич**, Л. А. Корниенко, В.О. Алексенко, Ю.В. Донцов, Б.Б. Овечкин, С.В. Шилько // *Трение и износ*. – 2020. – Т. 41 (3). – С. 313-322.

8. Панин, С.В. Роль упругого восстановления в формировании трибологических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена с разным размером исходных порошков / С.В. Панин, Л.А. Корниенко, **Д.Г. Буслевич**, В.О. Алексенко // *Известия высших учебных заведений. Серия: Физика*. – 2020. – Т. 63 (5). – С. 141-149.

Статьи, индексируемые в библиографических базах *Web of Science / Scopus*:

9. *Panin, S.V. Effect of Adhesion on Mechanical and Tribological Properties of Glass Fiber Composites, Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Powders with Various Initial Particle Sizes / S.V. Panin, L.A. Kornienko, Q. Huang, **D.G. Buslovich**, S.A. Bochkareva, V.O. Alexenko, I.L. Panov, F. Berto // *Materials*. – 2020. - Vol. 13, №. 3. - P. 1602.*

10. *Dontsov, Y.V. Taguchi Optimization of Parameters for Feedstock Fabrication and FDM Manufacturing of Wear-Resistant UHMWPE-Based Composites / Y.V. Dontsov, S.V. Panin, **D.G. Buslovich**, F. Berto // *Materials*. – 2020. - Vol. 13, №. 12. - P. 2718.*

11. *Panin, S.V. UHMWPE-Based Glass-Fiber Composites Fabricated by FDM. Multiscaling Aspects of Design, Manufacturing and Performance / S.V. Panin, **D.G. Buslovich**, Y.V. Dontsov, S.A. Bochkareva, L.A. Kornienko, F. Berto // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, №. 6. – P. 1515.*

Патент на изобретение в РФ.

1. Патент на изобретение № 2674019 от 04.12.2018 г. Панин С.В., Корниенко Л.А., Иванова Л.Р., Алексенко В.О., **Буслевич Д.Г.** Экструдированный антифрикционный композит на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7389. Подписано в печать 22.04.2022 г.
Формат 60x84 1/16, объем 1,125 п. л. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 52-98-49