

ISSN 2223-5396

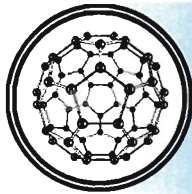
Заснаваны ў 2011 г.



Веснік

Гродзенскага дзяржаўнага
ўніверсітэта імя Янкі Купалы

Серыя 6



Тэхніка

Том 8, № 1, 2018





**«Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы»
Серыя 6. Тэхніка»**

Заснавальнік – Установа адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы».

Часопіс зарэгістраваны ў Міністэрстве інфармацыі Рэспублікі Беларусь.

Пасведчанне № 1463 ад 01.07.2011.

Навуковы, вытворча-практычны часопіс

Выдаецца з ліпеня 2011 года, выходзіць раз у паўгоддзе.

**“Vesnik Hrodzenskaha Dziarzhauaha Universiteta Imia Ianki Kupaly.
Seryia 6. Tekhnika”**

*Часопіс уключаны ў Пералік навуковых выданняў Рэспублікі Беларусь
для апублікавання вынікаў дысертацыйных даследаванняў,
а таксама*

ўваходзіць у навукаметрычную базу дадзеных «Расійскі індэкс навуковага цытавання»

Часопіс асвятляе пытанні фізікі кандэнсаванага стану (тэхнічныя навукі), матэрыялазнаўства і тэхналогіі матэрыялаў, трэння і зносу ў машынах, тэхналогіі і абсталявання механічнай і фізіка-тэхнічнай апрацоўкі, матэматычнага мадэлявання, лікавых метадаў і комплексу праграм, парашковай металургіі і кампазіцыйных матэрыялаў, нанатэхналогіі і нанаматэрыялаў, тэхналогіі і перапрацоўкі палімераў і кампазітаў, працэсаў і апаратаў харчавых вытворчасцей, машын, аграгатаў і працэсаў, будаўнічых матэрыялаў і вырабаў, гісторыі навукі і тэхнікі. Публікуюцца таксама рэцэнзіі, артыкулы, прысвечаныя вядомым беларускім вучоным, хроніка навуковага жыцця ГрДУ імя Янкі Купалы, іншыя матэрыялы.

Артыкулы друкуюцца на беларускай, рускай, нямецкай і англійскай мовах.

Разлічаны на спецыялістаў і шырокае кола чытачоў.

Нашы падпісныя індэксы: для індывідуальных падпісчыкаў – 00680, для арганізацый – 006802.

Адрас рэдакцыі: вул. Ажэшкі, 22,
230023, г. Гродна, Рэспубліка Беларусь.
Тэл./Факс: 8(0152) 73-19-10.

Адрас для карэспандэнцыі: вул. Леніна, 4,
230025, г. Гродна, Рэспубліка Беларусь.
Тэл.: 8(0152) 77-21-47, +375 33 6893315,
e-mail: vesnik@grsu.by

Адрас вэб-сайта: <http://vesnik.grsu.by>

Рэдактар: Т. В. Комар. Карэктар: К. М. Дараховіч.
Падрыхтоўка арыгінал-макета: Т. А. Пахомава.

Падпісана да друку 21.03.2018. Фармат 70 × 108%. Папера афсетная. Рызаграфія.
Ум. друк. арк. 9,28. Ул.-выд. арк. 11,26. Тыраж 100 экз. Заказ 020.

Надрукавана на тэхніцы выдавецкага цэнтра

Установа адукацыі «Гродзенскі дзяржаўны ўніверсітэт імя Янкі Купалы».

ЛП № 02330/146 да 30.04.2019.

Зав. Тэлеграфны, 15а, 230023, г. Гродна. Тэл.: 8(0152) 72-12-96, e-mail: pko_izdat@grsu.by

Том 8, № 1, 2018

Технологія і перапрацоўка полімераў і кампазітаў

УДК 539.8

**А. И. Свириденок, С. А. Чижик, А. В. Кравцевич, А. А. Суслов,
Л. И. Шашура, В. А. Русецкий****МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА «PULL-OUT»
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИОННОГО
СОЕДИНЕНИЯ «АРМИРУЮЩЕЕ ВОЛОКНО –
ТЕРМОПЛАСТИЧНАЯ МАТРИЦА»**

Во введении отмечено важное значение разработки новых композиционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых термопластичных материалов (матрицы) и армирующих волокон искусственного и природного происхождения, производимых предприятиями химической промышленности Беларуси. Конструирование новых композиционных материалов включает процессы лабораторного моделирования адгезионных контактов при их изготовлении и испытаниях. Целью работы является усовершенствование методики исследования межфазных явлений на примере модели адгезионной системы «полиэтиленовая матрица – армирующее волокно» методом вытаскивания («pull-out») волокна из матричной ячейки с использованием адгезиметра АТ-101. В основной части статьи изложены элементы модернизированной методики, преимуществами которой являются более высокая производительность изготовления экспериментальных образцов и воспроизводимость измерений. Приведены результаты исследований влияния на прочность адгезионного соединения: площади адгезионного соединения «полнамидное волокно – матрица», температуры расплава в момент формирования образцов, наномодификации полиэтиленовой матрицы, увеличения площади контакта (шероховатости) поверхностей армирующих элементов, влияния внешнего давления и роли трения в адгезионной прочности. Оценена эффективность совместного применения жестких армирующих волокон природного происхождения (лен) и синтетических полнамидных волокон (двухволоконное армирование). Экспериментальным путем показана высокая воспроизводимость полученных данных. В заключении сделан вывод о том, что возможности использования полиэтилена в качестве матрицы композиционного материала не исчерпаны. Адгезией полиэтилена низкой плотности к армирующим волокнистым материалам синтетического и природного происхождения можно управлять как за счет индивидуальных и комплексных технологических, механических и физико-химических приемов модифицирования полимерного связующего, так и изменения морфологии поверхности применяемых ингредиентов. Предложены оригинальные схемы экспериментальной оценки влияния

Свириденок Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., академик, зам. директора по НИР Гродненского филиала ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пл. А. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь; e-mail: resource@mail.grodno.by

Чижик Сергей Антонович, д-р техн. наук, академик, зав. лабораторией нанопроцессов и технологий ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. П. Бровки, 15, 220072, г. Минск, Беларусь; e-mail: chizhik_sa@tut.by

Кравцевич Алексей Владимирович, канд. техн. наук, директор Гродненского филиала ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пл. А. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь; e-mail: resource@mail.grodno.by

Суслов Андрей Анатольевич, канд. техн. наук, директор ОДО «Микротестмашины» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: ул. Тельмана, 44, 246003, г. Гомель, Беларусь; e-mail: microtm@mail.ru

Шашура Люцина Иосифовна, зав. сектором «Межфазные явления в гетерогенных средах» Гродненского филиала ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пл. А. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь; e-mail: resource@mail.grodno.by

Русецкий Вячеслав Альбертович, науч. сотрудник сектора «Межфазные явления в гетерогенных средах» Гродненского филиала ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси» (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пл. А. Тизенгауза, 7, 230023, г. Гродно, Беларусь; e-mail: resource@mail.grodno.by

Змест

Матэрыялазнаўства і тэхналогія матэрыялаў

Неменёнок Б. М., Задруцкий С. П., Пивоварчик А. А., Довнар Г. В.
(Минск – Гродно, Беларусь). Низкотоксичная смесь
для обработки алюминиевых сплавов.....6

Задруцкий С. П., Неменёнок Б. М., Довнар Г. В., Пивоварчик А. А.
(Минск – Гродно, Беларусь). Низкотоксичный препарат для рафинирующей
и рафинирующе-модифицирующей обработки расплавов на основе алюминия.....13

Тэхналогія і абсталяванне механічнай і фізіка-тэхнічнай апрацоўкі

Исаков С. А., Лещик С. Д., Гостик Ю. А. (Гродно, Беларусь).
Сравнительный анализ методов улучшения технологических
параметров соединений дуговой сваркой в среде защитного газа.....20

Матэматычнае мадэляванне, лікавыя метады і комплексы праграм

Жарнова О. А. (Гродно, Беларусь). Компьютерная диагностика шейного отдела
позвоночника при его движении в сагиттальной плоскости.....32

Линник Д. А., Лещик С. Д. (Гродно, Беларусь).
Разработка математических моделей колебаний масс колесного трактора
и метода имитационного моделирования колебаний на ПЭВМ.....41

Нанатэхналогіі і нанаматэрыялы

Сергиенко И. Г., Зноско К. Ф., Тарковский В. В. (Гродно, Беларусь).
Получение наночастиц и суспензий на их основе методом электроразрядного
разрушения в жидкости при микросекундном импульсе.....50

Тэхналогія і перапрацоўка палімераў і кампазітаў

**Свиридёнков А. И., Чижик С. А., Кравцевич А. В., Суслов А. А., Шашура Л. И.,
Русецкий В. А. (Гродно – Минск – Гомель, Беларусь).** Модернизация метода
«pull-out» исследования прочности адгезионного соединения
«армирующее волокно – термопластичная матрица».....62

Працэсы і апараты харчавых вытворчасцей

Троцкая Т. П., Клишанец Е. Т., Апанович З. В. (Гродно, Беларусь).
Выделение хитин-глюканового комплекса из биомассы *Aspergillus niger*,
побочного продукта производства лимонной кислоты, и его товароведная оценка.....75

**Потеха В. Л., Велямов М. Т., Невская Е. В., Шведко А. А., Потеха А. В.,
Веренич М. И. (Беларусь – Россия – Казахстан).** Применение микроволновых
колебаний сверхвысоких частот для повышения эффективности
технологического процесса производства хлебобулочных изделий.....83

Русина И. М., Снитко О. С., Колесник И. М. (Гродно, Беларусь).
Выбор оптимальных режимов тестоведения при производстве
хлебобулочных изделий на основе композитных смесей,
включающих пшеничную муку высшего сорта и порошок столовой свеклы.....94

внешнего давления и фрикционной составляющей усилий разрушения элементарного адгезионного контакта «волокно – связующее». Расширены возможности с меньшими затратами времени и средств с достаточно высокой достоверностью осуществлять первичный отбор основных составляющих полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: адгезия, метод «pull-out», полиамидное волокно, льноволокно, полиэтилен низкой плотности, композит.

Введение. История производства композиционных материалов на основе полимерных синтетических связующих насчитывает более 100 лет с тех пор, как Л. Х. Бакеланд (L. H. Bakeland) создал пригодную для практического применения фенол-формальдегидную смолу и на ее основе композицию «бакелит» [1]. После Второй мировой войны в развитых странах стали активно формироваться новые отрасли промышленности, связанные с созданием и применением особо прочных и многофункциональных композиционных материалов, прежде всего, для авиакосмических отраслей, морского флота, различного вида вооружений, спорта и др. Однако передача накапливаемого опыта развития новых композитов с уникальными свойствами в другие, прежде всего гражданские, отрасли сдерживается очень высокими ценами на современные армирующие высокопрочные и высокомодульные волокна, термостойкие и адгезивно активные полимерные связующие вещества, сложными технологиями изготовления из них изделий [2].

Поэтому в последние 2-3 десятилетия ученые и инженеры многих стран в своих исследованиях усилили внимание развитию знаний и технологий в области создания неметаллических композиционных материалов «эконом-класса» на основе дешевых природных и синтетических волокнистых армирующих и матричных полимерных материалов многотоннажного производства, мировые объемы которых достигли уже 300 млн тонн в год, что примерно равнозначно весу всего населения нашей планеты. О необходимости разработки и организации производства таких материалов более 50 лет назад писал известный ученый Г. Ф. Марк (Herman Francis Mark): «Для использования полимеров необходим следующий комплекс свойств в одном материале: модуль упругости – более 5 ГПа, температура размягчения или плавления – более 500 °С, высокие разрывные удлинения. И эти материалы должны быть дешевыми» [3]. Но до сих пор создать универсальные материалы на основе полимеров, полностью соответствующих выше перечисленным параметрам, не удается.

В современных условиях все более актуальным направлением становится стремление создать «зеленые» композиты, максимально соответствующие современным экологическим требованиям, с применением компонентов природного происхождения [4; 5].

В мире в настоящее время производится почти 6 млн тонн природных волокон 11 наименований. Среди них на пятом месте находится лен (более 800 тыс. тонн). Около 50–60 тыс. тонн льна ежегодно выращивается в Беларуси. Кроме этого, в Беларуси производится около 500 тыс. тонн термопластичных полимеров в год, в том числе 120 тыс. тонн полиэтилена. Выпускаются также полиэфирные, углеродные, вискозные, арселеновые и стекловолокна [6]. Все названные материалы пригодны для применения в качестве ингредиентов композиционных систем. При этом в качестве связующих материалов все чаще используются полиолефины, полиамиды, полиэфиры.

Активно ведутся исследования в области применения в качестве матрицы дешевого материала полиэтилена, в том числе низкой плотности (высокого давления). Несмотря на его низкую адгезионную активность, температуру кристаллизации, недостаточную прочность и модуль упругости, есть основания полагать, что, прибегнув к известным и новым методам модификации связующих и армирующих элементов, можно существенно улучшить свойства полиолефиновых композитов, сохранив их низкую стоимость [7–10].

Научная основа создания технологий и оптимальных составов таких материалов базируется в значительной степени на результатах модельных микромеханических исследований межфазных взаимодействий армирующих и матричных элементов. Для их изучения разработано уже большое количество теоретических и особенно экспериментальных методов исследований [2; 11–15]. При этом качество результатов

исследований моделей взаимодействия основных составляющих армированных волокнами полимерных композитов зависит от точности и воспроизводимости результатов экспериментальных исследований: вытягивание и выталкивание волокна из матричного блока, капли, пленки, методы петли, трех волокон, фрагментации и др. Однако, как показывает опыт, получаемые разными методами результаты измерения характеристик адгезионных соединений могут существенно отличаться, порой в два раза и больше [12].

Наиболее часто применяемым является метод вытягивания волокна из полимерной матрицы – «pull-out» и его варианты [11; 16–18]. Но и он требует модернизации, так как, кроме положительных характеристик, обладает рядом недостатков, связанных с трудностями обеспечения повторяемости получаемых результатов, высокой трудоемкостью подготовки образцов, сложностью изготовления и эксплуатации вспомогательной оснастки.

Целью настоящей работы является:

1. Усовершенствование метода «pull-out» и оценка его эффективности при исследовании механизмов межфазных взаимодействий в системе «армирующее волокно – полимерная термопластичная матрица».

2. Изучение особенностей и перспектив применения в качестве полимерной матрицы полиэтилена низкой плотности (высокого давления), армированного волокнами синтетического и природного происхождения.

Материалы и методы исследования. В качестве основных объектов исследования были выбраны (таблица 1):

– полимерные матричные термопластичные материалы: полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) марки 15803-020 и сополимер этилена с винилацетатом (СЭВА) марки 11708-210;

– армирующие элементы: полиамидные моноволокна (ПА 6) и пучок (нить) льняных волокон (ЛВ);

– модификатор: углеродный наноматериал (УНМ), полученный путем разложения углеводородов в плазме высоковольтного разряда в псевдооживленном слое катализатора (лаборатория дисперсных систем ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси»).

Таблица 1 – Характеристики базовых элементов экспериментальных образцов

Базовые элементы образцов	Вид материала	Основные характеристики				
		плотность, кг/м ³	ПТР, г/10 мин	предел прочности, σ_p , МПа	модуль упругости, Е, ГПа	относительное удлинение, %
Армирующие элементы	Волокно ПА 6, Ø30 мкм	1140,0	–	400,0–500,0	(2,5–3,5)10 ³	40–90
	ЛВ, Ø50 мкм	1400,0	–	240,0	60,0–80,0	1,2–1,6
Матричные полимерные материалы	ПЭНП	920,0	2,5	11,5	–	>500,0
	СЭВА	950,0	20,0	5,0	–	>600,0

Метод изготовления опытных образцов. Для изготовления экспериментальных образцов разработана оригинальная схема, включающая устройства для формирования образцов и их крепления в зажимах верхней и нижней travers адгезиметра (рисунок 1).

Экспериментальный образец на рисунке 1а представляет собой цилиндр 1 диаметром 3,0 мм и высотой 3–4 мм из термопластичного полимера, внутри которого вплавлен армирующий элемент 2 в виде волокна (нити), свободный конец которого жестко фиксируется в блоке 3, изготовленном из термопласта, обладающего высокой адгезионной способностью и недопускающего вытягивания из своей массы армирующего волокна.

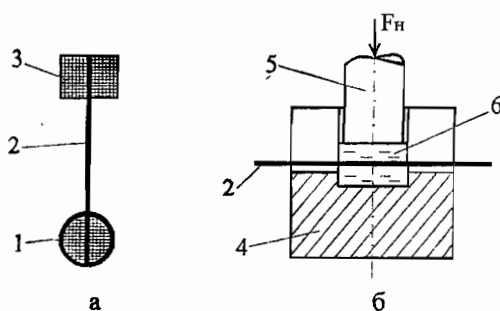


Рисунок 1 – Схема экспериментального образца (а) и технологии его изготовления (б)

Для изготовления экспериментальных образцов применяется специальное устройство, схематично представленное на рисунке 1б. Метод изготовления экспериментальных образцов заключается в сплавлении во внутренней полости пресс-формы 4 двух частей гранулы матричного полимера 6, между которыми предварительно помещено слегка натянутое армирующее волокно 2. С помощью пуансона 5 осуществляется подпрессовка.

После формования и охлаждения до комнатной температуры полученный экспериментальный образец извлекается из пресс-формы и помещается в измерительную систему адгезиметра. Цилиндр 1 закрепляется в подвижной траверсе адгезиметра, блок 3 – в неподвижной.

В процессе эксперимента фиксируются изменения усилия, прикладываемого к армирующему волокну, в процессе вытягивания из полимерной матрицы.

Метод измерения адгезионной прочности. В качестве базового способа измерения основных параметров соединения «волокно – матрица» был избран «pull-out» – метод вытаскивания (выдергивания) армирующего волокна из полимерной матрицы, усовершенствованный за счет использования высокоточного прибора – микроадгезиметра АТ-101 (разработчик – ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь), позволяющего фиксировать и характеризовать динамику деформационных процессов, происходящих в зоне контакта образцов «волокно – матрица» (рисунок 2).

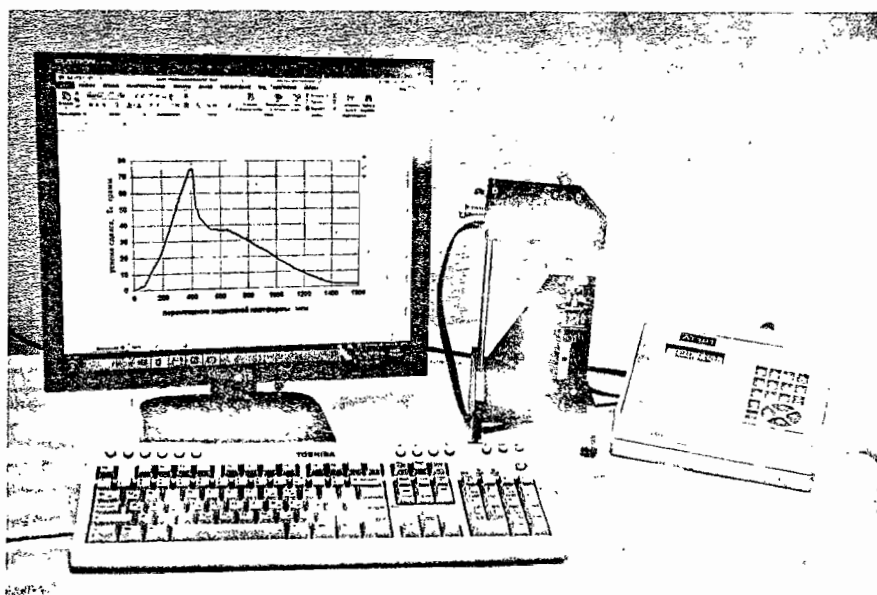


Рисунок 2 – Настольный адгезиметр АТ-101

Микроадгезиметр АТ-101 измеряет усилие разрушения адгезионного соединения и регистрирует перемещение армирующего волокна при его извлечении из матрицы с пошаговой фиксацией контрольных точек измеряемых параметров.

Скорость деформирования образцов может изменяться от 2 до 20 мм/мин. Предусмотрена возможность изменения жесткости консоли, благодаря чему диапазон измеряемых прибором усилий находится от 0,0098 до 9,8 Н. Настольный адгезиметр АТ-101 способен работать как в вертикальном, так и в горизонтальном положении.

Методом «pull-out» осуществляли вытаскивание волокнистого армирующего элемента из микроразмерного полимерного блока, моделирующего проектируемую структуру композита. Определяли усилие сдвига (разрушения изучаемого адгезионного соединения) τ (Н) и рассчитывали прочность адгезионного соединения σ по формуле

$$\sigma = \frac{\tau}{S} \text{ (Па),}$$

где S – площадь адгезионного контакта в соединении, м^2 :

$$S = PL,$$

где P – длина окружности, получаемой нормальным сечением, м; L – длина адгезионного контакта, м.

Рабочие режимы экспериментальных исследований были выбраны, исходя из опыта аналогичных работ. Эксперименты проводили при скорости деформирования образцов 6,8 мм/мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование механических характеристик армированных композитов

Влияние длины (площади) адгезионного контакта на усилие его разрушения представлено на рисунке 3. Температура формования образцов – 185 °С.

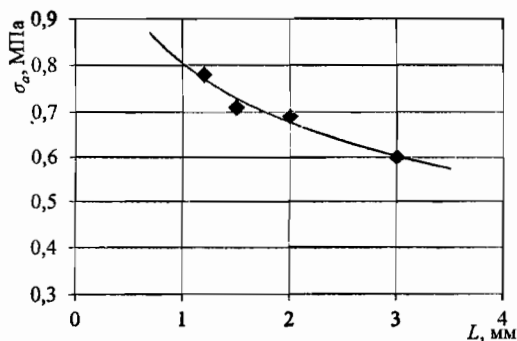
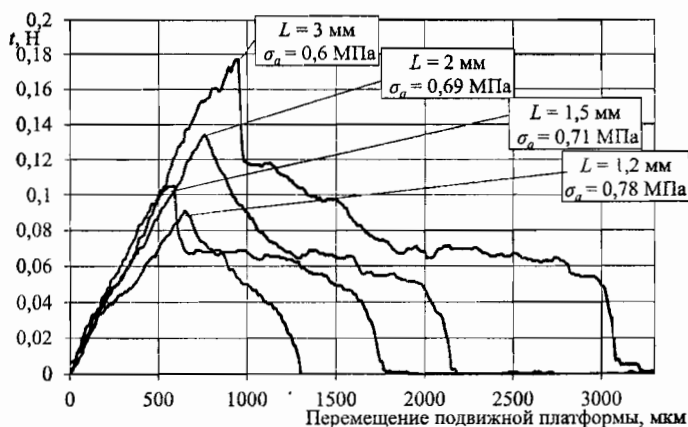


Рисунок 3 – Влияние длины L адгезионного соединения «ПА 6 – ПЭНП» на усилие разрушения контакта (а) и прочность при сдвиге (б)

Из рисунка 3 следует, что вследствие невысокого модуля упругости полиэтилена разница между значениями прочности в пределах длины контакта 1,2–3 мм изменяется не более чем на 25 %.

Влияние технологической температуры формирования адгезионного контакта в системе «волокно ПА 6 – ПЭНП» изучали в диапазоне температур 170–200 °С: после остывания при комнатной температуре определяли усилие, необходимое для его разрушения (прочность адгезионного соединения) (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние температуры формирования на прочность адгезионного соединения в системе «волокно ПА 6 – ПЭНП»

Температура формования, °С	170	180	190	200
Прочность адгезионного соединения, МПа	0,35	0,5	0,6	0,7
Примечание – Длина контакта волокна с матрицей $L = 3$ мм, технологическое давление 3–4 МПа.				

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что адгезионная способность ПЭНП к волокнам ПА при повышении температуры расплава существенно возрастает. Предположительно это связано с уменьшением вязкости расплава и с внутренним давлением в полимере, возникающим в результате усадки в процессе охлаждения.

При длительной (более 20–30 мин) выдержке образца при высокой температуре (>200 °С) наблюдается снижение адгезионной прочности до 25–30 % вследствие термодеструкции полимера.

Влияние давления при испытаниях. Для исследования влияния внешнего давления при испытаниях вытягиванием волокна из полимерной матрицы методом «pull-out» была разработана специальная технологическая схема (рисунок 4).

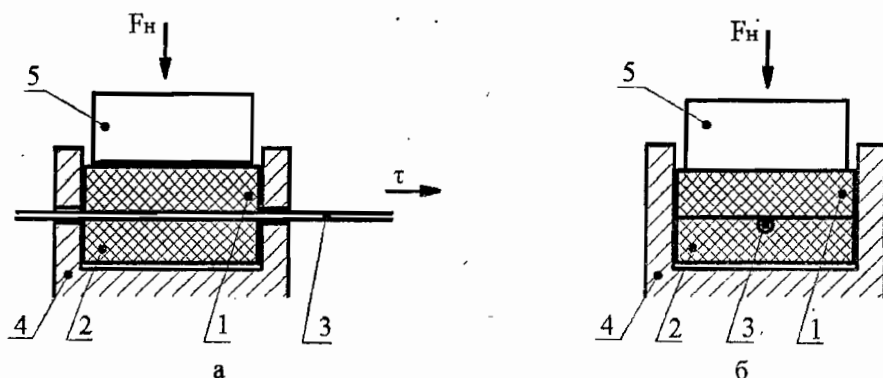


Рисунок 4 – Схема изготовления и нагружения (а) и испытания на сдвиг (б) образцов

Экспериментальный образец представляет собой двухслойную конструкцию из ПЭНП диаметром 3 мм и толщиной каждого слоя 1–2 мм. При изготовлении нижнего слоя 2 в поверхность расплава матричного материала вдавливали волокно 3. Верхний слой 1 изготавливали без армирования. Далее двухслойный образец помещали в цилиндрическую металлическую капсулу 4 (рисунок 4а), после чего создавалось внешнее давление от 0,5 до 6 МПа (груз 5). Затем волокно 3 (рисунки 4а, б) вытаскивали из матрицы. Искривлений волокна в процессе формования образцов и приложения внешнего давления замечено не было. Результаты испытаний представлены на рисунке 5.

Результаты вышеописанных экспериментов свидетельствуют о существенном влиянии внешнего давления на адгезионную прочность (σ) изучаемых адгезионных соединений.

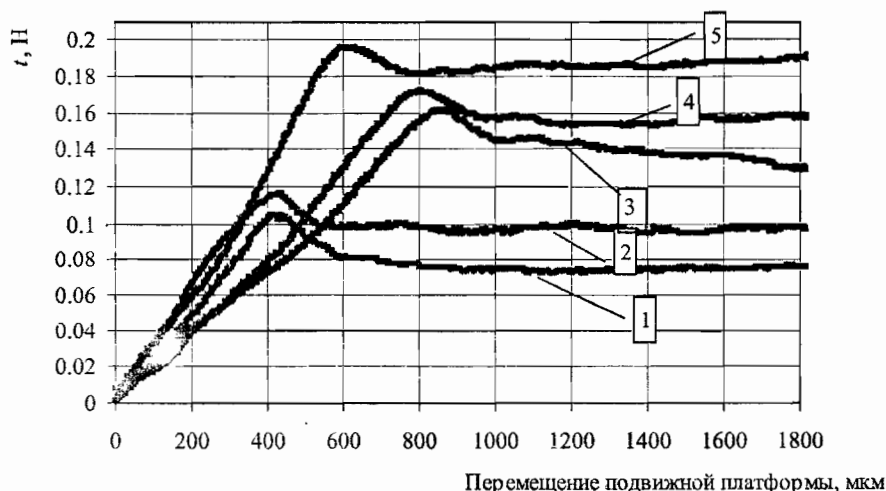


Рисунок 5 – Влияние внешнего давления на прочность сдвига и фрикционное сопротивление вытаскиванию полиамидного волокна из матричного полимера

Наномодифицирование матричного полимера. Для исследования влияния наномодифицирования на адгезионные свойства связующего были получены образцы, в которых термопластичный полимер содержал УНМ в концентрации 0,5 и 1,0 мас. %. На рисунке 6 представлены результаты испытаний, свидетельствующие о том, что введение 0,5 % УНМ в состав связующего на основе ПЭНП в 2 раза повысило прочность адгезионного соединения при сдвиге (рисунок 6).

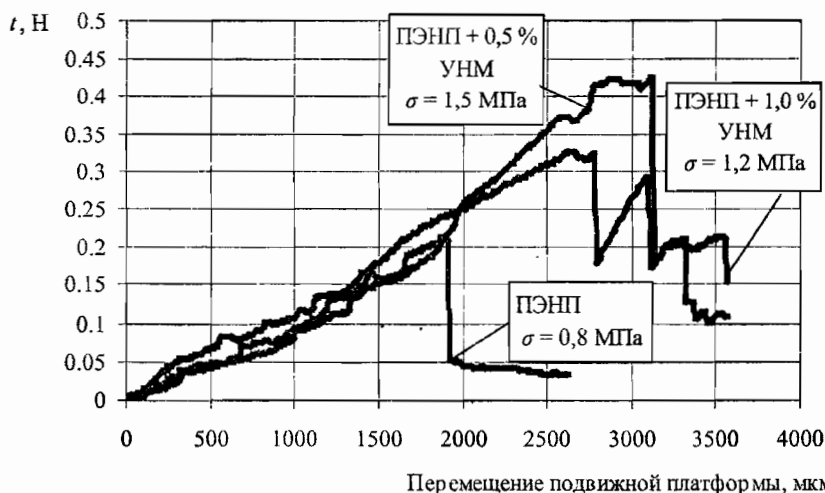


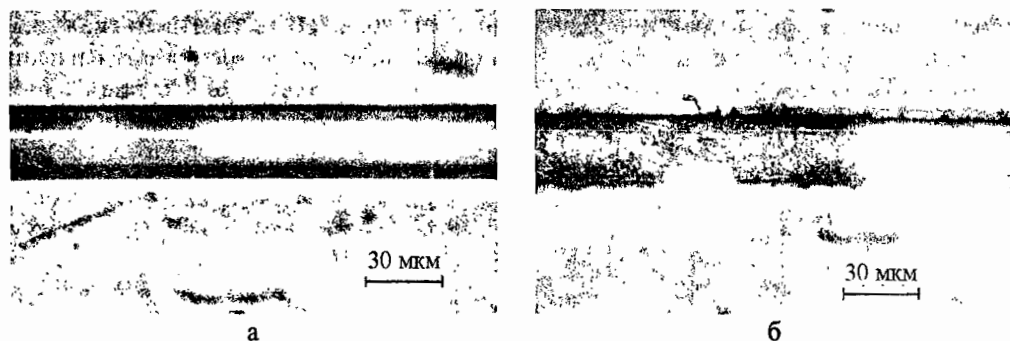
Рисунок 6 – Усилие сдвига (τ) адгезионного соединения волокна ПА 6 с матрицей из ненаполненного ПЭНП и ПЭНП, модифицированного 0,5 и 1,0 мас. % УНМ

Это можно объяснить повышением адгезионной способности матричного полимера вследствие уменьшения размеров его надмолекулярных структур и увеличения количества активных точек контакта материала матрицы с поверхностью армирующего элемента [19].

Изменение площади контакта армирующего элемента. Известны способы химической функционализации полиолефинов прививкой к макромолекулам полярных групп, например, малеинового ангидрида. Но это приводит к увеличению стоимости матричного полимера. Альтернативным путем увеличения прочности соединения неполярного связующего и армирующих элементов являются механические методы

увеличения площади контакта. С этой целью была осуществлена тонкая абразивная обработка с помощью шлифовальной бумаги Р 800 А (размер абразивных зерен 18–25 мкм), приведшая к образованию на поверхности волокон микрошероховатостей высотой 1,5–2 мкм. Длина адгезионного контакта 3 мм, температура формования 185 °С.

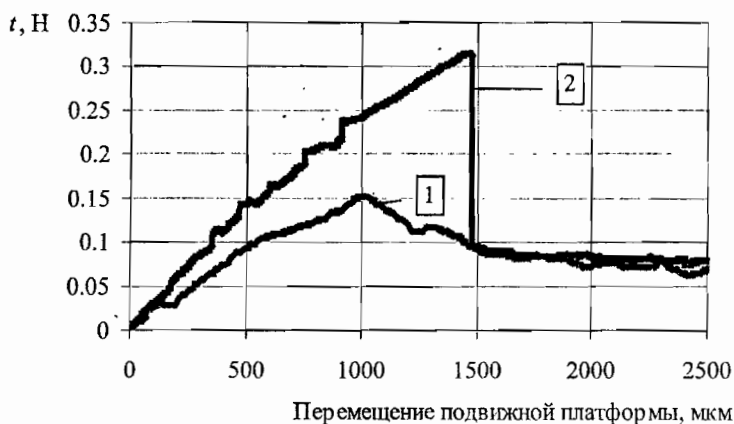
На рисунке 7 показаны волокна ПА 6 до (рисунок 7а) и после (рисунок 7б) абразивной обработки.



Пояснения: а – исходный; б – после абразивной обработки.

Рисунок 7 – Микрофотография профиля моноволокна

Вследствие повышения механической составляющей адгезионная прочность изучаемого соединения увеличилась более чем в 2 раза (рисунок 8).



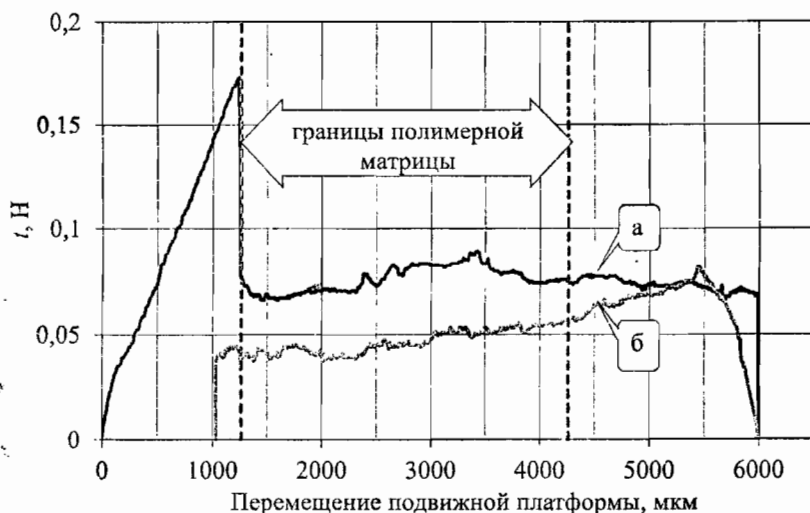
Пояснения: 1 – исходное моноволокно ПА 6 – ПЭНП; 2 – шероховатое моноволокно ПА 6 – ПЭНП.

Рисунок 8 – Диаграмма процесса разрушения адгезионного соединения

Фрикционная составляющая τ . Для исследования фрикционной составляющей были изготовлены образцы из волокон ПА 6 и ПЭНП в качестве связующего. Для данного эксперимента готовились образцы с избыточно длинным волокном, свободный конец которого выступал за пределы цилиндра и имел собственный блок крепления. Длина адгезионного контакта – 3 мм, температура формования адгезионного соединения – 185 °С. Волокно, запаиваемое в матрицу, протягивалось сначала в прямом направлении (рисунок 9, кривая (а)), затем – в обратном (рисунок 9, кривая (б)).

На рисунке 9 ход кривой (а) показывает изменение τ в процессе вытягивания волокна из матрицы. В диапазоне перемещения подвижной платформы от 0 до 1200 мкм происходит упругая деформация части волокна, находящейся между зажимным блоком и матрицей. Пиковое значение τ на кривой (а) предшествует началу движения волокна в матрице и характеризует предел прочности контакта в системе «волокно ПА 6 – ПЭНП».

На отрезке 1200–6000 мкм вытягиванию волокна противодействуют силы трения. Причем на отрезке 1200–4200 происходит вытягивание участка волокна, запаянного в полимерную матрицу, с постепенным замещением на волокно, ранее не контактировавшее с матрицей. На участке 4200–6000 мкм происходит протягивание через матрицу волокна, ранее не контактировавшего с ней. Кривая (б) отражает реверсивное движение армирующего волокна в матрице. Отрезок от 6000 до 5500 отражает упругую деформацию свободного участка волокна между точками закрепления. Пик на кривой (б) в точке 5500 предшествует моменту сдвига волокна в матрице. Дальнейший ход кривой (б) с заметным снижением величины τ определен силой трения. Заметное снижение силы трения по сравнению с соответствующим участком кривой (а), вероятно, является следствием износа и сглаживания микрошероховатостей.



Пояснения: а — протягивание волокна в прямом направлении; б — последующее протягивание волокна в обратном направлении.

Рисунок 9 — Диаграмма процесса разрушения адгезионного соединения системы «волокно — матрица ПЭНП»

Так как адгезионные взаимодействия на кривой (б) отсутствуют, величина τ отражает исключительно фрикционное взаимодействие, причем пиковое значение τ соответствует силе трения покоя. Следовательно, разность пиковых значений τ на кривых (а) и (б) исключает фрикционную составляющую и представляет собой общий результат адгезионного и механического взаимодействия, вызванного взаимопроникновением шероховатостей контактирующих поверхностей в системе «волокно ПА 6 — ПЭНП».

Таким образом, предоставляется возможность оценить вклад «статической» молекулярной составляющей адгезионного взаимодействия и динамического фрикционного взаимодействия в общее значение τ .

Гибридное (двухволоконное) армирование. Эксперименты по оценке возможности и эффективности армирования полиэтиленовой матрицы комплексом «синтетическое и природное (ПА 6 и ЛВ) волокно» выполнялись по вышеприведенной технологии. Были изготовлены экспериментальные образцы (технологические параметры: $L = 1,5$ мм, $T = 185$ °С), в которых волокна ПА 6 и ЛВ были помещены в полимерном блоке параллельно на расстоянии 0,5–0,7 мм. Затем определяли σ при одновременном вытаскивании волокон из матричного материала (рисунок 10).

Из диаграммы разрушения (рисунок 10) следует, что прочность при сдвиге рассматриваемого адгезионного соединения почти в 2 раза выше, чем полученной в аналогичных условиях системы «волокно ПА6 — ПЭНП» (рисунок 3), и на 10–15 % превосходят результаты, представленные на рисунке 8.

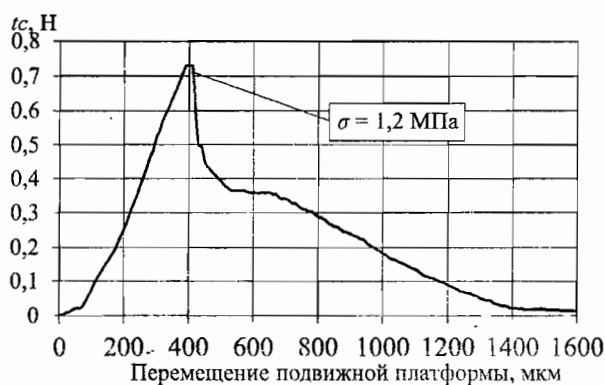


Рисунок 10 – Диаграмма совместного разрушения адгезионных контактов полиамидного волокна ($\varnothing 30 \text{ мкм}$) и льноволокна ($116 \times 56 \text{ мкм}$) в ПЭНП-матрице ($L = 1,5 \text{ мм}$, $T = 185^\circ \text{C}$)

Следует отметить, что характер разрушения адгезионного соединения волокна ПА 6 и ЛВ с полимером (рисунок 11), судя по выходным из матрицы отверстиям и состоянию поверхностей извлеченных образцов волокон, существенно отличается.

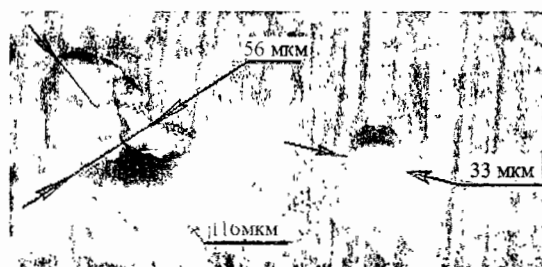


Рисунок 11 – Фотография среза ПЭНП-матрицы после совместного извлечения льноволокна (слева) и ПА-волокна (справа)

Поверхность волокна ПА осталась практически гладкой, ЛВ покрылось фрагментами адгезионного переноса матричного полимера толщиной до 10–15 мкм.

Воспроизводимость результатов исследований адгезионной прочности в системах «волокно – полимерная матрица». Воспроизводимость является одним из важнейших аспектов экспериментального определения достоверности и полезности применения модельных методов подбора материалов, их составов и технологий, необходимых для предсказания свойств проектируемых полимерных композитов. Поэтому в рамках данной работы были проведены эксперименты по определению τ изучаемого адгезионного сочетания «волокно ПА 6 – ПЭНП» (рисунок 12).

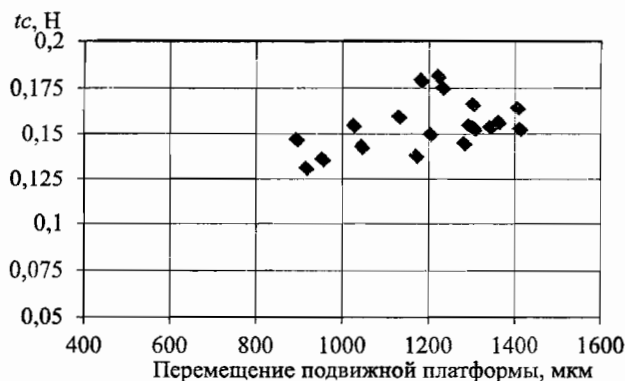


Рисунок 12 – Разброс значений максимальных усилий сдвига системы «ПА 6 – ПЭНП» с длиной адгезионного контакта 3 мм (185°C)

Стандартные отклонения от среднеарифметического значения прочности при сдвиге составили менее $\pm 15\%$, что характеризует высокую воспроизводимость экспериментов [11].

Заключение. В последние 15–20 лет в рамках создания «зеленой экономики» на нашей планете существенно повысился интерес к разработке и применению композитов на основе многотоннажных недорогих термопластичных матричных полимеров в комплексе с синтетическими и природными армирующими составляющими.

Это требует получения знаний в области физики, химии и механики новых композитов. Особенно важны исследования в области механики материалов с целью изучения, прежде всего, деформационно-прочностных механических свойств разрабатываемых материалов на базе эффективных методов моделирования поведения армирующих элементов в полимерной матрице в процессе механического нагружения.

Вышеприведенные результаты тестирования новым адгезиметром АТ-101 прочностных свойств в системах «полимерная матрица – армирующее волокно» отличаются улучшенными показателями точности измерения, удобством проведения экспериментов, скоростью подготовки образцов и воспроизводимости результатов экспериментов.

Показано, что возможности использования полиэтилена в качестве матрицы композиционного материала не исчерпаны. Адгезией ПЭНП к армирующим волокнистым материалам синтетического и природного происхождения можно управлять как за счет индивидуальных и комплексных технологических, механических и физико-химических приемов модификации полимерного связующего, так и изменения геометрической и молекулярной структуры поверхностей применяемых ингредиентов.

Предложены оригинальные схемы экспериментальной оценки влияния внешнего давления и фрикционной составляющей усилия разрушения элементарного адгезионного контакта «волокно – связующее». Расширены возможности с меньшими затратами времени и средств с достаточно высокой достоверностью осуществлять первичный отбор основных составляющих полимерных композиционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зоммерфельд, А. Пластические массы. Изготовление, обработка и испытания неметаллических материалов для бесстружечного формования / А. Зоммерфельд. – М. : Гл. ред. хим. лит., 1935. – 356 с.
2. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер [и др.] ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2009. – 560 с.
3. Марк, Ф. Полимеры в материаловедении / Ф. Марк // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1965. – Т. X, № 2. – С. 203–219.
4. Faryk, O. Biocomposites reinforced with natural fibers 2000–2015 / O. Faryk [et al.] // Progress in Polymer Science. – 2012. – Vol. 37, No. 11. – P. 1552–1596.
5. Mohammed, L. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and its Application [Electronic resource] / L. Mohammed [et al.] // International Journal of Polymer Science. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–15. – Mode of access : <https://www.hindawi.com/journals/ijps/2015/243947/>. – Date of access : 01.02.2018.
6. Песецкий, С. С. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси (обзор) / С. С. Песецкий, Н. К. Мышкин // Полимерные материалы и технологии. – 2016. – Т. 2, № 4. – С. 6–30.
7. Каякс, Я. А. Физико-механические свойства композитов на основе вторичного полиэтилена и волокнистых отходов льняного производства / Я. А. Каякс, С. А. Рейхмане, М. Г. Циприн // Механика композитных материалов. – 1999. – Т. 35, № 2. – С. 199–210.
8. Torres, F. G. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene / F. G. Torres, M. L. Cubillas // Polymer Testing. – 2005. – Vol. 24, No. 6. – P. 694–698.
9. Ogah, A. Characterization and Comparison of Rheological Properties of Agro Fiber Filled High-Density Polyethylene Bio-Composites / A. Ogah, J. Afiukwa, A. Nduji // Open Journal of Polymer Chemistry. – 2014. – Vol. 4, No. 1. – P. 12–19.
10. Arrakhiz, F. Z. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: doum/low density polyethylene / F. Z. Arrakhiz [et al.] // Materials & Design. – 2013. – Vol. 43. – P. 200–205.
11. Gorbatkina, Yu. A. Adhesive Strength of the Fibre-Polymer System / Yu. A. Gorbatkina. – Chinchester : Ellis Horwood, 1992. – 264 p.
12. Писанова, Е. В. Адгезионная прочность в системах термопластичный полимер – тонкое волокно. Зависимость измеряемого значения от метода испытаний / Е. В. Писанова, С. Ф. Жандаров, В. А. Довгяло // Механика композитных материалов. – 1993. – Т. 29, № 2. – С. 232–239.

13. Свириденко, А. И. Методы исследования свойств основных компонентов межфазных областей термопластичных композитов (обзор) / А. И. Свириденко [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 81–85.
14. Jones, F. R. A Review of Interphase Formation and Design in Fibre-Reinforced Composites / F. R. Jones // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2010. – Vol. 24, No. 1. – P. 171–202.
15. Барсуков, В. Г. Расчетная оценка термоупругих напряжений в окрестностях волокнистых и дисперсных наполнителей в композитах на основе фторопластов / В. Г. Барсуков [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2015. – № 2 (204). – С. 6–13.
16. Буров, А. К. Высокопрочные стеклопластики / А. К. Буров, Г. Д. Андриевская. – М. : АН СССР, 1958. – 78 с.
17. Zhao, Y. R. Interfacial stress transfer behavior in specially-shaped fiber-matrix pullout test / Y. R. Zhao [et al.] // Acta Mech. Sin. – 2010. – Vol. 26, No. 1. – P. 113–119.
18. Кудинов, В. В. Исследование методом full pull-out взаимного влияния и свойств волокон на прочность их соединения с полимерной матрицей композиционного материала / В. В. Кудинов // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – № 6. – С. 77–80.
19. Свириденко, А. И. Влияние высокодисперсного наполнителя на адгезионные и фрикционные свойства сополимера этилена с винилацетатом / А. И. Свириденко [и др.] // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 4. – С. 401–411.

Поступила в редакцию 12.12.17.

"Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science"
Vol. 8, No. 1, 2018, pp. 62–74
© Yanka Kupala State University of Grodno, 2018

Modernization of the method "pull-out" for studying the strength of the adhesion compound "reinforcing fiber – thermoplastic matrix"

A. I. Sviridenok¹, S. A. Chizhik², A. V. Kravtsevich³, A. A. Suslov⁴, L. I. Shashura⁵,
V. A. Rusetski⁶

¹ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
A. Tizengauza Sq., 7, 230023, Grodno, Belarus; e-mail: resource@mail.grodno.by

² A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
P. Brovki St., 15, 220072, Minsk, Belarus; e-mail: chizhik_sa@tut.by

³ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
A. Tizengauza Sq., 7, 230023, Grodno, Belarus; e-mail: resource@mail.grodno.by

⁴ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
Telmana St., 44, 246003, Gomel, Belarus; e-mail: microtm@mail.ru

⁵ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
A. Tizengauza Sq., 7, 230023, Grodno, Belarus; e-mail: resource@mail.grodno.by

⁶ A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Science of Belarus (Belarus)
A. Tizengauza Sq., 7, 230023, Grodno, Belarus; e-mail: resource@mail.grodno.by

Abstract. In the introduction the importance of developing new composite materials based on multi-tonnage thermoplastic materials (matrix) and reinforcing fibers of artificial and natural origin, produced by Belarusian chemical industry enterprises, is noted. The construction of new composite materials involves the adhesive contacts laboratory modeling processes during their manufacture and testing. The aim of the work is to improve the technique for studying interphase phenomena using the model "polyethylene matrix – reinforcing fiber" adhesion system by pulling out fiber from the matrix cell using an AT-101 adhesion meter. In the main part of the article the elements of the redesigned test are described, the advantages of which are the higher experimental samples production capacity and the reproducibility of measurements. The results of studies on the effect on the adhesive compound strength are given: the areas of the adhesive compound "polyamide fiber – matrix", melt temperature at sample formation, nanomodification of the polyethylene matrix, increasing the contact area (roughness) of the reinforcing elements surfaces, influence of external pressure and the role of friction in adhesion strength. The efficiency of reinforcing fibers of rigid natural origin (flax) and synthetic polyamide fibers (double-fiber reinforcement) joint application is estimated. The high reproducibility of the obtained data is shown experimentally. In the conclusion it is justified that the possibility of using polyethylene as a matrix of composite material has not been exhausted. Adhesion of low density polyethylene to reinforcing fibrous materials of synthetic and natural origin can be controlled by individual and complex technological, mechanical and physicochemical modification methods, as a polymer binder, and changes in the surface morphology

of the ingredients used. Original schemes for the experimental evaluation of the external pressure influence and the friction force component of the elementary adhesive bond "fiber – binder" destruction are proposed. It is expanded opportunities with less time and means with a sufficiently high reliability to perform primary selection of the main components of polymer composite materials.

Keywords: adhesion, method "pull-out", polyamide fiber, flax fiber, low density polyethylene, composite.

References

1. Zommerfeld A. **Plastics. Manufacture, processing and testing of non-metallic materials for shapeless molding** [*Plasticheskie massy. Izgotovlenie, obrabotka i ispytaniia nemetallicheskih materialov dlia besstruzhechnogo formovaniia*]. Moscow, 1935, 356 p.
2. Kerber M. L. [et al.]. **Polymer composite materials: structure, properties, technology** [*Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologii*]; Ed. A. A. Berlin. St. Petersburg, 2009, 560 p.
3. Mark F. Polymers in material science [*Polimery v materialovedenii*]. *Journal of the All-Union Chemical Society named after D. I. Mendeleev*, 1965, vol. X, No. 2, pp. 203-219.
4. Faryk O. [et al.]. Biocomposites reinforced with natural fibers 2000-2015. *Progress in Polymer Science*, 2012, vol. 37, No. 11, pp. 1552-1596.
5. Mohammed L. [et al.]. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and its Application. *International Journal of Polymer Science*, 2015, vol. 2015, pp. 1-15 [Electronic resource].
6. Pesetski S. S., Myshkin N. K. Polymer multifunctional composites: development and application prospects in Belarus [*Polimernye kompozity mnogofunktsional'nogo naznacheniia: perspektivy razrabotok i primeneniia v Belarusi*]. *Polymer materials and technologies*, 2016, vol. 2, No. 4, pp. 6-30.
7. Kaiaks Ya. A., Reikhsman S. A., Tsipriin M. G. Physical and mechanical properties of composites based on recycled polyethylene and flax production fibrous waste products [*Fiziko-mekhanicheskie svoystva kompozitov na osnove vtorichnogo polietilena i voloknistykh otkhodov l'nianogo proizvodstva*]. *Mechanics of composite materials*, 1999, vol. 35, No. 2, pp. 199-210.
8. Torres F. G., Cubillas M. L. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene. *Polymer Testing*, 2005, vol. 24, No. 6, pp. 694-698.
9. Ogah A., Afukwa J., Nduji A. Characterization and Comparison of Rheological Properties of Agro Fiber Filled High-Density Polyethylene Bio-Composites. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2014, vol. 4, No. 1, pp. 12-19.
10. Arrakhiz F. Z. [et al.]. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: doum/low density polyethylene. *Materials & Design*, 2013, vol. 43, pp. 200-205.
11. Gorbatkina Yu. A. Adhesive Strength of the Fibre-Polymer System. Chichester, 1992, 264 p.
12. Pisanova E. V., Zhandarov S. F., Dovgialo V. A. Adhesive strength in thermoplastic polymer-thin fiber systems. Dependence of the measured value on the test method [*Adgezionnaia prochnost' v sistemakh termoplastichnykh polimer - tonkoe volokno. Zavisimost' izmeriaemogo znacheniia ot metoda ispytaniia*]. *Mechanics of composite materials*, 1993, vol. 29, No. 2, pp. 232-239.
13. Sviridenok A. I. [et al.]. Methods for studying the properties of the main components of the interphase regions of thermoplastic composites (review) [*Metody issledovaniia svoystv osnovnykh komponentov mezhfaznykh oblastei termoplastichnykh kompozitov (obzor)*]. *Materials. Technologies. Instruments*, 2000, vol. 5, No. 1, pp. 81-85.
14. Jones F. R. A Review of Interphase Formation and Design in Fibre-Reinforced Composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, vol. 24, No. 1, pp. 171-202.
15. Barsukov V. G. [et al.]. Estimated evaluation of thermoelastic stresses in the vicinity of fibrous and dispersed fillers in composites based on fluoroplastics [*Raschetnaia otsenka termouprugikh napriazhenii v okrestnostiakh voloknistykh i dispersnykh napolnitelei v kompozitakh na osnove fluoroplastov*]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2015, No. 2 (204), pp. 6-13.
16. Burov A. K., Andrievskaya G. D. High-strength fiberglass [*Vysokoprochnye stekloplastiki*]. Moscow, 1958, 78 p.
17. Zhao Y. R. [et al.]. Interfacial stress transfer behavior in specially-shaped fiber-matrix pullout test. *Acta Mech. Sin.*, 2010, vol. 26, No. 1, pp. 113-119.
18. Kudinov V. V. Full-pull-out study of the mutual influence and properties of fibers on the strength of their connection with the polymer matrix of the composite material [*Issledovanie metodom full pull-out vzaimnogo vliianiia i svoystv volokon na prochnost' ikh soedineniia s polimernoii matritsei kompozitsionnogo materiala*]. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2010, vol. 6, pp. 77-80.
19. Sviridenok A. I. [et al.]. A highly dispersed filler influence on the ethylene vinyl acetate copolymer adhesion and friction properties [*Vliianie vysokodispersnogo napolnitelia na adgezionnye i friktsionnye svoystva sopolimera etilena s vinilatsetatom*]. *Friction and Wear*, 2014, vol. 35, No. 4, pp. 401-411.