

# **Исследование влияния углеродных волокон и технологий получения композитов на свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена**

**М. А. Маркова, П. Н. Петрова**

Рассмотрены различные технологические приемы получения композитов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и углеродных волокон марки УВИС-АК-П, основанные на физическом и ультразвуковом воздействии на компоненты полимерных композитов. Исследована зависимость физико-механических и триботехнических характеристик от технологии получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе ПТФЭ и углеродных волокон марки УВИС-АК-П. Для улучшения распределения дискретных углеродных волокон в полимерной матрице в данной работе использованы два технологических приема: ультразвуковое воздействие на порошковую композицию в сухой среде и введение наполнителя в полимерную матрицу через концентрат полимера с углеродными волокнами (УВ). При этом рассмотрено влияние содержания наполнителя в концентрате на свойства полимерных композитов. Для повышения адгезионного взаимодействия полимер-наполнитель, использована технология совместной активации компонентов на стадии получения концентрата, после чего полученную смесь смешивали порцией полимера до необходимой концентрации наполнителя. Установлено, положительное влияние использования технологии совместной механической активации компонентов на свойства ПКМ на основе ПТФЭ и углеродных волокон марки УВИС-АК-П. Выявлено, что оптимальными свойствами обладает композит с содержанием УВ 5 масс. %, полученный с использованием совместной механоактивации полимера с УВ при скорости вращения барабанов планетарной мельницы 400 об/мин при массовом соотношении 50 % концентрата и 50 % ПТФЭ. Деформационно-прочностные показатели этого композита на уровне исходного полимера, а износостойкость выше в 2020 раз по сравнению с ПТФЭ и в 5 раз по сравнению с композитом, полученным простым смешением концентрата с полимером.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, углеродные волокна, износостойкость, совместная механическая активация, ультразвуковое воздействие, лабораторные вальцы.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-11-59-68

## **Введение**

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, Ф-4) — базовый полимер класса фторполимеров — является наиболее подходящим для эксплуатации в экстремальных условиях, и на протяжении многих лет композиты на его основе успешно применяются в авиационной технике для изготовления деталей уплотнительного и антифрикционного назначения. Полимерные композиционные материалы (ПКМ)

на основе ПТФЭ являются перспективными материалами для узлов трения благодаря широкому диапазону рабочих температур и низкому коэффициенту трения. Среди множества марок ПТФЭ особое место занимает марка ПН, который может эксплуатироваться от  $-269$  до  $260$  °С с сохранением своих свойств.

К основным причинам, ограничивающим широкое использование ПТФЭ, относят технические, технологические, экологические и экономические

факторы [1]. При этом основным лимитирующим фактором является технологический, что обусловлено высокой вязкостью расплава и нерастворимостью, что исключает переработку этого полимера обычными для термопластов способами, в связи с чем, наиболее распространенной технологией производства фторопластовых заготовок и изделий является холодное прессование с последующим спеканием. Для решения этой проблемы промышленностью выпускаются фторсодержащие полимеры с меньшим, чем у ПТФЭ, содержанием фтора (например, Ф-1, Ф-2, Ф-3, Ф-4М, Ф-30, Ф-40, Ф-42 и др.), т.к. с уменьшением содержания фтора в полимере снижается температура перехода в вязкотекучее состояние и вязкость расплава, что позволяет перерабатывать эти полимеры методами, традиционными для термопластов. Однако, фторсодержащие полимеры с меньшим, чем у ПТФЭ содержанием фтора хотя и более технологичны и перерабатываются методами, традиционными для термопластов, однако по термостойкости и эксплуатационным характеристикам уступают ПТФЭ (Ф-4), поэтому используются в основном как конструкционные материалы, а не как антифрикционные материалы в машиностроении [2]. Для повышения технологичности ПТФЭ также применяют химические методы сополимеризации тетрафторэтилена с другими частично фторированными или полностью фторированными мономерами [3].

Основным недостатком ПТФЭ является низкая износостойкость и повышенная ползучесть, высокий и нелинейно изменяющийся с ростом температуры коэффициент теплового расширения, малая теплопроводность, что ограничивает ресурс работы и возможность его широкого использования без модифицирования различными наполнителями и методами [4 – 6]. Для повышения прочности и износостойкости [7] ПТФЭ модифицируют различными наполнителями (кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, оксиды, нитриды, шпинели, цеолиты, слоистые глины, керамики, углеродное, базальтовое, стекловолокно) в количестве от 0,5 до 45 масс. %. В результате анализа патентов [8 – 11] выявлено, что наиболее распространенными методами модификации различных марок ПТФЭ является использование различных волокнистых и нано-наполнителей, в том числе, в сочетании. Известно, что волокнистые наполнители (ткани, бумага, различные волокна) придают политетрафторэтилену прочность, жесткость, термо- и химическую стойкость и способствуют повышению износостойкости [12].

В связи с тем, что ПТФЭ характеризуется отсутствием выраженного вязкотекучего состояния при температурах плавления кристаллической фазы полимера, подобно состоянию других термопластов, использование дискретных волокон в качестве армирующих модификаторов является более приемлемым по сравнению с использованием непрерывных волокон.

Цель данной работы — исследование зависимости физико-механических и триботехнических свойств композитов на основе ПТФЭ и дискретных углеродных волокон марки УВИС-АК-П от технологии их получения.

### **Материалы и методы исследования**

В качестве полимерной матрицы выбран промышленно-выпускаемый ПТФЭ марки ПН. В качестве наполнителя использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ “УВИКОМ” (Россия), диаметром 5 – 8 мкм и длиной 50 – 300 мкм.

Показатели физико-механических свойств образцов определяли при испытаниях на растяжение (предел прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) и относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ )) и сжатии (прочность при сжатии  $\sigma_{сж}$ ) на разрывной машине “UTS-20K” (Германия) по ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 4651-2014. В качестве образцов использовали лопатки типа 5 и столбики, их количество на одно испытание составляло не менее 5. Триботехнические характеристики (скорость массового изнашивания и коэффициент трения) были исследованы по стандартной методике (ГОСТ 11629-75) на универсальной машине трения ИИ-5018 и на трибометре UMT-2 фирмы CETR. Схема трения палец – диск, образец – столбик радиусом 5 мм, контртело – вал из стали 45 твердостью 45 – 50 HRS и шероховатостью  $R = 0,06 – 0,08$  мкм при удельном давлении 160 Н и скорости скольжения 96 об/мин. Время испытания составляло 3 ч.

Поверхности ПКМ до и после трения исследованы с использованием ИК-спектрометра Varian 7000 FT-IR в области длин волн 400-4000  $\text{cm}^{-1}$  с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО).

Для улучшения качества диспергирования агломератов наполнителя и смешения наполнителя в полимере, а также для повышения адгезионного взаимодействия инертного гидрофобного ПТФЭ с гидрофильной поверхностью углеродного наполни-

теля в процессе выполнения работы использованы несколько технологических приемов, включая механическую активацию в планетарной мельнице и ультразвуковую обработку компонентов композита.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для достижения высоких показателей получаемых композитов важны не только модификация полимеров наполнителями, но и метод их получения. Ранее в работе [13] показана перспективность использования углеродных волокон марки УВИС-АК-П в качестве наполнителя ПТФЭ. Были рассмотрены рецептуры композитов на основе ПТФЭ, модифицированные УВ в количестве 1, 3 и 5 масс. %. Показано, что износостойкость композитов повысилась в 490 раз по сравнению с исходным полимером при сохранении физико-механических показателей на уровне исходного полимера.

Для дальнейшего улучшения свойств полимерных композитов использовали два способа смешения компонентов:

1. Механическая активация (МА) части полимера с УВ (концентрата) в планетарной мельнице "Pulverisette 5" при скорости вращения барабанов

200, 300, 400 об/мин в течение 2 минут. Композиты получены с использованием приема введения наполнителя через концентрат (рис. 1а).

2. Ультразвуковое (УЗ) воздействие на порошковую композицию в УЗ-ванне "Laborette - 17", наполненной водой, через емкость, пропускающий УЗ-колебания в течение 20 мин, при этом частота ультразвука соответствовала 35 кГц. Таким образом, порошковые композиции подвергались УЗ-воздействию в сухом виде (рис. 1б).

Результаты физико-механических и триботехнических свойств полученных ПКМ в зависимости от концентрации УВИС-АК-П и технологии получения приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что при использовании технологии совместной механоактивации компонентов со скоростью вращения барабанов 200 об/мин происходит повышение износостойкости в 54 – 1245 раз по сравнению с исходным ПТФЭ. Наиболее высокими показателями износостойкости обладает композит содержащий 5 масс. % УВ, но при этом зарегистрировано снижение физико-механических свойства показателей по сравнению с композитами с содержанием УВ 1 и 3 масс. %. В связи с этим, для повышения адгезии между компонентами повышена скорость

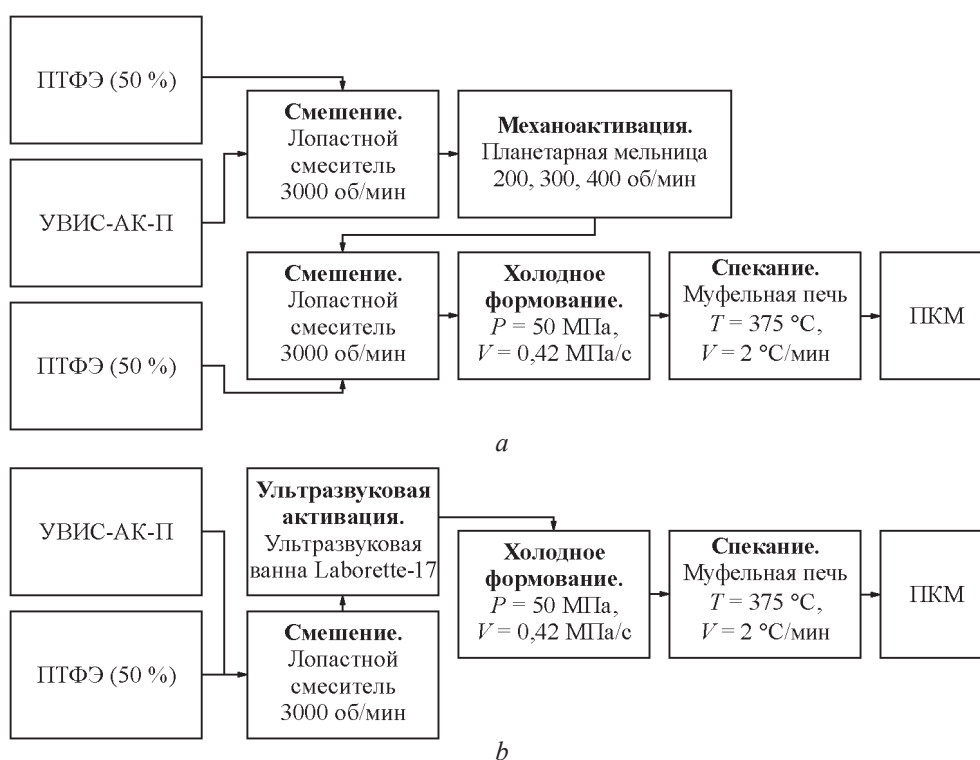


Рис. 1. Схемы получения ПКМ с использованием: а — технологии совместной механоактивации компонентов, б — УЗ-воздействия.

Fig. 1. Stages of obtaining PCM using: a — the technology of joint mechanoactivation of components, b — ultrasonic effect.

Зависимость физико-механических и триботехнических свойств ПКМ от концентрации УВИС-АК-П и технологии получения

Состав и Технология получения ПКМ	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E$ , МПа	$I$ , мг/ч	$f$
ПТФЭ	20	304	469	161,90	0,22
ПТФЭ + 1 масс. % УВИС-АК-П, МА 200 об/мин	20	323	657	3,00	0,21
ПТФЭ + 3 масс. % УВИС-АК-П, МА 200 об/мин	20	220	495	0,46	0,22
ПТФЭ + 5 масс.% УВИС-АК-П, МА 200 об/мин	19	168	489	0,13	0,19
ПТФЭ + 5 масс.% УВИС-АК-П, МА 300 об/мин	20	283	515	0,52	0,22
ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, МА 400 об/мин	20	364	514	0,08	0,25
ПТФЭ + 3 масс. % УВИС-АК-П, УЗ	18	405	505	0,48	0,20
ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, УЗ	14	180	499	0,55	0,19

Примечание:  $\sigma_p$  — предел прочности при растяжении;  $\epsilon_p$  — относительное удлинение при разрыве;  $E$  — модуль упругости при разрыве;  $I$  — скорость массового изнашивания;  $f$  — коэффициент трения.

вращения барабанов планетарной мельницы до 300 и 400 об/мин для композита с 5 масс. % УВ, так как этот композит характеризуется самой высокой износостойкостью. Установлено, что повышение скорости вращения барабанов планетарной мельницы до 300 – 400 об/мин приводит к повышению износостойкости композита в 1,6 раза и относительного удлинения при разрыве в 1,7 – 2 раза по сравнению с композитом, полученном при 200 об/мин.

Для композитов с содержанием УВ в количестве 5 масс. % использование приема совместной механоактивации компонентов положительно влияет на деформационно-прочностные показатели композитов, что, видимо, связано с некоторым диспергированием УВ (рис. 2), в процессе активации. Как видно из рис. 2 при таких режимах активации размеры УВ сильно не изменяются, но при этом

наблюдается незначительное количество диспергированных частиц, находящиеся в диапазоне менее 5 мкм. Отделившиеся частицы волокон с размером меньше 1 – 5 мкм распределяются в матрице и могут располагаться в межструктурных областях, влияя тем самым на молекулярную подвижность и деформационные свойства полимерного композита [12]. Измерение размеров частиц УВ до и после активации проводили с помощью лазерного дифракционного анализатора FRITSCH “Analysette 22” СОМРАСТ.

Использование ультразвукового воздействия приводит к повышению эластичности материала с содержанием УВ 3 масс. %, однако при повышении концентрации УВ до 5 масс. % наблюдается ухудшение физико-механических свойств по сравнению с исходным ПТФЭ (табл. 1). Износостойкость

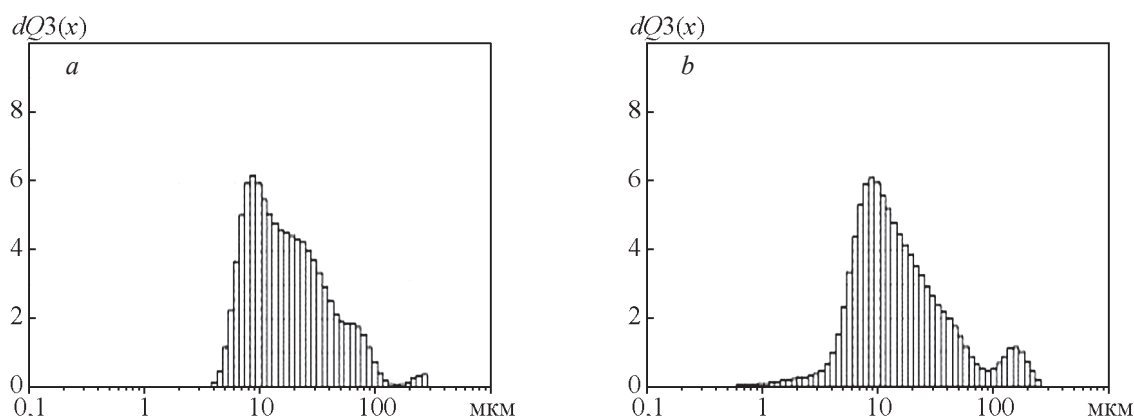


Рис. 2. Размер частиц УВИС-АК-П: *a* — без совместной МА, *b* — совместная МА при 400 об/мин.

Fig. 2. UVIS-AK-P particle size: *a* — without joint mechanical activation, *b* — joint mechanical activation at 400 rpm.

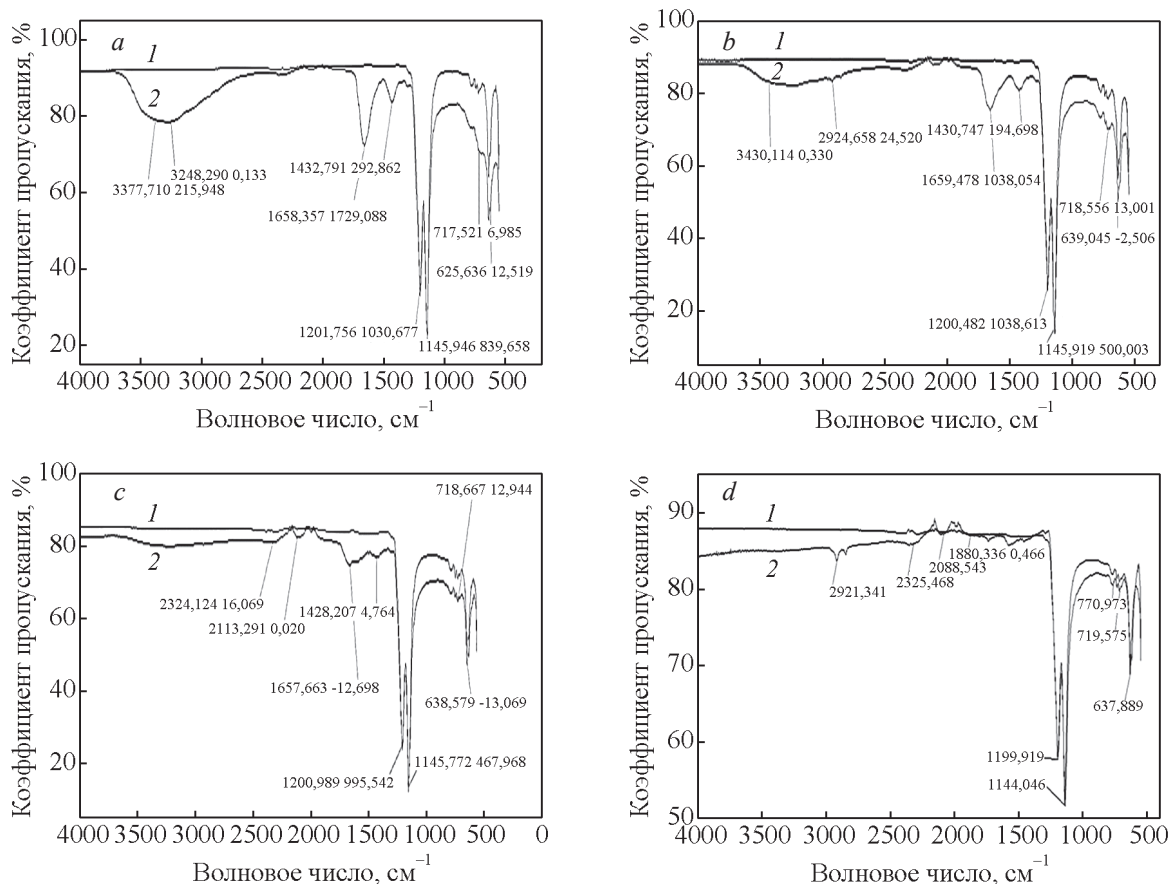


Рис. 3. ИК-спектры ПКМ на основе ПТФЭ в зависимости от концентрации УВ и технологии получения до (1) и после трения (2): а — ПТФЭ + 1 масс. % УВИС-АК-П (МА 200 об/мин); б — ПТФЭ + 3 масс. % УВИС-АК-П (МА 200 об/мин); с — ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П (МА 200 об/мин); д — ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П (МА 400 об/мин).

Fig. 3. IR spectra of PCM on PTFE basis depending on concentration of CF and technology of reception before (1) and after friction (2): a — PTFE + 1 wt. % UVIS-AK-P (200 rpm mechanoactivation); b — PTFE + 3 wt. % UVIS-AK-P (200 rpm mechanoactivation); c — PTFE + 5 wt. % UVIS-AK-P (200 rpm mechanoactivation); d — PTFE + 5 wt. % UVIS-AK-P (400 rpm mechanoactivation).

у этих композитов повышается в 294 – 337 раза по сравнению с исходным полимером.

По результатам структурных исследований методом ИК-спектроскопии (рис. 3) выявлено, что после трения на спектрах от поверхности образцов появляются или усиливаются пики при частотах 1657, 1430  $\text{см}^{-1}$ , которые принято относить к валентным и маятниковым колебаниям  $\text{C} = \text{C}$  групп, а также наблюдается появление менее интенсивной широкой полосы при частотах 3431, 3307, 3377 и 3248  $\text{см}^{-1}$ , соответствующей колебаниям ОН-групп. Указанные функциональные группы образуются при трении за счет протекания трибохимических реакций. При этом установлено, что интенсивность пиков, появляющихся после трения, снижается при повышении концентрации УВ в полимерной ма-

трице. У композитов, характеризующихся высокой износостойкостью, а именно, с содержанием УВ в количестве 5 масс. %, зарегистрировано самое небольшое изменение ИК-спектров до и после трения (рис. 3d).

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальными свойствами обладают ПКМ с содержанием 5 масс. % УВИС-АК-П, полученные с использованием совместной механоактивации компонентов со скоростью вращения барабанов 400 об/мин и введения наполнителя через концентрат.

В дальнейших исследованиях была поставлена задача: исследование влияния зависимости эксплуатационных свойств от содержания УВ в концентрате. Содержание УВ в конечном композите

Таблица 2

Зависимость физико-механических и триботехнических характеристик образца ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, МА 400 об/мин от соотношения концентрат/полимер

Table 2

Dependence of the physicomechanical and tribotechnical characteristics of the PTFE + 5 mass. % UVIS-AK-P, MA 400 rpm from the concentrate/polymer ratio

Соотношение концентрат/полимер	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$E$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа при деформации		$I$ , мг/ч	$f$
				10 %	25 %		
50/50	20	354	514	20	31	0,08	0,25
30/70	13	125	607	16	26	1,36	0,12
70/30	11	115	542	15	25	7,30	0,12

Примечание:  $\sigma_{сж}$  — прочность при сжатии.

Таблица 3

Зависимость физико-механических характеристик от концентрации УВИС-АК-П и технологии получения ПКМ

Table 2

Dependence of physical and mechanical characteristics on the concentration of UVIS-AK-P and PCM technology

Состав и технология получения ПКМ	$\sigma_p$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$E$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа при деформации		$I$ , мг/ч	$f$
				10 %	25 %		
ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, МА 400 об/мин, 50/50	20	354	514	20	33	0,08	0,25
ПТФЭ + 7 масс. % УВИС-АК-П, МА 400 об/мин, 50/50	12	113	378	14	25	4,35	0,12
ПТФЭ + 10 масс. % УВИС-АК-П, МА 400 об/мин, 50/50	8	34	273	12	22	1,36	0,11

соответствовало 5 масс. %, а в концентрате варьировалось от 7, 10 и 17 масс. % в зависимости от соотношения концентрата и последующей порции смешиваемого полимера. Результаты исследования деформационно-прочностных и триботехнических характеристик образца ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, полученного МА при 400 об/мин в зависимости от соотношения концентрат/полимер приведены в табл. 2.

Установлено, что композит с содержанием УВ 5 масс. %, полученный с использованием совместной механоактивации полимера с УВ при скорости вращения барабанов в планетарной мельнице 400 об/мин при массовом соотношении концентрат: полимер 50/50 ПТФЭ (табл. 2) обладает улучшенным комплексом свойств. Повышение содержания УВ в концентрате (соотношение 30/70) приводит к неравномерному распределению малых количеств высоковязкого полимера в большом объёме дисперсной фазы УВ, что вызывает формирование агломератов из частиц УВ, а уменьшение содержания количества УВ в концентрате (соотно-

шение 70/30) способствует образованию агломератов из частиц ПТФЭ.

Однако, использование технологии совместной активации и поэтапного смешения компонентов композита при соотношении концентрата и полимера 50/50 при повышении концентрации УВ в полимере до 7 – 10 масс. % влияет на ухудшение свойств композита (табл. 3).

Как видно из табл. 3 при повышении содержания УВ в полимере происходит снижение деформационно-прочностных характеристик: предел прочности на растяжение падает на 66 % и в 2,5 раза, относительное удлинение при разрыве — в 3 – 10,4 раза, модуль упругости при разрыве — на 36 – 88 % по сравнению с композитом, содержащим 5 масс. % УВ. Это может быть связано с образованием разрыхленной, пористой структуры полимерных композитов, в результате чего ухудшаются связь между волокнами и их совместная работа под нагрузкой. Известно, что одним из важнейших характеристик наполнителей, определяющих структуру и свойства ПКМ, является спо-



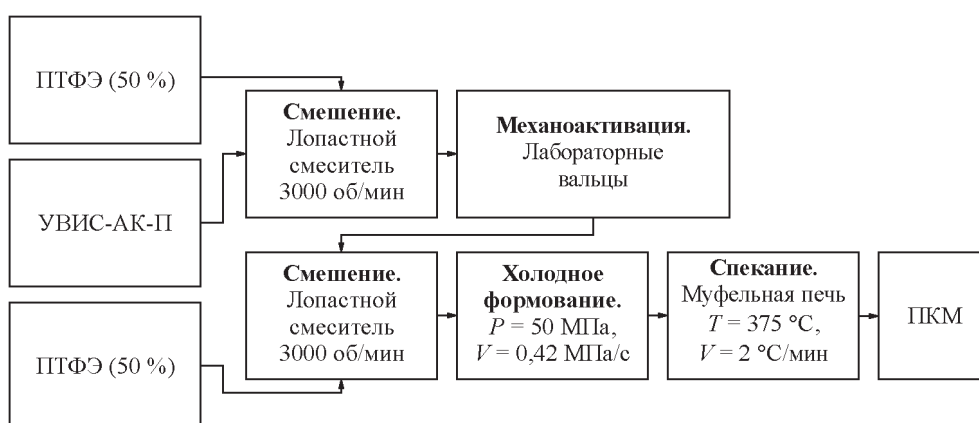


Рис. 4. Схема получения ПКМ с применением метода механической активации композитов с помощью лабораторных вальцев.

Fig. 4. Scheme of obtaining PCM using the method of mechanical activation of composites using laboratory rollers.

способность порошкообразных и волокнистых частиц упаковываться в заданном объеме, что численно выражается коэффициентом максимального заполнения объема наполнителем или критически возможным содержанием наполнителя в ПКМ ( $\gamma_{\max}$ ). Установлено, что  $\gamma_{\max}$  для УВ марки УВИС-АК-П составляет 0,09 об. %, что соответствует 7 масс.% УВИС-АК-П при введении их в объем ПТФЭ. Известно, что когда концентрация наполнителя приближается к максимально критическому объему ее содержанию  $\phi_m$  в композите наблюдается так называемая “обратимость” упрочняющего действия наполнителей, то есть при деформировании высоконаполненного композита в его матрице возникают большие внутренние перенапряжения, что и вызывает снижение прочности композита при превышении концентрации УВИС-АК-П свыше 5 масс. % [14].

В связи с этим, была апробирована другая технология получения ПКМ, которая заключалась в применении метода механической активации

композитов с помощью лабораторных вальцев СМ 350 150/150. В работе [15] показано, что подобный способ получения приводит к повышению прочностных характеристик высоконаполненных композитов на основе ПТФЭ. ПКМ в этом случае получали по схеме (рис. 4): наполнитель вводили в часть полимера, где его содержание составляло 10 %, затем разбавляли остальной частью полимера до нужной концентрации. Полученную смесь пропускали через лабораторные вальцы до получения пленок, которые в дальнейшем измельчали и далее по стандартной схеме получали образцы.

Результаты исследования деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композитов на его основе ПТФЭ полученных по схеме с использованием вальцевания приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, технологический прием с использованием вальцевания приводит к повышению модуля упругости и прочности при сжатии ПКМ по сравнению с композитами, полученными

Таблица 4

Зависимость физико-механических характеристик от концентрации УВИС-АК-П и технологии получения ПКМ

Table 4

Dependence of physical and mechanical characteristics on the concentration of UVIS-AK-P and PCM technology

Состав и технология получения ПКМ	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$E$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа при деформации		$I$ , мг/ч	$f$
				10 %	25 %		
ПТФЭ + 5 масс. % УВИС-АК-П, вальцевание, 50/50	17	192	490	21	35	0,44	0,19
ПТФЭ + 7 масс. % УВИС-АК-П, вальцевание, 50/50	13	113	582	17	29	3,80	0,11
ПТФЭ + 10 мас. % УВИС-АК-П, вальцевание, 50/50	12	55	531	14	26	0,33	0,16

с использованием технологии совместной механоактивации компонентов. При использовании технологии вальцевания износостойкость повышается в 4 раза по сравнению с композитами, полученными с использованием совместной механоактивации компонентов в планетарной мельнице. Это может быть обусловлено снижением пористости у этих композитов, что дает положительный эффект в повышении прочности и износостойкости.

## **Выводы**

Показана эффективность использования углеродного волокнистого активированного материала марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия) в качестве наполнителя ПТФЭ для получения износостойких композитов.

Разработана технология получения ПКМ, совмещающая приемы совместной активации компонентов и поэтапного смешения компонентов композита. Получен ПКМ с улучшенным комплексом свойств, содержащий УВ марки УВИС-АК-П до 5 масс. %. Установлено, что при использовании совместной механоактивации компонентов в планетарной мельнице при скорости вращения барабанов 400 об/мин в течение 2 мин при массовом соотношении концентрата и полимера 50/50 с последующим его разбавлением полимером до концентрации УВ в композите 5 масс. % износостойкость ПКМ повышается в 2024 раза по сравнению с исходным ПТФЭ.

Для снижения пористости и повышения износостойкости ПКМ с содержанием УВ свыше 5 масс. % разработана технология, сочетающая прием поэтапного смешения компонентов и дополнительного вальцевания порошковой композиции на вальцах CM 350 150/150. Использование данной технологии приводит к повышению модуля упругости на 60 %, прочности при сжатии — на 16 – 18 %, износостойкости ПКМ — до 4 раз при содержании УВ в полимере 7 и 10 масс. % по сравнению с композитами, полученными с использованием технологии совместной активации компонентов в планетарной мельнице «Pulverisette 5».

*Работа выполнена в рамках выполнения Госзадания АААА-А17-117040710038-8*

## **Литература**

1. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития. Российский химический журнал, 2008, Т. LII, № 3, с. 7 – 12
2. Хатипов С.А., Артамонов Н.А. Создание нового антифрикционного и уплотнительного материала на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена. Российский химический журнал, 2008, т. LII, № 3, с. 89 – 97.
3. Пугачев А.К. Анализ развития отечественной фторполимерной химии, производства и областей применения фторполимеров. Российский химический журнал, 2008, т. LII, № 3, с. 5 – 6.
4. Герасимов А.В. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007, 311 с.
5. Kirillina Iu.V., Nikiforov L.A., Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Cheonho Yoon, Jin-Ho Cho. Nanocomposites based on polytetrafluoroethylene and ultrahigh molecular weight polyethylene. A Brief Review. Bull. Korean Chem. Soc., 2014, v. 35, no. 12, pp. 3411 – 3420.
6. Krick B.A., Hahn D.W., Sawyer W.G. Plasmonic diagnostics for tribology: in situ observations using surface plasmon resonance in combination with surface-enhanced Raman spectroscopy. Tribology Letters, 2013, v. 49, pp. 95 – 102.
7. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. М.: Машиностроение, 2005, 240 с.
8. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Гоголева О.В., Федоров А.Л. Фторполимерные композиты триботехнического назначения. Трение и износ, 2007, т. 28, № 6, с. 627 – 633.
9. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Попов С.Н., Слепцова С.А. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе ПТФЭ. Российский хим. Журнал, 2008, т. 52, № 3, с. 147 – 152.
10. Петрова П.Н., Федоров А.Л. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью для узлов сухого трения. Вестник машиностроения, 2010, № 9, с. 50 – 53.
11. Хатипов С.А., Селиверстов Д.И., Жугаев Ю.Р., Терешенков А.В., Конова Е.М., Садовская Н.В., Кошечев А.П. Наноконпозиционный антифрикционный и уплотнительный материал на основе политетрафторэтилена. Патент РФ 2467034. Бюл., 2012, № 32.
12. Липатов Ф.С. Физико-механические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991, 260 с.
13. Петрова П.Н., Маркова М.А., Аргунова А.Г., Охлопкова А.А. Влияние способов смешения компонентов на триботехнические свойства композитов на основе ПТФЭ и углеродных волокон. Трение и износ, 2019, т. 40, №2, с. 159 – 167.



14. Рамбиди Н.Г., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, 456 с.
15. Прушак Д.А., Михайлова Л.В., Воропаев В.В. и др. Технология триботехнических и герметизирующих композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Горная механика и машиностроение, 2011, №3, с.19 – 31.

## Reference

1. Buznik V.M. Sostoyanie otechestvennoj himii ftoropolimerov i vozmozhnye perspektivy razvitiya [The state of domestic chemistry of fluoropolymers and possible development prospects]. *Rossiiskii khimicheskii zurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 7 – 12.
2. Hatipov S.A., Artamonov N.A. Sozdanie novogo antifrikcionnogo i uplotnitel'nogo materiala na osnove radiacionno-modificirovannogo politetraftoretilena [Creation of a new antifriction and sealing material based on radiation-modified polytetrafluoroethylene]. *Rossiiskii khimicheskii zurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 89 – 97.
3. Pugachev A.K. Analiz razvitiya otechestvennoj ftoropolimernoj himii, proizvodstva i oblastej primeneniya ftoropolimerov. [Analysis of the development of domestic fluoropolymer chemistry, production and applications of fluoropolymers] *Rossiiskij himicheskij zhurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2008, t. LII, № 3, pp. 5 – 6.
4. Gerasimov A.V. *Dispersno-napolnennye polimernye kompozity tekhnicheskogo i medicinskogo naznacheniya* [Dispersion-filled polymer composites for technical and medical purposes]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007, 311 p.
5. Kirillina Iu.V., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Sleptsova S.A., Cheonho Yoon, Jin-Ho Cho. Nanocomposites based on polytetrafluoroethylene and ultrahigh molecular weight polyethylene: A brief review. *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2014, vol. 35, no. 12, pp. 3411 – 3420.
6. Krick B.A., Hahn D.W., Sawyer W.G. Plasmonic diagnostics for tribology: In situ observations using surface plasmon resonance in combination with surface-enhanced Raman spectroscopy. *Tribology Letters*, 2013, vol. 49, pp. 95 – 102.
7. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F. *Kompozicionnye materialy na osnove politetraftoretilena* [Polytetrafluoroethylene Composite Materials]. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 240 p.
8. Ohlopkova A.A., Petrova P.N., Gogoleva O.V., Fedorov A.L. Ftropolimernye kompozity tribotekhnicheskogo naznacheniya [Fluoropolymer composites for tribological applications]. *Trenie i iznos — Journal of Friction and Wear*, 2007, vol. 28, no. 6, pp. 627 – 633.
9. Ohlopkova A.A., Petrova P.N., Popov S.N., Slepceva S.A. Polimernye kompozicionnye materialy tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove PTFE [PTFE-based polymer composite materials for tribotechnical purposes]. *Rossiiskii khimicheskii zurnal — Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 52, no. 3, pp. 147 – 152.
10. Petrova P.N., Fedorov A.L. Razrabotka polimernyh kompozitov na osnove politetraftoretilena s povyshennoj iznosostojkost'yu dlya uzlov suhogo treniya [Development of polymer composites based on polytetrafluoroethylene with increased wear resistance for dry friction units]. *Vestnik mashinostroeniya — Russian Engineering Research*, 2010, no. 9, pp. 50 – 53.
11. Hatipov S.A., Seliverstov D.I., Zhutaev Yu.R. et al. *Nanokompozicionnyj antifrikcionnyj i uplotnitel'nyj material na osnove politetraftoretilena* [Nanocomposite antifriction and sealing material based on polytetrafluoroethylene]. Patent RF 2467034, 2012, Bul., no. 32.
12. Lipatov F.S. *Fiziko-mekhanicheskie osnovy napolneniya polimerov* [Physico-mechanical fundamentals of polymer filling]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 260 p.
13. Petrova P.N., Markova M.A., Argunova A.G., Ohlopkova A.A. Vliyanie sposobov smesheniya komponentov na tribotekhnicheskie svoystva kompozitov na osnove PTFE i uglerodnyh volokon [The influence of the methods of mixing components on the tribological properties of composites based on PTFE and carbon fibers]. *Trenie i iznos — Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 2, pp. 159 – 167.
14. Rambidi N.G., Berezkin A.V. *Fizicheskie i himicheskie osnovy nanotekhnologii* [Physical and chemical foundations of nanotechnology]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2009, 456 p.
15. Prushak D.A., Mihajlova L.V., Voropaev V.V. et al. Tekhnologiya tribotekhnicheskikh i germetiziruyushchih kompozicionnyh materialov na osnove politetraftoretilena [Technology of tribotechnical and sealing composite materials based on polytetrafluoroethylene]. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie — Mine Mechanical Engineering and Machine-Building*, 2011, no. 3, pp. 19 – 31.

Статья поступила в редакцию — 10.08.2020 г.  
 после доработки — 12.09.2020 г.  
 принята к публикации — 13.09.2020 г.

*Маркова Марфа Алексеевна — ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН “Институт проблем нефти и газа” Сибирского отделения РАН (677000, Якутск Автоторожная, 20), аспирант, инженер, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена. E-mail: markovamusya@mail.ru.*

*Петрова Павлина Николаевна — ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН “Институт проблем нефти и газа” Сибирского отделения РАН (677000, Якутск Автоторожная, 20), кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, специалист в области композитных материалов на основе политетрафторэтилена и сверхмолекулярного полиэтилена. E-mail: ppravlina@yandex.ru.*

---

## **Influence of carbon fibers and composite technologies on the properties of PCM based on polytetrafluoroethylene**

**М. А. Markova, P. N. Petrova**

The given paper presents the results of studies on the development of various technological methods for producing composites based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and UVIS-AK-P carbon fibers. The methods consist in the physical and ultrasonic actions on the components of polymer composites. The dependence of the physical-mechanical and tribotechnical properties on the production technology of polymer composite materials (PCM) based on PTFE and carbon fibers of the UVIS-AK-P brand is investigated. Two technological methods were applied in the present work to improve the distribution of discrete carbon fibers in the polymer matrix: ultrasonic treatment of the powder composition in a dry medium and the technology of introducing the filler into the polymer matrix through a polymer concentrate with carbon fibers (CF). Herewith, the influence of the filler content in the concentrate on the properties of polymer composites is considered. To increase the adhesive interaction of the polymer with filler, the technology of joint activation of the components was used at the stage of obtaining the concentrate. Afterward, the resulting mixture was mixed with a portion of the polymer to the required concentration of the filler. The positive effect of the technology of joint mechanical activation of components on the properties of PCM based on PTFE and UVIS-AK-P carbon fibers has been established. It has been revealed that the composite with a carbon fiber content of 5 wt. % obtained using combined mechanical activation of a polymer with CF at a rotational speed of planetary mill drums of 400 rpm with a mass ratio of 50 % concentrate and 50 % PTFE has optimal properties. The deformation and strength characteristics of this composite at the level of the initial factor, the wear resistance is higher than in 2020, compared with PTFE and 5, compared with a composite obtained by a simple mixed concentration with a polymer.

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, carbon fibers, wear resistance, joint mechanical activation, ultrasonic treatment, laboratory rollers.

---

*Markova Marfa — Institute of Problems of Oil and Gas, Siberian branch of RAS (Yakutsk 677000, Avtodorozhnaya, 20), PhD student, engineer, specialist in the field of composite materials based on polytetrafluoroethylene. E-mail: markovamusya@mail.ru.*

*Petrova Pavlina — Institute of Problems of Oil and Gas, Siberian branch of RAS (Yakutsk 677000, Avtodorozhnaya, 20), PhD (Eng), associate professor, leading researcher, specialist in the field of composite materials based on polytetrafluoroethylene and supermolecular polyethylene. E-mail: ppravlina@yandex.ru.*