

На основании анализа электронно-микроскопических снимков (рис. 3) установлено, что макроструктура образцов ячеистого бетона с использованием механоактивации цемента имеет меньшую степень дефектности по сравнению с контрольным образцом. На фотографии межпоровой перегородки контрольного образца видны зерна непрореагировавшего кварца, а структура в целом является менее плотной.

Микроструктура межпоровых перегородок образцов ячеистого бетона с использованием механоактивированного цемента характеризуется высокой степенью закристаллизованности гидросиликатов кальция. Микроструктура контрольного образца отличается наличием большого количества гелеобразных субмикроструктурных фаз. Таким образом, можно предположить, что увеличение прочностных характеристик ячеистого бетона происходит за счет изменения механизма гидратации частичек механоактивированного цемента, что обеспечивает образование более плотной, закристаллизованной структуры.

Использование механоактивации портландцемента при получении ячеистого бетона позволяет упорядочить процессы кристаллизации гидросиликатов кальция при тепловлажностной обработке, оптимизировать микроструктуру межпоровых перегородок и улучшить физико-механические свойства готовых изделий.

### Список литературы

1. Мечай, А.А. Модифицирование структуры продуктов гидросиликатного твердения ячеистого бетона сульфалоюмоферритными добавками / А.А. Мечай, Е.И. Барановская // Цемент и его применение. – 2011. – № 5. – С. 140–143.
2. Использование углеродных нанотрубок в технологии строительных материалов / М. П. Мисник, А. А. Мечай [и др.] // Тепло- и массоперенос. Сборник научных трудов. 2014. – С. 152–157.
3. Физические, тепло- и массообменные свойства строительных материалов: Справочник / В.В. Шарков [и др.]. Днепропетровск: ПГАСА, 2009. 192 с.

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРИВИВКУ ТРАНС-ЭТИЛЕН-1,2-ДИКАРБОНОВОЙ КИСЛОТЫ К ПОЛИОЛЕФИНАМ И СВОЙСТВА ИХ СМЕСЕЙ С ПОЛИАМИДОМ 6

Кривогуз Ю.М., Макаренко О.А., Песецкий С.С.

*Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси,  
г. Гомель, Беларусь,  
[yurikriv@tut.by](mailto:yurikriv@tut.by)*

Настоящая работа посвящена анализу влияния углеродных нанополнителей (УНН) на свободнорадикальную прививку транс-этилен-1,2-дикарбоновой кислоты (ТЭДК) к полиолефинам (ПО) в ходе реакционной экструзии (РЭ) и изучению отдельных свойств функционализированных ПО (ФПО), в том числе их смесей с полиамидом 6 (ПА6).

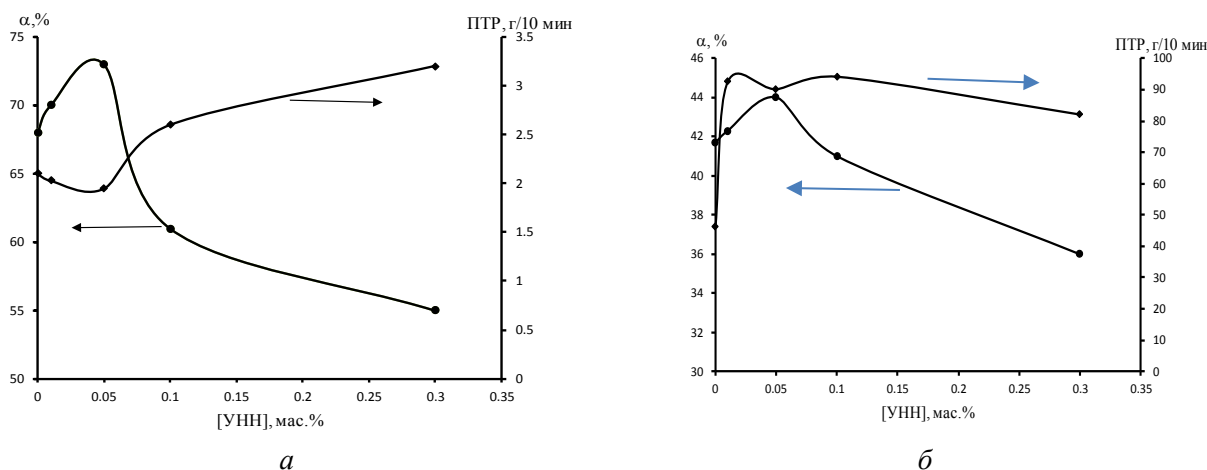
Следует отметить, что к настоящему времени вопросы влияния УНН на протекание реакций, имеющих место при функционализации ПО, в окрытой печати практически не освещены. Их изучение весьма актуально как с научной, так и с практической точек зрения. Проведение функционализации ПО в присутствии УНН, с одной стороны, позволяет реализовать процесс получения нанокомпозитов в одну стадию, а с другой – за счет присутствия УНН с различной физико-химической активностью открывается возможность направленно влиять на ход процесса функционализации.

Объектами исследований служили сополимер пропилена и этилена (с-ПП, марка 8332М, ТУ 2211-136-05766801-2006, содержание звеньев этилена  $\approx 7$  мас.%; производство ОАО «Нижекамск Нефтехим», Россия, значение показателя текучести расплава (ПТР) при температуре  $T = 210^\circ\text{C}$  и нагрузке  $P = 21,6$  Н равно 4,6 г/10 мин), линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП, марка Exceed 1018 НА, производства Exxon Mobil, США, ПТР = 1,0 г/10 мин при  $T = 190^\circ\text{C}$  и  $P = 21,6$  Н). При получении смесей ПА6/ФПО в качестве базового полимера использовали ПА6 производства ОАО «Гродно Азот» (марка для контакта с пищевыми продуктами температура плавления  $T_m = 220^\circ\text{C}$ , ПТР = 8,6 при  $T = 250^\circ\text{C}$  и  $P = 21,6$  Н).

Для функционализации ПО в качестве прививаемого мономера использовали ТЭДК ( $\text{C}_4\text{O}_4\text{H}_4$ , квалификации «ч», поставщик – ОАО «Камтэкс», Россия); свободнорадикальный инициатор – пероксид 1,3-бис(трет-бутилпероксиизопрпил)бензол (Perk-14, производства «Akzo Nobel», Нидерланды; концентрация активного кислорода 9 мас.%, период полураспада при  $200^\circ\text{C}$  0,31 мин). В качестве УНН применяли нанотрубки диаметром 5–30 нм и длиной от 1,5 до 30 мкм, полученные в Институте тепло и массообмена НАН Беларуси. При функционализации ПО концентрация прививаемой ТЭДК в экспериментах была постоянной и составляла 1 мас.%. Содержание Perk-14 при прививке к с-ПП принимали равным 0,12 мас.% и 0,15 мас.% - при прививке к ЛПЭНП. Концентрацию УНН, вводимых в реакционную смесь, изменяли в диапазоне от 0,01 до 0,3 мас.%.

Функционализацию ПО в присутствии УНН методом РЭ осуществляли при использовании экструзионно-грануляционной линии на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 (производство КНР, диаметр шнеков 35 мм,  $L/D = 40$ , 10 независимых зон обогрева материального цилиндра).

На рис. 1 (а и б) представлены зависимости эффективности прививки ( $\alpha$ ) ТЭДК к макромолекулам ЛПЭНП и с-ПП, а также ПТР привитых продуктов от содержания УНН.



**Рис. 1.** Влияние концентрации УНН на эффективность прививки ( $\alpha$ ) ТЭДК к ЛПЭНП (а) и с-ПП (б), а также ПТР ЛПЭНП-п-ТЭДК (а) и с-ПП-п-ТЭДК (б)

Видно, что на концентрационных зависимостях как для ЛПЭНП-п-ТЭДК, так и для с-ПП-п-ТЭДК наблюдаются четко выраженные максимумы значений  $\alpha$ . В обоих случаях максимальные значения  $\alpha$  достигаются при концентрации УНН  $\approx 0,05$  мас.%.

Концентрационные зависимости ПТР привитых продуктов для разных ПО имеют существенные отличия. Так при прививке к ЛПЭНП, значения ПТР ЛПЭНП-п-ТЭДК с ростом концентрации УНН изменяются экстремально с минимумом при 0,05 мас.% нанонаполнителя, а для с-ПП в начале при  $[\text{УНН}] = 0,01\%$  наблюдается почти двукратный прирост ПТР, а затем после небольшого минимума при  $[\text{УНН}] = 0,05\%$  происходит плавное

снижение значений данного показателя, общий уровень значений которого остается существенно более высокими по сравнению с с-ПП-п-ТЭДК, полученным без добавок нанонаполнителя.

Реологическое поведение расплавов определяется природой ПО. Для сшивающегося ЛПЭНП при добавлении до 0,05 мас.% УНН происходит некоторое снижение ПТР, свидетельствующее об увеличении степени сшивания макромолекул, а при дальнейшем повышении концентрации нанонаполнителя наблюдается заметный рост ПТР (от 2 г/10 мин до 3,3 г/10 мин), что указывает на снижение степени сшивания макромолекул ЛПЭНП. Для преимущественно деструктирующего при свободнорадикальной функционализации с-ПП введение в состав реакционной системы УНН приводит в целом к активированию деструкции (ПТР возрастает более, чем в 2 раза – с 45 г/10 мин до 96 г/10 мин при [УНН] = 0,1 мас.%).

Установлено, что при функционализации ЛПЭНП введение УНН в состав реакционной системы независимо от их концентрации мало влияет на значения температур плавления и кристаллизации. Однако наблюдается заметное увеличение значений теплот плавления и кристаллизации. Несомненная причина этого – нуклеирующее влияние УНН на кристаллизацию ЛПЭНП-п-ТЭДК. Еще более заметно нуклеирующий эффект добавок УНН выражен в случае с-ПП-п-ТЭДК. Введение УНН в с-ПП-п-ТЭДК сопровождается повышением  $T_{кр}$  на 2,4-4,8°C (от 117,1 до 121,9°C). Степень кристалличности, характеризуемая величиной  $\Delta H_{кр}$ , определяется концентрацией УНН: при ее повышении до 0,05%  $\Delta H_{кр}$  увеличивается от 101,2 Дж/г до 113,8 Дж/г, а затем снижается (при [УНН] = 0,3%  $\Delta H_{кр} = 100,8$  Дж/г).

Из диаграмм напряжение-удлинение найдены значения величин прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) и относительного удлинения при разрыве ( $\varepsilon_p$ ) установлено, что с увеличением [УНН] прочность при растяжении ЛПЭНП-п-ТЭДК мало зависит от степени нанонаполнения, а  $\varepsilon_p$  в целом заметно повышается при введении нанонаполнителя (от 321% до 369% для [УНН] = 0,3%). Основная причина этого – получение менее сшитых структур при функционализации в присутствии УНН. Для образцов с-ПП-п-ТЭДК наблюдается некоторый прирост значений  $\sigma_p$  и снижение  $\varepsilon_p$ . Очевидной причиной этому являются структурные изменения, происходящие при функционализации с-ПП в присутствии УНН: рост кристалличности обычно сопровождается повышением механической прочности и снижением деформационных характеристик кристаллизующихся термопластов.

Данные о влиянии УНН на прочность расплавов ( $\sigma_m$ ) и коэффициент разбухания ( $B_m$ ) экструдатов ЛПЭНП-п-ТЭДК и с-ПП-п-ТЭДК свидетельствуют о том, что  $\sigma_m$  коррелирует с изменением ПТР расплавов. Это следует из сравнения значений ПТР и  $\sigma_m$  для с-ПП-п-ТЭДК и ЛПЭНП-п-ТЭДК. Чем выше вязкость, тем выше прочность расплава материала и наоборот.

Одной из важных областей применения ФПО является получение при их использовании смесевых материалов с алифатическими полиамидами. Экспериментальные данные о показателях механических и реологических свойств смесей ПА6/ЛПЭНП-п-ТЭДК приведены в таблице.

Главный результат, вытекающий из данных таблице, заключается в том, что добавки УНН, вводимые в состав ЛПЭНП-п-ТЭДК, оказывают сильное упрочняющее действие на спаи потоков расплава для смесей ПА6/ЛПЭНП-п-ТЭДК. Смесей ПА6/с-ПП-п-ТЭДК независимо от содержания УНН при испытаниях методом растяжения и определении ударной вязкости разрушаются хрупко и характеризуются низкой прочностью спаев.

Таблица. Показатели свойств смесевых материалов ПА6/ЛПЭНП-п-ТЭДК-30 мас.% в зависимости от концентрации УНН в ЛПЭНП-п-ТЭДК

[УНН], мас.%	Испытания методом растяжения				Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>		ПТР, г/10 мин
	$\sigma_{тв}$ , МПа	$\sigma_{тн}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$a_{он}$	$a_{пн}$	
0	33,4	33,7	59,6 (31,6)	334 (18)	33,5	52,7	3,0
0,01	34,2 (31,8)	33,5 (29,6)	57,1 (45,7)	324 (285)	33,2	50,5	1,3
0,05	33,9 (32,8)	32,9 (29,8)	51,7 (48,7)	282 (298)	30,0	49,8	1,4
0,1	34,9 (32,0)	33,2 (29,7)	60,1 (45,0)	324 (262)	32,6	48,0	0,9
0,3	34,2 (32,7)	33,6 (30,4)	56,5 (46,1)	315 (275)	31,9	51,7	1,2

Примечания:  $a_{он}$ ,  $a_{пн}$  – ударная вязкость по Шарпи на образцах с острым и прямоугольным надрезами соответственно, в скобках – значения показателя для образцов со спаем, без скобок – без спая.

Таким образом, из полученных экспериментальных данных следует, что относительно малые добавки УНН (0,01-0,3 мас.%) оказывают заметное влияние на ход основного процесса (прививку ТЭДК) к макромолекулам ЛПЭНП и с-ПП, а также структуру, механические свойства функционализированных продуктов и их смесей с ПА6.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Константинов В.М., Галимский А.И., Ковальчук А.В.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*  
[a-v-kov@yandex.com](mailto:a-v-kov@yandex.com)

Научно-исследовательские работы по исследованию влияния структурных факторов и состава малоуглеродистых низколегированных сталей на их ударную вязкость относятся в основном к 1960–1970 гг., и их результаты изложены в известных монографиях и справочниках. Однако в последние годы возобновился интерес к этой проблеме, появились некоторые новые идеи, направленные на повышение показателей ударной вязкости за счет использования новых схем термической обработки и возможностей нового более совершенного оборудования и систем контроля.

Следует отметить, что в большинстве сталей, по нормам стандартов допускается содержания вредных примесей серы и фосфора в количествах при которых сталь не обладает сочетанием высокой прочности, пластичности, ударной вязкости.

В работе были проанализированы марки сталей (таблица 1), в результате чего отмечена тенденция к повышению качества сталей – снижению содержания серы и фосфора в сталях.