

САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ СТРУКТУРЫ И НАНОСБОРКИ

УДК 678.073

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СЕТЕЙ В КОМПОЗИТЕ АБС/МУНТ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ФИЛАМЕНТА ДЛЯ FDM-ПЕЧАТИ

© 2021 г. А. Е. Сорокин¹, А. А. Пыхтин¹, С. А. Ларионов¹, С. В. Кондрашов^{1,*}

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия*

*E-mail: stasru_59@mail.ru

Поступила в редакцию 02.10.2020 г.

После доработки 29.11.2020 г.

Принята к публикации 29.11.2020 г.

Проведено исследование физико-механических и электрофизических свойств филаментов нанокомпозиата из сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС)/многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) для FDM-печати (Fusing Deposition Modeling). В качестве наполнителя использованы как нативные (ТМН), так и функционализированные (ТМФ) многостенные углеродные нанотрубки. Показано, что прочность филамента нелинейно зависит от концентрации МУНТ. Вначале величина прочности падает на 24–34%, а затем по мере увеличения концентрации при 5 мас. % наполнителя увеличивается до значений на 3–5% меньше не модифицированного АБС. Удельное сопротивление филамента достигает значений 1.1×10^3 и 7.2×10^4 Ом м для ТМН и ТМФ соответственно (концентрация наполнителя 5 мас. %). Установлено нарушение степенной зависимости величины удельного сопротивления от концентрации нанонаполнителя, что, возможно, связано с протеканием процесса сегрегации фаз, различающихся проводимостью, в нанокомпозиате. Максимальное значение удельного сопротивления реализуется при концентрации 2.5 мас. % ТМН, когда фаза с более высокой проводимостью еще не образует единой сети, а представляет собой “островки”, разделенные между собой участками с меньшей проводимостью. Нарушения степенной зависимости пропадают в случае насыщения филамента с ТМН водой или использования в качестве нанонаполнителя ТМФ. Методами электронной микроскопии исследовано изменение морфологии и микроструктуры поверхности филамента. Показано, что повышение концентрации МУНТ приводит к “разглаживанию” поверхности, и может быть связано с более глубокой релаксацией сжимающих филамент усадочных напряжений. Эффект проявляется при минимальных концентрациях ТМН. При использовании ТМФ “разглаживание” поверхности наблюдается при максимальной концентрации 5 мас. %. Показано, что физико-механические и электропроводящие свойства филаментов определяются процессами разделения фаз, обладающих различной проводимостью, и усадки, протекающими одновременно в ходе получения филамента.

DOI: 10.1134/S1992722321040129

ВВЕДЕНИЕ

Одной из базовых составляющих “Индустрии 4.0” является разработка технологий для создания “Интернета вещей”. Данный подход предполагает мониторинг состояния детали или конструкции в целом с помощью интегрированных сенсоров и передачу информации в центр, который принимает решение о ее замене в случае исчерпания ресурса [1–4]. Создание сенсоров и элементов передающей электроники невозможно без разработки полимерных композитов, обладающих функциональными свойствами (электро- и теплопроводность, радиотехнические характеристики, магнитный момент) [5–7].

FDM-печать – способ изготовления изделий, позволяющий послойно увеличивать толщину

детали из термопластичных полимерных материалов и/или композитов на их основе, – является удобным и универсальным инструментом для решения данной задачи. Используя в качестве функционального наполнителя микропорошки железа [8, 9], магнетита [10], составы на основе марганца [11] или редкоземельных металлов [12], с помощью данной технологии возможно придавать полимерам магнитные свойства.

Детали, “напечатанные” из полимерных композитов, в состав которых входит чешуйчатый графит [13], наноалмазы [14], нитрид бора [15], имеют коэффициент теплопроводности в 5–25 раз больше, чем у чистых полимеров. Для получения полимерных композитов с высоким уровнем проводимости возможно использовать

металлическую нанопроволоку [16] или “чешуйчатое” серебро [17].

Наиболее востребованным функциональным наполнителем для придания полимерным матрицам электропроводящих свойств являются многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ). В качестве материалов для FDM-печати были выбраны нанокompозиты с углеродными нанотрубками на основе матриц из сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС) [18], полилактида (ПЛА) [19–21], полибутилентерефталата [22], полиимида (ПИ) [23]. Показано, что такие композиции при степени наполнения 5–8 мас. % имеют удельную проводимость на уровне от 1 до 10^2 С/м (данный уровень достаточен для изготовления сенсорных устройств и элементов гибкой электроники [24–26]). Введение МУНТ в матрицу в большинстве случаев приводит к повышению предела прочности нанокompозита (для АБС-матрицы при степени наполнения от 7 до 30 мас. % [18]). Увеличение прочности данной системы происходит за счет увеличения модуля упругости при практически постоянном значении относительного удлинения. Исключение составляет ПИ, где прочность уменьшается с введением в матрицу углеродсодержащего нанонаполнителя [23].

Также установлено, что введение наполнителя приводит к уменьшению показателя текучести расплава [18, 19].

Большинство упомянутых работ носит констатирующий характер и не содержит сведений о механизме формирования электропроводящих сетей из МУНТ при экструдировании филамента из расплава, содержащего углеродные нанотрубки (УНТ). Хотя известно, что электропроводящие сети из УНТ, сформированные в таких условиях (прохождение расплава через узкий канал с последующим быстрым охлаждением), по свойствам и морфологии существенно отличаются от сетей, формирующихся в квазистатическом состоянии [27, 28].

Однако без понимания этого механизма не представляется возможным определить оптимальные технологические режимы FDM-печати из электропроводящих нанокompозитов, которые позволят получить необходимый уровень проводимости при минимальном количестве МУНТ и сохранении физико-механических свойств полимерной матрицы.

Целью настоящей работы является описание морфологических и функциональных особенностей формирования проводящих цепей из МУНТ в АБС-пластике в процессе изготовления филамента для FDM-печати.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полимерной матрицей выступал сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола (АБС-пластик) марки 2525-31 (ОАО “Пластик Узловая”, Россия).

В качестве функционального наполнителя использовали МУНТ марки Таунит М двух типов: нативные (ТМН) и функционализированные алкильными группами (ТМФ). Оба продукта производства ООО “НаноТехЦентр” г. Тамбов.

Совмещение функционального наполнителя с полимерной матрицей проводили в лабораторном смесителе типа “Брабендер” с последующим измельчением в молотковой дробилке. Филамент диаметром 1.75 мм для 3D-печати получали с использованием лабораторной линии Skamia (одношнековый экструдер с диаметром шнека 20 мм).

Для печати использовали 3D-принтер Magnum Creative 2 PRO. Температура сопла 240–260°C, ориентация нити расплава $\pm 45^\circ$.

Для оценки влияния модификации на свойства филамента определяли:

- твердость по Шору (ГОСТ 23677-79) на приборе модели ИТ 5069 УХЛ 4.2;
- водопоглощение (ГОСТ 4650-2014);
- прочность на срез (ГОСТ Р 57968-2017) с использованием прибора “Testometric 500”.

Сколы и микроструктуру поверхности филаментов исследовали с помощью электронного сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 100$ до $\times 40000$. Поверхность сколов подвергали ионно-плазменному травлению (на установке JFC-1100 [JEOL]) с последующим напылением золота ≤ 10 нм (на установке магнетронного распыления Q150R ES Quorum Technologies).

Исследование морфологии поверхности нити в поперечном направлении проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка от 20 до 40 пА.

Для определения удельного сопротивления нанокompозитов к торцам цилиндрических образцов филаментов крепили токопроводящие шины. Измерения проводили с использованием мультиметра “Актаком АМ-1109”. Полученные значения пересчитывали с учетом геометрии образца.

Определение температуры стеклования АБС-пластика и нанокompозитов осуществляли методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе DSC-1 Mettler Toledo (скоростью нагрева $10^\circ\text{C}/\text{мин}$).

Таблица 1. Основные характеристики филаментов на основе АБС и УНТ

Композиция, мас. % МУНТ	H , ед.	T_g , °С	σ , Н/мм ²	ρ , Ом м	ρ_w , Ом м
АБС-пластик	77	103.8	53.0	10^{13}	
АБС-пластик + 1.0% ТМН	80	103.9	40.7	4800.00	42000
АБС-пластик + 2.5% ТМН	79	103.5	47.9	6900.00	23600
АБС-пластик + 5.0% ТМН	79	103.5	51.6	1100.00	4300
АБС-пластик + 1.0% ТМФ	79	104.0	35.3	158000.00	820000
АБС-пластик + 2.5% ТМФ	80	103.2	47.3	95000.00	615000
АБС-пластик + 5.0% ТМФ	80	103.4	49.7	72000.00	390000

Измерение относительного удлинения и среднего коэффициента линейного термического расширения филаментов проводили на термомеханическом анализаторе ТМА 202С фирмы NETZCH в соответствии с ГОСТ 32618.2-2014. Измерения проводили в диапазоне температур от -20 до 150°C со скоростью нагрева 5 K/мин в среде гелия с расходом продувки 70 мл/мин .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены результаты исследования физико-механических (твёрдость по Шору H , предел прочности на срез σ), термомеханических (температура стеклования T_g) и электрофизических (удельное объёмное сопротивление ρ и ρ_w в исходном состоянии и после выдержки в воде в течение 30 сут) свойств филаментов, содержащих различное количество нативных и функционализированных УНТ.

Как видно из представленных данных, введение в АБС-пластик МУНТ практически не оказывает влияния на величину твёрдости по Шору и температуру стеклования. Разброс значений этих характеристик находится в пределах точности проводимых измерений.

Крайне необычной является зависимость удельного сопротивления от концентрации для филамента, содержащего ТМН. При концентрации ТМН 1 мас. % величина удельного сопротивления филамента оказывается меньше, чем для нанокompозита, содержащего 2.5 мас. % нанонаполнителя, что нарушает общепринятую степенную зависимость электропроводности от концентрации проводящей фазы [27, 28]. При наномодификации функционализированными нанотрубками или после выдержки нанокompозитов с ТМН в воде более двух недель указанная особенность не проявляется.

Отметим, что нарушение степенной зависимости описано в [18], где показано, что проводимость нанокompозита АБС/МУНТ при достижении концентрации нанонаполнителя 7 мас. % уменьшается на порядок по сравнению с прово-

димостью нанокompозита, содержащего 5 мас. % МУНТ. Однако причины этого нарушения в работе не обсуждались.

Возможной причиной такого аномального поведения зависимости удельного сопротивления от концентрации ТМН в композиции является изменение морфологии проводящих сетей при увеличении концентрации функционального нанонаполнителя.

На рис. 1 приведены микрофотографии скола исследованных нанокompозитов. Как видим, при концентрации ТМН 1 мас. % (рис. 1б) электропроводящая сеть в нанокompозите представляет собой равномерно распределённые по объёму кластеры из УНТ. С увеличением концентрации МУНТ начинается процесс фазового разделения, результатом которого является образование двух фаз с различной проводимостью. При концентрации ТМН 5 мас. % одна из фаз (рис. 1г) аналогична фазовому составу образца (рис. 1б) и имеет более высокую проводимость, во второй фазе концентрация кластеров из нанотрубок (рис. 1г), а следовательно, и проводимость оказываются меньше. Особенно сильно этот эффект наблюдается при использовании ТМФ (рис. 1д). Таким образом, при высокой концентрации нанонаполнителя проводящие кластеры концентрируются в одну фазу, которая образует непрерывную электропроводящую сеть. Данная тенденция для полимерных нанокompозитов, полученных методом экструзии, является типичной [29–31].

Возможно, нарушение степенной зависимости удельного сопротивления при концентрации ТМН 2.5 мас. % связано с тем, что при данной концентрации фаза с более высокой проводимостью еще не образует единой сети, а представляет собой “островки”, разделённые между собой участками с меньшей проводимостью.

Как видно из данных табл. 1, насыщение нанокompозита водой, так же как и использование в качестве наполнителя ТМФ, приводит к увеличению его удельного сопротивления. Данный эффект, вероятно, связан с увеличением расстояния между МУНТ и ограничением транспорта заря-

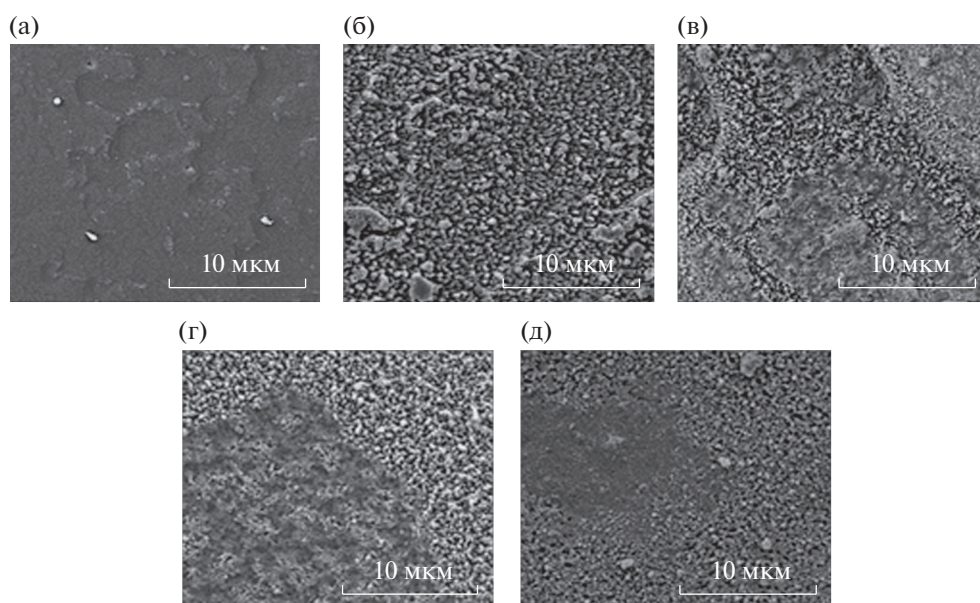


Рис. 1. Микроструктура скола образцов исходной матрицы (а) и нанокompозитов АБС/ТМН 1% (б), АБС/ТМН 2.5% (в), АБС/ТМН 5% (г), АБС/ТМФ 5% (д).

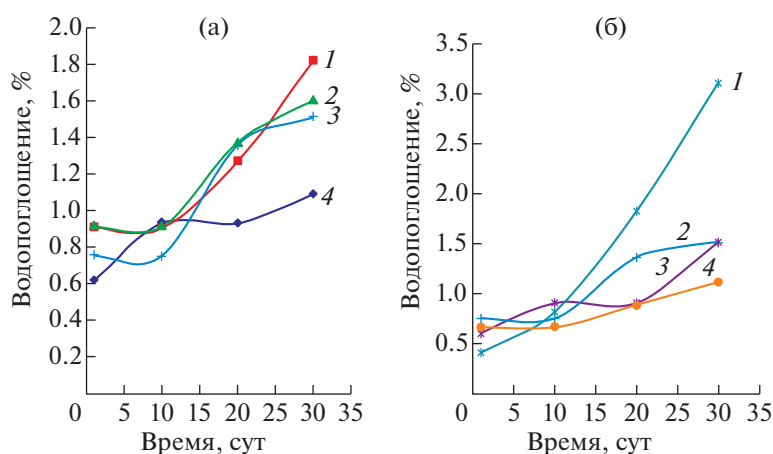


Рис. 2. Кинетика водопоглощения нанокompозитов АБС/ТМН (а) (1 – 2.5% ТМН, 2 – 5% ТМН, 3 – 1% ТМН, 4 – 0% ТМН) и АБС/ТМФ (б) (1 – 2.5% ТМФ, 2 – 0% ТМФ, 3 – 1% ТМФ, 4 – 5% ТМФ).

дов между ними. В результате удельное сопротивление фазы с более высокой концентрацией агрегатов растет быстрее, разница в проводимости обеих фаз уменьшается, а следовательно, причина аномального поведения электропроводности исчезает.

Существенное различие структуры промежуточного состояния при концентрации нанонаполнителя 2.5 мас. % подтверждается исследованиями кинетики водопоглощения (рис. 2) нанокompозитов с ТМН и ТМФ. Как видно из приведенных результатов, скорость водопоглощения для нанокompозитов, содержащих 2.5 мас. % УНТ обоих типов, максимальна и не проявляет

тенденции к снижению даже после 30 сут выдержки в дистиллированной воде.

На рис. 3. представлены фотографии поверхности исследованных филаментов и микроструктуры их поверхности. Как видим, поверхность филаментов из исходного АБС-пластика покрыта характерной ромбической сеткой, измята (рис. 3а). Микроструктура поверхности имеет слабо выраженный глобулярный характер (рис. 3б). По мере увеличения концентрации ТМН (рис. 3в, 3ж, 3л) поверхность филамента становится гладкой, а микроструктура поверхности приобретает ярко выраженные признаки фазового разделения.

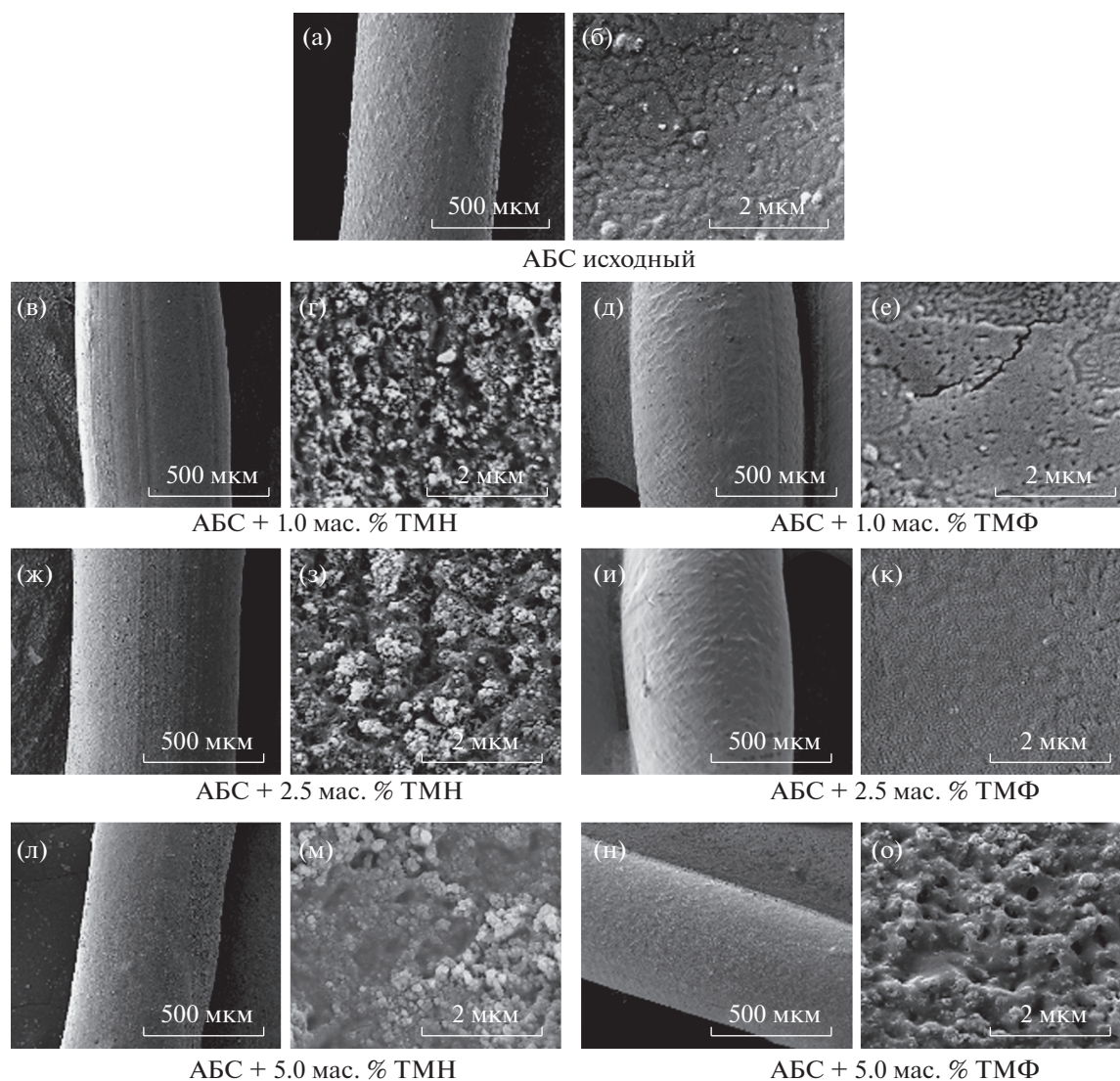


Рис. 3. Морфология и микроструктура поверхности филаментов с различным содержанием функционального нанонаполнителя при различных увеличениях.

При использовании в качестве модификатора функционализированных нанотрубок разглаживание поверхности и фазовое разделение наступают лишь при концентрации 5 мас. % ТМФ (рис. 3д, 3и, 3н, 3е, 3к, 3о).

Возможной причиной образования сеточной структуры на поверхности материала является неравномерность протекания усадочных явлений по диаметру филамента в процессе экструзии. При выдавливании полимерной матрицы через экструзионную головку в результате различия скоростей потока по центру и у стенки головки происходит ориентация макромолекул [32]. При охлаждении филамента расплав переходит в высокоэластичное состояние, возникающие при этом упругие силы уменьшают длину полученной полимерной нити. Процесс сжатия будет проис-

ходить до достижения расплавом температуры стеклования. Поверхность филамента (оболочка) переходит в стеклообразное состояние быстрее, чем его внутренние слои (ядро). Усадка ядра деформирует остывшие поверхностные слои, что приводит к образованию складок, образующих характерный “сеточный узор”.

На рис. 4 приведены температурные зависимости изменения относительного удлинения $\frac{\Delta L}{L_0}$ филамента для чистого и модифицированного ТМН АБС-пластика. Как видно из представленных графиков, после достижения температуры стеклования длина всех исследованных образцов уменьшается. Следовательно, макромолекулы полимера после экструдирования филамента находятся в ориентированном состоянии. При этом

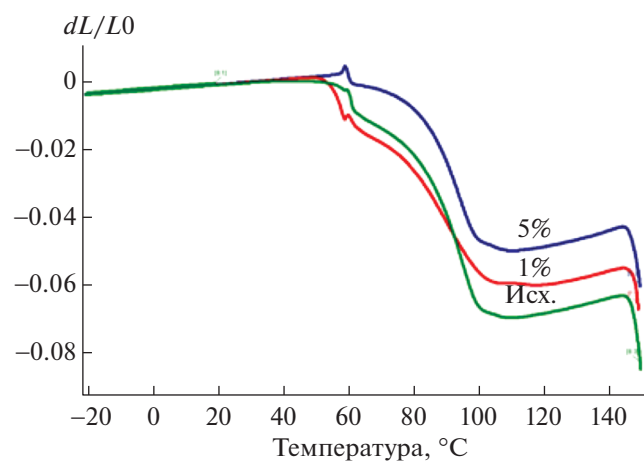


Рис. 4. Относительное изменение длины образцов филаментов с различной концентрацией ТМН при их нагреве.

модификация матрицы углеродными нанотрубками приводит к уменьшению усадки почти на 30%. Вероятно, это является одной из причин разглаживания поверхности модифицированного филамента.

Кроме того, коэффициент теплопроводности модифицированного МУНТ филамента (согласно данным [33]) при концентрации наполнителя 7 мас. % возрастает на 55% по сравнению с исходной матрицей, что приводит к снижению разности температур между ядром и оболочкой филамента, а следовательно, уменьшит образование складок на его поверхности.

Наибольший эффект снижения усадки и увеличения теплопроводности будет наблюдаться в случае завершеного процесса разделения фаз. Вероятно, именно это обстоятельство объясняет отсутствие эффекта разглаживания поверхности филамента при использовании малых концентраций ТМФ.

Высокий уровень усадки определяет возникновение больших остаточных напряжений на границе раздела матрица/кластер МУНТ, что приводит к существенному падению прочности филамента при концентрациях МУНТ 1 мас. %. (табл. 1). Увеличение концентрации нанонаполнителя приводит к увеличению прочностных характеристик. Возможно, этот эффект связан с ускорением релаксационных процессов в полимерной матрице при образовании непрерывной сети из УНТ. Аналогичный эффект наблюдали на эпоксидных и эластомерных матрицах [34–36].

Отметим, что усадочные процессы могут оказывать заметное влияние не только на физико-механические, но и на электропроводящие свойства филамента. Быстрое охлаждение “оболочки” полимерной нити будет приводить к возникнове-

нию напряжений сжатия в “ядре”, которые могут снизить электрическое сопротивление за счет уменьшения расстояний между МУНТ и облегчения транспорта носителей заряда.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование физико-механических и электрофизических свойств филаментов из нанокompозита АБС/МУНТ. В качестве наполнителя использованы нативные (ТМН) и функционализированные (ТМФ) многостенные углеродные нанотрубки. Показано, что прочность филамента нелинейно зависит от концентрации МУНТ. Вначале величина прочности падает на 24–34%, а затем по мере увеличения концентрации до 5 мас. % наполнителя увеличивается до значений на 3–5% меньше не модифицированного АБС.

Показано, что удельное сопротивление филамента достигает значений 1.1×10^3 и 7.2×10^4 Ом м для ТМН и ТМФ соответственно (концентрация наполнителя 5 мас. %). Установлено нарушение степенной зависимости величины удельного сопротивления от концентрации нанонаполнителя, что, возможно, связано с протеканием процесса сегрегации фаз, различающихся проводимостью, в нанокompозите. Максимальное значение удельного сопротивления реализуется при концентрации 2.5 мас. % ТМН, когда фаза с более высокой проводимостью еще не образует единой сети, а представляет собой “островки”, разделенные между собой участками с меньшей проводимостью. Нарушения степенной зависимости пропадают в случае насыщения филамента с ТМН водой или использования в качестве нанонаполнителя ТМФ.

Методами электронной микроскопии исследовано изменение морфологии и микроструктуры поверхности филамента. Показано, что повышение концентрации МУНТ приводит к “разглаживанию” поверхности и может быть связано с более глубокой релаксацией сжимающих филамент усадочных напряжений. Эффект проявляется при минимальных концентрациях ТМН. При использовании ТМФ “разглаживание” поверхности наблюдается при максимальной концентрации 5 мас. %.

Показано, что физико-механические и электропроводящие свойства филаментов определяются процессами разделения фаз, обладающих различной проводимостью, и усадки, протекающими одновременно в ходе получения филамента.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-03-00371 а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. // *Металлы Евразии*. 2017. № 3. С. 2.
2. Каблов Е.Н. // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16.
3. Каблов Е.Н. // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3.
<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
4. Каблов Е.Н. Сборник научно-информационных материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Сорокин А.Е., Платонов М.М., Ларионов С.А. // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. № 9. С. 35.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-9-5-5>
6. Кирич Б.С., Лонский С.Л., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. № 4 (76). С. 7.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29>
7. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. // *Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2019. № 10 (82) Ст. 04.
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49>
8. Bollig L.M., Hilpisch P.J., Mowry G.S., Nelson-Cheeseman B.B. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 442. P. 97.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.06.070>
9. Khatri B., Lappe K., Noetzel D. et al. // *Materials*. 2018. V. 11. № 2. P. 189.
<https://doi.org/10.3390/ma11020189>
10. Leigh S.J., Purssell C.P., Billson D.R., Hutchins D. // *Smart Mater. Struct.* 2014. V. 23. № 9. P. 095039.
11. Palmero E.M., Rial J., de Vicente J. et al. // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2018. V. 19. № 1. P. 465.
<https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1471321>
12. Huber C., Abert C., Bruckner F. et al. // *Sci. Rep.* 2017. V. 8. № 1. P. 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-09864-0>
13. Jia Y., He H., Geng Y. et al. // *Compos. Sci. Technol.* 2017. V. 145. P. 55.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.03.035>
14. Waheed S., Cabot J.M., Smejkal P. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2019. V. 11. № 4. P. 4353.
<https://doi.org/10.1021/acsami.8b18232>
15. Quill T.J., Smith M.K., Zhou T. et al. // *Appl. Compos. Mater.* 2018. V. 25. № 5. P. 1205.
<https://doi.org/10.1007/s10443-017-9661-1>
16. Cruz M.A., Ye S., Kim M.J. et al. // *Part. Part. Syst. Char.* 2018. V. 35. № 5. P. 1700385.
<https://doi.org/10.1002/ppsc.201700385>
17. Lei Z., Chen Z., Peng H. et al. // *J. Mater. Sci.* 2018. V. 53. № 20. P. 14495.
<https://doi.org/10.1007/s10853-018-2645-1>
18. Sezer H.K., Eren O. // *J. Manuf. Process.* 2019. V. 37. P. 339.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.12.004>
19. Yang L., Li S., Zhou X. et al. // *Synthetic Metals*. 2019. V. 253. P. 122.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.05.008>
20. Yu W.W., Zhang J., Wu J.R. et al. // *J. Appl. Polym. Sci.* 2017. V. 134. № 15. P. 44703.
<https://doi.org/10.1002/app.44703>
21. Spinelli G., Lamberti P., Tucci V. et al. // *Composites Part B*. 2019. V. 167. P. 467.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.021>
22. Gnanasekaran K., Heijmans T., Van Bennekom S. et al. // *Appl. Mater. Today*. 2017. V. 9. P. 21.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.04.003>
23. Ye W., Wu W., Hu X. et al. // *Compos. Sci. Technol.* 2019. V. 182. P. 107671.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.028>
24. Agarwala S., Goh G.L., Goh G.D. et al. // *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials*. Elsevier, 2020. P. 297.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00010-7>
25. Joshi A., Goh J.K., Goh K.E.J. // *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials*. Elsevier, 2020. P. 45.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816805-9.00003-X>
26. Khosravani M.R., Reinicke T. // *Sens. Actuators, A*. 2020. P. 111916.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111916>
27. Alig I., Pötschke P., Lellinger D. et al. // *Polymer*. 2012. V. 53. № 1. P. 4.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.10.063>
28. Villmow T., Pegel S., Pötschke P., Wagenknecht U. // *Compos. Sci. Technol.* 2008. V. 68. № 3–4. P. 777.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.08.031>
29. Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B. et al. // *Polymer*. 2006. V. 47. P. 2036.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.01.029>
30. Alig I., Lellinger D., Skipa T. // *Polymer-carbon nanotube composites Preparation, properties and applications*. Cambridge. Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 295.
<https://doi.org/10.1533/9780857091390.2.295>
31. Tiusanen J., Vlasveeld D., Vuorinen J. // *Compos. Sci. Technol.* 2012. V. 72. № 14. P. 1741.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.07.009>
32. Справочник химика 21. <https://www.chem21.info/info/info/981228/>
33. Bonnet P., Sireude D., Garnier B., Chauvet O. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91 (20). P. 201910.
<https://doi.org/10.1063/1.2813625>
34. Simonov-Emel'yanov I.D., Pykhtin A.A., Smotrova S.A., Kovaleva A.N. // *Polym. Sci. D*. 2017. V. 10. № 3. P. 236.
<https://doi.org/10.1134/S1995421217030169>
35. Simonov-Emel'yanov I.D., Pykhtin A.A., Mikhail'chenko K.A. // *Nanotechnologies in Russia*. 2018. V. 13. № 7–8. P. 372.
<https://doi.org/10.1134/S1995078018040146>
36. Мансурова И.А. и др. // *Изв. вузов. Хим. и хим. технология* 2019. Т 62. № 11. С. 106.