

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПА-6, ПРОШЕДШИХ ТФЭ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-НАГРЕВА

Д.О. Завражин, В.В. Худяков

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор В.М. Дмитриев*

**Ключевые слова и фразы:** модифицированные полимер-углеродные материалы; СВЧ-обработка; твердофазная экструзия.

**Аннотация:** Исследовано влияние СВЧ-излучения на процесс твердофазной плунжерной экструзии полимер-углеродных нанокompозитов. Проведена сравнительная оценка эксплуатационных показателей композиционных материалов. Показано, что сочетание методов твердофазной технологии с дополнительной СВЧ-обработкой полимер-углеродных нанокompозитов позволяет получать изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время технология переработки термопластов в твердой фазе методами пластического деформирования представляет собой технологический процесс, для успешной реализации которого на практике необходимы исследования основных закономерностей процесса и разработка материалов для твердофазной обработки давлением, обладающих рядом специальных характеристик.

В данной работе проведено исследование пластической деформации полимер-углеродных материалов с использованием кратковременной СВЧ-обработки на примере твердофазной плунжерной экструзии (ТФЭ) [2–4]. Было изучено влияние времени СВЧ-нагрева полимерных и модифицированных полимер-углеродных материалов на технологические параметры экструзии и формирование физико-механических и теплофизических свойств экструдатов.

Параметрами ТФЭ являются экструзионное отношение  $\lambda_{\text{экс}}$ , температура материала, необходимое давление формования  $P_{\text{ф}}$ , угол входного конуса в капилляр, длина капилляра и наличие модифицирующих добавок [1].

---

Завражин Дмитрий Олегович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Материалы и технология», старший научный сотрудник НОЦ ТамбГТУ – ИСМАН «Твердофазные технологии», e-mail: zavgazhin-do@yandex.ru; Худяков Владимир Владимирович – аспирант кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин», младший научный сотрудник НОЦ ТамбГТУ – ИСМАН «Твердофазные технологии», ТамбГТУ, г. Тамбов.

В качестве объекта исследования использовали полиамид ПА-6. В качестве модифицирующих веществ применяли углеродные нанотрубки (УНТ) «Таунит» (производства ООО «НаноТехЦентр», Россия, г. Тамбов) с наружным диаметром 8...15 нм и длиной 2 мкм и более в виде сыпучего порошка [5].

Опыты по ТФЭ проводили на экспериментальной установке типа капиллярного вискозиметра с загрузочной камерой диаметром 0,005 м и экструзионным отношением  $\lambda_{\text{экс}} = 1,52$  [1]. Частота СВЧ-излучения магнетрона 2450 МГц. Выходная мощность 700 Вт.

Предел прочности при срезе  $\sigma_{\text{ср}}$ , разрушающее напряжение  $\sigma_r$  и относительное удлинение при разрыве  $\varepsilon$  исходных образцов и экструдатов, полученных в условиях ТФЭ при различном времени СВЧ-обработки, определяли на универсальной испытательной машине УТС 101-5 при скорости перемещения подвижного зажима машины 20 мм/мин и температуре  $T_{\text{исп}} = 298$  К. Срез проводили в направлении, перпендикулярном оси ориентации.

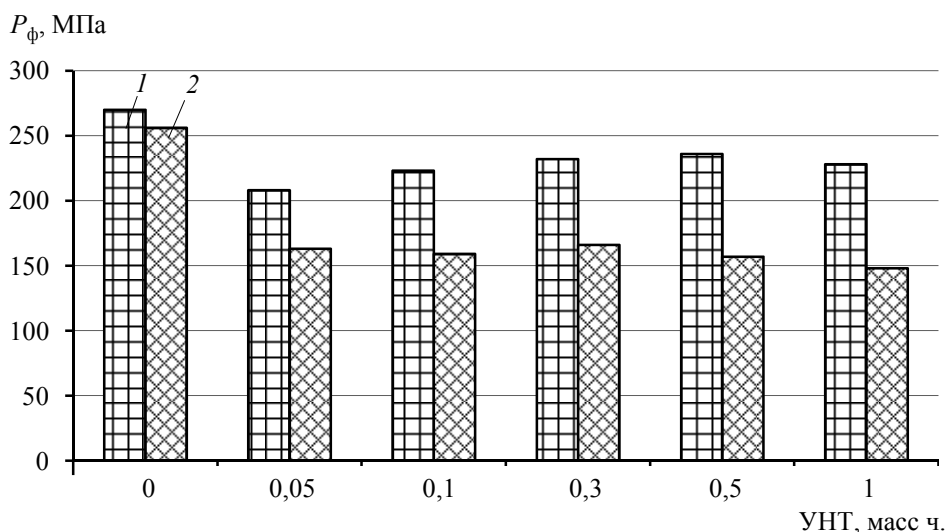
Для исследования структуры и определения удельной скорости поглощения энергии использовался модернизированный дифференциальный сканирующий калориметр DSC-2 фирмы Perkin Elmer.

Ранее установлено, что оптимальная температура переработки в твердой фазе композиционных материалов для аморфно-кристаллических полимеров определяется из соотношения Бойера [1]

$$T_{\text{экс}} = (0,75 \pm 0,15) T_{\text{пл}}. \quad (1)$$

Применение СВЧ-обработки позволяет за десятки секунд прогреть заготовку до оптимальной температуры переработки, снижая необходимое давление формования на 15–20 % (рис. 1).

Необходимо отметить, что при переработке полимерных материалов в режиме ТФЭ следует учитывать структурные особенности полимерной



**Рис. 1.** Диаграмма изменения необходимого давления формования  $P_f$  образцов системы ПА-6+УНТ, экструдированных при  $\lambda_{\text{экс}} = 1,52$  без СВЧ (1) и при СВЧ-нагреве в течение 100 с (2), в зависимости от содержания УНТ

матрицы: переработка полимеров с жесткой структурой при температуре окружающей среды может привести к разрушению полимерной матрицы.

Сравнительные механические характеристики исходного ПА-6 (жидкофазного (ЖФ) и прошедшего твердофазную экструзию (ТФЭ)) композитов на его основе представлены в таблице. Хорошо прослеживается влияние на прочностные характеристики комплексного воздействия модификатора, твердофазной технологии и СВЧ-излучения. Как правило, полученные полимер-углеродные нанокompозиты имеют более высокий модуль упругости при растяжении в сравнении с исходным ПА-6.

При оценке прочности на срез после обработки по заданной методике показано повышение прочностных характеристик материала до 100 % в направлении, перпендикулярном ориентации в режиме ТФЭ (рис. 2). Оценка твердости по Шору (шкала D) исходных и модифицированных материалов показала увеличение твердости материалов на 10–15 % (рис. 3).

### Сравнительные механические характеристики образцов системы ПА-6+УНТ, экструдированных при $\lambda_{\text{экс}}=1,52$ без СВЧ и при СВЧ-нагреве в течение 100 с от содержания УНТ

Состав образца	Предел прочности при разрыве $\sigma_r$ , МПа	Относительное удлинение при разрыве $\epsilon_r$ , %
ПА-6 исходный, ЖФ	62	72
ПА-6+1 масс. ч. УНТ, ЖФ	67	69
ПА-6 исходный, ТФЭ, 0 с СВЧ	75	53
ПА-6 исходный, ТФЭ, 100 с СВЧ	78	59
ПА-6+1 масс. ч. УНТ, ТФЭ, 0 с СВЧ	81	54
ПА-6+1 масс. ч. УНТ, ТФЭ, 100 с СВЧ	86	62

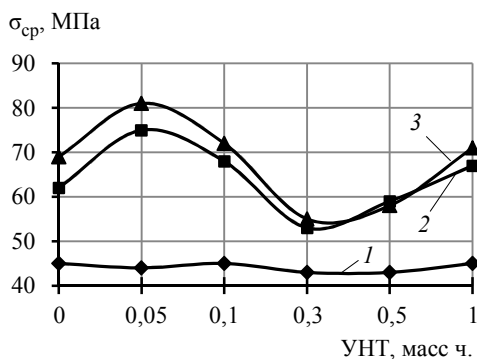


Рис. 2. Диаграмма изменения прочностных характеристик в условиях срезающих напряжений  $\sigma_{\text{ср}}$  образцов системы ПА-6+УНТ, полученных литьем под давлением (1) и экструдированных при  $\lambda_{\text{экс}}=1,52$  без СВЧ (2) и при СВЧ-нагреве в течение 100 с (3), в зависимости от содержания УНТ

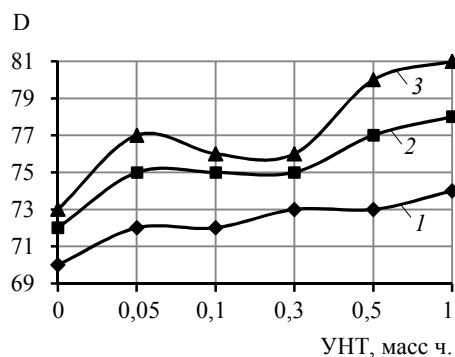
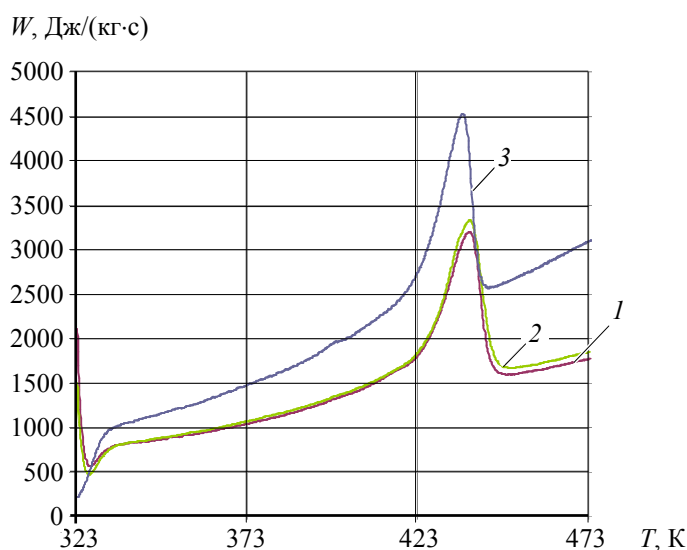


Рис. 3. Диаграмма зависимости твердости по Шору D образцов системы ПА-6+УНТ, полученных литьем под давлением (1) и экструдированных при  $\lambda_{\text{экс}}=1,52$  без СВЧ (2) и при СВЧ-нагреве в течение 100 с (3), в зависимости от содержания УНТ



**Рис. 4.** Диаграмма зависимости удельной теплоемкости образцов, прошедших твердофазную экструзию:

1 – исходный ПА-6; 2 – композит ПА-6+1 УНТ ( $\lambda_{\text{экс}} = 1,52$ ,  $T_{\text{экс}} = 295$  К);  
3 – композит ПА-6+1 УНТ при СВЧ-нагреве в течение 100 с ( $\lambda_{\text{экс}} = 1,52$ )

Для изучения термодинамических и теплофизических свойств полученных материалов был использован метод дифференциальной сканирующей калориметрии. Результаты исследований представлены на рис. 4.

Установлено, что СВЧ-обработка исходного ПА-6 и композитов на его основе позволяет получить более термостойкий материал. Температура плавления практически не меняется, однако, величина удельной теплоемкости возрастает до 30 %.

Проведенные исследования показывают целесообразность применения СВЧ-нагрева для процессов пластического деформирования полимерных материалов. Ранее проведенные исследования показали, что в ряде случаев необходимо повысить коэффициент поглощения СВЧ-излучения полимерной матрицей. В работе показано, что модифицирование полимеров углеродными материалами (в том числе нанокремнеземом) позволяет решить поставленную задачу.

*Исследование выполнено в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственное соглашение 14.A18.21.0105).*

#### Список литературы

1. Переработка полимеров в твердой фазе. Физико-химические основы : монография / Г.С. Баронин [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2002. – 320 с.
2. Влияние СВЧ-излучения на формирование структурно-механических свойств модифицированных полимер-углеродных материалов при твердофазной экструзии / Г.С. Баронин [и др.] // Науч. ведомости Белгород. гос. ун-та. Сер. Математика. Физика. – 2011. – Т. 23, № 11. – С. 123–128.

3. Завражин, Д.О. Влияние СВЧ-излучения на формирование структуры с улучшенными физико-механическими характеристиками модифицированных полимер-углеродных материалов при твердофазной обработке давлением / Д.О. Завражин, А.Г. Попов // Перспектив. материалы. – 2011. – № 11. – С. 389–395.

4. Пат. 2361733 РФ, В 29 С 39/00. Способ формования термопластов / Баронин Г.С., Завражин Д.О., Дмитриев В.М., Ткачев А.Г., Иванов С.А. и др. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2007128686/12 ; заявл. 25.07.2007 ; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 8 с.

5. Ткачев, А.Г. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур : монография / А.Г. Ткачев, И.В. Золотухин. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 316 с.

---

**Research into Structural and Mechanical Properties  
of the Nanomodified Polyamide-6-Based Materials  
after Solid-Phase Extrusion Using Microwave Heating**

**D.O. Zavrazhin, V.V. Khudyakov**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** microwave treatment; modified polymer-carbon materials; solid-phase extrusion.

**Abstract:** The effect of microwave radiation on the process of solid-phase extrusion of polymer-carbon nanocomposites has been studied. The comparative assessment of the operational characteristics of composite materials has been made. It is shown that the combination of methods of solid-phase technologies with additional microwave processing of polymer-carbon nanocomposites enables to obtain products with improved performance characteristics.

---

© Д.О. Завражин, В.В. Худяков, 2012