

## ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-21-26

УДК 678.5.073.002.68

### ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО ПОЛИКАПРОАМИДА ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

**Третьяков Владимир Никифорович,**

кандидат техн. наук, доцент, [treyakovvn@kuzstu.ru](mailto:treyakovvn@kuzstu.ru)

**Евменов Сергей Дмитриевич,**

кандидат техн. наук, профессор, [esd.tpp@kuzstu.ru](mailto:esd.tpp@kuzstu.ru)

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28



#### **Информация о статье**

Поступила:

27 октября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

05 декабря 2021 г.

#### **Ключевые слова:**

вторичный поликапроамид, композиционный материал, наполнитель, зола уноса теплоэлектростанций, литье под давлением, технологические параметры, деформационно-прочностные свойства, оптимальный температурный режим переработки.

#### **Аннотация.**

*Цель работы:* оценка влияния режимов переработки композиции на основе вторичного поликапроамида (ВПКА) и золы уноса теплоэлектростанций методом литья под давлением на свойства изделий и определение оптимального температурного режима, обеспечивающего получение изделий инженерно-технического назначения.

*Методы исследования:* стандартные методы исследования прочностных и деформационных характеристик полимеров: ударная вязкость, разрушающее напряжение при изгибе, модуль упругости при изгибе, прогиб при изгибе, прочность при разрыве, модуль упругости при растяжении, относительное удлинение при разрыве, теплостойкость по Вика, твердость, плотность и усадка; планирование эксперимента.

*В статье показано, что - исследуемая композиция, состоящая из 56% ВПКА и 44% наполнителя, в качестве которого использовалась зола уноса теплоэлектростанций, может перерабатываться в изделия литьем под давлением на серийно выпускаемом оборудовании; эксплуатационные свойства получаемых изделий во многом определяются температурными параметрами процесса литья под давлением, оптимальными значениями которого для данной композиции являются следующие: температура расплава  $T_p = 255 \pm 5^\circ\text{C}$ , температура формы  $T_f = 70^\circ\text{C}$ ; получаемые при данном режиме изделия имеют свойства, соответствующие изделиям инженерно-технического назначения.*

**Для цитирования:** Третьяков В.Н., Евменов С.Д. Переработка полимерной композиции на основе вторичного поликапроамида литьем под давлением // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 6 (148). – С. 21-26 – DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-21-26

Эксплуатационные свойства литевых изделий из пластмасс в значительной степени определяются технологическими параметрами процесса литья под давлением, которые в свою очередь зависят от свойств перерабатываемого материала. Поэтому для каждого материала подбирается оптимальный режим переработки, обеспечивающий получение изделий с наилучшими эксплуатационными характеристиками [1].

В результате ранее проведенных исследований [2, 3] была разработана композиция на основе вторичного поликапроамида (ВПКА), полученного из полимерных сеток, которые применяются в вакуум-фильтрах на углеобогатительных фабриках. В качестве наполнителя использовалась зола уноса, образующаяся при сжигании углей Канско-Ачинского угольного бассейна, которая является одним из отходов работы теплоэлектростанций. Содержание наполнителя было определено на основе анализа

эксплуатационных свойств композиций разного состава [2] и составило 44%.

Таблица 1. Параметры процесса литья под давлением

Table 1. Injection molding process parameters

Фактор	Обозначение	Шаг	Пределы варьирования		
			-1	0	+1
Температура расплава, °С	$X_1$	30	230	260	290
Температура формы, °С	$X_2$	30	40	70	100

Таблица 2. Физико-механические и теплофизические свойства изделий

Table 2. Physical, mechanical and thermophysical properties of products

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Нормативный документ
1.	Ударная вязкость, $a_{уд}$	кДж/м <sup>2</sup>	ГОСТ 4647-80
2.	Разрушающее напряжение при изгибе, $\sigma_{изг}$	МПа	ГОСТ 4648-2014
3.	Модуль упругости при изгибе, $E_{изг}$	МПа	ГОСТ 9550-81
4.	Прогиб при изгибе, $\Delta l_{изг}$	мм	ГОСТ 9550-81
5.	Прочность при разрыве, $\sigma_p$	МПа	ГОСТ 11262-2017
6.	Модуль упругости при растяжении, $E_p$	МПа	ГОСТ 9550-81
7.	Относительное удлинение при разрыве, $\varepsilon_p$	%	ГОСТ 11262-2017
8.	Теплостойкость по Вика, $T_v$	°С	ГОСТ 15088-2014
9.	Твердость, НВ	МПа	ГОСТ 4670-2015
10.	Плотность, $\rho$	г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 15139-69
11.	Усадка, $U$	%	ГОСТ 18616-80

Таблица 3. Уравнения регрессии

Table 3. Regression equations

№ п/п	Полученные уравнения регрессии	Дисперсия воспроизводимости ( $S_0^2$ )	Критерий Фишера (F)	
			Расчетный	Табличный
1.	$a_{уд} = 5,87 - 0,84X_1^2 + 0,75X_2^2$ , кДж/м <sup>2</sup>	0,1909	1,194	2,66
2.	$\sigma_{изг} = 103,55 - 21,71X_1 X_2 - 8,53X_1$ , МПа	85,54	1,614	2,66
3.	$E_{изг} = 922,62 - 212,61X_2$ , МПа	5495,2	1,319	2,59
4.	$\Delta l_{изг} = 0,748 - 0,206X_1^2$ , мм	0,0189	2,44	2,59
5.	$\sigma_p = 54,58 - 5,39X_1 - 10,05X_1^2$ , МПа	25,734	2,764	2,66
6.	$E_p = 1758,18 - 277,29X_1 - 349,95X_1^2 - 397,57X_2^2$ , МПа	22112,4	1,09	2,77
7.	$\varepsilon_p = 1,694 - 0,50X_1^2$ , %	0,081	3,086	2,59
8.	$T_v = 184,6$ °С	116,612	2,206	2,51
9.	$НВ = 150,87 + 9,44X_1 - 12,88X_1X_2$ , МПа	79,097	0,438	2,66
10.	$\rho = 1,499 - 0,049X_2 - 0,15X_2^2$ , г/см <sup>3</sup>	0,00157	0,776	2,77
11.	$U = 1,17 + 0,23X_2 + 0,22X_1X_2 + 0,2 X_1^2 - 0,58 X_2^2$ , %	0,00593	23,788	2,93

Задачей настоящего исследования явилась оценка влияния режимов переработки указанной композиции методом литья под давлением на свойства изделий и определение оптимального температурного режима, обеспечивающего получение изделий инженерно-технического назначения, обладающих набором физико-механических характеристик, необходимых для их возможного использования в различных отраслях промышленности [4].

Давление и скорость впрыска расплава в форму приняты в соответствии с известными рекомендациями для переработки термопластов [5, 6, 7], время выдержки под давлением и время охлаждения рассчитаны по соответствующим уравнениям, приведенным в [5].

Переменными параметрами явились температура расплава ( $T_p$ ) и температура литьевой формы ( $T_\phi$ ), т.к. физико-механические и теплофизические свойства изделий в значительной степени обусловлены величиной именно этих параметров [5, 6, 7].

В результате эксперимента, который проводился на вертикальной литьевой машине поршневого типа ВЛ-40, были получены стандартные образцы - лопатки размером 80x5x4 и бруски - 80x10x4 мм [8] при следующих характеристиках процесса:

- давление литья 90 МПа;

- скорость впрыска - 12 см<sup>3</sup>/с;
- время выдержки под давлением 32 с;
- время охлаждения 128 с.

Для сокращения количества опытов и повышения надежности результатов в работе использовался метод математического планирования эксперимента, в частности, двухфакторный ортогональный план [9, 10, 11]. Параметры варьирования приведены в таблице 1.

Интервалы варьирования исследуемых параметров определяются технологическими свойствами материала и были выбраны с учетом общих рекомендаций [5].

Для полученных образцов определялись показатели, приведенные в таблице 2.

При математической обработке результатов эксперимента получены уравнения регрессии, представленные в таблице 3.

Анализ полученных уравнений показывает, что теплостойкость по Вика (уравнение 8) не зависит от  $T_{\phi}$  и  $T_p$  в принятом диапазоне их изменения, а уравнения 5, 7 и 11 являются не адекватными экспериментальным данным, т.к. для них  $F_p > F_T$ . Вероятно, эти зависимости описываются математическими уравнениями более высокого порядка.

Температура расплава оказывает влияние практически на все определяемые показатели. Зависимость прочности при изгибе (уравнение 2) и твердости (уравнение 9) имеет линейный характер, причем с увеличением температуры эти показатели снижаются. Остальные зависимости носят экстремальный характер, при этом все проходят через максимум, кроме усадки, которая характеризуется наличием минимума.

Такое влияние температуры расплава на определяемые свойства связано скорее всего с уменьшением вязкости при увеличении температуры и, как следствие, с уменьшением напряжений сдвига при заполнении формы, а также с увеличением скорости релаксационных процессов при охлаждении. Это приводит к снижению внутренних напряжений в полимере, образованию более однородной надмолекулярной структуры и, как следствие, к увеличению прочности изделий [7, 11, 12].

В связи с тем, что исследуемый материал получен на основе вторичного поликапроамида, который имеет более низкую термостойкость, то при температурах выше 260°C в нем начинают протекать деструктивные процессы, приводящие к уменьшению молекулярной массы полимера и, соответственно, к снижению прочностных показателей.

Влияние температура формы на деформационно-прочностные показатели также не однозначное, так прочность и модуль упругости при изгибе (уравнения 2 и 3) и твердость с ростом температуры линейно снижаются, а остальные зависимости имеют экстремальный характер проходя через максимум, кроме ударной вязкости, которая имеет минимум (уравнение 1).

Поликапроамид является кристаллизующимся полимером, поэтому свойства получаемых изделий во многом определяются надмолекулярной структурой полимера, которая в свою очередь зависит от скорости охлаждения [3, 4, 12, 13]. При низкой температуре формы скорость охлаждения имеет максимальные значения, поэтому полимер имеет аморфную или мелкокристаллическую структуру. С ростом температуры степень кристалличности и размеры кристаллов возрастают и увеличиваются прочностные характеристики. Кроме этого, при заполнении формы наблюдается ориентация макромолекул, которая частично сохраняется в надмолекулярных образованиях, увеличивая прочностные показатели в направлении течения. Однако при медленном охлаждении (в нашем случае  $T_{\phi}=100^{\circ}\text{C}$ ) анизотропия свойств снижается и прочностные показатели в направлении течения снижаются.

Анализ полученных уравнений позволил определить оптимальный температурный режим литья под

Таблица 4. Физико-механические и теплофизические свойства изделий  
 Table 4. Physical, mechanical and thermophysical properties of products

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Значение показателя
1.	Ударная вязкость, $a_{y\phi}$	кДж/м <sup>2</sup>	5,9
2.	Разрушающее напряжение при изгибе, $\sigma_{изг}$	МПа	105
3.	Модуль упругости при изгибе, $E_{изг}$	МПа	923
4.	Прогиб при изгибе, $\Delta l_{изг}$	мм	0,74
5.	Прочность при разрыве, $\sigma_p$	МПа	55,2
6.	Модуль упругости при растяжении, $E_p$	МПа	1704,7
7.	Относительное удлинение при разрыве, $\epsilon_p$	%	1,68
8.	Теплостойкость по Вика, $T_v$	°C	184,6
9.	Твердость, НВ	МПа	149
10.	Плотность, $\rho$	г/см <sup>3</sup>	1,51
11.	Усадка, $U$	%	1,17

давлением исследуемого композиционного материала на основе ВПКА и золы:

температура расплава -  $255 \pm 5^\circ\text{C}$ ;

температура формы -  $70^\circ\text{C}$ .

Деформационно - прочностные свойства изделий, которые получены при реализации оптимальных температурных параметров, приведены в таблице 4.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- исследуемая композиция, состоящая из 56% ВПКА и 44% наполнителя, в качестве которого использовалась зола уноса теплоэлектростанций, может перерабатываться в изделия литьем под давлением на серийно выпускаемом оборудовании;

- эксплуатационные свойства получаемых изделий во многом определяются температурными параметрами процесса литья под давлением, оптимальными значениями которого для данной композиции являются следующие: температура расплава  $T_p = 255 \pm 5^\circ\text{C}$ , температура формы  $T_\phi = 70^\circ\text{C}$ .

- получаемые при данном режиме изделия имеют свойства, соответствующие изделиям инженерно-технического назначения, т.к.  $T_v \geq 150^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_p \geq 35 \text{ МПа}$ ,  $E_p \geq 900 \text{ МПа}$ ,  $\text{НВ} \geq 60 \text{ МПа}$  [14, 15].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Plastics Recycling / Ed.: Francesco La Mantia Rapra Technology, Shrewsbury UK, 2002. p. 441
2. Третьяков В.Н. Разработка композиционных материалов на основе полимерных отходов предприятий углеобогащения Кузбасса / Третьяков В.Н., Евменов С.Д. // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции. Казань. 2021. С. 1034-1038.
3. Третьяков В.Н. Разработка технологии переработки полимерных отходов предприятий углеобогащения Кузбасса / Третьяков В.Н., Евменов С.Д. // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: материалы V Всероссийской конференции. Кемерово. 2020. С. 68.1-68.4.
4. Hirte R., Schulz E., Weigel P. Uber die Feinstruktur der Polyamide. XII. Erscheinungen des Strukturgedachtnisses bei Polycaproamid // Faserforsch. und Textiltechn. - 1975. - V. 26. - № 6. - P. 265-270.
5. Бортников В. Г. Теоретические основы и технология переработки пластических масс [Текст]: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 18.03.01 "Химическая технология" / В. Г. Бортников. - 3-е изд. - М.: Инфра-М, 2015. - 478 с.
6. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. М.: Химия, 1974. - 270 с.
7. Шварц, Отто. Переработка пластмасс : [практ. руководство] / О. Шварц, Ф.-В. Эбелинг, Б. Фурт; пер. с нем. Н. Савченкова; под ред. А. Д. Паниматченко. [9-е изд.]. СПб. : Профессия, 2008. 320 с.
8. Шерышев, М.А. Технология переработки полимеров: конструирование изделий из пластмасс : учебное пособие для вузов : [для студентов дневной и вечерней форм обучения по специальности "Технология переработки пластмасс и эластомеров" и для магистров, обучающихся по программе "Химическая технология переработки пластмасс и композиционных материалов"] / М. А. Шерышев. 2-е изд. Москва : Юрайт, 2018. 119 с.
9. Адлер, Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П.Адлер. – М. : Металлургия, 2018. – 160 с.
10. Бондарь, А.Г. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / А.Г.Бондарь, Г.А. Статюха, И.А. Потяженко. – Киев: Вища школа, 1980. – 264 с.
11. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / В.З. Бродский. – Москва : МИР, 2019. – 224 с.
12. Brunner J., Kunststoffe-Plastics, 1975, № 9, s. 37
13. Шах, Вишу. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения / пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. СПб. : Научные основы и технологии, 2009. 732 с.
14. Калиничев, Э.Л. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий [Текст]: Справ. изд./ Калиничев, Э.Л., Саковцева, М.Б. - Л.: Химия, 1987. - 416 с.
15. Крыжановский, В.К. Инженерный выбор и идентификация пластмасс / В. К. Крыжановский. Санкт-Петербург : Научные основы и технологии, 2009. 204 с.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-21-26

UDS 678.5.073.002.68

## PROCESSING OF A POLYMER COMPOSITION BASED ON SECONDARY POL-YCAPROAMIDE BY INSURANCE CASTING

**Vladimir N. Tretyakov,**

candidate tech. sciences, associate professor, e-mail: tretyakovvn@kuzstu.ru

**Sergei D. Evmenov,**

candidate tech. sciences, professor, e-mail: esd.tpp@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennaya St, Kemerovo, 650000, Russian Federation



### Article info

Received:

27 October 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

05 December 2021

**Keywords:** secondary polycaproyamide, composite material, filler, fly ash from thermal power plants, injection molding, technological parameters, deformation and strength properties, optimal processing temperature.

### Abstract.

*The operational properties of molded plastic products are largely determined by the technological parameters of the injection molding process, which in turn depend on the properties of the material being processed. Therefore, for each material, the optimal processing mode is selected, which ensures the production of products with the best operational characteristics.*

*Research methods: standard methods for studying the strength and deformation characteristics of polymers: impact strength, breaking stress in bending, modulus of elasticity in bending, deflection in bending, strength at break, modulus of elasticity in tension, elongation at break, heat resistance according to Vicat, hardness, density and shrinkage; planning an experiment. The article shows that - the investigated composition, consisting of 56% VPCA and 44% filler, which was used as fly ash from thermal power plants, can be processed into products by injection molding on commercially available equipment; the operational properties of the resulting products are largely determined by the temperature parameters of the injection molding process, the optimal values of which for this composition are as follows: melt temperature  $T_r = 255 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , mold temperature  $T_f = 70^{\circ}\text{C}$ ; the products obtained under this mode have properties corresponding to products for engineering and technical purposes.*

---

**For citation** Tretyakov V.N., Evmenov S.D. Processing of a polymer composition based on secondary polycaproyamide by insurance casting. Bulletin of the Kuzbass State Technical University, 2021, no.6 (148), pp. 21-26. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-6-21-26

---

## REFERENCES

1. Handbook of Plastics Recycling / Ed.: Francesco La Mantia Rapra Technology, Shrewsbury UK, 2002. p. 441.
2. Tretyakov V.N. Development of composite materials based on polymer wastes from coal preparation enterprises in Kuzbass / Tretyakov V.N., Evmenov S.D. // Innovative technologies for environmental protection in the modern world: materials of the All-Russian scientific conference. Kazan. 2021.S. 1034-1038.
3. Tretyakov V.N. Development of a technology for processing polymer waste from coal preparation enterprises in Kuzbass / Tretyakov V.N., Evmenov S.D. // Chemistry and chemical technology: achievements and prospects: materials of the V All-Russian conference. Kemerovo. 2020.S. 68.1-68.4.
4. Hirte R., Schulz E., Weigel P. Uber die Feinstruktur der Polyamide. XII. Erscheinungen des Strukturgedachtnisses bei Polycaproyamid // Faserforsch. und Textiltechn. - 1975. - V. 26. - № 6. - P. 265-270.
5. Bortnikov VG Theoretical foundations and technology for processing plastic masses [Text]: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction 18.03.01 "Chemical technology" / VG Bortnikov. - 3rd ed. - M.: In-fra-M, 2015. -- 478 p.

6. Lapshin V.V. Fundamentals of thermoplastic injection molding. Moscow: Chemistry, 1974. -- 270 p.
7. Schwartz, Otto. Plastics processing: [practical. manual] / O. Schwartz, F.-V. Ebeling, B. Furth; per. with him. N. Savchenkova; ed. A. D. Panimatchenko. [9th ed.]. SPb. : Profession, 2008.320 p.
8. Sheryshev, M.A. Polymer processing technology: design of plastic products: textbook for universities: [for full-time and evening students in the specialty "Technology of processing of plastics and elastomers" and for masters studying in the program "Chemical technology for processing plastics and composite materials"] / M. A. Sheryshev. 2nd ed. Moscow: Yurayt, 2018.119 p.
9. Adler, Yu.P. Introduction to experiment planning / Yu.P. Adler. - M.: Metallurgy, 2018. -- 160 p.
10. Bondar, A.G. Planning an experiment in the search for optimal conditions / A.G. Bondar, G.A. Statyukha, I.A. Potyazhenko. - Kiev: Vishcha school, 1980. -- 264 p.
11. Brodsky V.Z. Introduction to factorial planning of experiment / V.Z. Brodsky. - Moscow: MIR, 2019. -- 224 p.
12. Brunner J., Kunststoffe-Plastics, 1975, № 9, s. 37.
13. Shah, Vishu. A reference guide for testing plastics and analyzing the causes of their destruction / lane. from English ed. A. Ya.Malkina. SPb. : Scientific bases and technologies, 2009.732 p.
14. Kalinichev, E.L. The choice of plastics for the manufacture and operation of products [Text]: Ref. ed. / Kalinichev, E.L., Sakovtseva, M.B. - L. : Chemistry, 1987. -- 416 p.
15. Kryzhanovsky, V.K. Engineering choice and identification of plastics / V.K.Kryzhanovsky. St. Petersburg: Scientific bases and technologies, 2009.204 p.

### **Conflicts of Interest**

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).