

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. ТАЛАПОВ, В. Г. МЕЛЬНИКОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: talapov_v_v@mail.ru*

Приведены основные технологии, использующиеся при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов. Определена задача получения требуемого распределения наполнителя с использованием центробежного литья. Выявлены особенности применения технологии центробежного литья, а также предложены рекомендации по снижению габаритов и энергопотребления приводов. Определены необходимые материалы и компоненты экспериментальной установки центробежного литья для апробации эффективности предложенных рекомендаций. Проведен сравнительный анализ физико-механических характеристик образцов из полимерных композитов, изготовленных по технологиям гравитационного и центробежного литья. По результатам сравнительного анализа установлено, что использование тихоходных приводов позволяет добиваться устранения пористости и смещения наполнителя в материале, приводящих к повышению механических характеристик изделий. Определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: *полимерный композиционный материал, центробежное литье, гравитационное литье, силиконовая форма, механические свойства материалов*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) применяются во многих областях промышленности. Сочетание высокой коррозионной стойкости и малой массы при хороших прочности и износостойкости, сопоставимых с таковыми показателями традиционных материалов (сталь, алюминий), обусловило широкое распространение ПКМ в авиастроении [1], автомобилестроении [1, 2], машиностроении [1], в медицине и др. Решение некоторых задач стало возможно только с применением ПКМ, например, при создании протезов нижних конечностей необходимо обеспечить высокую легкость, гибкость и прочность, что не позволяют достичь традиционные материалы. В производстве изделий из ПКМ используются различные технологии: 3D-печать, RRIM (Reinforced Reaction Injection Molding), центробежное литье, литье под давлением, контактное формование (распыление и выкладка), автоклавное формование, прессование и др.

Одной из актуальных задач при производстве изделий из ПКМ является получение заданного распределения структуры наполнителя в материале, в частности, для обеспечения желаемых механических характеристик изделия. Для предварительной оценки распределения волокон в материале применяется система инженерного анализа [3].

Наиболее часто для достижения желаемого распределения наполнителя в материале применяются специальные материалы-полуфабрикаты (препреги), однако их производство экологически небезопасно, и стоимость такого материала довольно высока. Перспективными технологиями получения желаемого распределения наполнителя являются ротационная 3D-печать и центробежное литье. Эти технологии имеют свои ограничения. Полученные при ротационной 3D-печати [4] изделия имеют низкие прочностные показатели ввиду применения ПКМ-термопластов в качестве материала матрицы. Центробежное литье позволяет использовать

более широкий спектр материалов в качестве матрицы (как реактопласты, так и термопласты), но данная технология пока применяется только при изготовлении функционально градиентных материалов на высокоскоростных устройствах [5].

Основная цель и подготовительный этап исследования. Цель настоящей работы — экспериментальная оценка эффективности применения низкоскоростного центробежного литья для формования изделий из ПКМ. При центробежном литье обычно используются больших габаритов приводы с высокой скоростью вращения формы [6, 7] (от 1500 об/мин) и высоким энергопотреблением. В настоящей работе исследуются особенности применения малогабаритного тихоходного привода для центробежного литья со скоростью вращения в 300 об/мин.

В качестве материала матрицы использовался литьевой полиуретановый пластик Lasil-Cast 3, предназначенный для создания прототипов, моделей и сувениров (табл. 1).

Таблица 1

Наименование	Значение
Вязкость смеси, мПа·с	50
Рабочее время смеси* при $t=22-24$ °С, мин	2
Время отверждения смеси при $t=22-24$ °С, мин	20
Плотность, кг/м ³	1080
Твердость по Shore D	70
Усадка, % (для изделий 500×50×25)	0,1—0,25

* Рабочее время смеси — промежуток времени, после которого начинается процесс полимеризации материала.

В качестве наполнителя выбрано стекловолокно Filler F60, используемое в 90 % изделий из ПКМ в мире [8].

При изготовлении оформляющей полости применялся силикон марки MoldMax 14NV, требующий минимума оборудования (табл. 2) и не требующий вакуумной дегазации [9, 10].

Таблица 2

Наименование	Значение
Рабочее время смеси при $t=22-24$ °С, мин	40
Отверждение смеси при $t=22-24$ °С, мин	240
Плотность, кг/м ³	1120
Вязкость смеси, мПа·с	7500

Ввиду особенностей технологии создания силиконовых форм предварительно изготовлены шесть мастер-моделей и опалубка для последующей заливки в нее силикона. При помощи средств 3D-моделирования оценены размеры опалубки и расположение моделей в ней (рис. 1, а), изготовленные силиконовые формы представлены на рис. 1, б.

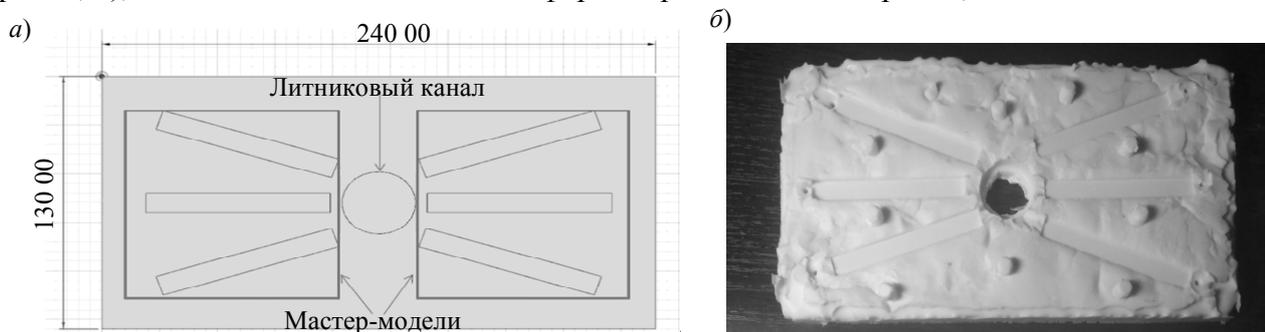


Рис. 1

Для реализации процесса центробежного литья спроектирована и собрана экспериментальная установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 2. В состав установки входят: шаговый двигатель SY85STH80-5504A; драйвер шагового двигателя Leadshine DM860; блок питания NES-350-24 и контроллер Arduino Leonardo.

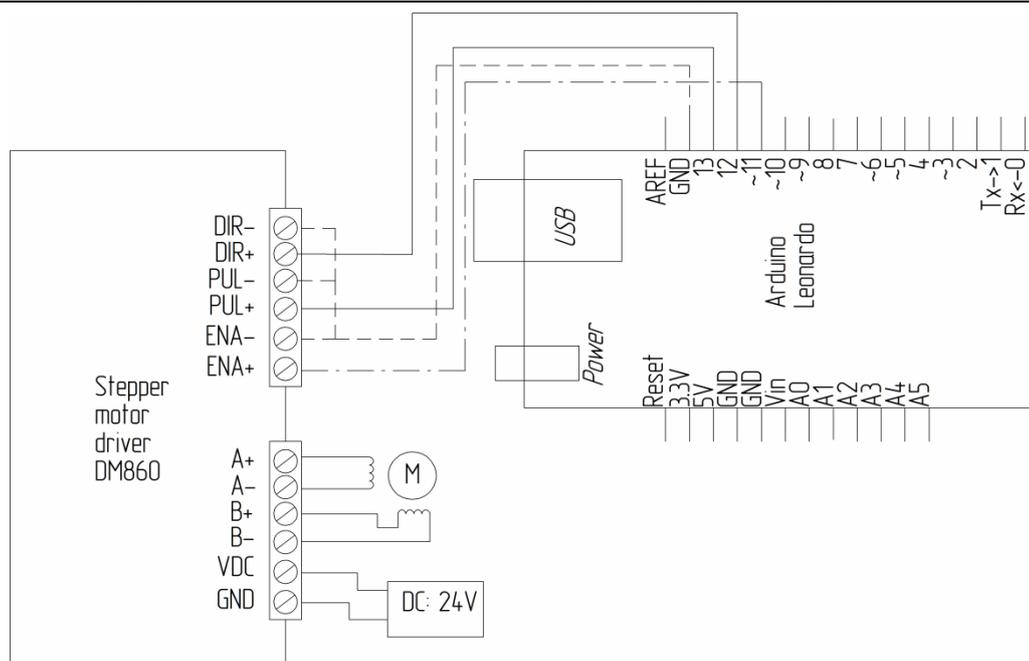


Рис. 2

С помощью 3D-модели предварительно оценено соотношение требуемых компонентов смеси по весу: LasilCast 3 — 30 г, наполнителя (доля 30 %) 10 г.

По окончании подготовительных этапов произведена заливка материала LasilCast 3 с наполнителем Filler F60 в силиконовую форму через центральный литниковый канал (см. рис. 1, а).

Анализ полученных результатов. Было изготовлено четыре партии образцов с помощью различной технологии (гравитационное и центробежное литье); с наполнителем и без него. Центробежное литье проводилось при низкой скорости вращения (300 об/мин), весь объем смеси с наполнителем заливался в форму и только после этого начиналось вращение.

В соответствии с требованиями ГОСТ после отливки образцы подвергались дополнительной механической обработке для получения необходимых размеров: длина $l = 80 \pm 2$ мм; ширина $b = 10 \pm 0,2$ мм; толщина $h = 4 \pm 0,2$ мм.

Для оценки физико-механических свойств ПКМ были проведены испытания по ГОСТ 4648-2014*: выполнялись испытания на статический изгиб (ISO 178:2010 — Plastics — Determination of flexural properties). Использовалась универсальная испытательная машина RTMIT „Orientec“ (Япония) при температуре помещения 23 °С и влажности 55 %, скорость составляла 1 мм/мин (табл. 3).

В случае без применения наполнителя (партии III и IV) центробежное литье обеспечило более высокие показатели прочности и упругости при изгибе, по сравнению с гравитационным литьем, что отражает эффективность применения низкоскоростного центробежного литья для данного материала. В процессе низкоскоростного центробежного формования снижается пористость материала.

Сравнительный анализ образцов партий II и III, полученных центробежным литьем, с наполнителем и без него, а также из партий I и II, полученных гравитационным и центробежным литьем с применением наполнителя, показал, что гравитационное литье матрицы с наполнителем обеспечивает лучшие плоскостные показатели, чем низкоскоростное центробежное литье. Следует отметить, что выбранные материалы матрицы и наполнителя существенно различаются по плотности (плотность стекловолокна 700 кг/м^3 , материала матрицы — 1080 кг/м^3) и применение низкоскоростного центробежного литья приводит к движению

* ГОСТ 4648–2014 Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб; Введен: 01.03.2015. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

наполнителя, его управляемому перераспределению в матрице под воздействием центробежных сил.

Таблица 3

Номер партии материала	Технология изготовления	Степень армирования, %	Прочность при изгибе (изгибающее напряжение), МПа		Модуль упругости при изгибе, МПа	
			Значения для образцов	Среднее значение	Значения для образцов	Среднее значение
I	Гравитационное литье	30	42	39,2	1963	1851
			42,6		2021	
			42,2		1716	
			33,7		1764	
			35,5		1791	
II	Центробежное литье	30	37,6	41	769	851
			46,9		963	
			44,4		910	
			38,2		799	
			37,8		814	
III	Центробежное литье	0	44,3	46,3	1968	2145
			48,2		2315	
			43,6		2107	
			43,9		1931	
			51,3		2406	
IV	Гравитационное литье	0	36,3	39,6	847	873
			39,7		831	
			41,1		971	
			41,4		924	
			39,5		795	

Использование наполнителя уменьшает объемную долю полимерной матрицы и, таким образом, ускоряет процесс полимеризации [12]. При смещении наполнителя и быстрой полимеризации в материале остаются незаполненные пористые участки, что приводит к ухудшению механических характеристик.

Анализ показывает, что образцы с наполнителем, выполненные гравитационным литьем (партия IV), уступают по физико-механическим свойствам образцам, полученным центробежным литьем без наполнителя, что подтверждает целесообразность применения низкоскоростного центробежного литья для пластиков.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения низкоскоростного центробежного литья для производства пластиков, важной составляющей изготовления изделий из ПКМ является не только выбор наполнителя и его концентрации, но и правильный выбор режима литья.

Заключение. В ходе исследования выполнен подбор материалов матрицы и наполнителя для создания образцов из ПКМ; установлены необходимые размеры образцов; изготовлены формы и оснастки; проведены конструирование и сборка установки для центробежного литья; изготовлены образцы из ПКМ по технологиям гравитационного и центробежного литья; проведены сравнительные испытания образцов из ПКМ и получены их физико-механические характеристики. В результате исследования выявлено, что использование низкоскоростного центробежного литья обеспечивает общее уплотнение материала изделия по сравнению с гравитационным литьем, а также позволяет управлять распределением наполнителя.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-01-00672.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. González C., Vilatela J. J., Molina-Aldareguía J. M., Lopes C. S., Lorca J. L. Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends // *Prog. Mater. Sci.* 2017. Vol. 89. P. 194—251. DOI:10.1016/j.pmatsci.2017.04.005.
2. Cheon S. S., Choi J. H. and Lee D. G. Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars // *Composite Structures*. 1995. Vol. 32, N 1—4. P. 491—499. DOI: 10.1016/0263-8223(95)00078-X.
3. Восоркин А. С. Применение систем моделирования при проектировании изделий из полимерных композиционных материалов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57, № 8. С. 30—33.
4. Raney J. R., Compton B. G., Mueller J., Ober Th. J., Shea K., and Lewis J. A. Rotational 3D printing of damage-tolerant composites with programmable mechanics // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115, N 6. P. 1198—1203. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1715157115>.
5. Hashmi S. R. A., Dwivedi U. K. Estimation of concentration of particles in polymerizing fluid during centrifugal casting of functionally graded polymer composites // *J. of Polymer Research*. 2007. Vol. 14, N 1. P. 75—81.
6. Ning K., Lu K. Fundamental understanding of centrifugal micromolding for high fidelity patterns // *J. of the European Ceramic Society*. 2018. Vol. 38, Is. 15. P. 5167—5173. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.027.
7. Mitchell P. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Plastic Part Manufacturing*. USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996. 706 p.
8. Effing M. Expert insights in Europe's booming composites market // *Reinforced Plastics*. 2018. Vol. 62, Is. 4. P. 219—223. DOI:10.1016/j.repl.2017.06.086.
9. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Васильков С. Д., Восоркин А. С., Кушнарченко А. А. Принципы проектирования литьевых форм для производства пилотных серий деталей оптических приборов из термопластичных полимерных материалов // *Матер. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“*. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 409—417.
10. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Грибовский А. А. Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2014. Т. 57, № 5. С. 72—76.
11. Дмитриев О. С., Кириллов В. Н., Зуев А. В., Черепихина А. А. Влияние типа наполнителя на оптимальные режимы отверждения толстостенных ПКМ // *Клеи, герметики, технологии*. 2011. № 11. С. 27—36.

Сведения об авторах

Владислав Валерьевич Талапов — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: tinker999@mail.ru

Виталий Геннадьевич Мельников — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: vgmelnikov@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию
28.01.19 г.

Ссылка для цитирования: Талапов В. В., Мельников В. Г. Целесообразность использования малых скоростей вращения при центробежном литье полимерных композиционных материалов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62, № 6. С. 561—566.

**FEASIBILITY OF USING A LOW-SPEED ROTATION
FOR CENTRIFUGAL CASTING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS**

V. V. Talapov, V. G. Melnikov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: talapov_v_v@mail.ru

An overview of existing casting technologies used in the manufacture of products from polymer composite materials is presented. The task of obtaining the required distribution of the filler and the method of achieving it using centrifugal casting is defined. Features of application of technology of centrifugal molding are revealed, and recommendations on reduction of dimensions and energy consumption

of drives are formulated. The necessary materials and components of the experimental centrifugal casting plant for testing the effectiveness of the proposed recommendations are specified. Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of samples from polymer composites made by gravity and centrifugal casting technologies is carried out. According to the results of the analysis, the use of low-speed drives allows to eliminate porosity and displacement of the filler in the material, and therefore leads to an increase in the mechanical characteristics of the products. The directions of further research are determined.

Keywords: polymer composite materials, centrifugal casting, gravity casting, silicon mold, mechanical properties of materials

REFERENCES

1. González C., Vilatela J.J., Molina-Aldareguía J.M., Lopes C.S., Lorca J.L. *Progress in Materials Science*, 2017, vol. 89, pp. 194–251. DOI:10.1016/j.pmatsci.2017.04.005.
2. Cheon S.S., Choi J.H. and Lee D.G. *Composite Structures*, 1995, no. 1-4(32), pp. 491–499. DOI: 10.1016/0263-8223(95)00078-X.
3. Vosorkin A.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 8(57), pp. 30–33. (in Russ.)
4. Raney J.R., Compton B.G., Mueller J., Ober Th.J., Shea K., and Lewis J.A. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, no. 6(115), pp. 1198–1203. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1715157115>.
5. Hashmi S.R.A., Dwivedi U.K. *Journal of Polymer Research*, 2007, no. 1(14), pp. 75–81.
6. Kaijie Ning, Kathy Lu. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, no. 15(38), pp. 5167–5173. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.07.027.
7. Mitchell P. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Plastic Part Manufacturing*, USA, Society of Manufacturing Engineers, 1996, 706 pp.
8. Effing M. *Reinforced Plastics*, 2018, no. 4(62), pp. 219–223. DOI:10.1016/j.repl.2017.06.086.
9. Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Vasil'kov S.D., Vosorkin A.S., Kushnarenko A.A. *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* (Modern Engineering. Science and Education), Proceedings of the 3rd International Scientific-Practical Conference, St. Petersburg, 2013, pp. 409–417.
10. Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Gribovskiy A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2014, no. 5(57), pp. 72–76. (in Russ.)
11. Dmitriyev O.S., Kirillov V.N., Zuyev A.V., Cherepakhina A.A. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2011, no. 11, pp. 27–36. (in Russ.)

Data on authors

- Vladislav V. Talapov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: tinker999@mail.ru
- Vitaly G. Melnikov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: vgmelnikov@corp.ifmo.ru

For citation: Talapov V. V., Melnikov V. G. Feasibility of using a low-speed rotation for centrifugal casting of polymer composite materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 6. P. 561–566 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-561-566