

УДК 004.942

Д. А. Кандыба, А. Г. Любимов, А. Ф. Петрушеня, О. М. Касперович, Л. А. Ленартович
Белорусский государственный технологический университет

СИСТЕМА MOLDEX3D ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРЕСС-ФОРМ

На предприятиях, занятых производством сложной литьевой оснастки, существует интерес и потребность в прогнозировании поведения конечного продукта. При вводе в эксплуатацию дорабатывается практически 100% пресс-форм. В современных реалиях представлено большое количество САД-систем для анализа литья под давлением с различными надстройками, функциями и методами расчета. В статье выполнен обзор современной САД/САЕ-системы для анализа литья под давлением пластмасс, позволяющей снизить конечную себестоимость продукта, сократить сроки изготовления оснастки и сроки подготовки производства. На примере оснастки для детали массового производства рассмотрены возможности системы, выделены методы построения сеток, показаны особенности проведения моделирования процесса заполнения. Программное обеспечение для инженерных расчетов с использованием численных методов (системы САЕ) литья под давлением термопластичных материалов и специальных технологий литья предоставляет широкие возможности прогнозирования и предотвращения проблем производства и снижения затрат не только с точки зрения производства оснастки, но и с точки зрения технологического процесса. С помощью анализа можно выделить характеристики температур, время заполнения, кривую выдержки под давлением, время охлаждения и расход теплоносителя для получения качественных деталей с первых отливок. Для эффективного применения этого программного обеспечения необходимо учитывать комплекс факторов, влияющих как на получаемые количественные результаты расчета, так и на их качественную оценку применительно к особенностям конкретной задачи. Результаты, полученные в ходе компьютерного анализа, напрямую зависят от учета особенностей методов моделирования процесса, условий выполнения расчетов и функциональных возможностей программного продукта.

Ключевые слова: литье под давлением пластмасс, Moldex3D, пресс-форма, анализ заполняемости, САЕ-системы, BLM-сетка, метод разбиения геометрии, моделирование течения расплава.

Для цитирования: Кандыба Д. А., Любимов А. Г., Петрушеня А. Ф., Касперович О. М., Ленартович Л. А. Система Moldex3D для проведения анализа литья под давлением при проектировании пресс-форм // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 115–121.

DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-14.

D. A. Kandyba, A. G. Liubimau, A. F. Petrushenya, O. M. Kasperovich, L. A. Lenartovich
Belarusian State Technological University

MOLDEX3D SYSTEM FOR INJECTION MOLDING ANALYSIS IN MOLD DESIGN

In enterprises engaged in the production of complex injection molding equipment, there is an interest and need in predicting the behavior of the final product. During commissioning, almost 100% of the molds are modified. In modern realities, a large number of injection moldings with various add-ons, functions and calculation methods are presented for analysis. The article provides an overview of a modern CAD/CAE system for the analysis of injection molding of plastics, which allows reducing the final cost of the product, reducing the production time of equipment and pre-production time. Using the example of equipment for a mass-produced part, the capabilities of the system are considered, methods for constructing meshes are high-lighted, and the features of modeling the filling process are shown. Software for engineering calculations using numerical methods (CAE systems) for injection molding of thermoplastic materials and special casting technologies provides extensive opportunities to predict and prevent production problems and reduce costs, not only from the point of view of tooling production, but also from the point of view technological process. With the help of analysis, it is possible to highlight temperature characteristics, filling time, pressure holding curve, cooling time and coolant flow to obtain quality parts from the first castings. To effectively use this software, it is necessary to take into account a set of factors that influence both the obtained quantitative calculation results and their qualitative assessment in relation to the characteristics of a specific task. The results obtained during computer analysis directly depend on the consideration of the features of the process modeling methods, the conditions for performing calculations and the functional capabilities of the software product.

Keywords: plastic injection molding, Moldex3D, mold, filling analysis, CAE systems, BLM mesh, geometry partitioning method, melt flow modeling.

For citation: Kandyba D. A., Liubimau A. G., Petrushenya A. F., Kasperovich O. M., Lenartovich L. A. Moldex3D system for injection molding analysis in mold design. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2 (283), pp. 115–121 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2024-283-14.

Введение. Важнейшими задачами, которые стоят перед производителями пресс-форм, являются сокращение сроков изготовления, повышение эффективности, снижение затрат и оптимизация проектирования оснастки. При вводе в эксплуатацию в среднем 49 из 50 литьевых форм дорабатываются по результатам испытания [1].

Литье под давлением – это технологический процесс, в ходе которого исходный материал впрыскивается в специальную пресс-форму, после чего линейно застывает, т. е. возле холодных стенок формы застывание происходит быстрее, чем в центре.

Литье под давлением применяют преимущественно для изготовления изделий из термопластов, осуществляют под давлением 80–140 МПа на литьевых машинах поршневого или винтового типа, имеющих высокую степень механизации и автоматизации.

Основное влияние на качество изготавливаемого изолятора оказывает правильность проектирования пресс-формы.

Пресс-форма представляет собой вид технологической оснастки, позволяющей получить готовые детали путем прессования материала во время полимеризации. Это может быть открытое прессование, вакуумформование, раздув или литье под давлением пластмасс или металлов. С точки зрения качества самыми стабильными можно назвать пресс-формы для литья под давлением, позволяющие получать детали самых сложных

форм, с высокой производительностью, но при этом с минимальными потерями материала [2].

Основная часть. Двадцать лет назад технологи по литью и конструкторы форм стояли перед той же проблемой, что и сегодня: где расположить точки впуска, в каком количестве, где могут оказаться линии спая и воздушные включения.

Moldex3D обладает большими возможностями для быстрого и точного анализа заполняемости проектируемых деталей. В состав программы входит расчет параметров заполняемости, выдержки под давлением и охлаждения.

Для начала процесса заполняемости необходимо имитировать трехмерную модель детали, а также задать ряд исходных параметров и определить граничные условия моделирования. Поскольку Moldex3D позволяет работать с самыми различными форматами трехмерной геометрии, то для выполнения расчетов можно совершенно спокойно использовать геометрию, импортированную из любых CAD-систем.

Процесс литья происходит с помощью метода конечных элементов – основного математического инструмента практически всех систем инженерных расчетов [3]. Поэтому первой задачей, встающей перед инженером, является создание сетки конечных элементов из исходной модели детали (рис. 1). Для этого существует два метода разбиения геометрии: поверхностный и объемный. Каждый метод имеет те или иные возможности и предназначен для определенных целей.

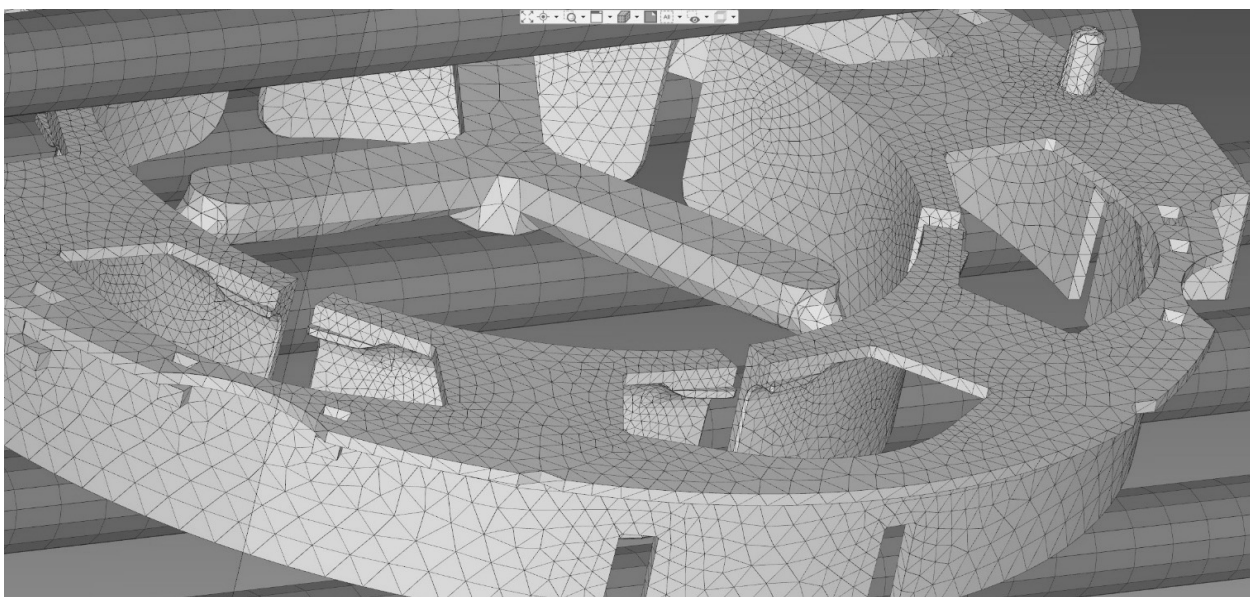


Рис. 1. Сетка конечных элементов, построенная из исходной CAD-модели

Поверхностный метод использует наружные и внутренние грани детали для построения расчетной сетки. Преимущества поверхностного метода разбиения очевидны: упрощается структура сетки и сокращается время анализа пресс-формы. Недостатком же является меньшая точность расчета по сравнению с объемным методом. Поэтому область применения поверхностного метода – это тонкостенные детали, в которых нет резких изменений в толщинах стенок. Также поверхностный метод часто используется при детальном анализе геометрии детали, когда необходимо предварительно оценить возможность изготовления методом литья под давлением [4].

Для деталей более сложной формы, а также для выполнения финальных расчетов предназначен метод разбиения геометрии детали, использующий весь объем твердого тела при построении сетки конечных элементов. При необходимой производительности компьютера процесс заполнения пресс-формы на основе этого метода дает максимально точные результаты.

В качестве единиц разбиения геометрии детали в этом методе служат тетраэдры или гексаэдры. Из-за большого числа элементов время самого моделирования может быть очень и очень существенным. Несмотря на то, что моделирование процесса заливки пресс-формы данным методом дает хорошие результаты, в Moldex3D существует третий, гибридный метод разбиения геометрии, включающий в себя преимущества обоих стандартных [5].

Другим направлением оптимизации сеток является учет физических особенностей моделируемого процесса. Применение так называемых BLM-сеток (Boundary Layer Mesh) [3] позволяет при существенно меньшем количестве элементов модели точнее учесть процессы, происходящие при

неизотермическом течении полимерных расплавов вблизи стенок литниковых каналов и оформляющей полости: формирование застывшего пристенного слоя, диссипативное тепловыделение в расплаве в процессе его течения (рис. 2).

Так же в комплексе есть Moldex3D CADdoctor. Это интерактивный инструмент восстановления геометрии, который обеспечивает обмен данными между несколькими CAD, упрощение и проверку геометрии, проверку качества CAE и т. д. CADdoctor помогает улучшить качество сетки и получить более точные результаты анализа [6].

После того как была построена расчетная сетка, для выполнения расчетов необходимо также задать тип используемого материала и станка. В Moldex3D уже входит обширная база данных полимеров от различных производителей с самыми разными характеристиками. Если по какой-то причине проектировщик не сможет найти нужного материала, то он в любой момент без особых проблем может его добавить в базу данных. И, наконец, прежде чем выполнить расчет, необходимо определить граничные условия моделирования и указать места, где будет производиться впрыск расплавленного полимера [7].

После того как заданы параметры и граничные условия, можно запустить процесс моделирования заполнения пресс-формы расплавленным полимером. Moldex3D позволяет выполнять два вида расчетов: расчет параметров проливаемости материала (рис. 3) и моделирование процесса выдержки пресс-формы под давлением. Расчеты можно запускать как по очереди (для экономии времени и для предварительных анализов), так и одновременно, для получения сразу всех результатов [8]. Время моделирования зависит от мощности компьютера, точности требуемых результатов и размеров детали.

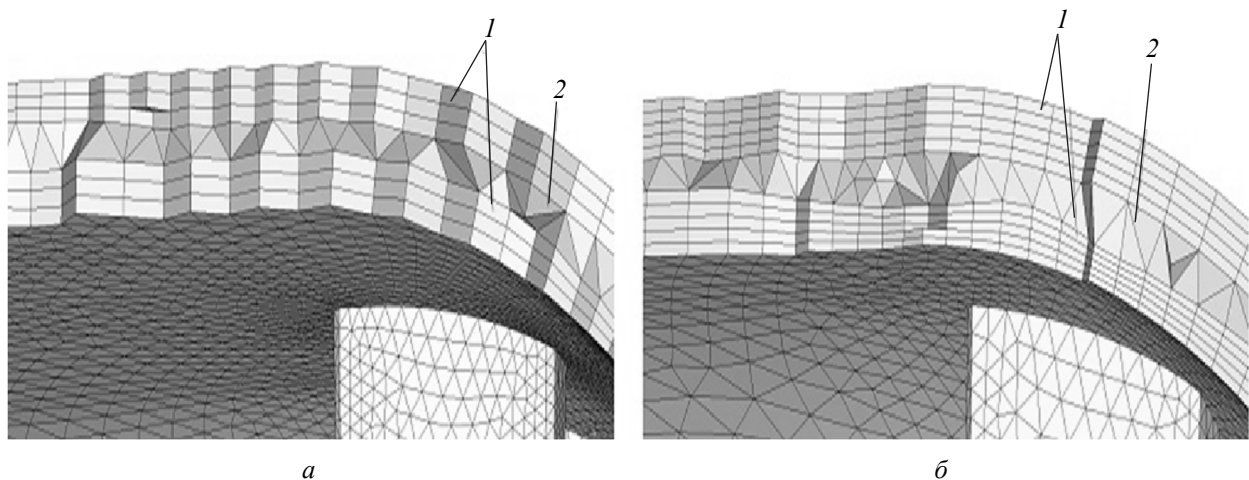


Рис. 2. Варианты BLM-сетки с тремя (а) и пятью (б) слоями призматических элементов 1 вблизи стенки формы и тетраэдрических элементов 2 в центральных слоях оформляющей полости

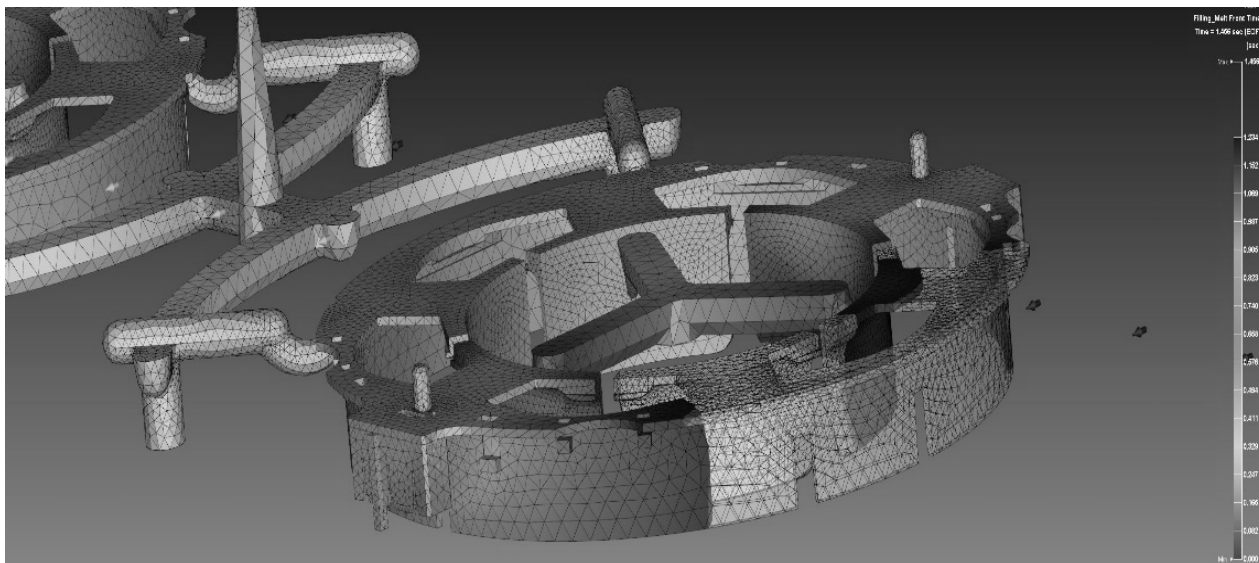


Рис. 3. Отчет процесса заполнения

После окончания расчетов можно оценить полученные параметры, к которым относятся:

- время заполнения;
- поля давлений;
- поля температур;
- воздушные ловушки;
- линии спая;
- коробления;
- усадка;
- время охлаждения;
- остаточные напряжения;
- утяжины и т. д.

Все полученные данные можно свести в отчет, содержащий таблицы, графики, иллюстрации и рекомендации к устранению проблем.

Подготовка данных для полимерного материала включает оценку в имеющейся базе данных информации о применяемых моделях материала (т. е. уравнениях, которые используются для описания реологических, теплофизических, механических и прочих свойств), характеристики материала, а также рекомендуемый режим его переработки [9]. Модель механических свойств материала, в частности, оказывает большое влияние на расчет напряженно-деформированного состояния отливки (технологической усадки, коробления, остаточных напряжений). При необходимости эти данные корректируются в базе данных пользователя с учетом информации изготовителя материала и других доступных источников.

Одним из условий корректности расчетов является учет возможностей применяемого литейного оборудования, поэтому подготовка данных по литейной машине относится к важнейшим этапам подготовки расчета [10].

Интересные возможности программных продуктов Moldex3D связаны с использованием виртуальных систем управления литейных машин

для задания при расчете технологического режима в том виде, как он задается в системе управления реальной литейной машины.

Какова точность САЕ-расчетов? Повышение точности расчетов – одно из стратегических направлений совершенствования САЕ-систем. Оценка точности расчета имеет большое практическое значение при анализе результатов моделирования и принятии решений на их основе. Между тем говорить о том, насколько числовая модель отличается от реального процесса и какие погрешности она вызывает, можно только в отношении конкретной характеристики процесса. Полученное в общем малое расхождение результатов расчета и эксперимента при валидации в отношении конкретной характеристики, конструкции, термопластичного материала и условий процесса не гарантирует высокую точность для других характеристик, конструкций, материалов и условий. Рассмотрим более подробно точность расчета напряженно-деформированного состояния литейного изделия после его извлечения из формы [11].

Технологическая усадка, коробление и остаточные напряжения являются следствиями предыстории изменений термопластичного материала в процессе переработки и выталкивания из литейной формы, поэтому точность их расчета зависит от всех явлений и факторов, влияющих на ход стадий литейного процесса. Добавление вязкоупругости в цифровую модель процесса и материала может значительно повлиять на напряженно-деформированное состояние отливки, например, прогнозируемое коробление изделия может при этом измениться на противоположное [12].

Достоверность прогнозирования технологической усадки очень сильно зависит от особенностей термопластичного материала и конструкции

изделия. Технологическая усадка кристаллизующихся термопластов и ее анизотропия в большой степени определяются процессом кристаллизации (проблема моделирования кристаллизации отмечена выше), поэтому расчет данных параметров для таких материалов, если они не содержат наполнителя, имеет в целом невысокую точность [13].

Повышенная точность расчета технологической усадки может быть достигнута при средних показателях толщины стенки для аморфных термопластов и быстро кристаллизующихся термопластов с относительно высоким содержанием дисперсного (например, минерального) наполнителя, потому что эти материалы имеют малую и изотропную технологическую усадку при относительно слабой зависимости этого параметра от режима литья, конструкции изделия и литейной формы. Однако технологическая усадка тонкостенных изделий из аморфных термопластов является анизотропной из-за повышенного влияния застывших пристенных слоев с высокой молекулярной ориентацией, что снижает точность прогнозирования [14].

Погрешность расчета технологической усадки уменьшается для кристаллизующихся термопластов, содержащих короткий жесткий волокнистый наполнитель (стеклянное, углеродное и арамидное волокно). Эти материалы имеют высокую анизотропию модулей упругости, коэффициентов линейного теплового расширения и, соответственно, усадки. В последнее время достигнуты значительные успехи в повышении точности прогнозирования ориентации жестких волокнистых наполнителей на стадии заполнения оформляющей полости расплавом [8]. Поскольку модуль упругости таких наполнителей превышает модуль упругости самого термопласта более чем в 25 раз, а длина волокна уменьшается в процессе переработки не очень сильно, ориентация волокна является важнейшим фактором, влияющим на технологическую усадку.

Для материалов, содержащих длинное волокно, проблемы прогнозирования технологической усадки возрастают из-за негативного влияния разрушения волокна, которое происходит главным образом в материальном цилиндре литейной машины на стадии пластикации [11].

Прогнозирование технологической усадки существенно осложняется для изделий высокой толщины, а также изделий с утолщениями по нескольким причинам. Во-первых, повышение толщины стенки изделия увеличивает технологическую

усадку и ее колебание. Во-вторых, при литье под давлением толстостенных изделий может формироваться микро- или макропористая внутренняя структура, а также могут возникать макроскопические пустоты (усадочные полости, пузыри), что не учитывается в современных цифровых моделях литейного процесса, как уже упоминалось выше. В-третьих, для расчетов напряженно-деформированного состояния обычно используются продольный и поперечный модули упругости материала, определенные на образцах средней толщины, тогда как при повышении толщины стенки модули упругости существенно уменьшаются (для тонкостенных изделий они увеличиваются).

Особые проблемы прогнозирования характеристик напряженно-деформированного состояния возникают для алифатических полиамидов (ПА-6, ПА-66 и др.), как ненаполненных, так и наполненных, что объясняется негативным влиянием такого их свойства, как поглощение влаги из воздуха. Повышение влажности полиамида вызывает его набухание, вследствие которого размеры литейного изделия увеличиваются неоднородно в разных направлениях. Одновременно с этим существенно снижаются модули упругости материала, что приводит к уменьшению размеров изделия и повышению коробления. Технологическая усадка изделий, полученных из таких материалов, определяется конкурирующим влиянием этих явлений.

Крайне низкая точность расчета технологической усадки характерна для термопластичных эластомеров, что связано с их сложным поведением в условиях литья под давлением [6].

Заключение. Программные продукты Moldex3D позволяют получить подробную информацию (в графическом и текстовом виде) о поведении термопластичного материала в литейной форме на стадиях заполнения, уплотнения, охлаждения отливки в форме, а также после ее извлечения из формы.

Анализ результатов представляется наиболее сложной частью расчетов для начинающих пользователей. Эта сложность связана не столько с использованием CAE, сколько вообще со структурой информации о литейном процессе [15].

Оценивая результаты расчетов, необходимо понимать, что находясь в рамках определенных моделей процесса и материала, при том, что принимаемое решение должно учитывать весь комплекс влияющих явлений и факторов.

Список литературы

1. Казмер Д. О. Разработка и конструирование литейных форм / пер. с англ.; под ред. В. Г. Дувидзона. СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. 464 с.
2. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литейные формы / пер. с англ.; под ред. В. Г. Дувидзона, Э. Л. Калинчева. СПб.: Профессия, 2007. 640 с.

3. Kennedy P., Zheng R. Flow analysis of injection molds. Cincinnati: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013. 378 p.
4. Rajupalem V., Talwar K., Friedl C. Three-dimensional simulation of the injection molding process // SPE ANTEC Tech. Papers. 1997. Vol. 43. P. 670–673.
5. Silva L., Agassant J.-F., Coupez T. Three-dimensional injection molding simulation. Injection molding // Technology and fundamentals / ed. by M. R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009. P. 599–651.
6. Sombatsompop N., Chaiwattanpipat W. Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding // Adv. Polymer Tech. 2000. Vol. 19, no. 2. P. 79–86.
7. Wang M.-L., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Molding simulation: Theory and practice. Cincinnati: Hanser Publishers, Hanser Publications, 2018. 513 p.
8. Барвинский И. А., Барвинская И. Е., Дувидзон В. Г. Дефекты деталей из термопластов при литье под давлением // Следы течения: V Междунар. инструментальный саммит, Москва, 3 июня 2010 г. Москва, 2010. 7 с.
9. Kennedy P. Development of injection molding simulation injection molding // Technology and fundamentals / ed. by M. R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009. P. 553–598.
10. Chang R. Y., Liu L., Yang W.-H., Yang V., Hsu D. C. To refine mesh or not to? An innovative mesh generator for 3D mold filling analysis // 60th SPE ANTEC Tech. Papers. 2002. P. 455–459.
11. Барвинский И. А., Барвинская И. Е. Проблемы литья под давлением изделий из полимерных материалов: уплотнение // Полимерные материалы. 2014. № 3. С. 3–13.
12. Малкин А. А., Исаев А. И. Реология: Концепция, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 558 с.
13. Барвинский И. А., Дувидзон В. Г., Гончаренко В. А. Глоссарий дефектов, проблем и незначительные явления при литье // Полимерные материалы. 2020. № 7. С. 47–58.
14. Austin C. A. Moldflow design principles. Melbourne: Moldflow Pty. Ltd., 1991. 54 p.
15. Moldflow design guide: A resource for plastics engineers / ed. by J. Shoemaker. Cincinnati: Hanser, 2006. 326 p.

References

1. Kazmer D. O. *Razrabotka i konstruirovaniye lit'yevykh form* [Injection Mold Design Engineering]. St. Petersburg, TsOP "Professiya" Publ., 2011. 464 p. (In Russian).
2. Menges G., Mikayeli V., Moren P. *Kak delat' lit'yevyye formy* [How to make injection molds]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2007. 640 p. (In Russian).
3. Kennedy P., Zheng R. Flow analysis of injection molds. Cincinnati, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013. 378 p.
4. Rajupalem V., Talwar K., Friedl C. Three-dimensional simulation of the injection molding process. *SPE ANTEC Tech. Papers*, 1997, vol. 43, pp. 670–673.
5. Silva L., Agassant J.-F., Coupez T. Three-dimensional injection molding simulation. Injection molding. *Technology and fundamentals*. Ed. by M. R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009, pp. 599–651.
6. Sombatsompop N., Chaiwattanpipat W. Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding. *Adv. Polymer Tech.*, 2000, vol. 19, no. 2, pp. 79–86.
7. Wang M.-L., Chang R.-Y., Hsu C.-H. Molding simulation: Theory and practice. Cincinnati, Hanser Publishers, Hanser Publications, 2018. 513 p.
8. Barvinskiy I. A., Barvinskaya I. E., Duvidzon V. G. Defects in thermoplastic parts during injection molding. *Sledy techeniya: V Mezhdunarodnyy instrumental'nyy sammit* [Flow marks: V International Instrumental Summit]. Moscow, 2010. 7 p. (In Russian).
9. Kennedy P. Development of injection molding simulation injection molding. *Technology and fundamentals*. Ed. by M. R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Hanser, 2009, pp. 553–598.
10. Chang R. Y., Liu L., Yang W.-H., Yang V., Hsu D. C. To refine mesh or not to? An innovative mesh generator for 3D mold filling analysis. *60th SPE ANTEC Tech. Papers*, 2002, pp. 455–459.
11. Barvinskiy I. A., Barvinskaya I. E. Problems of injection molding of products from polymer materials: compaction. *Polimernyye materialy* [Polymeric materials], 2014, no. 3, pp. 3–13 (In Russian).
12. Malkin A. A., Isaev A. I. *Reologiya: Kontseptsiya, metody, prilozheniya* [Rheology: Concept, methods, applications]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2007. 558 p. (In Russian).
13. Barvinskiy I. A., Duvidzon V. G., Goncharenko V. A. Glossary of defects, problems and minor phenomena during casting. *Polimernyye materialy* [Polymeric materials], 2020, no. 7, pp. 47–58 (In Russian).
14. Austin C. A. Moldflow design principles. Melbourne, Moldflow Pty. Ltd., 1991. 54 p.
15. Moldflow design guide: A resource for plastics engineers. Ed. by J. Shoemaker. Cincinnati, Hanser, 2006. 326 p.

Информация об авторах

Кандыба Дмитрий Анатольевич – магистрант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: docdoc0104@gmail.com

Любимов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lubimov@belstu.by

Петрушеня Александр Федорович – кандидат технических наук, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: petraf@belstu.by

Касперович Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Ленартович Лилия Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lenartovich@belstu.by

Information about the authors

Kandyba Dmitriy Anatol'yevich – Master's degree student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: docdoc0104@gmail.com

Liubimau Aleksandr Gennad'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lubimov@belstu.by

Petrushenya Aleksandr Fedorovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petraf@belstu.by

Kasperovich Olga Mikhaylovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kasperovichvolha@yandex.by

Lenartovich Liliya Alekseevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lenartovich@belstu.by

Поступила 15.07.2024