УДК 658.512
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ ЛИТЬЕВЫХ ФОРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М. Г. Лопатов, А. В. Чукичев*, О. С. Тимофеева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
** avchukichev@itmo.ru*

Аннотация. Представлена методика проектирования формообразующих деталей литьевых форм. Приведены результаты анализа параметров литниковой системы в виде таблицы зависимостей от параметров полимерного изделия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке базы знаний.

Ключевые слова: *технологическая подготовка производства, полимерные изделия, литье под давлением, параметрическое моделирование, переналаживаемая литьевая форма*

Ссылка для цитирования: *Лопатов М. Г., Чукичев А. В., Тимофеева О. С.* Методика проектирования формообразующих деталей литьевых форм с использованием информационных технологий // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 3. С. 241—246. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246.

METHODOLOGY FOR DESIGNING FORMING PARTS OF INJECTION MOLDS USING INFORMATION TECHNOLOGIES

M. G. Lopatov, A. V. Chukichev*, O. S. Timofeeva

ITMO University, St. Petersburg, Russia
** avchukichev@itmo.ru*

Abstract. A method of designing forming parts of injection molds is presented. Results of analysis of the gating system parameters are presented in the form of a table of dependences on parameters of a polymer product. The obtained results can be used in the development of a knowledge base.

Keywords: technological production preparation, polymer product, injection molding, parametrization, reconfigurable injection mold

For citation: Lopatov M. G., Chukichev A.V., Timofeeva O. S. Methodology for designing forming parts of injection molds using information technologies. *Journal of Instrument Engineering.* 2023. Vol. 66, N 3. P. 241—246 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-3-241-246.

Введение. В настоящее время сокращение сроков изготовления и внедрения часто меняющейся номенклатуры изделий — одна из актуальных задач на приборостроительных предприятиях [1]. Производство, основанное на единой модели данных об изделиях, процессах и производственных системах, цифровых методах планирования, моделирования, мониторинга и управления, — это базовая ступень к созданию цифрового производства. Переход к цифровому производству связан с необходимостью повышения уровня автоматизации технологической подготовки производства (ТПП) и взаимной интеграции систем CAD, CAM, CAE,

© *Лопатов М. Г., Чукичев А. В., Тимофеева О. С., 2023*

CAPP, PLM. В жизненном цикле изделий из полимерных материалов ТПП является самым длительным этапом, связанным с проектированием и изготовлением специального формообразующего оснащения — литьевых форм. Применение методов унификации и принципов группирования, а также использование систем автоматизированного проектирования позволяют значительно сократить сроки ТПП [2].

В качестве объекта исследования рассматривается ТПП малых серий изделий из полимерных термопластичных материалов литьем под давлением. Цель настоящей статьи — поиск путей сокращения длительности ТПП, а следовательно, и себестоимости полимерных изделий при мелкосерийном типе производства, когда длительность ТПП превышает длительность процесса литья требуемой партии.

Материалы и методы. Одним из этапов ТПП полимерных изделий методом литья является проектирование литьевой формы, конструкция которой определяет протекание процесса заполнения формующей полости. Этот этап, важность которого обусловлена весомой долей накопленного в процессе производства полимерных изделий на каждом предприятии уникального опыта, может стать основой единой базы знаний.

Литьевая форма представляет собой систему деталей, образующих рабочую полость, при заливке которой материалом формируется отливка. Отливка состоит из одного или нескольких отливаемых изделий и литниковой системы. Литниковой системой называют совокупность каналов, предназначенных для подвода расплава материала в форму, ее полного заполнения и питания отливки в процессе затвердевания. Литниковая система состоит из впускных и выпускных литниковых каналов, разводящих литниковых каналов, технологических прибылей, а также центрального литникового канала: см. рис. 1, где *1* — отливаемое полимерное изделие, *2* — впускной литник, *3* — разводящий литник, *4* — центральный литник.

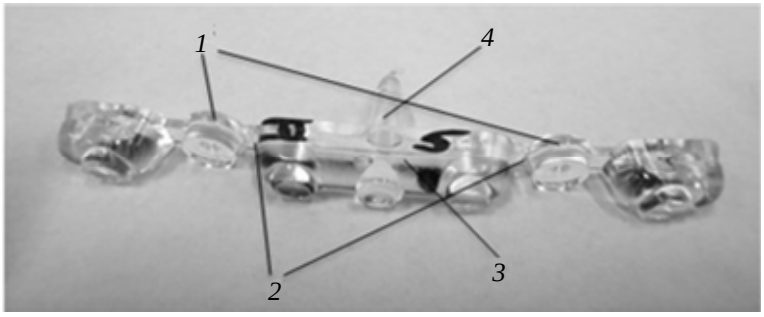


Рис. 1

Автоматизация проектирования литниковой системы является одной из сложных и трудноформализуемых задач вследствие разнообразия форм полимерных изделий. Одним из подходов к автоматизации процесса проектирования литниковой системы является параметрическое моделирование отливки на основе конструкторско-технологических и геометрических характеристик полимерного изделия. Параметры, описывающие данные характеристики, определяются автоматически из 3D-модели полимерного изделия.

Процесс проектирования литниковой системы для заданной полимерной детали может быть представлен как решение таких задач, как определение параметров литниковой системы и их оптимизация. Правильность конфигурации литниковой системы проверяется проливаемостью отливки, что может быть реализовано с использованием систем имитационного моделирования. На рынке программного обеспечения для решения задач имитационного моделирования процесса литья под давлением представлено множество зарубежных программных продуктов, реализующих 3D-метод анализа, являющийся стандартом отрасли [3], среди которых можно выделить: REM3D (Transvalor S.A, Франция), VISI Flow (Vero USA, Inc., США), Sigmasoft (SIGMA Engineering GmbH, Германия), Moldex3D (CoreTech System, Тайвань) и 3D TIMON (Toray Engineering Co., Япония) [4]. Одной из основных функций этих программ является оценка конфигураций литниковых систем отливки. Использование систем имитацион-

ного моделирования позволяет просчитывать различные варианты геометрии литниковых систем без проведения натурных экспериментов, что, в свою очередь, позволяет снизить стоимость ТПП. Однако применение современных информационных технологий (искусственного интеллекта), вероятно, может способствовать отказу от использования дорогостоящих систем имитационного моделирования.

Современные исследования в области проектирования литниковых систем и подбора параметров (режимов) литья направлены на разработку интеллектуальных систем и используют следующие подходы: метод рассуждений на основе прецедентов (CBR — Case-Based Reasoning), метод на основе экспертных систем, системы на основе нейронных сетей [5]. Несмотря на принципиальные различия алгоритмов, используемых в данных подходах, основой для каждого является база знаний.

Проектирование литьевых форм для литья под давлением полимерных изделий на основе баз знаний [6] представляет собой основу метода проектирования с использованием искусственного интеллекта в литьевом производстве. Применение метода рассуждений на основе прецедентов преобразует процесс проектирования литьевой формы в модификацию предыдущих успешных прецедентов, хранящихся в базе знаний, для решения новых задач.

Автоматизированное проектирование литниковой системы литьевой формы с параметрическим управлением [7] осуществляется на основе управления геометрическими параметрами с использованием стандартных шаблонов. Стандартные шаблоны для проектирования литниковой системы представляют собой различные конфигурации литниковых каналов. Применение шаблонов гарантирует, что требуемая конфигурация каналов может быть добавлена в модель конструкции литьевой формы без необходимости перепроектирования формующей полости.

Технология литья под давлением, вследствие стабильности этапов процесса (подготовка расплава полимерного материала, впрыск, выдержка под давлением, охлаждение и выталкивание), позволяет формировать группы конструктивно различающихся изделий, изготовление которых возможно с использованием конкретной модели литьевого оборудования. Для данных групп изделий, с учетом параметров литьевой машины (расстояние между колоннами, объем впрыска и пр.), целесообразно проектировать и изготавливать переналаживаемые литьевые формы (ПЛФ). Это позволяет при переходе к производству нового полимерного изделия проектировать только комплект сменных формообразующих деталей (ФОД) и тем самым значительно сократить время ТПП. Для каждой ПЛФ существует предельный объем полости, который позволяет определить суммарные размеры комплекта ФОД (матрицы и пуансона).

Методика проектирования ФОД. Построение 3D-модели полимерной детали и параметризация этой модели — первоочередной этап при проектировании формообразующих деталей. На рис. 2 в качестве примера приведена параметрическая 3D-модель полимерной детали.

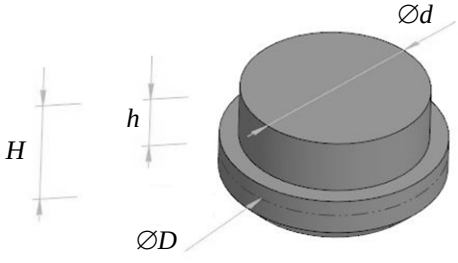


Рис. 2

При проектировании литниковой системы необходимо учитывать процент усадки, который зависит от характеристик материала отливаемого изделия. Для учета этого физического явления в системе автоматизированного проектирования должно производиться масштабирование трехмерной модели изделия.

Методику проектирования ФОД можно представить в виде следующих этапов [8—10]:

1) определение количества отливаемых полимерных изделий в одной отливке;

2) построение 3D-модели отливки;

3) выбор оборудования и ПЛФ в соответствии с параметрами отливки (объем, материал, габаритные размеры), определение суммарных предельных размеров комплекта ФОД [11];

4) формирование трехмерных моделей ФОД (матрицы и пуансона) посредством вычитания 3D-модели отливки из 3D-моделей комплекта ФОД;

5) построение дополнительных элементов (вентиляционных каналов, отверстий под толкатели, при необходимости отверстий под сменные знаки).

Решения, принимаемые на этапах 2, 3 и 5, зависят от геометрии полимерного изделия и требований к его поверхностям.

Этап построения 3D-модели отливки, в свою очередь, состоит из следующих шагов [12]:

1) определение положения точки впрыска;

2) определение положения плоскости разъема для извлечения отливки;

3) построение впускного литникового канала;

4) построение разводящих литниковых каналов;

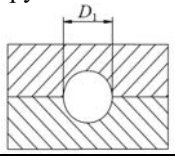
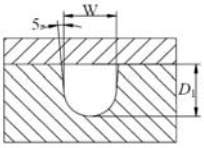
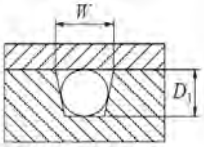
5) построение центрального литникового канала;

6) определение количества и расположения толкателей;

7) построение технологических прибылей (при необходимости).

В качестве примера параметризации литниковой системы в табл. 1 приведены варианты конфигураций поперечных сечений разводящих каналов и условия принятия решения о применении каждого варианта[13].

Таблица 1

Тип поперечного сечения разводящего канала	**Условия применения**
Круглое сечение 	Потери тепла при данной форме литников минимальны, однако изготовление характеризуется дороговизной и сложностью; $D_1 = S_{max} + 1,5$ мм, где S_{max} — максимальная толщина стенки изделия, мм
Параболическое сечение 	Более технологичный вариант, чем круглое сечение, однако потери тепла больше; угол параболы — от 3 до 10°, $D_1 = S_{max} + 1,5$ мм, $W = D \cdot 1,25$ мм
Трапециевидное сечение 	Альтернатива параболическому сечению, однако потери тепла больше. Формулы расчета аналогичны расчету параболического сечения

В результате исследования были выявлены характеристики (свойства) полимерного изделия, влияющие на принятие решений на различных этапах проектирования литниковой системы:

— объем изделия, определяет количество отливаемых изделий за один впрыск;

— материал изделия, влияет на выбор комплекта ФОД и оборудования для изготовления изделия;

— требования к поверхностям изделия, влияют на определение положения точки впрыска и плоскости разъема.

В табл. 2 представлены параметры литниковых каналов, определяемые параметрами полимерного изделия.

Таблица 2

Параметры полимерного изделия	**Определяемые параметры для построения отливки**
Построение впускного литникового канала	
Материал	Глубина канала $h = H \cdot k$, где k — коэффициент, зависящий от материала отливаемого изделия; H — характеристический размер канала, мм
Объем	Характеристический размер канала $H = 2 \cdot V_и / A_и$, где $V_и$ — объем изделия, см^3; $A_и$ — площадь поверхности изделия, см^2
Площадь поверхности матрицы	Ширина канала $b = k \frac{\sqrt{A}}{30}$, где A — площадь поверхности матрицы, мм^2
Масса (m)	Если сечение канала имеет форму окружности или полуокружности, то его диаметр определяется следующей зависимостью: m, г — D_1, мм 0—5 — 0,5 5—10 — 0,62 10—20 — 0,75 20—40 — 1 40—100 — 1,25
Построение разводящего литникового канала	
Максимальная толщина стенки	Глубина канала $h = S_{max}$ +1,5 мм, ширина канала $W = D \cdot 1{,}25$ мм

Заключение. Анализ научной литературы, посвященной описанной в статье проблеме, позволяет сделать следующие выводы:

— в большинстве методик построения формообразующих деталей не используются параметрические возможности современных САПР;

— параметрическая модель изделия позволяет построить полностью зависящую от параметров полимерного изделия модель отливки;

— использование функционала систем автоматизированного проектирования позволяет сократить сроки технологической подготовки производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марков А. М., Макарова М. И., Плетнева Е. М.* Алгоритм проектирования группового технологического процесса механической обработки деталей // Обработка металлов. 2012. № 4(57). С. 5—9.

2. *Митрофанов С. П.* Особенности групповой технологии механической обработки в современных условиях. СПб: Ун-т ИТМО, 2001.

3. *Барвинский И.* Экспертиза инженерных расчетов литья термопластов под давлением // Полимерные технологии. 2018. № 2. С. 22—29.

4. *Пирогов А. В.* Разработка и моделирование процессов технологической подготовки производства изделий из полимерных оптических материалов: дис. … канд. техн. наук. СПб, 2014.

5. *Gao H.* Intelligent methods for the process parameter determination of plastic injection molding // Frontiers of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 13. P. 85—95.

6. *Mok C. K., Hua M., Wong S. Y.* A hybrid case-based reasoning CAD system for injection mould design // Intern. Journal of Production Research. 2008. N 46:14. P. 3783—3800. DOI: 10.1080/00207540601103100.

7. *Low M., Lee K.* A Parametric-Controlled Cavity Layout Design System for a Plastic Injection Mould // Intern. Journal of Advanced Manufact. Techn. 2003. N 21. P. 807—819. DOI: 10.1007/s00170-002-1397-9.

8. *Басов К. И., Брагинский В. А., Казанков Ю. В.* Формующий инструмент для изготовления изделий из полимерных материалов. М.: Химия, 1991.

9. *Казмер Д. О.* Разработка и конструирование литьевых форм / Пер. с англ.; под. ред. *В. Г. Дувидзона*. СПб: Изд-во „Профессия“, 2011.

10. *Крыжановский В. К.* Инженерный выбор и идентификация пластмасс. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 204 с.

11. *Талапов В. В., Тимофеева О. С., Помпеев К. П.* Разработка алгоритма и определение критериев выбора материала формообразующих деталей // „Инновации на транспорте и в машиностроении“: Сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 28—29 апр. 2016 г. 2016. Т. 3. С. 138142.

12. *Менгес Г., Микаэли В., Морен П.* Как делать литьевые формы / Пер. с англ.; под ред. *В. Г. Дувидзона, Э. Л. Калинчева*. СПб: Изд-во „Профессия“, 2007. 639 с.

13. *Rutkauskas Ž., Bargelis A.* Knowledge–based method for gate and cold runner definition in injection mold design // Mechanika. 2007. Vol. 66, N 4.

Сведения об авторах

Максим Геннадьевич Лопатов — студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: max.lopatov@rambler.ru

Артемий Валерьевич Чукичев — аспирант; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: avchukichev@itmo.ru

Ольга Сергеевна Тимофеева — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: otimofeeva@itmo.ru

Поступила в редакцию 09.09.22; одобрена после рецензирования 29.09.22; принята к публикации 25.01.23.

REFERENCES

1. Markov A.M. *Algoritm proyektirovaniya gruppovogo tekhnologicheskogo protsessa mekhanicheskoy obrabotki detaley* (Algorithm for Designing a Group Technological Process of Machining Parts), Barnaul, 2012. (in Russ.)
2. Mitrofanov S.P. *Osobennosti gruppovoy tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki v sovremennykh usloviyakh* (Features of Group Machining Technology in Modern Conditions), St. Petersburg, 2001. (in Russ.)
3. Barvinsky I. *Polymer materials. Products, equipment, technology*, 2018, no. 2, pp. 22–29. (in Russ.)
4. Pirogov A.V. *Razrabotka i modelirovaniye protsessov tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva izdeliy iz polimernykh opticheskikh materialov* (Development and Modeling of the Processes of Technological Preparation for the Production of Products from Polymeric Optical Materials), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2014. (in Russ.)
5. Gao H. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 13, pp. 85–95.
6. Mok C.K., Hua M. & Wong S.Y. *International Journal of Production Research*, 2008, no. 14(46), pp. 3783–3800, https://doi.org/10.1080/00207540601103100.
7. Low M., Lee K. *Int. Journ. Adv. Manufac. Tech*., 2003, vol. 21, pp. 807–819, https://doi.org/10.1007/s00170-002-1397-9.
8. Basov K.I., Braginsky V.A., Kazankov Yu.V. *Formuyushchiy instrument dlya izgotovleniya izdeliy iz polimernykh materialov* (Forming Tool for the Manufacture of Products from Polymeric Materials), Moscow, 1991. (in Russ.)
9. Kazmer D.O. *Injection Mold Design Engineering, Hanser Publications*, 553 p.
10. Kryzhanovsky V.K. *Inzhenernyy vybor i identifikatsiya plastmass* (Engineering Selection and Identification of Plastics), St. Petersburg, 2009, 204 p. (in Russ.)
11. Talapov V.V., Timofeeva O.S., Pompeev K.P. *Innovatsii na transporte i v mashinostroyenii* (Innovations in Transport and Mechanical Engineering), Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, April 28–29, 2016, vol. 3, pp. 138–142. (in Russ.)
12. Menges G., Michaeli W., Mohren P. *How to make injection molds, Hanser Publishers, Munich*, 2001.
13. Rutkauskas Ž., Bargelis A. *Mechanika*, 2007, no. 4(66).

Data on authors

Maksim G. Lopatov — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: max.lopatov@rambler.ru

Artemy V. Chukichev — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: avchukichev@itmo.ru

Olga S. Timofeeva — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: otimofeeva@itmo.ru

Received 09.09.22; approved after reviewing 29.09.22; accepted for publication 25.01.23.