

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ю. С. АНДРЕЕВ¹, О. С. ТИМОФЕЕВА², Е. И. ЯБЛОЧНИКОВ¹

¹ *Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*
E-mail: yandreev84@gmail.com

² *Публичное акционерное общество „Техприбор“, 196084, Санкт-Петербург, Россия*

Рассматриваются возможные пути сокращения сроков проектирования и изготовления формообразующей оснастки в условиях мелкосерийного производства. Предполагается сократить сроки за счет использования переналаживаемых литевых форм и изготовления только формообразующих деталей по обоснованно выбранной технологии с учетом размера партии и требований к изготавливаемым полимерным изделиям. Предлагается использовать эффективные инструменты проектирования и моделирования, входящие в состав современных CAD/CAE/CAM-систем, а также организовать процессы технологической подготовки производства (ТПП) в едином информационном пространстве, что позволит обмениваться технической и организационной информацией, принимать согласованные решения в режиме реального времени и в итоге существенно сократить издержки на передачу и обработку данных. На всех этапах ТПП предлагается использовать принципы и методы групповой технологии.

Ключевые слова: *формообразующая оснастка, материал формообразующей детали, CAD/CAM/CAE, единое информационное пространство, групповая технология, мелкосерийное производство*

Введение. Проектирование и изготовление литевой формы — сложный, длительный и дорогостоящий процесс, требующий привлечения высококвалифицированных специалистов, использования современного оборудования, специализированного программного обеспечения, новых эффективных технологий [1]. Сокращение продолжительности и стоимости технологической подготовки производства (ТПП) является необходимым условием конкурентоспособности предприятия. В работе [2] выполнен анализ современного состояния предприятий, специализирующихся на производстве литевых форм (ЛФ), отмечены характерные проблемы и некоторые пути их преодоления. В настоящее время производство характеризуется частой сменой номенклатуры выпускаемых изделий, поэтому один из важнейших экономических показателей, определяющих эффективность использования технологии литья под давлением, — не максимальное количество изделий, которые можно изготовить по неизменной литевой форме, а скорость перехода с ограниченной партии одного типа выпускаемого изделия на другой. В связи с вышесказанным актуальной задачей является исследование основных этапов ТПП формообразующей оснастки и определение возможных путей сокращения их продолжительности.

Процесс производства полимерных изделий с момента получения заказа до выпуска готовой продукции надлежащего качества включает несколько основных этапов: получение заказа и разработка технического задания; проектирование литейной формы, ее изготовление, контроль и испытание; литье изделий на литейной машине (или термопластавтомате — ТПА) и контроль отливок; приемка готовых изделий заказчиком [3].

Самым длительным является этап проектирования, изготовления, контроля и испытания литейной формы, что в условиях мелкосерийного производства может являться определяющим фактором при выборе технологии производства полимерных изделий [4]. На этом этапе решаются задачи выбора оборудования и разработки базового варианта конструкции формообразующей оснастки; предварительного моделирования процесса литья; разработки технологической документации и закупки необходимого инструмента; изготовления и контроля полученной геометрии и качества поверхностей; сборки конструкции литейной формы и ее испытания.

В условиях мелкосерийного производства на всех этапах подготовки производства целесообразно применять методы и принципы групповой технологии, сформулированные проф. С. П. Митрофановым [5]. Применение этих методов предполагает разработку и использование переналаживаемых литейных форм [6]. При этом для перехода к производству новой полимерной детали (в пределах сформированных групп деталей) требуется изготовить только формообразующие детали (ФОД), трудоемкость изготовления которых, несомненно, зависит от используемого материала, технологии изготовления и уровня автоматизации ТПП.

Выбор материала и методов изготовления ФОД. На выбор материала ФОД и соответственно технологию их изготовления влияют материал изделия, предъявляемые к изделию технические и эксплуатационные требования, а также размер партии. Выбор материала ФОД является непростой задачей, так как необходимо подобрать лучшее соотношение весьма противоречивых показателей для конкретной производственной ситуации. В условиях мелкосерийного производства наиболее важными из них являются сроки и стоимость изготовления. Например, для предотвращения быстрого износа ФОД желательно, чтобы материал имел высокую твердость, но известно: чем выше твердость материала, тем труднее его механически обрабатывать. Для снижения стоимости изготовления необходима высокая скорость механической обработки, соответственно материал должен иметь низкую твердость [1].

При изготовлении малых партий изделий следует выбирать такой материал, обработка которого займет минимальное время при условии гарантированного обеспечения необходимой стойкости ФОД. Для изготовления ФОД могут применяться такие материалы, как сталь, алюминиевые сплавы, а также различные полимеры [6, 7]. В условиях мелкосерийного производства изготовление стальных ФОД в общем случае нецелесообразно из-за высокой твердости материала, высокой стоимости и длительности обработки.

Для изготовления ФОД фрезерованием могут использоваться специальные модельные плиты из полимерных композиционных материалов, например, LAB 1000 и XE2390/2 фирмы AXSON и плиты OBO 1600 фирмы OBO Werke. На одном таком комплекте ФОД можно произвести от 50 до 300 отливок, в зависимости от конструкции детали и марки полимерного материала выпускаемого изделия. Эти материалы характеризуются высокой стабильностью размеров, высокой температурной стойкостью и механической прочностью, позволяют использовать высокопроизводительные режимы механической обработки, ограниченные только возможностями оборудования [8].

Примеры материалов, используемых для изготовления ФОД, представлены в таблице. Данные о стойкости материалов взяты с сайтов производителей и дистрибьюторов: „BE Group“, Швеция <www.begroup.com>; ООО „АБ Универсал“, Российская Федерация <www.abuniversal.ru>; „3DSystems“, США <www.3dsystems.com>; „Carrs tool steels limited“, Великобритания <www.carrs-tool.co.uk>.

Материалы ФОД и их стойкость

Материал ФОД		Количество циклов формования		
		<300	<10000	<1000000
Сталь (45, TOOLOX33, TOOLOX44)		+	+	+
Алюминиевые сплавы	ALUMEC, ALUMOLD	+	+	+
	Д16, АМг6, В95	+	+	
Модельный материал (ОВО1000, LAB1000)		+		
АБС-подобный фотополимер		+		
Полиамидные композиции EOS ALUMIDE		+		
Нанокompозитный материал Accura Bluestone™ Plastic		+		

Перспективными технологиями изготовления ФОД являются лазерное спекание и 3D-печать. Полимерные композиции на основе полиамида PA12: PA2200 (чистый полиамид), PA3200GF (стеклонаполненный полиамид) и Alumide (полиамид, наполненный алюминием) для послойного спекания предлагает компания EOS (Германия). Такие материалы, как ABS-подобный фотополимер (компания Stratasys) и нанокompозитный полимер Accura Bluestone Plastic (компания 3DSYSTEM) можно применять для изготовления ФОД на 3D-принтерах. Эти материалы обладают высокой термостойкостью, стабильной размерной точностью, а также механической прочностью, они способны сохранять перечисленные свойства длительное время [9, 10].

Комплекты формообразующих деталей из алюминиевого сплава (а) и полимерного материала Bluestone (б) для одного и того же изделия представлены на рис. 1. Особенности процесса 3D-печати обуславливают необходимость финишной доработки ФОД, изготовленных по данной технологии. Также для многократного увеличения термостойкости материала необходима термообработка комплекта ФОД до установки его в литьевую форму.

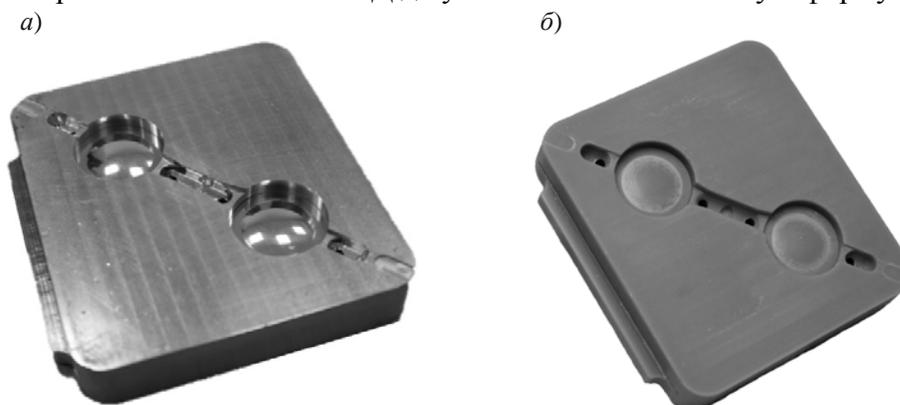


Рис. 1

Использование 3D-принтеров для создания формообразующих деталей в условиях мелкосерийного производства открывает большие перспективы с точки зрения сокращения трудоемкости и сроков изготовления, однако нужны дополнительные исследования, поэтому в настоящее время основной технологией изготовления ФОД по-прежнему остается фрезерная и электроэрозионная обработка на станках с ЧПУ.

Применение эффективных механизмов CAD/CAE/CAM-систем. Процесс проектирования и изготовления литьевой оснастки носит итерационный характер. Для того чтобы уменьшить или полностью исключить необходимость внесения изменений в конструкцию ФОД и их повторного изготовления после анализа результатов пробного литья [2], необходимо использовать системы компьютерного моделирования на всех этапах процесса: при

разработке конструкции, при анализе геометрии ФОД и имитации процесса литья, при разработке управляющих программ.

Использование на всех этапах ТПП методов и принципов групповой технологии предполагает применение переналаживаемых литьевых форм (ПЛФ) и формирование групп изделий для каждой такой формы. Группа изделий характеризуется совокупностью параметров системы „ТПА—ПЛФ—ФОД“. Среди основных параметров можно выделить объем впрыска и усилие смыкания ТПА, диаметр сопла и положение толкателей в ПЛФ, материал и качество функциональных поверхностей ФОД.

На этапе адресации нового изделия к группе целесообразно использовать не только информационно-поисковые системы или табличные алгоритмы [11], но и функциональные возможности CAD/CAE/CAM-систем. Например, система Cimatron E позволяет быстро оценить разнотолщинность детали, что является одним из ключевых факторов, влияющих на получение изделия надлежащего качества методом литья под давлением. При значительной разнотолщинности полимерного изделия должен быть проведен анализ его геометрии на предмет возможного изменения последней с сохранением функциональных свойств.

Критические факторы, влияющие на качество конечного продукта (неполный впрыск, наличие линий сая, воздушных ловушек и пр.) целесообразно выявлять на самых ранних стадиях проектирования. Применяя Moldex3D/Solid, можно решать максимальное число задач, включая анализ усадки изделий с существенными перепадами толщины стенки (рис. 2). Эффективный инструмент моделирования и экспресс-анализа проливаемости пресс-формы Moldex3D/eXplorer позволяет конструкторам выявлять потенциальные проблемы непосредственно в среде CAD моделирования.

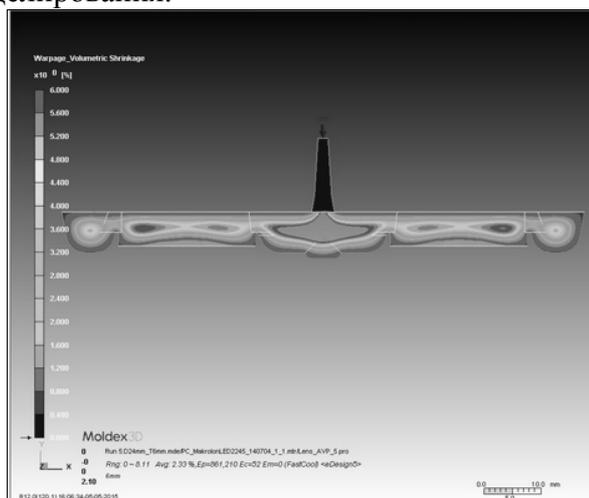


Рис. 2

Проектирование рабочей конструкции ФОД для изготовления конкретной детали группы следует выполнять на основе базовой модели, которая должна быть создана для каждой ПЛФ. Эта базовая модель представляет собой „заготовку“ с уже сформированными наружными (установочными) поверхностями и вариантами размещения отверстий под толкатели и требует моделирования только формообразующих поверхностей для конкретного полимерного изделия и создания поверхностей литников.

Несмотря на большое количество возможных конструкций ФОД, в каждой из них можно выделить следующие самостоятельные объекты (поверхности определенного функционального назначения): разводящие литники, впускные литники, формообразующие поверхности (непосредственно формирующие поверхности изделий), прибыли и выпоры, отверстия под толкатели, поверхности смыкания, а также наружные поверхности, которые используются для базирования ФОД в ПЛФ. Группы таких поверхностей целесообразно объединять в наборы и присваивать им названия, соответствующие функциональному назначению поверхностей.

Создание процедуры обработки в САМ-системе представляет собой выбор стратегии обработки, указание обрабатываемых поверхностей (непосредственно на модели или по какому-либо критерию), выбор применяемого инструмента и назначение режимов резания. Последовательное создание процедур обработки с выбором обрабатываемых поверхностей по критерию (имени набора) позволяет создавать технологические шаблоны, которые могут храниться в САМ-системе унифицированных технологических операций. При проектировании процесса обработки рабочей модели ФОД использование таких шаблонов позволит автоматически выбирать обрабатываемые поверхности по именам наборов и рассчитывать траектории перемещения используемых в шаблонах инструментов. Это позволит значительно сократить время подготовки управляющих программ для изготовления рабочих формообразующих деталей.

Для того чтобы оценить возможность применения технологического шаблона к рабочей модели ФОД (для оценки объема изменений базовой конструкции), удобно использовать инструмент современных САМ-систем „Сравнение моделей“, результаты применения которого явно укажут на измененные участки геометрии.

Размерная точность и качество поверхностей полимерных изделий, изготавливаемых с использованием технологии литья под давлением, зависят не только от режимов литья, но и от точности и качества самих ФОД, поэтому одним из важных этапов является контроль геометрических размеров и шероховатости поверхности ФОД. Для этих целей современные предприятия используют координатно-измерительные машины (КИМ) и профилометры. САМ-система Cimatron E позволяет для оператора КИМ подготовить шаблон, использование которого значительно ускорит процесс подготовки программ измерений. В этом шаблоне указаны координаты идеальных точек касания, рассчитанные системой по 3D-модели ФОД в выбранной системе координат. В шаблоне отчета содержатся поля для заполнения оператором КИМ координат фактических точек касания. Изображение положения точек касания при измерении, передаваемое в виде инструкции оператору КИМ (а), и фрагмент шаблона отчета (б) представлены на рис. 3. В случае соответствия контролируемых параметров заданной конструкции ФОД собирается и передается для установки в ПЛФ.

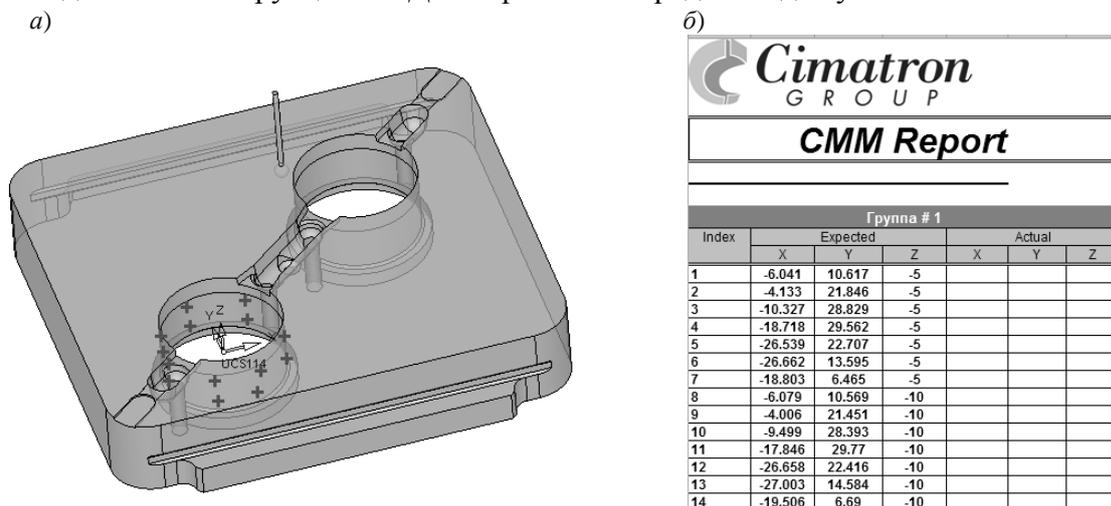


Рис. 3

Организация процессов ТПП с использованием PDM-систем. Особенностью современных процессов проектирования и ТПП изделий из полимерных материалов является территориальная удаленность специалистов разных дисциплин (проектанты, расчетчики, технологи, метрологи и др.), вследствие этого необходимо создавать условия для коллективной работы, обеспечивающие возможность быстрого доступа к получаемым результатам, своевременный обмен информацией между специалистами, возможность анализа и контроля выполняемых

работ [8, 12]. Наличие единого информационного пространства (ЕИП) позволит свободно обмениваться технической и организационной информацией, осуществлять коллективную работу, оперативно решать задачи по поддержке принятия согласованных решений в режиме реального времени, и в итоге существенно сократить издержки на передачу и обработку данных. При проектировании и ТПП изделий из полимерных материалов используется большое количество автоматизированных систем. На всех этапах интегрированного процесса формируется большое количество информации, моделей, документов различной формы и структуры. Поэтому актуально организовать централизованное накопление, хранение и доступ к данным всем участникам рассматриваемых бизнес-процессов в соответствии с их ролями.

Использование PDM-систем, например SmarTeam, позволяет организовать такое информационное пространство для всех участников проекта и обеспечить систематизированное хранение всей необходимой информации (техническое задание, 3D-модели и чертежи, пояснительные записки, технологические карты, файлы с расчетными данными, отчеты, графики и другие документы). Все документы могут отображаться на экране с использованием встроенных модулей просмотра, а их редактирование осуществляется с учетом роли специалиста и прав доступа. Система внутренних связей между различными специалистами и этапами проектирования дает возможность быстрее выявлять возникающие проблемы (снижение точности, появление дефектов и др.) и точнее определять, какие изменения и на каком этапе необходимо внести. Взаимодействие участников проекта может быть организовано с помощью процессов WorkFlow, которые позволяют определить состав работ, задачи, назначить исполнителей и отслеживать состояние проекта, автоматизировать обмен документами между пользователями. Каждый участник проекта имеет доступ к системе через Интернет. Ведение в PDM-системе SmarTeam таких проектов позволяет отслеживать их текущее состояние и планировать время участников проекта на выполнение той или иной задачи, а также при необходимости изменять последовательность решения задач, чтобы добиться максимальной эффективности на стадиях проектирования и изготовления литьевых форм в условиях мелкосерийного производства.

Заключение. При проведении описанных работ и исследований использовались программное обеспечение и оборудование различных лабораторий Университета ИТМО, в том числе PDM-система SmarTeam, CAE-система Moldex 3D, CAD/CAM-система Cimatron E, фрезерный обрабатывающий центр HAAS SMM, координатно-измерительная машина DEA Global Performance 05.07.05, профилометр Hommel Tester T8000, термопластавтомат Ferromatik Milacron EE30-55. Результаты исследований показали, что эффективность процессов проектирования и ТПП в сфере производства малых серий изделий из полимерных материалов может быть достигнута за счет комплексного использования различных методов и средств — унификации конструкторско-технологических решений и группирования изделий, использования переналаживаемых литьевых форм, обоснованного выбора материала формообразующих деталей и технологий их изготовления, применения специализированных функций CAD/CAM/CAE-систем, организации единого информационного пространства для всех участвующих в решении задач специалистов. Перспективным представляется применение новых материалов в совокупности с быстроразвивающимися аддитивными технологиями, что во многих случаях позволит исключить механическую обработку при изготовлении деталей литьевых форм. Исследования и разработка на их основе новых технологий проводятся совместно с предприятиями, выпускающими инновационную продукцию в сфере приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм. СПб: Профессия, 2011. 464 с.
2. Аюпова Р. И., Пелипенко А. Б. Современное состояние и тенденции развития отечественной инструментальной промышленности // САПР и графика. 2013. № 12. С. 30—32.
3. Митрофанов С. П. Групповая технология машиностроительного производства. Т. 1. Организация группового производства. Л.: Машиностроение, 1983. 407 с.
4. Injection molding: Technology and fundamentals / Ed. by M. R. Kamal, A. Isayev, S.-J. Liu. Munich, Cincinnati: Hanser, 2009. 926 p. DOI:10.3139/9783446433731.
5. Освальд Т., Тунг Л.-Ш., Грэмман П. Дж. Литье пластмасс под давлением. СПб, 2006. 712 с.
6. Бояринцев А. В., Дувидзон В. Г., Подсобляев Д. С. Быстрое изготовление пилотных серий деталей из термопластичных полимерных материалов // Полимерные материалы. 2013. № 6. С. 4—9.
7. Яблочников Е. И., Грибовский А. А., Пирогов А. В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литьевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // Металлообработка. 2013. № 5—6 (77—78). С. 74—80.
8. Яблочников Е. И., Восоркин А. С., Цупиков А. В. Интегрированная система для разработки изделий из полимерных композиционных материалов на основе методологии PLM // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 100—104.
9. Yablochnikov E. I., Vasilkov S. D., Andreev Y. S., Pirogov A. V., Tretyakov S. D. An integrated approach to development and simulation manufacturing processes of optical products // Management and Production Engineering Review. 2015, Vol. 6, N 4. P. 94—103. DOI:10.1515/mpcr-2015-0040
10. Singh V. Rapid Prototyping, Materials for RP and Applications of RP // Intern. J. of Scientific & Engineering Research. 2013. Vol. 4, Iss. 7. P. 473—480. DOI:10.14299/000000.
11. Митрофанов С. П., Куликов Д. Д., Миляев О. Н., Падун Б. С. Технологическая подготовка гибких производственных систем. Л.: Машиностроение, 1987. 352 с.
12. Иващенко А. В., Кременецкая М. Е., Филатов А. Н., Пейсахович Д. Г. Современные технологии организации проектирования в едином информационном пространстве научно-производственного предприятия // Вестн. Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 5. С. 284—291.

Сведения об авторах

- Юрий Сергеевич Андреев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; E-mail: yandreev84@gmail.com
- Ольга Сергеевна Тимофеева** — Публичное акционерное общество „Техприбор“; ведущий инженер-технолог; E-mail: otimofeeva@corp.ifmo.ru
- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра технологии приборостроения; заведующий кафедрой; E-mail: eugeny@beepitron.com

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
23.03.16 г.

Ссылка для цитирования: Андреев Ю. С., Тимофеева О. С., Яблочников Е. И. Проектирование и изготовление формообразующей оснастки в условиях мелкосерийного производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 7. С. 592—599.

**DESIGN AND MANUFACTURING OF INJECTION MOLDING TOOLING
IN SMALL-SCALE PRODUCTION**

Yu. S. Andreev¹, O. S. Timofeeva², E. I. Yablochnikov¹

¹ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: yandreev84@gmail.com

²Public joint stock company Techpribor, 196084, St. Petersburg, Russia

Possible ways of reduction of terms of designing and manufacturing of injection molding equipment in small-scale production are considered. It is expected to reduce the time through the application of reusable molds and manufacture only the forming parts with reasonably selected technology regarding to lot size and requirements for manufactured polymer products. It is proposed to use the effective tools of designing and modeling that are included with modern CAD/CAE/CAM systems, as well as organizing the processes of technological preparation of production in a single information space that will allow exchanging technical and organizational information to make coordinated decisions in real time, and eventually significantly reduce communication costs and data processing. At all stages of technological preparation of production the use of the principles and methods of group technology is proposed.

Keywords: injection molding tooling, material of molds, CAD/CAM/CAE, integrated information space, group technology

Data on authors

- Yury S. Andreev** — PhD; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies;
E-mail: yandreev84@gmail.com
- Olga S. Timofeeva** — Techpribor; Leading Engineer-Designer;
E-mail: otimofeeva@corp.ifmo.ru
- Eugeny I. Yablochnikov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; Head of the Department;
E-mail: eugeny@beepitron.com

For citation: Andreev Yu. S., Timofeeva O. S., Yablochnikov E. I. Design and manufacturing of injection molding tooling in small-scale production // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016. Vol. 59, N 7. P. 592—599 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-7-592-599