

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.7.022.2: 621.7.073: 621.7.019.5: 621.7.08

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЕ

© 2017 г. **Е. И. Яблочников**, канд. техн. наук; **А. В. Пирогов**, канд. техн. наук;
С. Д. Васильков, канд. техн. наук; **Ю. С. Андреев**, канд. техн. наук;
Н. А. Демкович, аспирант

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: pirogov@corp.ifmo.ru

Рассмотрен интегрированный подход к разработке и моделированию технологических процессов производства изделий из полимерных оптических материалов. Описаны процессы технологической подготовки производства в распределенной интегрированной среде, реализованной на базе системы управления данными. Представлены результаты исследования влияния конструктивно-технологических факторов на оптические свойства линзы. Исследование проводилось с помощью численных методов в программе компьютерного моделирования процесса литья под давлением, а также экспериментальным путем. Выявлено влияние факторов, связанных с конструкцией литниковой системы и давлением выдержки на точность формы получаемого оптического изделия и на показатель преломления полимерного материала, а скорости подачи материала в литьевую форму – на линейную усадку и двойное лучепреломление. Контроль оптических свойств готовых изделий подтвердил соответствие полученных характеристик требуемым.

Ключевые слова: полимерная линза, распределенная интегрированная среда, литье под давлением, компьютерный инженерный анализ, технологические параметры, оптические свойства.

Коды OCIS: 220.3630, 220.2740

Поступила в редакцию 18.10.2016

Введение

Изделия из термопластичных оптических материалов широко применяются в приборах различного назначения. Исследование процессов разработки, моделирования и производства подобных изделий раскрывает дополнительные возможности для повышения производительности труда, в том числе за счет параллельного выполнения отдельных процессов, и улучшения эксплуатационных характеристик [1].

На этапах проектирования и технологической подготовки производства (ТПП) могут применяться различные системы автоматизированного проектирования и компьютерного моделирования. При этом актуальным является решение теоретических и прикладных задач по разработ-

ке технологий и методик для обеспечения точности изготовления и повторяемости заданных параметров изделий из полимерных и полимерных композиционных материалов [2, 3].

Например, для выбора конструктивных решений для литниковой системы, расположения каналов системы охлаждения литьевой формы, а также для прогнозирования поведения расплава полимерного материала предлагается применять современные системы инженерного анализа (*Computer-Aided Engineering* – CAE-системы), с помощью которых проводится анализ параметров процесса производства [4].

В статье предложены процессы проектирования и ТПП полимерных оптических изделий на примере линзы, представлены результаты исследований по обработке информации,

появляющейся в процессе ТПП, в единой информационной системе, а также исследований по моделированию и оптимизации процесса литья под давлением, приведено сравнение результатов моделирования с реальным экспериментом и выполнен анализ полученных характеристик.

Таким образом, оказывается возможным существенно сократить время проектирования конструкции литьевой оснастки путем применения оптимизационных подходов, управления проектными данными и принятия разработчиками решений на основе данных, накопленных в базе знаний. В то же время применение компьютерных систем моделирования процесса литья под давлением для выбора технологических параметров позволяет улучшить оптические характеристики оптических элементов и выявить закономерности, характеризующие влияние технологических факторов на качество изделия.

Процесс технологической подготовки производства при создании нового изделия в распределенной интегрированной среде

Создание нового изделия – это сложный процесс, реализация которого требует своевременной передачи информации между специалистами и оперативного анализа полученных данных. Проектирование изделия и литьевой оснастки, технологическая подготовка производства и натурные испытания в рамках данного исследования велись на базе различных технологических площадок. Это потребовало создания единой информационной среды, реализованной на базе системы управления данными об изделии (*Product Data Management – PDM-система*). Связь между участниками проекта осуществлялась посредством удаленного доступа, что позволило оперативно принимать решения и вносить изменения на всех стадиях выполнения исследований.

В интегрированном процессе производства изделий оптического назначения применяется метод групповой технологии, который подразумевает классификацию деталей и объединение их в семейства, представляющие собой совокупность объектов, подобных друг другу по форме, размерам, материалам и технологическим процессам изготовления [5]. В случае литья под давлением при обосновании принад-

лежности изделия к группе учитываются особенности литьевой оснастки и литьевой машины. Подобный подход позволяет использовать унифицированные переналаживаемые литьевые формы.

В качестве объекта исследования выбрана плосковогнутая линза диаметром 24 мм со световым диаметром поверхности 17 мм, толщиной в диапазоне от 3,0 до 4,2 мм, изготавливаемая из поликарбоната *Makrolon LED 2245* компании *Bayer Material Science*. На рис. 1 представлен эскиз линзы. Компьютерное моделирование процессов литья для различных вариантов конструкции литниковой системы (рис. 2) и параметров технологических процессов выполнялось в программе *Moldex3D R12*. Для получения прототипов литьевой оснастки и линзы использовался 3D принтер *Objet Eden 350V*.

Переналаживаемая литьевая форма с комбинированной горяче-холодноканальной системой изготовлена из сталей 45 (1.1730) и 40ХГМА (1.2312), а формообразующие детали (ФОД) для малой серии изделий – из алюминиевого сплава Д16 [6]. При производстве окончательного варианта комплекта ФОД использовались станки *HAAS Super MiniMill*,

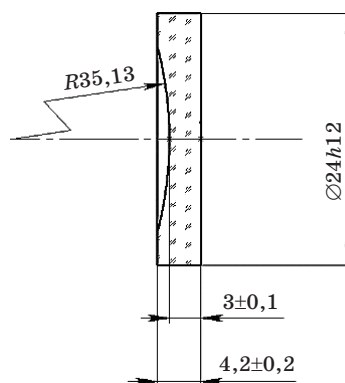


Рис. 1. Эскиз исследуемой линзы.

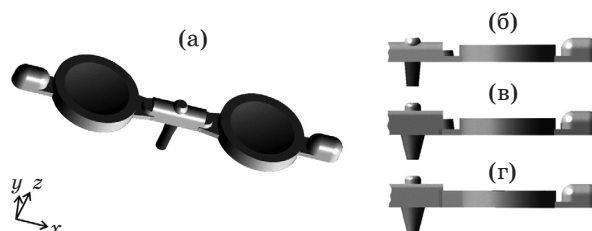


Рис. 2. 3D модель отливки для двугнездной литьевой формы (а), варианты конструкции литниковой системы 1 (б), 2 (в) и 3 (г) с различной геометрией впускного литника (см. табл. 1.)

HAAS SL-1 и *Primacon PFM 24NGD*, а для получения оптических поверхностей на формообразующих поверхностях использовался станок *Nanoform 250*. При изготовлении линз литьем под давлением применялась литьевая машина *Ferromatik Milacron EE30-55*. Информационная поддержка и управление проектом при разработке и моделировании ТПП полимерных изделий реализованы в PDM-системе *SmarTeam* [7].

Внедрение систем компьютерного моделирования деталей и узлов, автоматизированного проектирования технологической оснастки и распределенных систем поддержки принятия решений способствует улучшению организации процессов проектирования, ТПП и производства при разработке новых изделий [8–10].

Процессы проектирования и ТПП изделий оптического назначения имеют итерационный характер. Разработанные алгоритмы и решения используются в качестве аналогов при проектировании новой продукции. Информационная интеграция данных об оптическом изделии в PDM-системе позволяет обеспечить доступ к актуальной информации различным специалистам на всех этапах жизненного цикла изделия. Управление рабочими процессами, такими как конструкторская и технологическая подготовка производства, в PDM-системах осуществляется с помощью *WorkFlow*-процессов. На рис. 3 приведен пример схемы рабочего процесса (“Проектирование оснастки для изготовления полимерной линзы”), выполненной в нотации PDM-системы *SmarTeam* (модуль *SmarTeam WorkFlow*).

Основой предложенного процесса является ряд документов, включающий техническое задание, чертеж и 3D модель линзы и оптической системы, поясняющие отчеты. Данные об изделии передаются на хранение в систему управления данными (PDM-систему), с помощью которой отслеживаются все вносимые изменения. Это обеспечивает целостность, полноту и актуальность данных об изделии. Документы

отображаются встроенным модулем просмотра и при необходимости могут редактироваться в зависимости от прав доступа. На этапе конструирования формообразующих деталей создаются и сохраняются несколько вариантов таких комплектов деталей со всей необходимой конструкторской и технологической документацией [11]. Поиск оборудования осуществляется по базе данных. Выполняется подбор максимально подходящего по заданным параметрам оборудования, которое затем связывается программным способом с изделием при использовании паспорта оборудования.

В случае применения программ компьютерного моделирования соответствующие результаты представляются в виде объекта типа “компьютерный инженерный расчет”, к которому присоединяются соответствующие файлы из САЕ-системы. Также проводятся расчеты влияния механических и тепловых нагрузок на линзу или оптический узел в программе *OOFELIE* при интеграции с программой *Zemax*. Помимо этого в проекте закрепляются данные контроля геометрии и шероховатости оснастки и линз, а также требуемых оптических свойств. Рассмотрим некоторые этапы исследования более подробно.

Анализ напряженно-деформированного состояния полимерной линзы при термомеханическом нагружении и проектирование технологической оснастки

Начальный этап проекта заключался в разработке оптической системы с дальнейшим анализом напряженно-деформированного состояния полимерной линзы при термомеханическом нагружении, что было реализовано в программах *Zemax* и *OOFELIE 4.2* [12]. Например, был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния линзы в корпусе из акрилонитрилбутадиенстирола (АБС-пластика), на которую действует нагрузка 100 Н в направлении,



Рис. 3. Схема алгоритма проведения исследований.

перпендикулярном оптической оси. Рассчитанные механические напряжения в деталях конструкции не превысили предела текучести материала каждой конкретной детали.

Возможна интеграция трех САЕ-систем для повышения точности прогноза. В таком случае исходные данные о 3D модели отливки формируются в программе Moldex3D. На основе полученных результатов моделирования процессов литья был спроектирован сменный комплект ФОД для переналаживаемой литьевой формы [6].

Применение аддитивных технологий на этапе ТПП позволило сократить время проектирования литьевой оснастки [13]. Прототипы линзы и комплекта ФОД использовались в качестве концептуальной модели для визуализации, анализа конструкции на технологичность и проверки ее кинематики. Также аддитивные технологии могут быть применены для изготовления готовой литьевой оснастки серийных изделий сложной формы при послойном лазерном спекании металлического или полимерного композиционного порошкообразного материала [13]. При этом требуется решить задачу обеспечения заданной точности формообразующей поверхности литьевой оснастки для формирования оптических поверхностей линзы.

Подготовка управляющих программ осуществлялась в CAD (Computer-Aided Design – автоматизированное проектирование)/CAM (Computer-Aided Manufacturing – автоматизированная технологическая подготовка производства) – системе Cimatron E с верификацией в программе VERICUT для выявления ошибок траектории движения инструмента и ее оптимизации.

Моделирование технологического процесса литья под давлением и сравнение с результатами реальных экспериментов

Для выявления и анализа различных зависимостей на этапах проектирования и ТПП был разработан алгоритм проведения исследований, схема которого представлена на рис. 4. На основании исходных данных и с учетом возможностей имеющегося оборудования формируется первичное конструкторское решение, которое реализуется в САЕ-системе. На этом этапе определяется состав применяемых САЕ/САЕ-систем и оборудования (металлообра-

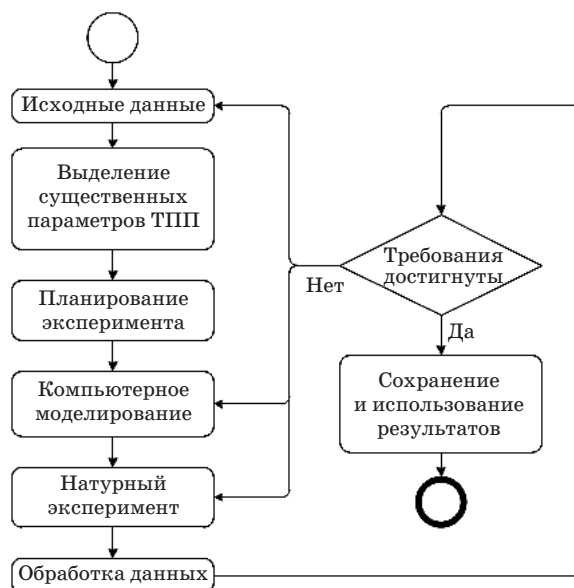


Рис. 4. Схема рабочего процесса “Проектирование оснастки для изготовления полимерной линзы”.

тывающее, литьевое и контрольное). Затем осуществляется планирование эксперимента, определяются факторы и их уровни, например, технологические параметры литья под давлением, геометрия изделия или оснастки и др. Проводится серия экспериментов по компьютерному инженерному расчету, после чего результаты анализируются и выбираются оптимальные уровни факторов для улучшения рассматриваемого параметра. На их основе реализуется натурный эксперимент (литье полимерных линз) и проводятся исследования необходимых параметров. Результаты сравниваются с исходными требованиями, делаются выводы об их выполнении и данные сохраняются в PDM-системе. В случае если требования не удовлетворены, последовательность действий повторяется целиком или частично.

При использовании программных средств компьютерного моделирования процессов литья под давлением необходим личный опыт конструирования литьевой оснастки и понимание причин возникновения дефектов, поскольку существующие теоретические модели не могут полностью описать литьевые процессы полимерных материалов.

При выборе конструктивно-технологических решений, обеспечивающих требуемое качество и стабильность оптических свойств линзы, необходимы учет особенностей материала, геометрии изделия, литьевой формы и режи-

мов литья [3, 14]. На точность компьютерного моделирования большое влияние оказывают размер и форма создаваемой конечно-элементной сетки. Ввиду особенностей течения расплава была применена комбинированная гибридная сетка: вдоль поверхности 3D модели была построена сетка из призматических элементов с основанием из четырех- или шестиугольников, позволяющая детально описать форму отливки, а внутренний объем сформирован с помощью тетраэдров.

Качество получаемого изделия определяется совокупностью факторов, степень влияния которых можно оценить с учетом выявленных в процессе исследования зависимостей [15]. С помощью статистического метода планирования эксперимента, а именно метода Тагути [16, 17], в САЕ-системе Moldex3D было выявлено влияние технологических факторов на геометрические и оптические свойства линзы: усадку, коробление, двулучепреломление и показатель преломления. По предварительным данным [18] были определены шесть контролируемых факторов для проведения эксперимента: три варианта конструкции литниковой системы (рис. 2) (*A*), скорость впрыска (*B*), температура расплава (*C*), температура литьевой формы (*D*), давление выдержки (*E*) и время выдержки на охлаждение (*F*), указанные в табл. 1. Варианты конструкции литниковой системы были выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможность оценки влияния толщины разводящих и впускных литниковых каналов на процесс лития поликарбоната [19]. Увеличение толщины впускного литникового канала облегчает переориентацию течения за фронтом расплава в области входа в формообразующую полость, способствуя снижению риска появления струйного течения и следов течения. Но такое увели-

чение затрудняет отделение литника от линзы и может вызвать обратное течение расплава при выдержке, увеличивая усадку материала и градиент его плотности.

Для проведения исследования по методу Тагути выбран 6-факторный ортогональный набор L18 с тремя уровнями, содержащий комбинацию уровней факторов для 18-ти экспериментов [14]. Каждый параметр определялся на основе данных моделирования в программе Moldex3D в контрольных точках, расположенных на поверхностях технологической кромки (1 и 3), в центре масс линзы (2) и на световом диаметре внутри объема линзы (4 и 5), как показано на рис. 5.

С целью выявления факторов, оказывающих наибольшее влияние на характеристики линзы, была проведена оценка значений обобщенных откликов (отношение сигнал/шум) выходных характеристик, полученных в результате компьютерного моделирования [20]. В качестве исследуемых параметров были выбраны следующие: объемная усадка (S_V), продольная (S_L) и поперечная (S_T) линейные усадки, коробление (W),

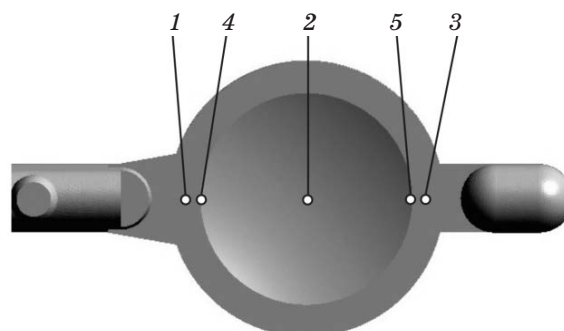


Рис. 5. Точки на поверхности для измерения показателя преломления (4, 2, 5), двойного лучепреломления (4, 2, 5), усадки и коробления (1, 2, 3).

Таблица 1. Контролируемые факторы и их уровни

Обозначение	Контролируемый фактор	Уровни и значения		
		1	2	3
<i>A</i>	Конструкция литниковой системы	1	2	3
<i>B</i>	Скорость впрыска (V), см ³ /с	35	40	45
<i>C</i>	Температура расплава (T_{melt}), град	280	300	320
<i>D</i>	Температура литьевой формы (T_{mold}), град	80	87,5	95
<i>E</i>	Давление выдержки (P_{pack}), МПа	30	55	80
<i>F</i>	Время охлаждения (t_{cool}), с	10	27,5	45

Примечание. Последовательными числами от 1 до 3 обозначены варианты конструкции литниковой системы (см. рис. 2).

показатель преломления (n), двулучепреломление ($|\Delta n|_{\max}$).

Анализ значений S_V в линзе показал, что усадка увеличивается по мере удаления от впускного литникового канала при постоянной толщине линзы, так как при входе в формообразующую полость давление выше и материал уплотняется больше [18].

Основными факторами, влияющими на S_V , оказались геометрия литниковой системы (A) и давление выдержки (E), что следует из рис. 6. На фактор A наибольшее влияние оказали размеры сечения разводящего и впускного литников. На оси абсцисс указаны факторы ($A-F$) технологических параметров и их уровни (1–3, см. табл. 1): чем больше изменение, тем большее влияние оказывает фактор. Комбинация указанных двух факторов определяет основное поведение S_V при равномерном охлаждении.

Аналогично, анализ полученных значений откликов “сигнал/шум” для n показал, что основное влияние на него оказывают размеры сечения впускного и разводящего литниковых каналов (A), температура расплава (C) и давление выдержки (E).

Такие факторы, как температура литьевой формы (D) и время выдержки на охлаждение (F), оказывают наименьшее влияние на рассматриваемые характеристики линзы. Для большей наглядности в табл. 2 представлена оценка влияния факторов на некоторые характеристики линзы: чем меньше значение в ячейке таблицы, тем большее влияние наблюдается (максимальное соответствует единице, минимальное – шести).

Таким образом, для сохранения заданной формы линзы следует особое внимание уделять сочетанию таких факторов, как геометрия впускного литникового канала, а именно высота в сравнении с толщиной линзы, и давление выдержки. При этом может возникать градиент плотности, влияющий на показатель прелом-

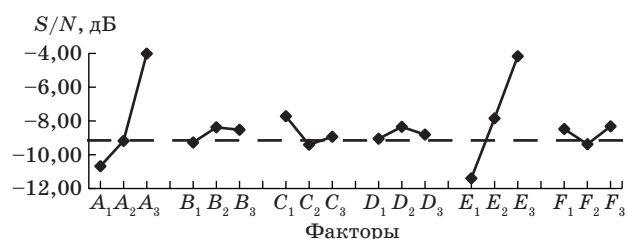


Рис. 6. Отношение сигнал/шум каждого из факторов и их уровней, влияющих на объемную усадку (S_V) в центре линзы.

Таблица 2. Оценка приоритетов конструктивно-технологических факторов при влиянии на характеристики плосковогнутой полимерной линзы

Факторы \ Параметры	A	B	C	D	E	F
S_V	2	5	3	6	1	4
S_L	6	1	2–3	2–3	4	5
S_T	3	1	4	5–6	2	5–6
W	2	5	3	4	1	6
n	1	5	3	4	2	6
$ \Delta n _{\max}$	5	2	1	6	3	4

ления. Управление этими факторами следует проводить на этапе разработки литьевой оснастки, применяя компьютерный инженерный расчет. На продольную и поперечную усадки влияет, в основном, скорость впрыска, которая формирует фронт расплава. При повышенной температуре возможно появление дополнительных остаточных напряжений, а значит более выраженного эффекта двулучепреломления. В результате проведенных исследований оптимальным набором технологических параметров из табл. 1 стал набор $A_3B_2C_2D_3E_3F_1$ с небольшой корректировкой давления выдержки с 80 до 70 МПа, чтобы избежать возникновения отрицательной усадки.

Контроль характеристик изделия

Контроль геометрии и шероховатости полученных полимерных линз осуществлялся в два этапа: вначале контролировались ФОД на этапе ТПП, а затем готовые изделия. Далее был проведен контроль некоторых оптических свойств. С помощью контрольно-измерительной машины *Global Performance 05.07.05* был проведен контроль геометрии ФОД, а с помощью профилометра *Hommel Tester T8000* – контроль шероховатости и профиля для расчета процента усадки. По результатам измерений наблюдалось варьирование линейной усадки до 1,5%, что связано с разной толщиной изделия. С приближением к центру линзы значения усадки и коробления уменьшаются, а значит, геометрические и оптические свойства в световом диаметре оказываются ближе к требованиям чертежа, о чем говорят измерения общей ошибки номинального радиуса кривизны и фокусного расстояния. Сравнивая эти данные и результаты компьютерного моделирования,

Выводы

мы наблюдаем отличия в максимальном уменьшении значений линейной усадки 5,3%, коробления по направлению движения расплава 5,5%, а поперек направления движения расплава – 4,9%.

Требования к оптическим параметрам указываются в таблице на чертеже. Одним из важных параметров является точность формы оптических поверхностей линзы: общие и местные отклонения на чертеже заданы числом интерференционных колец N и ΔN .

Для контроля линзы был использован метод наложения пробных стекол с пробным стеклом II класса точности, с радиусом кривизны 35,08 мм с предельным отклонением 0,014 мм [21]. Так как радиус используемого пробного стекла отличается от радиуса измеряемой детали, был проведен пересчет ошибки N в зависимости от диаметра пробного стекла. Разность стрелки прогиба обоих стекол составила 0,001769 мм, что примерно соответствует $N = 7$ колец. В результате измерений была получена ошибка, равная 15 кольцам, что превышает допустимое отклонение на 4 кольца. Чистота поверхности соответствует IV классу чистоты по заданным требованиям.

Контроль фокусного расстояния проводился на аппарате *Trioptics OptiSpheric*. Расчетное значение фокусного расстояния линзы из материала *Makrolon LED 2245* с показателем преломления $n = 1,586$ составило 59,949 мм. Так как на чертеже фокусное расстояние указано для длины волны инфракрасного излучения 940 нм, а в установке используется источник с длиной волны 546 нм, то был необходим пересчет измерений. В результате фокусное расстояние составило 59,161 мм. Погрешность составляет 1,3%, что допустимо и говорит о соответствии радиуса кривизны исходным требованиям.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of plastic optics / Ed. by Bäumer S. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011. 308 p.
2. Освальд Т., Тунг Л.Ш., Грэмманн П.Д. Литье пластмасс под давлением / под ред. Калинчева Э.Л. СПб.: Профессия, 2006. 712 с.
3. Schaub M.P. The design of plastic optical systems. Bellingham: SPIE Press, 2009. 215 p.
4. Yang Y., Yang B., Zhu S., Chen X. Online quality optimization of the injection molding process via digital image processing and model-free optimization // J. Materials Proc. Technology. 2015. V. 226. P. 85–98.
5. Валетов В.А., Помпеев К.П. Технология приборостроения: учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 234 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., 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 (106). С. 100–104.
8. Wu D., Rosena D.W., Wangb L., Schaefer D. Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation // Computer-Aided Design. 2015. V. 59. P. 1–14.
9. Koch M., Sturm S., Dungen M. Innovationsfelder der Kunststofftechnik. Roadmap für die Thüringer Kunststoffverarbeitungsindustrie. TU Ilmenau, 2011.
10. Bangemann T., Karnouskos S., Delsing J., Stluka P., Harrison R. Industrial cloud-based cyber-physical systems. Springer International Publishing, 2014. 245 p.
11. 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. V. 6. № 4. P. 94–103.
12. Mazzoli A., Saint-Georges P., Orban A., Ruess J.-S., Loicq J., Barbier C., Stockman Y., Georges M., Nachtergaele P., Paquay S., Vincenzo P. Experimental validation of opto-thermo-elastic modeling in OOFELIE Multi-physics // SPIE Optical Systems Design. International Society for Optics and Photonics, 2011.
13. Яблочников Е.И., Грибовский А.А., Пирогов А.В. Эффективность применения аддитивных технологий для изготовления литевых форм и при подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов // Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 74–80.
14. Lo W.C., Tsai K.M., Hsieh C.Y. Six Sigma approach to improve surface precision of optical lenses in the injection-molding process // Intern. J. Advanced Manufacturing Technology. 2009. V. 41. № 9–10. P. 885–896.
15. Powell S., Fisher D. Polymer optics gain increased precision // Laser Focus World. 2007. V. 43. № 6. P. 111–117.
16. Robust design methodology for reliability: Exploring the effects of variation and uncertainty / Ed. by Bergman B. John Wiley & Sons, 2009. 191 p.
17. Montgomery D.C. Design and analysis of experiments. 8th ed. John Wiley & Sons, 2012. 752 p.
18. Yablochnikov E.I., Pirogov A.V., Vasilkov S.D., Andreev Y.S., Barvinsky I.A. Studies of design and technology influence on optical properties of injection molding parts by simulation // Proc. 58th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau. 2014. P. 1–12.
19. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб.: Профессия, 2007. 560 с.
20. Гордон М.Дж. Управление качеством литья под давлением. СПб.: Научные основы и технологии, 2012. 823 с.
21. Пирогов А.В., Васильков С.Д., Савченко В.П. Контроль качества оптических изделий из термопластичных полимерных материалов // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 8. С. 61–64.