

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНИКЕ

**№6
2021
Том 13**

Издается
с января 2009 г.

Рекомендован ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций
на соискание ученых степеней кандидатов и докторов наук
по группам специальностей 01.02.00, 01.04.00, 05.07.00

Официальное издание Национального комитета РАН по тепло- и массообмену

Главный редактор

академик РАН *О.М. Алифанов*.

Заместители главного редактора

проф. *А.С. Мякочин*, проф. *А.В. Ненарокомов*

Состав редакционного совета

академик РАН *В.В. Костюк* (председатель),
академик РАН *А.В. Клименко* (зам. председателя),
академик РАН *С.В. Алексеев*,
чл.-корр. РАН *А.А. Иноземцев*,
академик РАН *Б.И. Каторгин*,
академик РАН *В.И. Колесников*,
академик РАН *А.И. Леонтьев*,
чл.-корр. РАН *А.Н. Павленко*,
академик РАН *В.М. Фомин*.

Состав редколлегии

Россия:

г. Москва – чл.-корр. РАН *А.Ю. Варакин*;
д.т.н., проф. *А.М. Губертов*; д.т.н., проф. *И.В. Деревич*;
д.т.н., проф. *Б.В. Дзюбенко*; д.т.н. *Л.А. Домбровский*;
д.т.н., проф. *В.С. Зарубин*; д.ф.-м.н., проф. *Э.М. Карташов*;
д.т.н., проф. *Ю.А. Кузма-Кичта*; д.т.н. *Ю.М. Липницкий*;
к.т.н. *Н.В. Медвецкая*; д.т.н., проф. *О.В. Митрофанова*;
к.т.н., доц. *А.В. Моржухина* (ученый секретарь);
д.т.н. *М.Ю. Русин*; д.т.н. *В.С. Финченко*;
д.т.н., проф. *В.В. Черепанов*; д.ф.-м.н., проф. *В.П. Шутяев*;
д.т.н., проф. *Л.С. Яновский*

г. Воронеж – д.т.н., проф. *В.М. Попов*

г. Казань – д.т.н., проф. *С.Э. Тарасевич*

г. Новосибирск – д.ф.-м.н. *В.В. Кузнецов*

г. Омск – д.т.н., проф. *В.В. Шалай*

г. Рыбинск – д.т.н., проф. *Ш.А. Пиралишвили*

г. Самара – д.т.н., проф. *М.Ю. Лившиц*;

г. С.-Петербург – д.т.н., проф. *Г.Т. Алдошин*
д.т.н., проф. *С.З. Сапожников*

г. Таганрог – д.ф.-м.н., проф. *А.И. Жорник*

г. Уфа – д.т.н., проф. *Н.М. Цирельман*

Беларусь: академик НАН Беларуси *А.А. Михалевич*;
чл.-корр. НАН Беларуси *Н.В. Павлюкевич*

Италия: проф. *М. Маркетти*

Франция: проф. *Ж.-Ф. Сакадура*; проф. *И. Жарни*

США: проф. *М.П. Менгуч*; проф. *А.Ф. Эмери*

Украина: академик НАН Украины *Ю.М. Мацевитый*

Япония: проф. *Н. Нагаи*

СОДЕРЖАНИЕ

Зарубин В.С., Зарубин С.В., Осадчий Я.Г.

Интенсификация теплоотвода
при заполнении баллона
газообразным водородом 242

Черепанов В.В., Бобошина С.Б.,

Лихущина Е.В., Побережский С.Ю.

Измерение коэффициентов теплопроводности
жидкостей и жидких сред
при различных температурах 253

Аттетков А.В., Волков И.К.

Автомодельные процессы теплопереноса
в твердом теле с осесимметричным
тепловым источником 258

Кочнев К.В., Ненарокомов А.В.

Моделирование теплообмена в симуляторе
лунного реголита. Постановка задачи* 264

Попов В.Э.

Влияние ингибиторов на догорание и образование
вредных выбросов на больших высотах 269

Ларионов И.С., Балькаев Д.А., Амирова Л.М.

Подбор оптимальных параметров литья
под давлением при помощи Moldflow 275

При использовании
материалов журнала в любой форме
ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции:
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4
тел.: +7 499 158-45-19
e-mail: tpt@mai.ru

© МАИ, 2021

УДК 541.66

Подбор оптимальных параметров литья под давлением при помощи Moldflow*

И.С. Ларионов¹, Д.А. Балькаев^{1,2}, Л.М. Амирова¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ им. А.Н. Туполева, г. Казань, 420111, Россия

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия
e-mail: larionov_igor1999@mail.ru, dinar.balkaev@yandex.ru, amirovaliliyam@mail.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-6-275-285

Поступила в редакцию 05.05.2021

После доработки 15.05.2021

Принята к публикации 21.05.2021

Работа посвящена изучению течения расплава полипропилена при литье под давлением и улучшению качества отливаемой детали путем нахождения оптимальных параметров литья. Из-за высокой стоимости оборудования и оснастки выбор оптимальных параметров литья для каждого отдельно взятого изделия является одной из главных проблем и задач метода литья под давлением, частично решаемой применением методов компьютерного анализа. Изучение тенденций при изменении параметров литья проводилось на базе программного обеспечения Moldflow Insight путем оценивания остаточных напряжений, деформации, напряжения сдвига в расплаве и др. Для анализа была построена деталь «Крышка корпуса квадрокоптера», изготавливаемая методом литья под давлением. По итогу данного исследования удалось добиться значительного снижения остаточных напряжений, при этом сохраняя высокое качество изделия.

Ключевые слова: литье под давлением, полипропилен, Moldflow, параметры литья, моделирование литья.

Введение

Литье под давлением является самым распространенным в мире методом производства изделий из полимерных материалов, так как он сочетает в себе высокую точность изготовления деталей и небольшую продолжительность технологического процесса, а также отлично подходит для крупносерийных производств [1]. На процесс литья и соответственно качество формируемого изделия влияют множество факторов: расположение питателей литниковой системы, температура литьевой формы, температура расплава полимера, время заполнения, давление впрыска, время охлаждения и др., – каждый из которых необходимо учитывать. Поскольку

пластик обладает труднопрогнозируемыми не-ньютоновскими термовязкоупругими свойствами, сложность процесса формования делает очень трудным достижение желаемых свойств изделия и затрудняет поддержание качества детали во время производства [2–4]. Некорректно подобранные параметры способны вызвать ряд дефектов, неполное заполнение формы или высокие остаточные внутренние напряжения отливки, что снижает диапазон применения изделия или вовсе делает его непригодным для эксплуатации. По этой причине нахождение оптимальных параметров литья для каждого отдельно взятого изделия является одной из главных проблем и задач метода литья под давлением.

Кроме того, метод литья под давлением подразумевает использование дорогих формообра-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90116.

зующей оснастки и инжекционного оборудования [5], из-за чего выпуск новой детали в производство всегда сопровождается расчетами оптимальных параметров не только технологического процесса, но и литьевой формы [6]. Данный процесс сопряжен с риском появления ошибок на этапе разработки, цена каждой из которых высока, или же неполной реализации возможностей производства [7] и, кроме того, вынуждает проверять качество процесса экспериментальным путем, что тоже усложняет и удорожает его. Для решения перечисленных проблем в последние десятилетия все активнее применяются методы компьютерного анализа, позволяющие оптимизировать производственный процесс, значительно упрощающие проектировочные расчеты и повышающие энерго-ресурсоэффективность технологического процесса, что положительно влияет на экономические затраты.

Объекты и методы исследования

В качестве платформы для проведения анализа литья под давлением и симуляции течения расплава было выбрано программное обеспечение Moldflow Insight, разработанное компанией Autodesk. Программный комплекс Moldflow широко используется в целях выявления технологических особенностей поведения полимерного материала и принятия обоснованных инженерных решений при проектировании детали, пресс-формы и технологического процесса литья [8–12]. Данное программное обеспечение обладает богатым инструментарием, позволяющим решать разнообразные проектировочные и технологические задачи, предсказывая поведение расплава полимера в широком диапазоне условий.

Для моделирования и расчетов остаточных напряжений использованы следующие математические модели.

Общий вид анизотропной зависимости напряжения от деформации для линейной термовязкоупругости:

$$\sigma_{ij} = \int_{-\infty}^{\xi(t) - \xi(t')} c_{ijkl} \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t'} dt' - \int_{-\infty}^{\xi(t) - \xi(t')} \beta_{ij} \left(\xi(t) - \xi(t') \right) \frac{\partial T}{\partial t'} dt', \quad (1)$$

где c_{ijkl} и β_{ij} – тензоры, определяющие механические и термические характеристики материала соответственно; $\xi(t)$ – псевдовременная шкала, которая учитывает температурную зависимость материала и определяется уравнением:

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{1}{a_T} dt'; \quad (2)$$

a_T – коэффициент температурно-временного сдвига, характеризуемый уравнением ВЛФ или уравнением Аррениуса в зависимости от материала и диапазона температур.

Максимальное σ_1 и минимальное σ_2 нормальные напряжения определяются из уравнений:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (4)$$

где σ_{xx} – нормальное напряжение в первом основном направлении; σ_{yy} – нормальное напряжение во втором основном направлении.

Угол для σ_{xx} и σ_{yy} рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}. \quad (5)$$

Термовязко-упругая модель была дополнена с учетом результатов измерения усадки, внесенных в базу данных Autodesk Moldflow. Это возможно за счет использования теоретической модели в качестве одной из независимых переменных в гибридной модели, которая коррелирует с измеренными данными усадки для уменьшения расхождения между измеренной и прогнозируемой усадками. Полученная модель называется моделью скорректированного остаточного напряжения в форме CRIMS.

Объектом исследования выбран полипропилен марки WSKM4D 777A1 от Machino Polymers Ltd., близкий по своим свойствам к марке PP 8300N производства ПАО «Нижекамскнефтехим», широко применяемой в РФ. Деталь для моделирования литья под давлением и оптимизации параметров литья спроектирована с использованием САПР Siemens NX 11. Трехмерная модель изделия «Крышка корпуса квадрокоптера» показана на рис. 1.

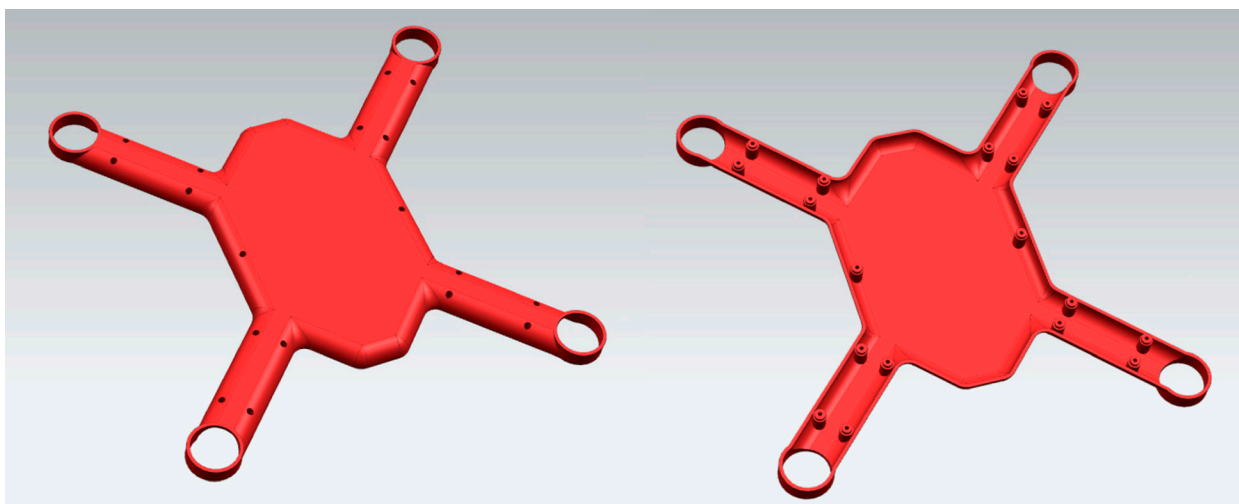


Рис. 1. Компьютерная 3D-модель детали

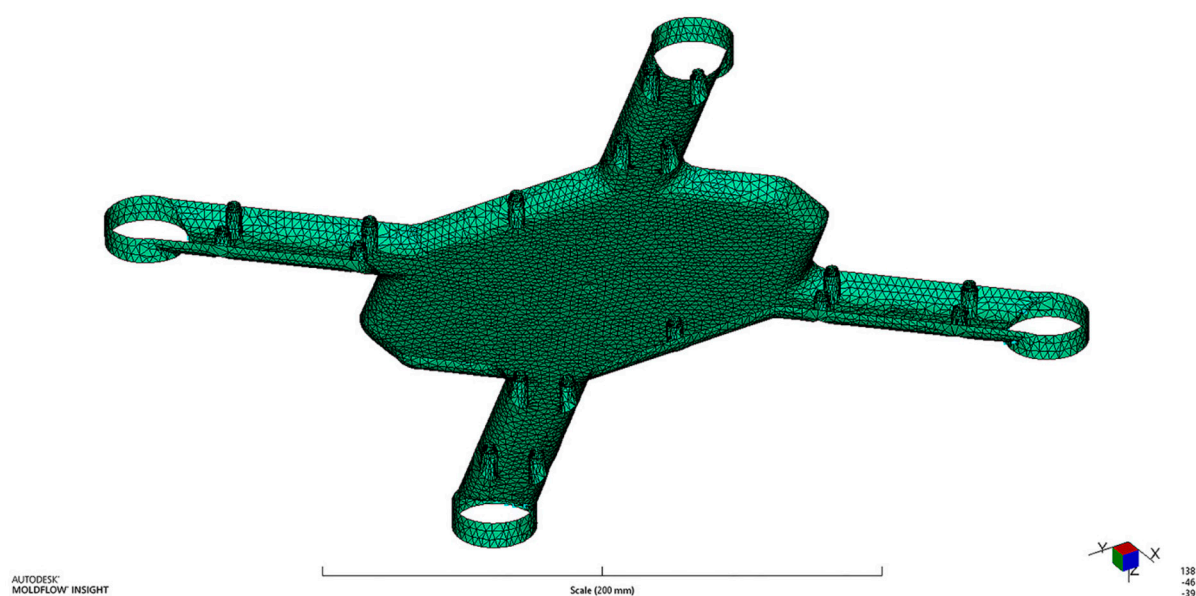


Рис. 2. Срединная поверхность детали с построенной сеткой конечных элементов

В качестве стандартных условий литья выбраны следующие параметры: температура расплава – 220°C; температура формы – 30°C; время заполнения – 1 с; время охлаждения – 30 с; давление выдержки – 80%; время выдержки – 10 с.

Результаты были получены на основе анализа срединной поверхности детали с построенной сеткой конечных элементов. Данная сеть состоит из трехузловых треугольных элементов, расположенных на половине толщины модели (рис. 2). В данной работе построенная сетка состоит из 12473 элементов (6679 узлов), среднее соотношение «длина стороны/проведенная к ней высота» равно 2.41 (минимальное –

1.16; максимальное – 30.48), а GEL (Global Edge Length) составила 3 мм.

В результате анализа был получен ряд графиков и трехмерных диаграмм, по которым происходила оценка эффективности выбранных параметров литья под давлением.

В первую очередь выполнен анализ влияния количества литьевых каналов и их положения в литьевой форме на технологический процесс и качество отливки.

При анализе оценивались следующие параметры:

1. Доля толщины затвердевшего слоя в конце заполнения, более высокое значение которой указывает на более толстый затвердевший слой

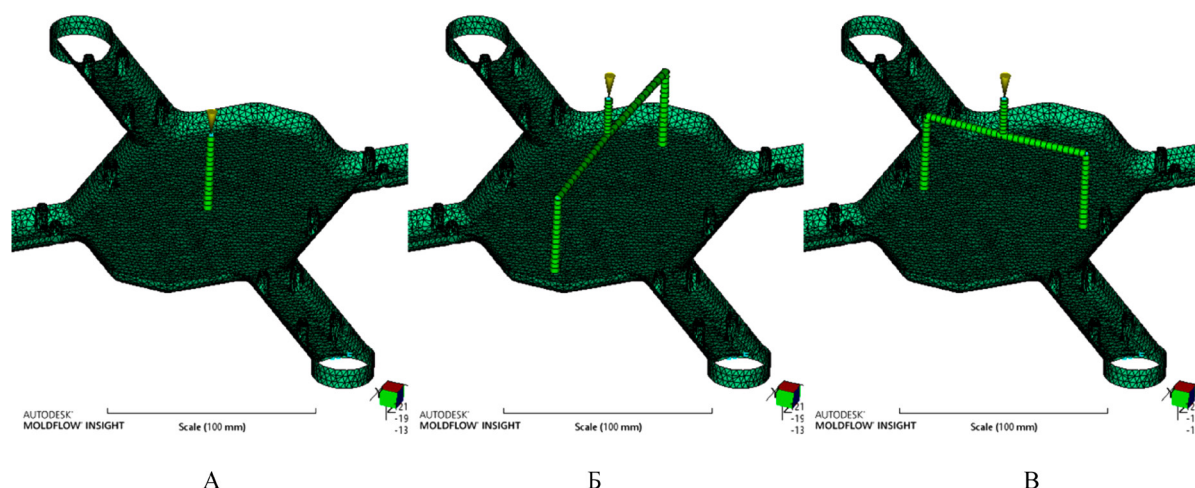


Рис. 3. Варианты расположения питателей литниковой системы

Таблица 1. Анализ количества питателей и их положения в литейной форме

Тип литниковой системы	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. / мин. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. / мин. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
А	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
Б	0.2092	0.1970	2.392	11.73	9.49	2.04	0.75
В	0.2269	0.1972	2.318	11.09	8.65	2.31	0.75

(или более тонкий слой потока). Фракция застывшего слоя очень сильно влияет на сопротивление потоку расплава [13, 14] и не рекомендуется, чтобы она превышала 0.20–0.25 в конце заполнения, так как «замороженный» слой будет препятствовать протеканию фазы выдержки под давлением.

2. Напряжение сдвига расплава на границе раздела расплав–затвердевший полимер (стенка литейной формы), так как именно на этой границе напряжение в расплаве достигает максимальных значений в любой части поперечного сечения, и оно не должно быть больше или равняться предельному напряжению сдвига расплава для используемого полимера (в представленной работе < 0.25 МПа) [15]. Области с превышением предельного напряжения могут быть подвержены растрескиванию.

3. Отклонение от математической модели детали, диаграмма которого показывает общую прогнозируемую деформацию изделия, учитывая такие факторы, как дифференциальная усадка, эффекты ориентации, дифференциальное охлаждение и угловые эффекты.

4. Остаточные напряжения в первом основном (x) и во втором (y) направлениях, для

которых положительные значения соответствуют растяжению в детали, а отрицательные – сжатию.

5. Остаточное напряжение сдвига.

6. Коэффициент качества – параметр, характеризующий изменение общего качества изделия при изменении входных параметров (температуры литейной формы, температуры плавления и времени впрыска). Этот показатель качества выводится из результатов минимальной температуры фронта потока, давления впрыска, максимального времени охлаждения, максимальной скорости сдвига и максимального напряжения сдвига при заданном наборе условий формования.

Значения остаточных напряжений являются приоритетными показателями качества, если прочие показатели находятся в пределах нормы и незначительно отличаются друг от друга.

Для выбора оптимального количества и расположения литейных каналов проведен анализ с тремя наиболее распространенными расположениями литниковых каналов для заполнения формы с минимальным количеством воздушных пор (рис. 3), результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 2. Анализ влияния температуры впрыска расплава на параметры изделия

Температура расплава, °С	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
260	0.1672	0.1781	2.298	7.36	5.90	2.19	0.51
250	0.1773	0.1835	2.316	7.87	6.30	2.07	0.57
240	0.1881	0.1893	2.341	8.49	6.69	2.10	0.63
230	0.1996	0.1962	2.375	9.07	7.18	2.06	0.69
220	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
210	0.2242	0.2122	2.463	10.92	8.14	2.20	0.82
200	0.2386	0.2208	2.513	11.08	9.28	2.31	0.89
190	0.2554	0.2298	2.555	11.63	10.18	2.31	0.84

Таблица 3. Анализ влияния температуры литьевой формы на параметры изделия

Температура формы, °С	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
100	0.0568	0.2057	2.940	13.38	14.48	1.93	0.85
90	0.0844	0.2050	2.687	10.76	12.41	1.87	0.88
80	0.1072	0.2043	2.598	9.20	10.96	1.88	0.91
70	0.1307	0.2046	2.547	8.93	8.27	2.00	0.88
60	0.1547	0.2050	2.501	9.15	6.79	2.08	0.85
50	0.1763	0.2047	2.469	9.42	6.80	2.12	0.81
40	0.1956	0.2045	2.443	9.68	7.25	2.10	0.78
30	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
20	0.2255	0.2043	2.397	10.38	7.70	2.07	0.71
10	0.2391	0.2041	2.367	10.65	7.88	2.28	0.67

Судя по результатам моделирования положения литьевых каналов, вариант А с одним питателем, расположенным по центру детали, является наиболее оптимальным выбором, так как он обладает на 16–20% меньшими остаточными напряжениями в сравнении с вариантом Б и на 10–12% – в сравнении с вариантом В. Кроме того, для него характерна меньшая протяженность линий спая, что обеспечит изделию наибольшую прочность. Вариант расположения литниковых каналов А значительно проще реализовать при изготовлении литьевой формы, что удешевляет формообразующую оснастку. В дальнейшем, во всех последующих анализах будет использоваться данный вариант расположения литников.

При проведении анализа влияния температурных параметров литья на показатели каче-

ства изделия (табл. 2) температуры впрыска расплава варьировались в интервале от 260 до 190°С с шагом 10°С, и рассматривалось отклонение конечных характеристик от условий, принятых за стандартные. Для рассматриваемого полимера максимально допустимой температурой расплава является 270°С, в связи с чем верхним пределом анализа выбрана температура 260°С. Изменения показателей качества изделия в зависимости от температуры литьевой формы моделировались в интервале температур от 100 до 10°С с шагом 10°С (табл. 3).

Результаты моделирования зависимости характеристик отливки и техпроцесса от времени заполнения литьевой формы (от 0.5 до 4 с) приведены в табл. 4. Влияние продолжительности охлаждения (от 10 до 40 с) на качество отливаемого изделия представлено в табл. 5.

Таблица 4. Анализ влияния времени заполнения формы на параметры изделия

Время заполнения, с	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
0.5	0.1271	0.2400	2.403	10.83	7.97	2.30	0.63
1	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
2	0.3250	0.1784	2.377	9.43	7.25	2.13	0.36
3	0.4217	0.1681	2.318	9.17	7.15	2.04	0.36
4	0.5603	0.1605	2.253	9.55	7.08	1.94	0.37

Таблица 5. Анализ влияния времени охлаждения на параметры изделия

Время охлаждения, с	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
10	0.2118	0.2043	2.418	10.07	7.44	2.10	0.75
20	0.2118	0.2043	2.418	10.07	7.44	2.10	0.75
30	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
40	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75

Таблица 6. Анализ влияния давления выдержки на параметры изделия

Давление выдержки, %	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
100	0.2077	0.2043	2.336	14.11	10.59	2.73	0.75
90	0.2097	0.2043	2.375	12.19	8.95	2.38	0.75
80	0.2118	0.2043	2.417	10.02	7.61	2.10	0.75
70	0.2169	0.2043	2.467	8.63	6.64	1.95	0.75
60	0.2215	0.2043	2.521	6.83	5.54	1.86	0.75
50	0.2392	0.2043	2.574	5.46	6.16	1.78	0.75
40	0.2999	0.2043	2.702	5.33	6.08	1.81	0.75
30	Недолив						

Выдержка под давлением применяется для уплотнения впрыснутого в форму полимера, вследствие чего уменьшается деформации отливки. Данный этап также может оказать существенное влияние на остаточные напряжения, изменение которых в зависимости от давления выдержки показано в табл. 6.

Помимо давления немаловажную роль играет и время выдержки, при недостатке которого расплав полимера может частично выйти через незатвердевший литниковый канал, сведя к ми-

нимуму преимуществы этапа выдержки под давлением. Чтобы предотвратить такой исход, был проведен анализ изменения времени выдержки, результаты которого приведены в табл. 7.

Судя по результатам моделирования температурных параметров (см. табл. 2), с повышением температуры расплава уменьшаются такие характеристики как остаточные напряжения, деформация, максимальное напряжение сдвига в расплаве и доля затвердевшей фракции в конце литья, т.е. улучшаются все показатели, что

Таблица 7. Анализ влияния времени выдержки на параметры изделия

Время выдержки, с	Доля затвердевшего расплава в конце заполнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. отклонение, мм	Макс. остаточное напряжение в первом главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение во втором главном направлении, МПа	Макс. остаточное напряжение сдвига, МПа	Коэффициент качества
5	0.2126	0.2043	2.969	10.57	12.29	1.91	0.75
10	0.2118	0.2043	2.418	10.07	7.61	2.10	0.75
15	0.2126	0.2043	2.411	8.07	6.75	2.08	0.75
20	0.2126	0.2043	2.411	8.08	6.77	2.08	0.75
25	0.2126	0.2043	2.411	8.08	6.77	2.08	0.75

положительно влияет на качество отливки и техпроцесса. Кроме того, разница в остаточных напряжениях между крайними значениями температуры крайне велика (37–42%), из чего можно сделать вывод, что более высокая температура расплава имеет высокий приоритет при подборе параметров формования.

Анализируя тенденции при изменении температуры формы (см. табл. 3), можно отметить, что максимальные значения остаточных напряжений достигаются при крайних значениях температуры литейной формы (при 100°C остаточные напряжения в основных направлениях достигают максимума, при 10°C – напряжение сдвига). Также при 100°C деформация отливки увеличивается до 2.940 мм, а при 10°C появляется близкая к критической доля затвердевшего расплава в конце фазы заполнения (0.2391). Наилучшим вариантом является температура 60°C из-за наименьших значений остаточных напряжений в основных направлениях (9.15 и 6.79 МПа) и относительно небольшого напряжения сдвига (2.08 МПа). Однако допустимы и температуры 70, 50 и 40°C из-за незначительных отличий (до 18%).

Время заполнения (см. табл. 4), как и температуры формы и расплава, оказывает влияние на все характеристики отливки и технологического процесса, но в меньшей степени, так как разность между остаточными напряжениями незначительна (до 16%), в то время как доля затвердевшего расплава в конце заполнения становится опасно высокой (0.3250) уже на 2-й секунде заполнения. С другой стороны, высокая скорость течения расплава, достигаемая при небольшом времени заполнения (0.5 с), ведет к высоким значениям напряжений сдвига в расплаве (0.24 МПа), приближающим их к крити-

ческому значению (0.25 МПа). При наличии выбора предпочтительно применять более длительное заполнение, так как такой подход обеспечивает изделию меньшие остаточные напряжения и деформацию, однако, как уже было отмечено, разница будет незначительна, а потому время заполнения не является приоритетным критерием.

Как показали результаты анализа (см. табл. 5), время охлаждения не влияет на конечные свойства детали, а значит времени, требуемого на затвердевание расплава, будет достаточно.

Фаза выдержки под давлением наступает, когда почти вся литейная форма заполнена. Параметр времени задается относительно максимального давления впрыска и сопровождается более медленным течением расплава, из-за чего характеристики данной фазы (давление и время выдержки) не могут повлиять на максимальное напряжение сдвига в расплаве. Что касается остальных характеристик качества, то давление выдержки (см. табл. 6) обратно пропорционально остаточным напряжениям и достигает их минимальных значений (остаточные напряжения в основных направлениях – 5.33 и 6.08 МПа, остаточное напряжение сдвига – 1.81 МПа) при 40%. При достижении давления выдержки ниже 40% не происходит полного заполнения формы и деталь признается бракованной.

Также с уменьшением давления происходит увеличение доли затвердевшего расплава в конце заполнения и отклонение геометрических контуров детали, претерпевающих резкий скачок между 50 и 40%. Следовательно, давление в 50% от максимального является оптимальным давлением выдержки, так как остаточные напряжения незначительно уступают тем, что

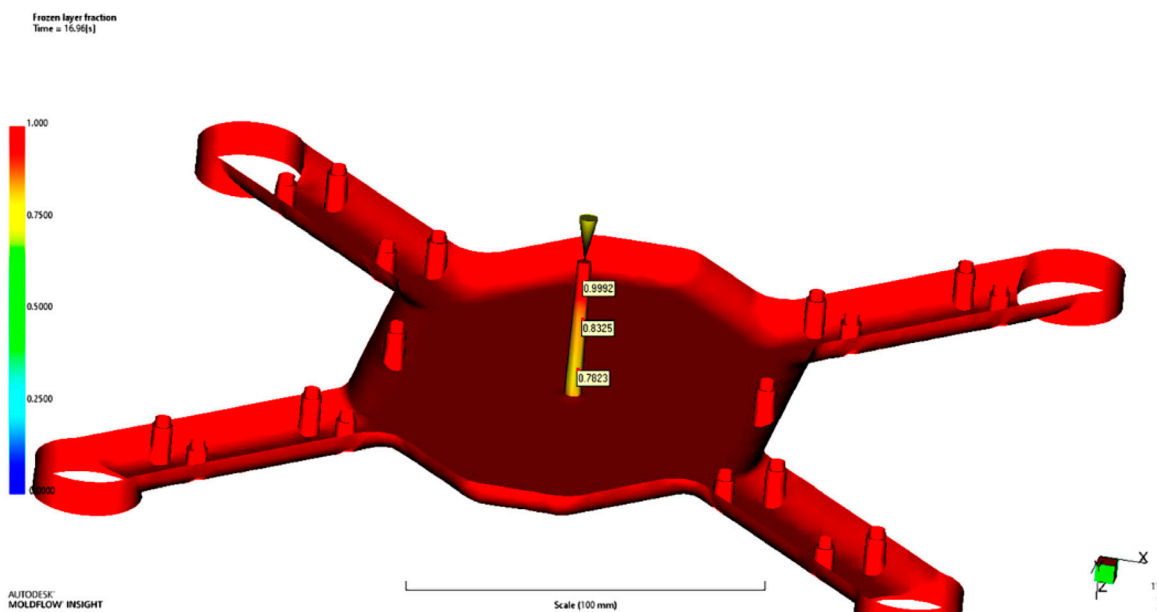


Рис. 4. Доля затвердевшего расплава на 17-й секунде технологического процесса

при 40% (не более 3% разницы), в то время как происходит заметный выигрыш по всем остальным показателям.

Что касается времени выдержки, то, согласно результатам анализа (см. табл. 7), при небольшой продолжительности фазы уплотнения деталь обладает наихудшими характеристиками. Однако после достижения 15 с, показатели перестают изменяться. Данное явление говорит о том, что необходимо охладить литниковый канал ниже температуры перехода полимера в твердое состояние прежде, чем завершится фаза выдержки под давлением. Иначе при снижении давления часть расплава может вытечь из формы через питатель. Согласно исследованию, при любых значениях входных параметров расплав в литниковом канале затвердевает уже к 20 секундам, перекрывая выход из формы (рис. 4). Ни давление, ни время выдержки не участвуют в расчете коэффициента качества и никак на него не влияют, а значит они могут быть заблаговременно выбраны и использованы для всех предварительных наборов входных параметров.

Результаты и их обсуждение

Так как среди параметров, влияющих на коэффициент качества (температура расплава, температура формы, время заполнения), высокая температура расплава имеет значительный выигрыш по всем показателям в сравнении с

более низкой температурой, среди значений 70, 60, 50, 40°C, разница между которыми незначительна, легко подобрать температуру формы, а время заполнения оказывает слабое влияние на остаточные напряжения, то наибольшим приоритетом должна обладать высокая температура расплава. Если отталкиваться от значения 260°C, то можно получить следующие зависимости коэффициента качества от температуры формы, показанные на рис. 5.

Согласно рис. 5, наибольшее значение коэффициента качества достигается при температуре формы 40°C и времени заполнения 0.6 с, а при заполнении за 0.4 и 1 с происходит его заметное падение. Минимальное необходимое время охлаждения находится из графика зависимости времени охлаждения от температуры формы при температуре расплава 260°C и времени заполнения 0.6 с (рис. 6) и равняется 12 с.

Таким образом, для первого набора параметров выбраны следующие значения: 260°C / 40°C / 0.6 с / 12 с / 50% / 20 с (температура расплава / температура формы / время заполнения / время охлаждения / давление выдержки / время выдержки). По аналогичной схеме, но с другими приоритетами были подобраны параметры для еще трех наборов. Второй набор отличается большим вниманием к температуре формы, которую старались приблизить к 60°C, третий – к времени заполнения, которое стремились сделать максимально возможным, не потеряв при

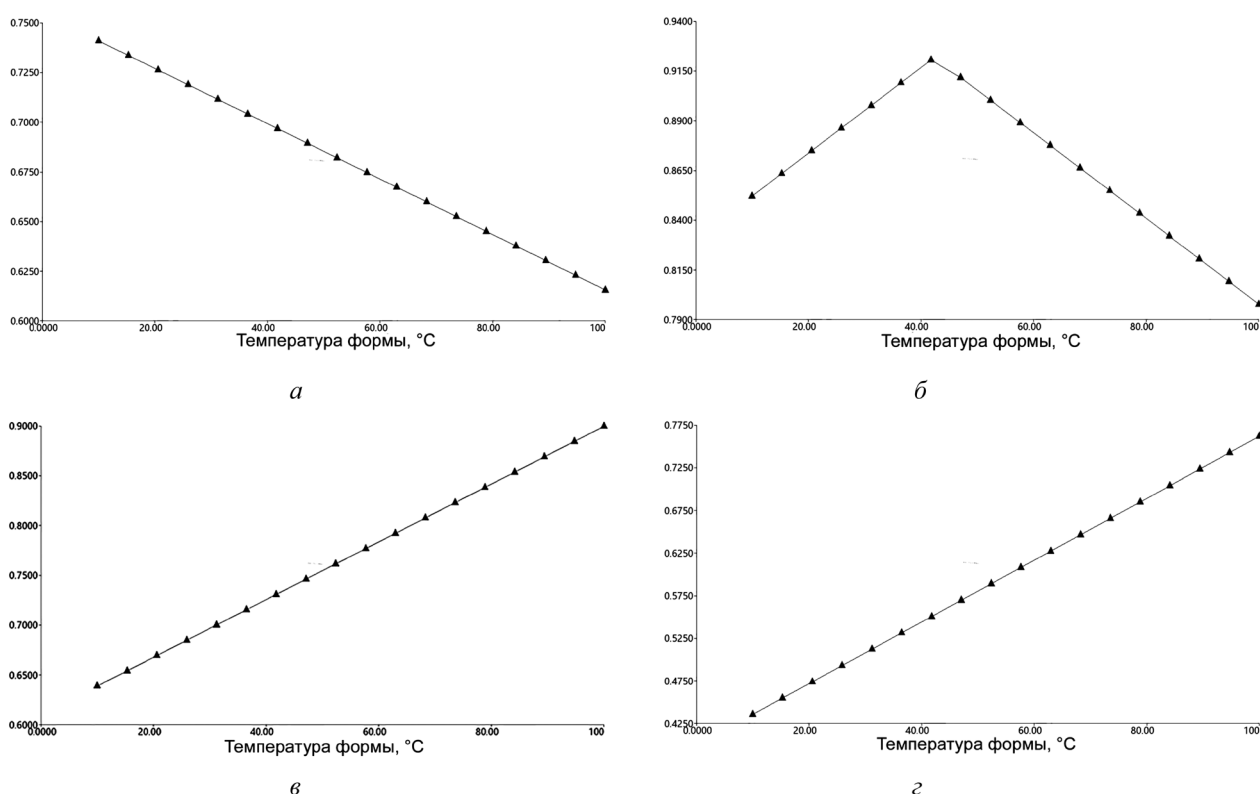


Рис. 5. Зависимость коэффициента качества от температуры формы при температуре расплава 260°C и времени заполнения 0.4 с (а); 0.6 с (б); 0.8 с (в); 1 с (г)

Таблица 8. Анализ подобранных входных параметров

Но- мер набо- ра	Доля за- твердевшего расплава в конце за- полнения	Макс. напряжение сдвига в расплаве, МПа	Макс. объемная усадка, %	Макс. отклоне- ние, мм	Макс. оста- точное напряжение в первом глав- ном направ- лении, МПа	Макс. остаточ- ное напряжение во втором глав- ном направле- нии, МПа	Макс. оста- точное напряжение сдвига, МПа	Кэффи- циент ка- чества
1	0.1092	0.2009	11.06	2.464	5.54	5.09	1.56	0.92
2	0.1337	0.2073	10.75	2.626	7.14	4.90	1.72	0.89
3	0.1904	0.2130	10.52	3.012	7.74	4.98	1.90	0.91
4	0.1025	0.2001	10.94	2.604	6.51	5.22	1.67	0.92

этом высокое значение коэффициента качества, а в четвертом искали оптимальные соотношения параметров с равными приоритетами.

Были найдены наборы оптимальных входных параметров для литья под давлением:

- 1) 260°C / 40°C / 0.6 с / 12 с / 50% / 20 с;
- 2) 230°C / 60°C / 0.8 с / 12 с / 50% / 20 с;
- 3) 210°C / 60°C / 1 с / 11 с / 50% / 20 с;
- 4) 240°C / 70°C / 0.8 с / 15 с / 50% / 20 с.

Каждый из наборов был проанализирован в Moldflow, а результаты занесены в табл. 8.

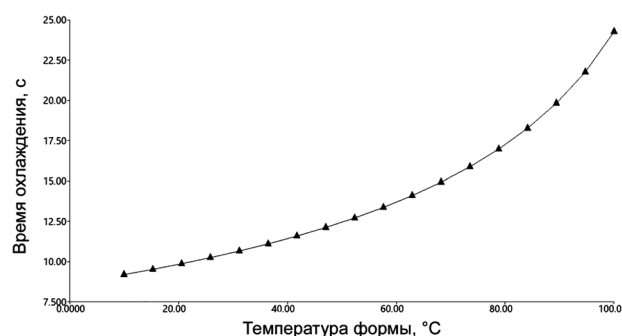


Рис. 6. Минимальное необходимое время охлаждения отливки при температуре расплава 260°C и времени заполнения 0.6 с

Заключение

По результатам проведенного моделирования литья под давлением удалось добиться значительного снижения остаточных напряжений, сохраняя при этом высокое качество литья полипропилена и удерживая параметры технологического процесса в пределах допустимой нормы. Лучшими параметрами литья оказался первый набор, в котором предпочтение отдавалось высокой температуре расплава из-за ее сильного положительного влияния на каждый из параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spalding M.A., Chatterjee A. Handbook of industrial polyethylene and technology: Definitive guide to manufacturing, properties, processing, applications and markets set. John Wiley & Sons, 2017.
2. Van Krevelen D.W., Te Nijenhuis K. Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions. Elsevier, 2009.
3. Dangayach G., Guglani L. Application of Moldflow and Taguchi technique in improving the productivity of injection moulded energy meter base // International Journal of Process Management and Benchmarking. 2015. V. 5. N 3. P. 375–385.
4. Янян Ч., Пье П.М., Малышева Г.В. Определение кинетики отверждения деталей из полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 4. С. 185–191.
5. Bryce D. Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals. M.: Society of Manufacturing Engineers, 1996.
6. Seow L., Lam Y. Optimizing flow in plastic injection molding // Journal of materials processing technology. 1997. V. 72. N 3. P. 333–341.
7. Rahim S.Z.A., Sharif S., Zain A.M., Nasir S., Mohd Saad R. Improving the quality and productivity of molded parts with a new design of conformal cooling channels for the injection molding process // Advances in polymer technology. 2016. V. 35. N 1.
8. Shen Y., Chien H., Lin Y. Optimization of the micro-injection molding process using grey relational analysis and MoldFlow analysis // Journal of reinforced plastics and composites. 2004. V. 23. N 17. P. 1799–1814.
9. Gunawan H., Anggono W. Improving quality of injection mold using moldflow software simulation case study: new design plastic cup // Proceeding of International seminar on Product Design and Development. 2006.
10. Liu X.F., Hu Y.H., Huang W.J. Optimum design of plastic injection mould gate based on Moldflow // Advanced Materials Research. – Trans Tech Publ. 2011. V. 239. P. 2541–2544.
11. Guo W., Hua L., Mao H., Meng Z. Prediction of warpage in plastic injection molding based on design of experiments // Journal of Mechanical Science and Technology. 2012. V. 26. N 4. P. 1133–1139.
12. Li M., Zhang H. M., Nie Y. Simulation analysis of residual stress of the plastic gear based on moldflow // Key Engineering Materials. – Trans Tech Publ. 2012. V. 501. P. 339–343.
13. Sin L.T., Rahman W., Rahmat A., Tee T.-T., Bee S.T., Chong-Yu L. Computer aided injection moulding process analysis of polyvinyl alcohol–starch biodegradable polymer compound // Journal of manufacturing processes. 2012. V. 14. N 1. P. 8–19.
14. Mannella G., La Carrubba V., Brucato V., Zoetelief W., Haagh G. No-flow temperature in injection molding simulation // Journal of Applied Polymer Science. 2011. V. 119. N 6. P. 3382–3392.
15. Vlachopoulos J., Alam M. Critical stress and recoverable shear for polymer melt fracture // Polymer Engineering & Science. 1972. V. 12. N 3. P. 184–192.

Optimal injection casting parameters selection with the moldflow software

I.S. Larionov¹, D.A. Balkaev^{1,2}, L.M. Amirova¹

¹ Kazan National Research Technical University – KAI named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Russia

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008, Russia

e-mail: larionov_igor1999@mail.ru, dinar.balkaev@yandex.ru, amirovaliliyam@mail.ru

The presented article deals with polymer melt flow while injection casting studying, and quality improving of the part being casted by searching for optimal casting parameters. The high cost of equipment and casting tooling assigns a high threshold for polymer products input into production increasing the price of every error at the development phase. Which is why optimal casting parameters selection for each individual product is one of the crucial problems and tasks of the injection casting method. The problem is being partly solved by computer analysis methods application. The presented work employs the Moldflow software, on which basis studying of tendencies while casting parameters changing by evaluation of the residual stresses, deformation, shearing stress in the melt etc. Melt ejection temperature, casting mould temperature, the time of mould filling, pressure and packing time were selected as the parameters under consideration. A “Quadrocopter cover” part, being manufactured by the injection casting was developed for the analysis. By the result of this study, four sets of parameters were compiled

with account the obtained regularities, from which the best one was selected. Thus, the authors managed to achieve the residual stresses reduction, preserving herewith the high quality of the polymer and retaining technological process parameters within the acceptable rate.

Keywords: Injection molding, polymer, Moldflow software, casting parameters, casting modelling.

REFERENCES

1. **Spalding M.A., Chatterjee A.** *Handbook of industrial polyethylene and technology: Definitive guide to manufacturing, properties, processing, applications and markets set*. John Wiley & Sons, 2017. 1410 p. DOI:10.1002/9781119159797
2. **Van Krevelen D.W., Te Nijenhuis K.** *Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions*. Elsevier, 2009. 1032 p.
3. **Dangayach G., Guglani L.** Application of Moldflow and Taguchi technique in improving the productivity of injection moulded energy meter base // *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 375–385. DOI:10.1504/IJPMB.2015.070820
4. **Yanyan Ch., P'ye P.M., Malysheva G.V.** Opredelenie kinetiki otverzhdeniya detaley iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove epoksidnykh svyazuyushchikh [Determination of the kinetics of curing of parts made of polymer composite materials based on epoxy binders] // *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 185–191. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-4-185-191. In Russ.
5. **Bryce D.** *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*. M.: Society of Manufacturing Engineers, 1996. 282 p. In Russ.
6. **Seow L., Lam Y.** Optimizing flow in plastic injection molding // *Journal of materials processing technology*, 1997, vol. 72, no. 3, pp. 333–341. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00188-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00188-X)
7. **Rahim S.Z.A., Sharif S., Zain A.M., Nasir S., Mohd Saad R.** Improving the quality and productivity of molded parts with a new design of conformal cooling channels for the injection molding process // *Advances in polymer technology*, 2016, vol. 35, no. 1. DOI:10.1002/adv.21524
8. **Shen Y., Chien H., Lin Y.** Optimization of the micro-injection molding process using grey relational analysis and MoldFlow analysis // *Journal of reinforced plastics and composites*, 2004, vol. 23, no.17, pp. 1799–1814. <https://doi.org/10.1177/0731684404041149>
9. **Gunawan H., Anggono W.** Improving quality of injection mold using moldflow software simulation case study: new design plastic cup // *Proceeding of International seminar on Product Design and Development*. 2006.
10. **Liu X.F., Hu Y.H., Huang W.J.** Optimum design of plastic injection mould gate based on Moldflow // *Advanced Materials Research. Trans Tech Publ*, 2011, vol. 239, pp. 2541–2544. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.2541
11. **Guo W., Hua L., Mao H., Meng Z.** Prediction of warpage in plastic injection molding based on design of experiments // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, no. 4, pp. 1133–1139. DOI:10.1007/s12206-012-0214-0
12. **Li M., Zhang H. M., Nie Y.** Simulation analysis of residual stress of the plastic gear based on moldflow // *Key Engineering Materials. Trans Tech Publ*, 2012, vol. 501, pp. 339–343. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.501.339
13. **Sin L.T., Rahman W., Rahmat A., Tee T.-T., Bee S.T., Chong-Yu L.** Computer aided injection moulding process analysis of polyvinyl alcohol–starch green biodegradable polymer compound // *Journal of manufacturing processes*, 2012, vol. 14, no. 1, pp. 8–19.
14. **Mannella G., La Carrubba V., Brucato V., Zoetelief W., Haagh G.** No-flow temperature in injection molding simulation // *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, vol. 119, no. 6, pp. 3382–3392. DOI:10.1002/app.32987
15. **Vlachopoulos J., Alam M.** Critical stress and recoverable shear for polymer melt fracture // *Polymer Engineering & Science*, 1972, vol. 12, no. 3, pp. 184–192. DOI:10.1002/pen.760120305