

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЛИТЬЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА СРЕДСТВАМИ САЕ- АНАЛИЗА

© 2019 А.И. Хаймович, Н.В. Галкина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 12.02.2019

Для повышения качества тонкостенных изделий, полученных методом инжекционного литья, из полимерных материалов необходимо подобрать наиболее эффективную систему охлаждения литьевых форм. Смоделированы различные системы охлаждения для литьевой формы детали типа «Крышка». Установлено, что вид системы охлаждения влияет на коробление полученной отливки. Для получения наиболее качественной детали наиболее эффективно использовать конформную систему охлаждения. *Ключевые слова:* инжекционное литье, пресс-форма, тонкостенные изделия, полимерные материалы.

ВВЕДЕНИЕ

Технология литья термопластичных полимерных материалов (ТПМ) под давлением является одной из самых массовых технологий производства современных изделий. Пластиковые детали содержатся практически в любом изделии и степень их использования возрастает. При этом процесс подготовки производства средств технологической оснастки для литья достаточно трудоемок и требует существенных временных затрат, которые могут не только повлиять на коммерческую успешность новых продуктов, но и поставить под сомнение целесообразность выпуска изделия как такового.

Одним из важных факторов инжекционного литья является эффективность системы охлаждения литьевых форм. Сокращение времени охлаждения всего на одну или две секунды может привести к увеличению производительности на 10-20%. Это уже оказывает непосредственное влияние на экономическую эффективность производственного процесса [1]. Но экономия времени является не единственной важной задачей, решение которой обеспечивает правильно спроектированная система охлаждения. Контролируемое охлаждение всей детали имеет во многом решающее значение для обеспечения точности размеров и механических свойств детали. Оптимизированное охлаждение деталей позволяет уменьшать их коробление, снизить остаточные напряжения в материале отливки [2]. Зачастую процесс охлаждения занимает большую часть цикла литья и поэтому является

главным аспектом возможности экономии и увеличения производительности. Очевидно, что правильно спроектированная система охлаждения является ключевым компонентом конструкции литьевой пресс-формы, способствует повышению качества литых деталей, обеспечивает снижение времени литейного цикла и, следовательно, повышению рентабельности литейного производства.

Наиболее эффективный вариант конструкции системы охлаждения пресс-формы - это конформная система охлаждения. При конформном охлаждении формообразующих деталей пресс-формы система охлаждения образует распределенную сеть каналов расположенных эквидистантно поверхности отливаемой детали [3]. При такой топологии каналов обеспечивается равномерная и эффективная теплопередача со всей формообразующей поверхности пресс-формы. Геометрию каналов охлаждения не всегда возможно получить в металле механической обработкой с помощью стандартных инструментов. Поэтому производство формообразующих деталей пресс-форм (матрицы, пуансоны, профильные вставки) с конформной системой охлаждения стало возможным главным образом с помощью аддитивных технологий. Аддитивное производство позволяет создавать охлаждающие каналы сложной геометрической формы в точном соответствии с расчетами, без ограничений, свойственных обычным методам механической обработки [4]. Современные системы компьютерного анализа инжекционного литья методом конечных элементов [5-7], таких как Moldflow или Moldex, позволяют проектировщику получить «цифровой двойник» для анализа технологических параметров инжекционного литья и проектных решений по конструкции пресс-формы. Встроенные инструменты анализа позволяют получить распределения тем-

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: berill_samara@bk.ru
Галкина Наталья Викторовна, аспирант, старший преподаватель кафедры инженерной графики. E-mail: nata12_92@mail.ru

ператур, напряжений, усадки, короблений и прочих полевых параметров на всех этапах процесса. Однако, четкие численные сравнительные характеристики эффективности различных вариантов реализации системы охлаждения, которые позволили бы сформулировать оптимизационную задачу, в технической литературе не приводятся [8]. В настоящей статье предлагается к практическому использованию ряд таких сравнительных характеристик.

Целью исследования является разработка численных критериев оценки качества инжекционного литья на этапе проектирования пресс-формы для сравнительного анализа вариантов ее конструкции, в частности оценки эффективности системы охлаждения с помощью ряда характеристик, которые можно получить с помощью «цифрового двойника» процесса.

Под качеством инжекционного литья в контексте настоящей статьи понимается обеспечение условий формообразования в пресс-форме, способствующих получению качественной отливки при минимальном времени цикла.

1. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМЫ

Для разработки критериев оценки качества инжекционного литья было проведено сравнение двух вариантов систем охлаждения пресс-формы – конформной и традиционной.

Для оценки качества и эффективности были выбраны следующие характеристики: равномерность охлаждения, средняя скорость охлаждения, коэффициент искажения формы отливки и ее неплоскостность. Кроме того эффективность охлаждения оценивалась дифференцированно для каждого канала по интенсивности теплоотдачи канала.

1. Равномерность охлаждения (по температурному полю) обеспечивает равномерность усадки и, следовательно, ведет к минимальным искажениям формы отливки. В качестве числовой характеристики равномерности охлаждения целесообразно принять сравнение изменения градиента температуры во времени в различных точках отливки после заполнения формообразующей полости пресс-формы. Иными словами постоянство градиента температуры при охлаждении отливки в пресс-форме в любых ее точках должно обеспечить равномерность усадки и отсутствие усадочных напряжений.

Обозначим:

S – срединная поверхность отливки, т.е. поверхность равноудаленная от точек внешней поверхности отливки;

$(T_{\min})_m = T(x_i, x_j, x_k)_m$ – локальный мини-

мум температуры;

$(T_{\max})_n = T(x_i, x_j, x_k)_n$ – локальный максимум температуры;

l_{mn} – кривая наименьшей длины между точками $(x_i, x_j, x_k)_n$ и $(x_i, x_j, x_k)_m$;

$l_{mn} \subset S$ – среднее изменение температурного поля между названными точками в период $\{t_0, t_1\}$.

Среднее за период времени $\{t_0, t_1\}$ изменение градиента температуры ΔT_{mn} вдоль срединной плоскости между любыми точками $(x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m$ определится зависимостью (1)

$$\begin{aligned} \Delta T_{mn} &= \frac{1}{(t_1 - t_0) l_{mn}} \int_{t_0}^{t_1} \int_{(T_{\min})_m}^{(T_{\max})_n} \text{grad } T \cdot \bar{l}_i dt \\ &= \frac{1}{(t_1 - t_0) l_{mn}} \int_{t_0}^{t_1} \int_{(T_{\min})_m}^{(T_{\max})_n} \frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot \frac{\frac{\partial l}{\partial x_i} dt}{\sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial x_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial x_k}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Сформулируем условие равномерности усадки в зависимости от температурного фактора, способствующего минимальным короблениям.

$$\sum_{m,n}^N \Delta T_{mn} \rightarrow \min \quad (2)$$

для множества пар характерных точек $\{(x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m\} \subset S$; $n = 1 \dots N, m = 1 \dots N$

при ограничениях:

$t_1 - t_0 \leq t_{\max}$ – ограничение по времени цикла;

$(\Delta T_{mn} \leq (\Delta T_{mn})_{\max} \{ (x_i, x_j, x_k)_m, \{ (x_i, x_j, x_k)_n \} \subset S \})$

- ограничение по максимально допустимому значению локальной усадки.

Для оценки параметра ΔT_{mn} между двумя характерными точками $(x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m$ в настоящем исследовании использовались две величины p_1 и p_2 :

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(T_{\max} - T_{\min})_{t_1} - (T_{\max} - T_{\min})_{t_2}}{(t_2 - t_1) L}, \\ p_2 = \frac{(T_{\max} - T_{\min})_{t_2}}{(t_2 - t_1) L} \end{cases} \quad (3)$$

где t_1 – время окончания заполнения пресс-формы;

L – расстояние между точками с максимальной T_{\max} и минимальной T_{\min} температурами в отливке.

Параметр p_2 характеризует неравномерность температуры в отливке в момент времени t_2 завершения выдержки под давлением. Очевидно, что параметр p_2 должен стремиться к минимуму к моменту времени t_2 . При этом чем выше p_1 – интенсивность выравнивания температуры между сопоставимыми точками

отливки с наибольшей и наименьшей температурами – тем более эффективная система охлаждения пресс-формы. Чем больше параметр p_1 , тем качественнее отливка.

Средняя скорость охлаждения отливки определяет среднюю по объему отливки интенсивность теплоотдачи.

$$V_{cp} = \frac{1}{W(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial T}{\partial t} dW dt,$$

где W – объем отливки.

Чем выше, тем интенсивнее остывает отливка и, следовательно, уменьшается t_2 и время цикла. Следует обратить внимание, что параметр p_2 при этом должен быть минимальным.

Для оценки V_{cp} в данном исследовании использовали локальные значения $V_i = \left(\frac{T_{t_2} - T_{t_1}}{t_2 - t_1} \right)_i$, которые измерялись в трех точках: в центре отливки, на краю отливки и на среднем радиусе отливки.

2. Искажение формы отливки возникает из-за того, что геометрия формообразующей полости пресс-формы обычно получается масштабированием геометрии отливки на усредненный коэффициент объемной усадки. На самом деле коэффициент усадки – величина не постоянная, а вариативная в зависимости от характера охлаждения каждой локальной области отливки.

Локальный линейный коэффициент усадки в окрестности точки i определяется зависимостью:

$$k_{i \text{ усадки}} = \frac{R_{i \text{ прессформы}}}{R_{i \text{ отливки}}} = 1 + \frac{D_i}{R_{i \text{ отливки}}},$$

где $R_{i \text{ отливки}}$ – расстояние от нуля системы координат, расположенной в центре отливки до рассматриваемой точки;

$D_i = R_{i \text{ прессформы}} - R_{i \text{ отливки}}$ – смещение точки i отливки от ее номинального положения в пресс-форме.

Средний коэффициент линейной усадки

$$k_{\text{усадки ср.}} = 1 + \frac{D_{cp}}{R_{\text{отливки ср.}}},$$

где $R_{\text{отливки ср.}} = R_{\text{max}} / 2$ – средний радиус отливки; D_{cp} – среднее смещение.

$$D_{cp} = \frac{1}{R_{\text{max}}} \int_0^{R_{\text{max}}} D_i dr = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_{i-k} \delta_{i-k};$$

D_{i-k} – среднее смещение точек отливки между значениями D_i и D_k для интервала $j = 1 \dots N$;

δ_{i-k} – отнесенное к N количество значений смещений попадающих в интервал $[D_i, D_k]$.

D_{i-k}, δ_{i-k} определяются по гистограмме смещений точек отливки при усадке.

Действительное и расчетное расстояния до некоторой точки i на отливке определяются зависимостями вида:

$$R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}} = \frac{R_{i \text{ прессформы}}}{k_{\text{усадки ср.}}}$$

Численно искажение геометрии отливки вследствие неравномерности ее усадки можно оценить с помощью коэффициента искажения формы отливки.

С учетом изложенного определим коэффициент искажения геометрии как среднее взвешенную величину модуля относительной погрешности расчетного значения $R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}}$.

$$k_{\text{искажения}} = \sum \left| \frac{R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}} - R_{i \text{ отливки}}^{\text{действ}}}{R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}}} \right|.$$

При «качественной» системе охлаждения гистограмма смещений точек отливки при усадке не должна иметь провалов.

Параметр неплоскостности оценивается по результатам САЕ-анализа.

Величина теплосъема определяется количеством теплоты, которое передается каждому каналу системы охлаждения.

Для апробации методики оценки качества изделий была взята тонкостенная отливка типа «Крышка», получаемая методом инъекционно-го литья с применением конформной системы охлаждения.

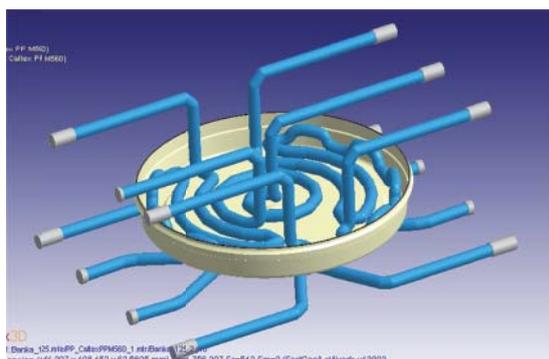
2. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Для апробации методики оценки качества изделий была взята тонкостенная отливка типа «Крышка», получаемая методом инъекционно-го литья с применением конформной системы охлаждения и традиционной системы охлаждения (рисунок 1). Для конформной системы охлаждения сеть каналов охлаждения была смоделирована по форме, приближенной к форме изделия.

Для оценки системы охлаждения был использован метод численного имитационного моделирования процесса литья в программном продукте Moldex3DR13. Для этого в программном продукте Moldex 3D designer были смоделированы отливка, система подачи расплава, система охлаждающих каналов и наложена сетка конечных элементов, необходимая для дальнейших расчетов.

Материал отливки – полипропилен (PP) выбирался из базы данных реологических и механических свойств Moldex 3D аналогичный по свойствам марке материала («Болен»), из которого должна быть получена натурная деталь.

Конформная система охлаждения



Традиционная система охлаждения

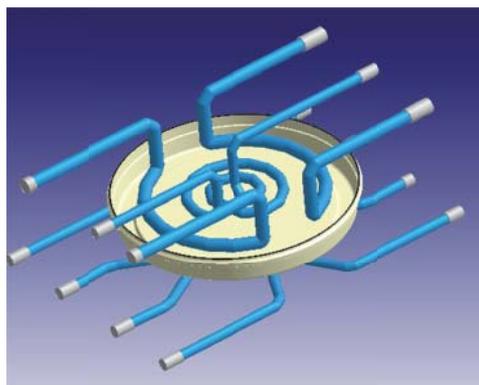


Рис. 1. Смоделированные системы охлаждения



Рис. 2. Разделение детали на локальные области

РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОТЛИВКИ

Для расчета равномерности охлаждения необходимо разбить деталь на локальные области: первая – область постоянной толщины детали, вторая – область фланца (утолщения). Разделение детали на локальные области представлено на рисунке 2. Результаты расчета представлены в таблице 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была апробирована методика оценки качества изделий на примере тонкостенной отливки типа «Крышка», получаемой методом инжекционного литья с применением конформной и традиционной систем охлаждения.

Был предложен ряд численных критериев оценки качества инжекционного литья на этапе проектирования пресс-формы для сравнительного анализа вариантов ее конструкции по результатам процесса симуляции инжекционного литья в CAE-системе. Предложенные критерии позволяют произвести количественный анализ эффективности и

равномерного охлаждения отливки, обеспечивающие минимальные коробления и неплоскостность отливки.

Сравнительный анализ с использованием разработанных критериев оценки качества в программном продукте Moldex3DR13 показал эффективность конформной системы охлаждения выполненной в виде зигзагообразной спирали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazmer D.O. Injection mold design engineering. Munich Hanser Publishers, 2007. 438 с.
2. Michaeli W., Menges G., Mohren P. How to Make Injection Molds. 3. ed. — Hanser Publishers, Munich, 2001. 643 с.
3. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением [пер. с англ. яз. под. ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова]. СПб.: Профессия, 2006. 512 с.
4. Яблочников Е.И., Пирогов А.В. Грибовский А.А. Современное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. №5. С. 72 – 76.
5. Яблочников Е.И., Брагинский В.А., Восоркин А.С. Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 7. С. 75—80.

Таблица 1. Результаты расчета критериев оценки качества при различных вариантах систем охлаждения

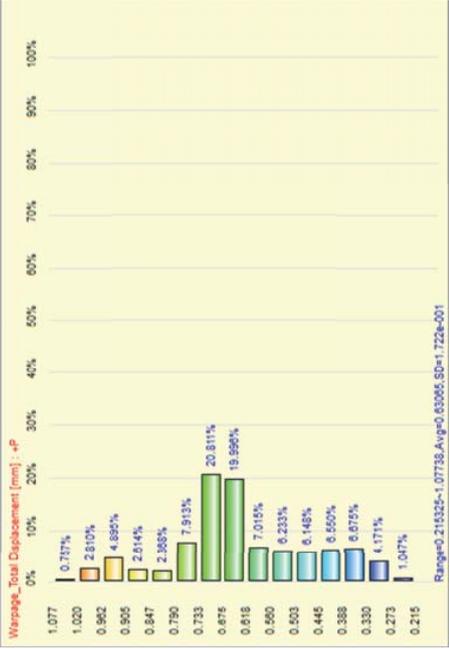
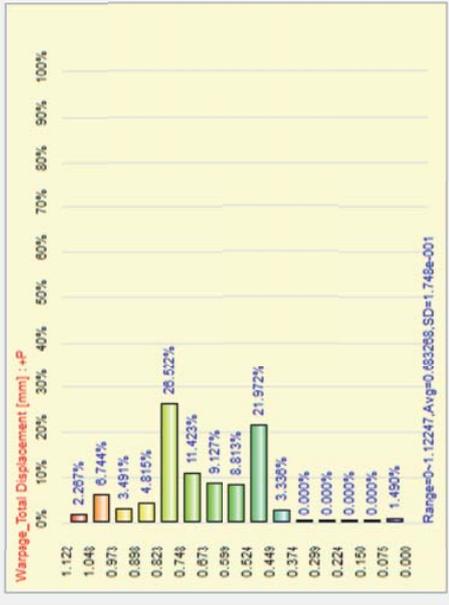
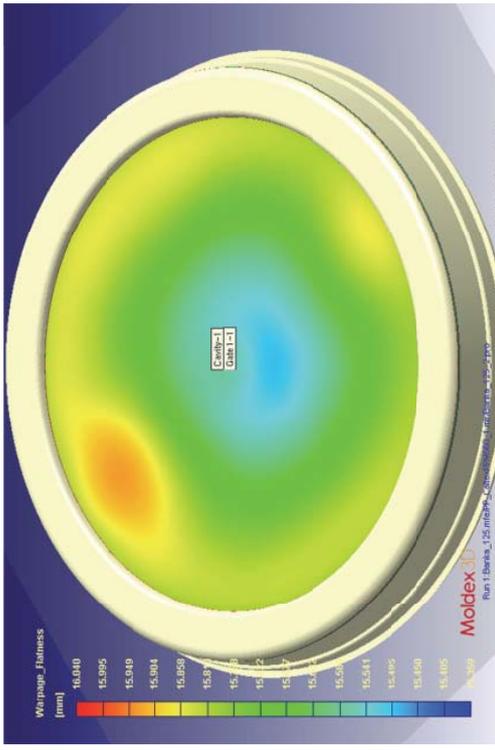
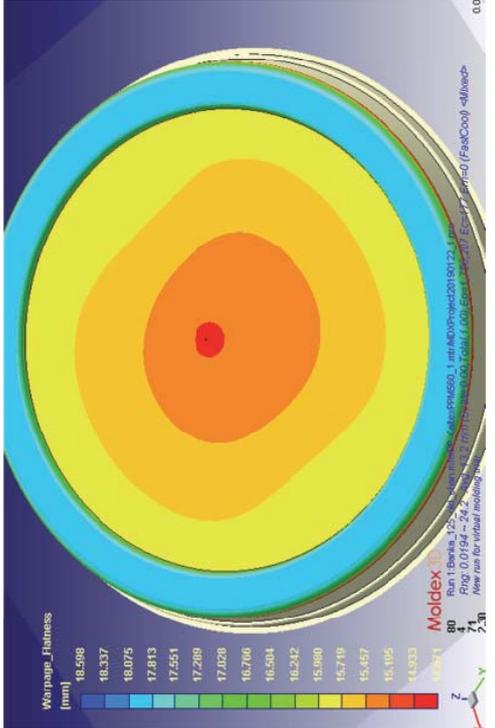
Критерии оценки качества	Конформная система охлаждения	Традиционная система охлаждения
<p>Гистограмма смещений точек отливки при усадке</p>		
<p>Параметры равномерности охлаждения в первой локальной области</p>	<p>Гистограмма - равномерная</p> $p_1 = \frac{(207 - 100)_{0,517} - (100 - 37)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 74} = 0.597$ $p_2 = \frac{(100 - 37)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 74} = 0.855$	<p>Наблюдаются провалы гистограммы</p> $p_1 = \frac{(207 - 103)_{0,517} - (143 - 52)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 74} = 0.176$ $p_2 = \frac{(143 - 52)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 74} = 1.235$
<p>Параметры равномерности охлаждения во второй локальной области</p>	$p_1 = \frac{(100 - 60)_{0,517} - (59 - 46)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 4} = 6.683$ $p_2 = \frac{(59 - 46)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 4} = 3.263$	$p_1 = \frac{(130 - 60)_{0,517} - (78 - 52)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 4} = 11.044$ $p_2 = \frac{(78 - 52)_{1,513}}{(1.513 - 0.517) 4} = 6.526$
<p>Средняя скорость охлаждения в центре отливки:</p>	$V_{центр} = \left(\frac{203 - 131}{1.513 - 0.517} \right) = 72.3 \text{ град} / c$	$V_{центр} = \left(\frac{208 - 167}{1.513 - 0.517} \right) = 41.2 \text{ град} / c$
<p>Средняя скорость охлаждения в середине радиуса отливки:</p>	$V_{серед} = \left(\frac{126 - 33}{1.513 - 0.517} \right) = 93.4 \text{ град} / c$	$V_{серед} = \left(\frac{142 - 64}{1.513 - 0.517} \right) = 78.3 \text{ град} / c$

Таблица 1. Результаты расчета критериев оценки качества при различных вариантах систем охлаждения (окончание)

Средняя скорость охлаждения на торце отливки:	$V_{\text{торец}} = \left(\frac{73 - 23}{1.513 - 0.517} \right) = 50.2 \text{ град} / \text{с}$	$V_{\text{торец}} = \left(\frac{116 - 84}{1.513 - 0.517} \right) = 32.1 \text{ град} / \text{с}$
Средний коэффициент линейной усадки	$k_{\text{усадкиср.}} = 1 + \frac{0.63}{37} = 1.02$	$k_{\text{усадкиср.}} = 1 + \frac{0.685}{37} = 1.02$
Распределение температуры в сечении отливки после впрыска	<p>Распределение температуры отливки после впрыска равномерное в окружном направлении (колебания не более 10 – 15 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 235 градусов в центре отливки и 150 градусов на ее периферии в радиальном направлении (на этапе выдержки под давлением) до равномерной температуры около 110 градусов по остальной части отливки.</p>	<p>Распределение температуры отливки после впрыска неравномерно в окружном направлении (колебания более 20 – 25 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 250 градусов в центре отливки и 220 градусов на ее периферии в радиальном направлении до равномерной температуры около 110 град по по остальной части отливки.</p>
	<p>Максимальная неплоскостность находится в пределах 0,7 мм и наблюдается в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки.</p>	<p>При традиционной системе охлаждения неплоскостность центральной части крышки изменяется в пределах до 1,3 мм в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки. Неплоскостность превышает значение для отливки с конформной системой охлаждения почти в 2 раза.</p>
		

6. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н.Л. Казанский, И.С. Степаненко, А.И. Хаймович, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 2. С. 203-214.
7. *Stepanenko I.S., Khaimovich A.I.* GTE blade injection molding modeling and verification of models during process approbation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. 177(1), статья № 012093.
8. *Ковалькова Е.А., Хаймович И.Н.* Разработка системы оценки качества технологических процессов инжекционного литья из полимерных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т.19 № 1-3. С. 489-493.

ASSESSMENT OF QUALITY OF CASTINGS FROM POLYMERIC MATERIALS AT THE STAGE OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION BY MEANS OF CAE-ANALYSIS

© 2019 A.I. Khaymovich, N.V. Galkina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

To improve the quality of thin-walled products obtained by injection molding, polymer materials, it is necessary to choose the most effective cooling system of injection molds. Various cooling systems have been simulated for injection mold parts. It is established that the type of cooling system affects the warping of the resulting casting. To obtain the best quality parts, the conformal cooling system is used.
Keywords: injection molding, molding, thin-section casting, polymeric materials.

Aleksandr Khaymovich, Doctor of Technics, Professor at the Engine Production Technology Department.

E-mail: berill_samara@bk.ru

Nataliya Galkina, Graduate Student, Senior Lecturer at the Engineering Graphics Department.

E-mail: nata12_92@mail.ru