

УДК 539.319:539.32

МИНИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТА КОРОБЛЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТОВ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ЗА СЧЕТ ВВОДА НАПОЛНИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ (ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)*

Гаришин О.К.¹, Корляков А.С.¹, Шадрин В.В.^{1,2}¹ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия²ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Литье под давлением это один из наиболее распространенных способов получения изделий из термопластических полимеров (полиэтилен, полипропилен, полистирол и т.д.) и композитов на их основе. Одной из главных проблем этого технологического процесса является коробление деталей вследствие неравномерного охлаждения после извлечения из литейной формы. В настоящее время существует достаточно много способов минимизировать этот эффект. Обычно в производстве используют специально подобранные режимы отпуска (охлаждения) деталей. Но это значительно удлинит процесс изготовления и требует дополнительных расходов.

В данной работе теоретически изучена возможность уменьшения эффектов коробления за счет ввода наполнителя с отрицательными значениями коэффициента температурного расширения (сегнетокерамика). Такой подход позволил бы существенно упростить технологию производства и повысить производительность.

Задачу решали в рамках теории термоупругих деформаций. Считали, что изделие испытывает только температурные напряжения, то есть внешняя нагрузка к телу не прикладывалась, а массовые силы отсутствовали. Решение искали в 3D постановке методом конечных элементов.

На конкретном примере проведено численное моделирование охлаждения реальной вертушки вентилятора из полиэтилена, наполненного дисперсными частицами PZT сегнетокерамики (твердый раствор титаната – цирконата свинца $Pb(Ti,Zr)O_3$). Предполагалось, что частицы наполнителя имеют зернистую форму и случайным образом равномерно распределены по объему матрицы, то есть композит изначально макроизотропен.

Рассмотрено несколько вариантов, различающихся концентрацией наполнителя. Количественно степень температурного коробления вертушки оценивали с помощью отношения максимального смещения обода вертушки от исходной конфигурации к ее диаметру (фактор температурного коробления K_{warp}). Установлено, что для данной конкретной геометрии детали полная компенсация коробления возможна уже при 25%-й концентрации наполнителя. При более высоких концентрациях картина не менялась.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность использования наполнителя с отрицательным коэффициентом теплового расширения для уменьшения коробления деталей сложной формы при остывании.

Ключевые слова: термоупругость; коробление; отрицательный коэффициент теплового расширения; дисперсно наполненные термопласты; сегнетокерамика

* Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект № 16-08-00756, проект № 14-08-96013_урал_a.

MINIMIZATION OF THE EFFECT OF THERMOPLASTIC MATERIALS WARPAGE IN INJECTION MOLDING DUE TO INPUT THE FILLER WITH A NEGATIVE COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION (NUMERICAL SIMULATION)

Garishin O.K.¹, Korlyakov A.S.¹, Shadrin V.V.^{1,2}

¹*Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia*

²*Perm State University, Perm, Russia*

ABSTRACT

The process of injection molding is one of the most common methods for producing articles from thermoplastic polymers (polyethylene, polypropylene, polystyrene, etc.) and composites on its basis. One of the main problems of this technology is products warping due to uneven cooling after removal from the mold. Nowadays there are many ways to minimize this effect. Typically, specially selected cooling modes of products are used. However, this significantly increases the duration of the manufacturing process and requires additional expenditures.

The possibility of reducing warping effects by adding negative thermal expansion filler (ferroelectric ceramics) in thermoplastic material is studied theoretically in paper proposed. Such an approach would considerably simplify production technology and improve productivity.

In this study, a 3D thermoelastic problem has been solved numerically using a finite element method. It is also considered that the product undergoes only thermal stresses, that is the external load to the body was not apply, and the mass forces were absent. Solution of 3D problem was obtained with the help of the finite element method.

Numerical simulation of the real fan impeller made of polyethylene filled with dispersed particles of ferroelectric PZT (a solid solution of lead titanate – lead zirconate $Pb(Ti,Zr)O_3$) was carried out. It was assumed that the filler particles have a granular shape and randomly distributed over the matrix volume, so this composite is macro isotropic initially.

Several variants differing in filler concentrations were considered. To quantify the degree of thermal warping of the fan impeller, the ratio of the maximum displacement of the fan rim from initial configuration to its diameter (thermal warping factor, K_{warp}) was used. It was established that for this particular geometry complete compensation of warping is possible even at a 25% filler fraction. At higher concentrations, the picture was the same. The investigation shows that negative thermal expansion filler could be used to reduce the warpage of complex-shaped parts as they cool.

Keywords: thermoelasticity; warping (warpage); negative thermal expansion coefficient; granular filled thermoplastics; ferroelectric ceramics

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время детали и конструкции из пластмасс и композитов на их основе широко применяются в самых различных областях промышленности. Их основными достоинствами по сравнению с металлическими изделиями являются легкость (малая массовая плотность), высокая коррозионная устойчивость, хорошие тепло и электроизоляционные свойства. Эти материалы легко поддаются различным видам механической обработки, они хорошо льются и формуются. К недостаткам можно отнести более низкую прочность, то есть

пластмассовые детали, как правило, используют в тех элементах конструкций и механизмов, где нагрузки относительно невелики (корпусные детали, тара, фурнитура и т.д.).

Одним из наиболее распространенных способов получения изделий из термопластических полимеров (полиэтилен, полипропилен и т.д.) является литье под давлением [1-3]. При этом пластмасса расплавляется при нагревании, а затем направляется в литьевую форму, где, охлаждаясь, приобретает конфигурацию формирующей полости. Этот технологический цикл может быть повторен много раз, поскольку готовые детали могут быть размолоты и вторично заново переработаны. При соблюдении надлежащих технологических условий переработки в термопластах не происходят какие-либо химические реакции, а их физические свойства изменяются незначительно [4].

При завершении выдержки под давлением материал продолжает охлаждаться до температуры, при которой отлитая деталь становится достаточно твердой для ее безопасного (без повреждений) извлечения из литьевой формы и способной стабильно сохранять приданную ей конфигурацию и размеры. Слишком короткий интервал времени охлаждения может привести к увеличению усадки изделия и последующему его короблению. С другой стороны, слишком длительный период охлаждения не оправдан с экономической точки зрения.

Под усадкой обычно понимается изменение объема термопласта, связанного с затвердеванием, высушиванием и другими процессами, которые происходят при остывании термопластичного полимера. Короблением же называются любые искажения формы готового изделия, полученной литьем под давлением. Как правило, коробление обусловлено неравномерной (по объему изделия) термической усадкой [5-7].

В настоящее время проблема усадки термопластов интересует многих ученых, которые занимаются разработкой различных методик изготовления полимерных изделий [8,9]. По мнению специалистов, прогнозирование усадок термопластов является крайне сложной задачей, на которую оказывает влияние множество факторов. Решение данной проблемы позволит значительно увеличить качество изделий, которые изготавливаются из различных видов термопластов, существенно сократив брак, который получается в результате технологического процесса.

Усадка термопластов требует вносить определенные поправки при расчете и изготовлении форм для литья, в некоторых случаях более эффективным может оказаться применение безусадочных материалов для изготовления различных изделий. В качестве борьбы с усадками термопластов, которые образуются при изготовлении различных полимерных изделий, может использоваться как введение в состав расплавленной смеси различных добавок, которые значительно снижают усадки, так и применение специально разработанных методик охлаждения готовых полимерных изделий [10].

В данной работе не ставилась цель отобразить во всем многообразии процесс изготовления изделия из термопласта литьевым методом. Задача состояла в том, чтобы на конкретном примере с термомеханических позиций рассмотреть влияние только одного из множества факторов, способствующих возникновению коробления детали: неравномерное ее охлаждение после извлечения из литьевой формы.

Наиболее очевидный вариант уменьшения возникающих при остывании деформаций – варьирование коэффициентом температурного расширения

материала. Сделать это можно, если вместо чистого термопласта взять композит на его основе, причем в качестве наполнителя использовать материал с отрицательным значением коэффициента температурного расширения (КТР). Такие материалы давно известны – это сегнетокерамики [11,12]. В настоящее время они достаточно широко используются в технике (в основном как пьезоматериалы). Сегнетокерамики относятся к классу сегнетоэлектрических материалов, в которых в определенном интервале температур происходит спонтанная поляризация кристаллов даже в отсутствие внешнего электрического поля (и, соответственно, изменяется объем тела). Исследование физической природы возникновения отрицательной температурной сжимаемости материалов выходят за рамки данной статьи. Достаточно полный обзор современных представлений об этом можно найти в [13-21].

1. МЕТОДЫ

Модельные исследования вели на основе полиэтилена, наполненного дисперсными сегнетокерамическими частицами. Полиэтилен – один из самых дешёвых и распространенных полимеров, способных перерабатываться всеми известными для термопластов высокопроизводительными методами (в том числе и литьем под давлением). При расчетах в качестве матрицы был выбран полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) с температурой плавления в диапазоне в диапазоне примерно от 400К до 450К. Остальные его физико-механические свойства соответствовали типичным значениям для этого типа полимеров [22]. Они приведены в табл.1.

Таблица 1.

Физико-механические свойства полиэтилена (матрица).

Наименование физического свойства	Значение, единицы измерения
Плотность ρ_m	930 kg/m ³
Теплопроводность k_m	0.2 W/(m·K)
Удельная теплоёмкость c_m	2000 J/(kg·K)
Модуль Юнга E_m	80 МПа
Коэффициент Пуассона ν_m	0.48
Коэффициент линейного температурного расширения α_m	150×10^{-6} 1/K

Физико-механические характеристики наполнителя, используемые при моделировании, соответствовали свойствам PZT сегнетокерамики ПКР-7М (твёрдый раствор титаната-цирконата свинца $Pb(Ti,Zr)O_3$) [23,24]. Предполагалось, что частицы наполнителя имеют зернистую форму и случайным образом равномерно распределены по объёму матрицы, то есть композит изначально макроизотропен. PZT сегнетокерамика имеет отрицательные значения коэффициента теплового расширения в диапазоне температур 400-500 К (рис.1). Физико-механические характеристики наполнителя представлены в табл.2.

Физико-механические свойства композитной системы (плотность ρ , коэффициент Пуассона ν , коэффициент линейного теплового расширения α , удельная теплоемкость c , удельная теплопроводность k) задавали в соответствии с классическим правилом «смесей» для двухкомпонентной среды [25], формулы (1-5).

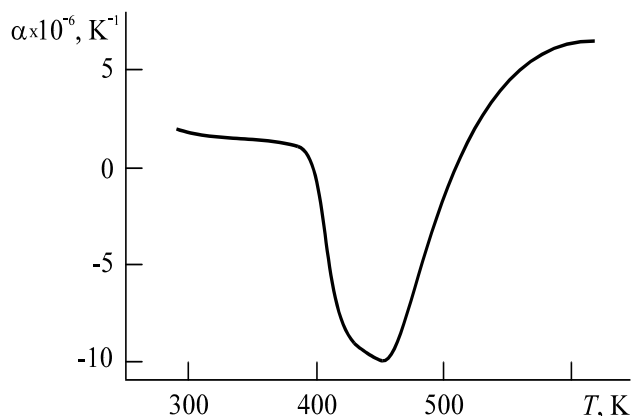


Рис.1. Температурная зависимость линейного коэффициента теплового расширения для титаната-цирконата свинца Pb(Ti,Zr)O₃ [22].

Таблица 2.

Физико-механические свойства PZT сегнетокерамики ПКР-7М (наполнитель).

Наименование физического свойства	Значение, единицы измерения
Плотность ρ_p	7600 kg/m ³
Теплопроводность κ_p	1.85 W/(m·K)
Удельная теплоёмкость c_p	320 J/(kg·K)
Модуль Юнга E_p	570000 МПа
Коэффициент Пуассона ν_p	0.48
Коэффициент линейного температурного расширения α_p	-5×10^{-6} 1/K

$$\rho = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_m, \tag{1}$$

$$\nu = \varphi \nu_p + (1 - \varphi) \nu_m, \tag{2}$$

$$\alpha = \varphi \alpha_p + (1 - \varphi) \alpha_m, \tag{3}$$

$$\kappa = \varphi \kappa_p + (1 - \varphi) \kappa_m, \tag{4}$$

$$c = \varphi c_p + (1 - \varphi) c_m. \tag{5}$$

Индекс p относится к наполнителю, m – к матрице, φ – объемная концентрация наполнителя. Для вычисления модуля Юнга композита E формула «смеси» неприменима, так как модуль наполнителя E_p на четыре порядка превышает модуль матрицы E_m (т.е. частицы можно считать абсолютно жесткими). В связи с этим композитный модуль рассчитывали с помощью известной экспериментально-феноменологической зависимости (6), полученной в [26] для композитов со случайным расположением жестких частиц дисперсной фазы

$$E = E_m \left(1 + 1.25 \frac{\varphi}{1 - \varphi / 0.605} \right)^2. \tag{6}$$

Известно, что ввод более жесткого наполнителя в полимер, как правило, улучшает его механические характеристики [27,28], поэтому наполнение ПЭ частицами PZT керамики должно как минимум не ухудшить эксплуатационные свойства вертушки. Специально этот вопрос нами не исследовался, так как он выходит за рамки данного исследования. Проблема изменения массы изделия и, соответственно, увеличения центробежных сил при вращении вертушки его также

не рассматривалась. Основная задача состояла в том, чтобы показать принципиальную возможность компенсации температурного коробления за счет ввода наполнителя с отрицательным КТР. С другой стороны, существует множество ситуаций, когда вес вертушки не имеет особого значения для эксплуатации: например, низкоскоростные вентиляторы. Зависимости физико-механических свойств композита от степени наполнения представлены в табл.3.

Таблица 3.

Физико-механические свойства композита.

φ	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\kappa, \text{W/(m}\cdot\text{K)}$	$c, \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$	E, MPa	ν	$\alpha, 1/\text{K}$
0 %	930	0.2	2090	80	0.48	$170 \cdot 10^{-6}$
5 %	1260	0.28	2015	91	0.48	$161 \cdot 10^{-6}$
10 %	1598	0.36	1913	105	0.48	$152 \cdot 10^{-6}$
15 %	1930	0.47	1824	124	0.48	$143 \cdot 10^{-6}$
20 %	2260	0.53	1736	150	0.48	$135 \cdot 10^{-6}$
25 %	2598	0.61	1675	187	0.48	$126 \cdot 10^{-6}$
30 %	2930	0.69	1559	243	0.48	$117 \cdot 10^{-6}$

Моделирование влияния наполнителя с отрицательным коэффициентом теплового расширения на искажение формы тела при неоднородном остывании проводили на примере четырехлопастной вертушки вентилятора с внешним ободом (рис.2). Геометрические размеры детали были таковы:

Лопатка: высота 1 см, длина (по радиусу) 65.85 см, угол раскрытия сектора 45° .

Ступица: высота 20 см, диаметр 13 см.

Обод: высота 5 см, толщина обода 1.85 см, внешний диаметр 135.4 см.

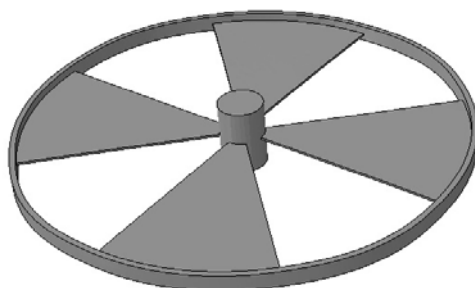


Рис.2. Четырехлопастная вертушка вентилятора (исходная форма).

Опыт показывает, что температура термопласта в момент перехода материала из жидкого в деформируемое состояние T_s зависит от давления во время отливки детали, скорости охлаждения материала и ряда других технологических факторов [4], то есть в разных частях отливки она может быть разная. Также одной из наиболее часто возникающих в литейном производстве проблем является неправильное охлаждение литейной формы, из-за чего в ней возникает неравномерность распределения по температуре [5].

Поскольку задача моделирования технологической стадии изготовления не ставилась детали (нас интересовала качественная оценка возможности снижения коробления детали при остывании за счет ввода "сжимающегося" наполнителя), то было принято, что распределение температуры по объему каждой из частей крыльчатки вентилятора (обод, лопатки, ступица) было

постоянным. При этом предполагалось, что в частях с большей площадью поверхности нагрев изделия в заготовке был сильнее.

Значения $\Delta T = T - T_s$ (T – температура на заданный момент времени) на ободке принимали равным 50К, на лопатках – 120К, на ступице – 10К. Считали, что вертушка вентилятора испытывает только температурные напряжения, связанные с ее неравномерным охлаждением, то есть внешняя нагрузка к телу не прикладывалась, а массовые силы отсутствовали.

Задачу решали в рамках линейной теории термоупругих деформаций. При этом использовали уравнения классической термоупругости которые в общем случае имеют вид [29]

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu) \alpha \nabla T + \mathbf{F} = 0, \quad (7)$$

где λ – константа Ляме, μ – модуль сдвига, \mathbf{F} – массовые силы. Связь между напряжениями (σ_{ij}) и деформациями (ε_{ij}) задавали через соотношения Дюгамеля-Неймана

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + \lambda (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \delta_{ij} - (3\lambda + 2\mu) \alpha \Delta T. \quad (8)$$

Решение искали в трехмерной постановке методом конечных элементов в пакете ANSYS (Лицензия ANSYS Academic Research Mechanical and CFD для ИМСС УрО РАН). При построении сетки использовали гексаэдральные элементы 1-го порядка (кубические). Предварительно были проведены исследования устойчивости численного решения от числа элементов в сетке и вида ее разбиения. Результат считался достоверным, когда расхождение по напряжениям в контрольных точках не превышало 3-5%. Было установлено, что для данной геометрии вентилятора требуется порядка 150000 элементов. При расчетах, результаты которых приведены ниже, обод разбивался на 34840 элементов, ось на 27000 элементов, лопатка на 33320 элементов.

Расчеты показали, что под действием температурной усадки возможно значительное искажение формы вертушки даже в рамках теории линейной теории термоупругих деформаций. Практически, в этом случае наблюдается та же ситуация, что и в случае изгиба балки, когда деформации в каждой точке сечения малы, а абсолютный прогиб достигает значений, соизмеримых с ее длиной.

Никаких дополнительных ограничений и условий, учитывающих циклическую симметрию вертушки, не задавалось. Задача эта неустойчивая, то есть потеря симметричного решения может наступить при сколь угодно малых отклонениях. Поэтому любое (даже самое незначительное) несовершенство формы рассчитываемой конструкции (а на практике оно всегда имеется) способно привести к таким эффектам. В нашем случае при задании расчетной геометрии детали относительный разброс по линейным размерам лопастей составлял порядка 0.1%.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ниже представлены результаты, полученные для вариантов с различной концентрацией PZT-наполнителя φ , которая изменялась от 0 до 40%. Значение $\varphi=0\%$ соответствует вентилятору из чистого полиэтилена. Согласно расчетам, его форма после охлаждения должна принять вид, показанный на рис.3 (вид сбоку). Наблюдается хорошо выраженное коробление детали. Совершенно ясно, что в таком виде она к эксплуатации непригодна. То есть требуются какие-то дополнительные меры для исправления данной ситуации (ввод PZT-наполнителя).

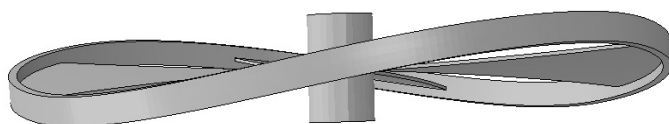


Рис.3. Вертушка вентилятора из чистого полиэтилена после охлаждения, $\varphi=0\%$.

На рис.4 представлен вариант, когда вентилятор сделан из композита с 15%-ным наполнением $Pb(Ti,Zr)O_3$. Коробление детали стало явно меньше, но все еще остается значительным.

Расчеты показали, что для данной геометрии детали и физико-механических свойств компонент в композитную систему необходимо примерно 25-30% наполнителя по объему чтобы практически полностью «погасить» эффект температурного коробления. Вариант расчета с 25%-ным наполнением показан на рис.5.

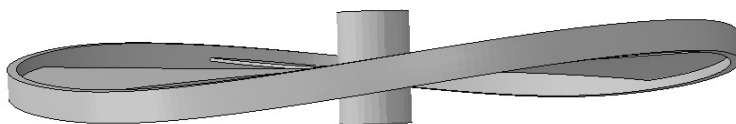


Рис.4. Вертушка вентилятора из наполненного полиэтилена после охлаждения, $\varphi=15\%$.

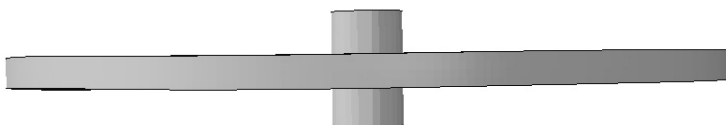


Рис.5. Вертушка вентилятора из наполненного полиэтилена после охлаждения, $\varphi=25\%$.

Количественно степень температурного коробления вертушки оценивали с помощью отношения максимального смещения обода вертушки от исходной конфигурации к ее диаметру (фактор температурного коробления K_{warp}). На рис.6 представлена его зависимость от концентрации наполнителя φ . Из графика видно, что полная компенсация температурного коробления для данного конкретного изделия происходит при значениях φ порядка 25-27%. При более высоких концентрациях картина не менялась. 25% – это уже достаточно большая концентрация дисперсной фазы и выбор применения данного способа компенсации коробления надо увязывать с рентабельностью производства таких изделий.

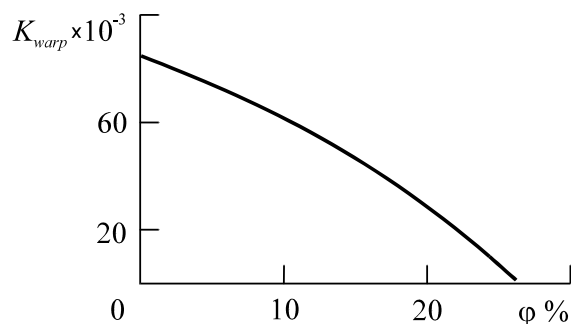


Рис.6. Концентрационная зависимость фактора температурного коробления K_{warp} .

Следует еще раз отметить, что данные выводы справедливы только для данного конкретного случая. Они показывают, что с помощью предложенного подхода действительно имеется теоретическая возможность снизить температурное коробление изделия.

ВЫВОДЫ

Методами математического моделирования проведена теоретическая оценка возможности компенсации температурного коробления пластмассовых деталей сложной формы, получаемых методом литья под давлением, за счет ввода в полимер дисперсного наполнителя с отрицательным коэффициентом температурного расширения. На конкретном примере в виде вертушки вентилятора, изготовленной полиэтилена (матрица), наполненного дисперсными PZT-частицами ($\text{Pb}(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_3$). Теоретически исследованы условия возникновения коробления и величина искажения формы в зависимости от концентрации наполнителя. Установлено, что для рассматриваемой в работе конструкции полная компенсация температурного коробления происходит, если в композите содержится не менее 25% PZT-наполнителя.

Таким образом, можно утверждать, что проведенные исследования показали принципиальную возможность использования предложенного подхода для снятия нежелательных температурных деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bryce D.M. *Plastic injection molding: Manufacturing process fundamentals*. – Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1996. – 277 p.
2. Shenoy A. *Thermoplastic melt rheology and processing (Plastics engineering)*. – USA: CRC Press, 1996. – 480 p.
3. Kamal M., Isaev A., Liu Shih-Jung *Injection molding: technology and fundamentals*. – Hanser Publications, 2009. – 926 p.
4. White J.L., Choi D.D. *Polyolefins Processing, Structure Development, and Properties*. – Munich: Carl Hansen Verlag, 2007. – 271 p.
5. Мэллой Р.А. *Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением*. – СПб.: Профессия, 2008. – 512 с.
6. Fisher J.M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Plastics Design Library. – USA: Willam Andrew Inc., 2013. – 292 p.
7. Hassan H. *Heat transfer during injection Molding*. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 400 p.
8. Nan S.O., Honglin Z., Wai H.W. *Plastic injection molding of high-aspect ratio micro-rods // Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – Vol.21. – Pp.824-831.
9. Zheng R., Tanner R.I., Fan Xi-Jun. *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 118 p.
10. McCrum N., Buckley C., Bucknall C. *Principles of Polymer Engineering*. – Oxford Sci. Publ., 1997. – 464 p.
11. Lines M.E., Glass A.M. *Principles and application of ferroelectrics and related materials*. – Oxford: Clarendon Press, 1977. – 694 p.
12. Safari A. *Piezoelectric and acoustic Materials for Transducer Applications*. – Springer US, 2008. – 482 p.

13. Chu C.N., Saka N., Suh N.P. *Negative thermal expansion ceramics: A review* // Mater. Sci. Eng. – 1987. – Vol.95. – Pp.303-308.
14. Roy R., Agrawal D.K., McKinstry H.A. *Very low thermal expansion coefficient materials* // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1989. – Vol.19. – Pp.59-81.
15. White G.K. *Thermal expansion and contraction* // Contemp. Phys. – 1993. – Vol.34. – No.4. – Pp.193-204.
16. Roy R., Agrawal D. *Thermal-expansion materials not so new* // Nature. – 1997. – Vol.388. – Pp.433-433.
17. Sleight A.W. *Compounds that contract on heating* // Inorg. Chem. – 1998. – Vol.37. – No.12. – Pp.2854-2860.
18. Evans J.S.O. *Negative thermal expansion materials* // J. Chem. Soc., Dalton Trans. – 1999. – Vol.19. – Pp.3317-3326.
19. Barrera G.D., Bruno J.A.O., Barron T.H.K., Allan N.L. *Negative thermal expansion* // J. Phys.: Condens. Matter. – 2003. – Vol.17. – No.4. – Pp.R217-R252.
20. Takenaka K. *Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion* // Sci. Technol. Adv. Mater. – 2012. – Vol.13. – Pp.1-11.
21. Lind C. *Two Decades of Negative Thermal Expansion Research: Where Do We Stand* // Materials. – 2012. – Vol.5. – Pp.1125-1154.
22. Кабанов В.А. и др. *Энциклопедия полимеров*. – Москва, 1977. – Т.3. – 1152 с.
23. Kallaeв S.N., Gadzhiev G.G., Kamilov I.K., Omarov Z.M., Sadikov S.A., Reznichenko L.A. *Thermal properties of ferroelectric ceramics based on PZT* / Physics of Solid State. – 2006. – Vol.48. – No.6. – Pp.1169-1170.
24. Kallaeв S.N., Omarov Z.M., Mitarov R.G., Sadykov S.A. *Thermal physical properties of ferroelectric ceramics PKR-7M near the diffuse phase transition* / Physics of Solid State. – 2011. – Vol.53. – No.7. – Pp.1378-1382.
25. Christensen R.M. *Mechanics of composite materials*. – New York: Wiley-InterScience, 1979. – 348 p.
26. Chong J.S., Christiansen E.B., Baer A.D. *Rheology of concentrated suspension* / J. Appl. Polym. Sci. – 1971. – Vol.15. – Pp.2007-2021.
27. Garishin O.K. *Mechanical properties and fracture of disperse-filled elastomers. Structural modeling*. – Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing (LAP), 2012. – 286 p.
28. Abraham R., Thomas S.P., Kuryan S., Isac J., Varughese K.T., Thomas S. *Mechanical properties of ceramic-polymer nanocomposites* // Express Polymer Letters. – 2009. – Vol.3. – No.3. – Pp.177-189.
29. Амензаде Ю.А. *Теория упругости*. – М.: Высшая школа, 1976. – 272 с.

REFERENCES

1. Bryce D.M. *Plastic injection molding: Manufacturing process fundamentals*. Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 1996, 277 p.
2. Shenoy A. *Thermoplastic melt rheology and processing (Plastics engineering)*. USA, CRC Press, 1996, 480 p.
3. Kamal M., Isaev A., Liu Shih-Jung *Injection molding: technology and fundamentals*. Hanser Publications, 2009, 926 p.
4. White J.L., Choi D.D. *Polyolefins Processing, Structure Development, and Properties*. Munich, Carl Hansen Verlag, 2007, 271 p.

5. Melloi R.A. *Konstruivovanie plastmassovykh izdelii dlia lit'ia pod davleniem [Construction of plastic products for injection molding]*. St. Petersburg, Professia, 2008. – 512 p.
6. Fisher J.M. *Handbook of molded part shrinkage and warpage*. Plastics Design Library, USA, Willam Andrew Inc., 2013, 292 p.
7. Hassan H. *Heat transfer during injection Molding*. LAP Lambert Academic Publishing, 2011, 400 p.
8. Nan S.O., Honglin Z., Wai H.W. *Plastic injection molding of high-aspect ratio micro-rods*. Materials and Manufacturing Processes, 2006, Vol.21, Pp.824-831.
9. Zheng R., Tanner R.I., Fan Xi-Jun. *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 118 p.
10. McCrum N., Buckley C., Backnall C. *Principles of Polymer Engineering*. Oxford Sci. Publ., 1997, 464 p.
11. Lines M.E., Glass A.M. *Principles and application of ferroelectrics and related materials*. Oxford, Clarendon Press, 1977, 694 p.
12. Safari A. *Piezoelectric and acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer US, 2008, 482 p.
13. Chu C.N., Saka N., Suh N.P. *Negative thermal expansion ceramics: A review*. Mater. Sci. Eng., 1987, Vol.95, Pp.303-308.
14. Roy R., Agrawal D.K., McKinstry H.A. *Very low thermal expansion coefficient materials*. Annu. Rev. Mater. Sci., 1989, Vol.19, Pp.59-81.
15. White G.K. *Thermal expansion and contraction*. Contemp. Phys., 1993, Vol.34, No.4, Pp.193-204.
16. Roy R., Agrawal D. *Thermal-expansion materials not so new*. Nature, 1997, Vol.388, Pp.433-433.
17. Sleight A.W. *Compounds that contract on heating*. Inorg. Chem., 1998, Vol.37, No.12, Pp.2854-2860.
18. Evans J.S.O. *Negative thermal expansion materials*. J. Chem. Soc., Dalton Trans., 1999, Vol.19, Pp.3317-3326.
19. Barrera G.D., Bruno J.A.O., Barron T.H.K., Allan N.L. *Negative thermal expansion*. J. Phys.: Condens. Matter., 2003, Vol.17, No.4, Pp.R217-R252.
20. Takenaka K. *Negative thermal expansion materials: technological key for control of thermal expansion*. Sci. Technol. Adv. Mater., 2012, Vol.13, Pp.1-11.
21. Lind C. *Two Decades of Negative Thermal Expansion Research: Where Do We Stand*. Materials, 2012, Vol.5, Pp.1125-1154.
22. Kabanov V.A. et al. *Entsiklopediia polimerov [Encyclopedia of polymers]*. Moskva, 1977, Vol.3, 1152 p.
23. Kallaev S.N., Gadzhiev G.G., Kamilov I.K., Omarov Z.M., Sadikov S.A., Reznichenko L.A. *Thermal properties of ferroelectric ceramics based on PZT*. Physics of Solid State, 2006, Vol.48, No.6, Pp.1169-1170.
24. Kallaev S.N., Omarov Z.M., Mitarov R.G., Sadykov S.A. *Thermal physical properties of ferroelectric ceramics PKR-7M near the diffuse phase transition*. Physics of Solid State, 2011, Vol.53, No.7, Pp.1378-1382.
25. Christensen R.M. *Mechanics of composite materials*. New York, Wiley-InterScience, 1979, 348 p.
26. Chong J.S., Christiansen E.B., Baer A.D. *Rheology of concentrated suspension*. J. Appl. Polym. Sci., 1971, Vol.15, Pp.2007-2021.

27. Garishin O.K. *Mechanical properties and fracture of disperse-filled elastomers. Structural modeling*. Saarbrucken, Germany, Palmarium Academic Publishing (LAP), 2012, 286 p.
28. Abraham R., Thomas S.P., Kuryan S., Isac J., Varughese K.T., Thomas S. *Mechanical properties of ceramic-polymer nanocomposites*. Express Polymer Letters, 2009, Vol.3, No.3, Pp.177-189.
29. Amenzade Iu.A. *Teoriia uprugosti [Theory of elasticity]*. Moskva, Vysshaia shkola, 272 p.

Поступила в редакцию 25 июля 2016 года

Сведения об авторах:

Гаришин Олег Константинович – д.ф.-м.н., с.н.с., ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия; e-mail: gar@icmm.ru

Корляков Антон Сергеевич – асп., ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия; e-mail gar@icmm.ru

Шадрин Владимир Васильевич – вед. спец., ФГБУН Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия; e-mail: shadrin@icmm.ru