

# ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.744.072.2

Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ТОЧНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию размерной точности фотополимерных высокопористых моделей, используемых в литье при формообразовании керамической оболочковой формы. Применение моделей, заполненных ячеистой структурой в литье, связано со снижением брака керамических форм в процессе выжигания и прокали. Уменьшение силового воздействия на керамику происходит благодаря деформации ячеистого массива во внутрь модели. Используемый в работе материал относится к классу шиштых полимеров, до отверждения представляет желтую непрозрачную жидкость. Переход материала из жидкого состояния в твердое при воздействии сконцентрированного источника света сопровождается усадочными процессами, оказывающими влияние на погрешность при послойном построении моделей. Поэтому актуальной задачей исследования является оценка эволюции погрешности при формообразовании и последующей полимеризации модели с ячеистым заполнением. В работе описана методика проектирования моделей, представляющих собой оболочку, заполненную массивом ячеек. Приведены физико – механические свойства материала и геометрические параметры варьирования размеров ячейки. Представлена методика контроля исследуемых образцов и параметры точности. По результатам экспериментов установлено, что при увеличении объемного содержания материала в образце за счет увеличения толщины перемычки отклонения исследуемого параметра точности диаметра увеличиваются до и после полимеризации материала. Минимальные отклонения достигнуты при использовании ячейки с толщиной перемычки 0,2 мм. Исследование точности по показателю неплоскостности показало, что минимальные отклонения достигнуты при среднем объемного содержания материала в модели с толщиной перемычки ячейки 0,4 мм. После полимеризации минимальные отклонения неплоскостности достигнуты при толщине перемычки 0,2 мм. Минимальные отклонения параметра нецилиндричности достигнуты при максимальной толщине перемычки 0,6 мм. Полученные данные позволяют прогнозировать отклонения формы моделей, заполненных ячеистой структурой, и вносить изменения в компьютерную модель на этапе проектирования.

**Ключевые слова:** прототипирование, нецилиндричность, неплоскостность, отклонение, точность, фотополимерная модель, ячеистая структура, дополимеризация, литье по выжигаемым моделям.

### Введение

С увеличением потребности машиностроительной отрасли в отливках сложной конфигурации возрастает роль специальных способов литья. Литье по выжигаемым моделям (ЛВМ) полностью удовлетворяет требованиям изготовления и качеству сложнопрофильных отливок.

Многооперационность способа и широкий спектр используемых материалов подразумевает высокую себестоимость и недопустимость брака на всех этапах технологического процесса литья, особенно при опытно–конструкторских работах и при переходе на новый тип отливок [1].

К числу прогрессивных способов повышения эффективности (ЛВМ) относятся технологии быстрого прототипирования (БП), позволяющие послойно изготавливать модели отливок без дополнительной оснастки и инструмента. В отличие от традиционного способа изготовления моделей в металлических прессформах, технологии БП

позволяют внести изменения в конструкцию модели, сократить время на научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу, снизить затраты на опытную партию отливок.

Применение моделей отливок, изготовленных по технологии БП в ЛВМ, связано с некоторыми технологическими трудностями. Одной из причин является возникновение брака керамических оболочковых форм (КОФ) в процессе выжигания модельного материала и прокалики форм перед заливкой, а именно растрескивание керамического блока из-за различия термомеханических свойств керамики и используемого полимерного материала. Поэтому на многих предприятиях использование выжигаемых полимерных моделей не реализовано. Одним из направлений снижения брака КОФ является использование полимерных моделей, заполненных ячеистой структурой.

Определенный вклад в данное направление внесли работы исследователей Зленко, Морозова, Yao, Norouzi [2-5]. В своих работах авторы анализировали формы ячеистых структур и их

©Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А., 2019

Физико – механические свойства фотополимерной композиции Si500

Модуль упругости на растяжение $E^g$ , ГПа	2,68
Предел прочности на разрыв $[\sigma_p]$ , МПа	78,1
Относительная деформация при разрыве $[\varepsilon_p]$ , %	4,39
Предел прочности при изгибе $[\sigma_b]$ , МПа	65
Модуль сдвига $G^g$ , ГПа	2,5
Температура стеклования $T_g$ , С°	61
Плотность в жидком состоянии $\rho_{liq}$ , г/см <sup>3</sup>	1,1
Плотность в твердом состоянии $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,2

влияние на напряжённо-деформированное состояние (НДС) системы модель отливки – КОФ при температурах деструкции полимера около 300 С°. Используя треугольные, квадратные и шестиугольные формы ячеек в выжигаемых моделях, авторам удалось достигнуть положительных результатов в значениях напряжений в КОФ при нагреве, позволяющих в некоторых случаях обеспечить сохранность формы. Однако оптимальной формы ячеистых структур на данный момент не существует. Выбор того или иного типа структуры зависит от физико – механических свойств используемого полимера и их изменения при послойном формообразовании и нагреве.

Кроме исследования НДС в КОФ при нагреве, необходимо уделить внимание изучению вопроса точности выжигаемых моделей, заполненных ячеистой структурой при послойном формообразовании и постобработке, заключающейся в дополимеризации материала (отверждение). Используемые материалы при послойном формообразовании под воздействием источников света переходят из жидкого в твердое состояние. Данный процесс сопровождается усадкой материала и возникновением разных по значению напряжений в изготавливаемой модели, что напрямую связано с размерной точностью.

Поэтому актуальной задачей является исследование и установление закономерностей изменения точности моделей, заполненных ячеистой структурой, в процессе формообразования и полимеризации материала.

Целью работы является экспериментальное определение влияния внутренней ячеистой структуры модели на размерную точность фотополимерных образцов.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являются модели, заполненные ячеистой структурой, выполненные из фотополимерной композиции SI500. Материал относится к классу сшитых полимеров на основе акрилатов, до полимеризации представляет желтую непрозрачную жидкость. Физико – химические свойства представлены в табл.1.

Экспериментальные образцы с внутренней ячеистой структурой изготовлены на установке для послойного синтеза фотополимерного материала. Основным отличием от классической стереолитографии являются уход от использования схемы с лазером для иницирования реакции фотополимеризации и замена его на несколько цифровых видеопроекторов, использующих технологию цифровой обработки светом (Digital Light Processing - DLP).

Суть процесса заключается в использовании «маски» каждого текущего сечения модели, проецируемой на рабочую платформу через специальную систему зеркал очень малого размера с помощью видеопроектора, содержащего в своей конструкции лампы с высокой яркостью света. Платформа после засветки слоя опускается ровно на толщину следующего слоя в ванну с жидким полимером. Формирование и засветка видимым светом каждого слоя модели происходят с высокой скоростью (1 см/ч по высоте, при шаге построения 50 мкм). При использовании шага в 25 мкм на моделях практически отсутствуют характерные для всех технологий послойного синтеза ступеньки от слоев. Такая возможность позволяет получать изделия с высоким качеством поверхности с шероховатостью до Ra0,1 и точностью размеров 0,1 мм. Для эксперимента были изготовлены 9 образцов, представляющих собой цилиндр высотой 30 мм и диаметром 30 мм, заполненные ячеистой структурой типа Вигнера-Зейтца (рис.1). Образцы имеют различные параметры внутренней структуры, представленные в табл.2.

Проектирование высокопористых моделей с заданными геометрическими параметрами ячеистой структуры проводилось в несколько этапов (рис.1):

- 1) построение единичной ячейки, состоящей из цилиндрических и полуцилиндрических балок с заданным диаметром (толщина перемычки ячейки) (рис.1.,а);
- 2) построение массива ячеек по осям координат x,y,z (рис.1.,б);
- 3) построение фигуры (оболочка модели) в массиве ячеек (рис.1.,в);
- 4) удаление лишнего массива и объединение с оболочкой модели (рис.1.,г).

Геометрические параметры образцов

Номер образца	Толщина оболочки полимерной модели, мм	Линейные размеры ячейки, мм	Толщина перемычки ячейки, мм	Коэффициент пористости образца*
1	0,5	3	0,2	0,76
2		5		0,82
3		7		0,84
4		3	0,4	0,66
5		5		0,78
6		7		0,82
7		3	0,6	0,54
8		5		0,75
9		7		0,80

\*Отношение объемного содержания материала в образце относительно внутренних пустот, образованных массивом из единичных ячеек Вигнера – Зейтца.

Спроектированные модели, заполненные ячеистой структурой с разными геометрическими параметрами ячейки (толщина перемычки и размер ячейки), послойно выращивались по режиму, используемому в предыдущих исследованиях [6].

Измерение отклонений размеров и геометрии производилось в два этапа. На первом этапе изготовленные образцы для контроля геометрических параметров (отклонение диаметра от номинального размера, неплоскостность и нецилиндричность) измерялись сразу после построения с фиксацией отклонений. На втором этапе образцы дополимеризовывались в УФ – камере в течение 2-3 мин. На отвержденных образцах проведены замеры контролируемых параметров с фиксацией значений отклонений.

Контроль исследуемых геометрических параметров осуществлен с помощью 3- координатной измерительной машины с активным способом сканирования образцов (контактная шуповая система) (рис.2.).



Рис.2. Контроль исследуемых параметров

Измерения отклонений размеров диаметра до и после полимеризации проводились по трем сечениям с перемещением к верхней плоскости цилиндра. Определение параметра нецилиндричности проводилось с фиксацией координат точек, измеренных по спиральной траектории, проходящей с движением сканирующего шупа от нижней к верхней

плоскости цилиндра.

Результатом замера отклонений является среднее квадратичное значение координат отсканированных точек в количестве 100. Определение неплоскостности поверхности исследуемых образцов проводилось с фиксацией координат точек на верху цилиндрических образцов. Результатом замера отклонений является среднее квадратичное значение отсканированных точек поверхности в количестве 30 шт.

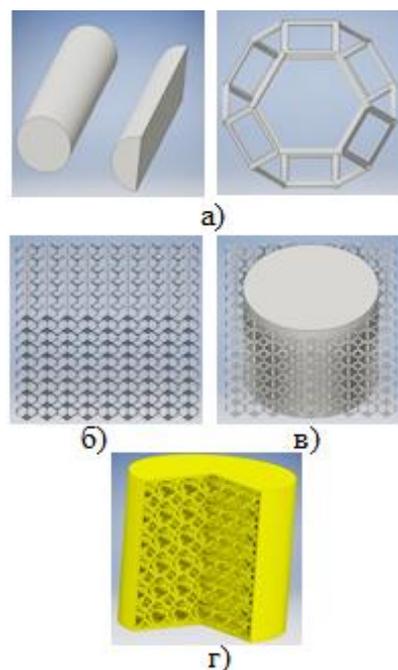


Рис.1. Построение высокопористой модели движением сканирующего шупа от нижней к верхней плоскости цилиндра.

#### Результаты исследования и обсуждения

Данные измерений, полученные в ходе исследования, сведены в рис.3,4.

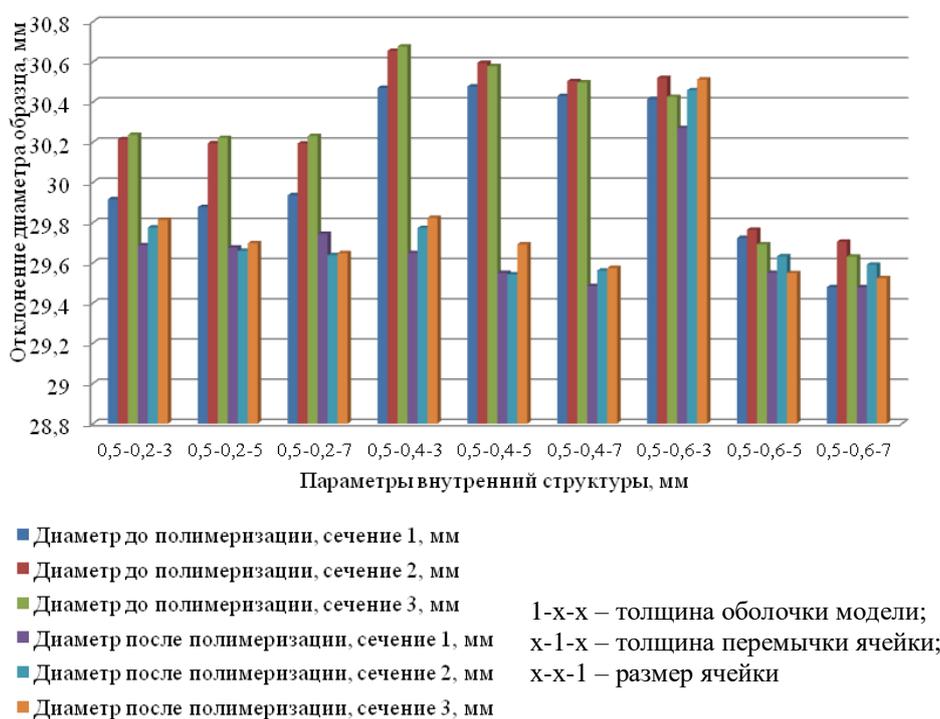


Рис.3. Отклонения диаметра образца от номинального размера в зависимости от геометрических параметров внутренней ячеистой структуры

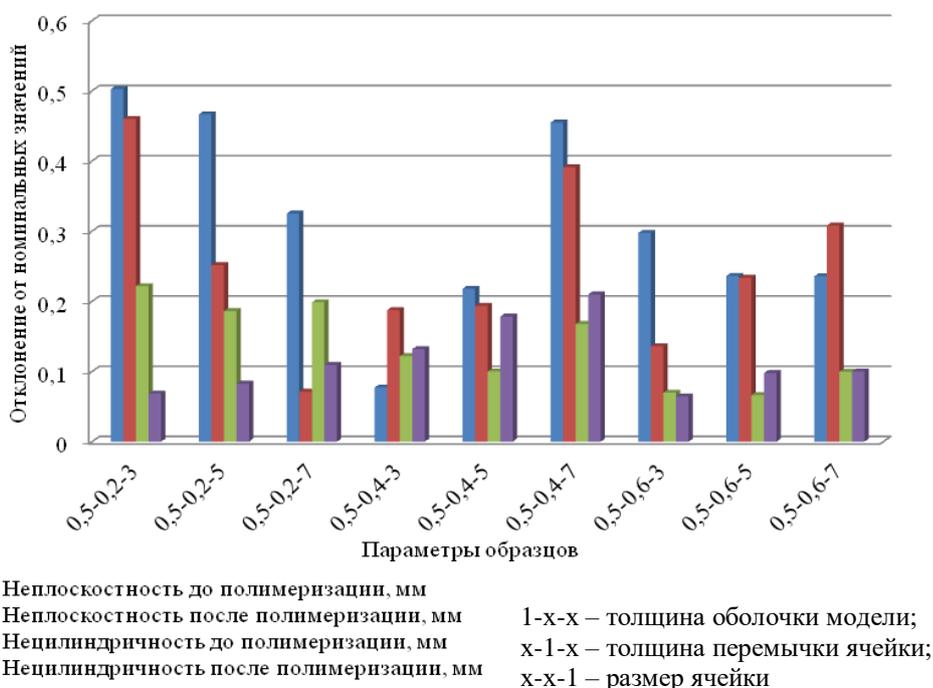


Рис. 4 Зависимость отклонений неплоскостности и нецилиндричности от параметров внутренней ячеистой структуры

На рис.3 показано изменение размеров диаметра до и после полимеризации в зависимости от геометрических характеристик ячеистой структуры. При увеличении толщины перемычки ячейки точность размеров диаметра в трех измеренных сечениях уменьшается. Процесс уменьшения размерной точности объясняется возникновением разных по значению напряжений, вызванных усадочными процессами. Увеличение толщины перемычки увеличивает площадь, обрабатываемую светом в процессе засветки и остаточные деформации в тонком слое. После дополимеризации значения отклонений диаметра в некоторой степени стабилизируются при максимальных размерах толщины перемычки. При этом отклонения в дополимеризованных образцах при толщине перемычки 0,4 и 0,6 отличаются практически на 0,1 мм от образцов с толщиной перемычки 0,2 мм, увеличивая погрешность размеров диаметра образцов.

На рис.4. представлено изменение показателей неплоскостности и нецилиндричности до и после полимеризации. До полимеризации минимальные отклонения показателя неплоскостности достигнуты при средней толщине перемычки 0,4 мм. После полимеризации минимальные отклонения, равные 0,07 мм, наблюдаются у образца с минимальной толщиной перемычки 0,2 мм и размером ячейки 7 мм. Минимальные отклонения нецилиндричности до и после полимеризации наблюдаются у образцов с толщиной перемычки 0,6 мм.

Полученные результаты, показывающие изменения параметров размерной точности, характеризуют неравномерность протекания усадочных процессов и различие в значениях напряжений при послойном построении и полимеризации фотополимерных моделей заполненных ячеистой структурой.

Развитием направления контроля точности моделей, изготовленных послойным наращиванием фотополимерных композиций, является прогнозирование эволюции погрешности с внесением отклонений в будущую модель на этапе проектирования, что позволит компенсировать деформации на этапах формообразования и последующей полимеризации.

### Список литературы

1. Технология литейного производства: Специальные виды литья: учебник для студ. вузов / Э.Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин; под ред. В. А. Рыбкина. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 352 с.
2. Зленко М.А., М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220
3. Yousef Norouzi, Sadegh Rehmati, Yousef Hojjat (2009), "A novel lattice structure for SL investment casting patterns"// Rapid Prototyping Journal, vol. 4. no.14, pp. 255–263.
4. W.L. Yao, Ming C. Leu. Analysis and design of internal web structure of laser stereolithography patterns for investment casting. Materials and Design 21.2000, pp. 101-109.
5. Морозов В. В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выжигаемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии : автореф. дис. канд. техн. наук / В. В. Морозов. М., 2005. 15 с.
6. Шумков А.А., Абляз Т. Р. Экспериментальное определение деформаций поверхностей литьевых мастер-моделей при послойном синтезе фотополимерного материала// Металлообработка. 2015. № 3(87). С. 54-57.

### Сведения об авторах

**Шумков Алексей Александрович** – ст. преп. кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: Shumkov\_89@mail.ru

**Матыгуллина Елена Вячеславовна** – д-р техн. наук, проф. кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: matik68@rambler.ru

**Трапезников Никита Владимирович** – аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: niktrap@yandex.ru

**Мальцев Алексей Аркадьевич** – магистр кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин», ПНИПУ, г. Пермь, Россия. E-mail: alexscar112@gmail.com

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

**INFLUENCE OF PARAMETERS OF CELLULAR STRUCTURE ON THE ACCURACY OF HIGHLY POROUS MODELS CASTING**

**Shumkov Aleksey A.** - Assistant Professor, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: Shumkov\_89@mail.ru

**Matygullina Elena V.** – D.Sc. (Eng.) Professor, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation. E-mail: matik68@rambler.ru

**Trapeznikov Nikita V.** - graduate student, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: niktrap@yandex.ru

**Mal'cev Aleksey A.** - master's degree, Department “Materials, Technology and Construction Machines”, Perm National Research Polytechnic University Perm, Russian Federation.

E-mail: alexscar112@gmail.com

**Abstract.** *The work is devoted to the study of dimensional accuracy of highly porous photopolymer models used in casting when forming a ceramic shell mold. The use of models filled with cellular structure in casting is associated with a decrease in the marriage of ceramic forms in the process of burning and calcining. The reduction of the force effect on ceramics is due to the deformation of the cellular volume inside the model. The material used in the work belongs to the class of cross-linked polymers, before curing it is a yellow opaque liquid. The transition of a material from a liquid to a solid state when exposed to a concentrated light source is accompanied by shrinkage processes that affect the error in the layering models. Therefore, an urgent task of the study is to evaluate the evolution of the error in the formation and subsequent polymerization of the model with a cellular filling. The paper describes the design technique of models representing a shell filled with an array of cells. The physical and mechanical properties of the material and the geometrical parameters of varying the cell size are given. The method of control of the studied samples and the accuracy parameters are presented. According to the results of the experiments, it was established that with an increase in the volume content of the material in the sample due to an increase in the thickness of the web, the deviations of the investigated parameter of the diameter accuracy increase before and after polymerization of the material. Minimal deviations are achieved when using a cell with a jumper thickness of 0.2 mm. According to the results of a study of accuracy in terms of non-flatness, the minimum deviations were achieved with an average volumetric content of the material in the model with a cell jumper thickness of 0.4 mm. After polymerization, the minimum deviations of flatness were achieved with a jumper thickness of 0.2 mm. The minimum deviations of the non-cylindrical parameter are achieved with a maximum jumper thickness of 0.6 mm. The data obtained allow to predict the deviations of the shape of the models filled with a cellular structure and to make changes to the computer model at the design stage.*

**Keywords:** *prototyping, non-cylindrical, flatness, deviation, accuracy, photopolymer model, cellular structure, prepolymerization, investment casting.*

---

Ссылка на статью

Шумков А.А., Матыгуллина Е.В., Трапезников Н.В., Мальцев А.А. Влияние параметров ячеистой структуры на точность высокопористых моделей отливок // Теория и технология металлургического производства. 2019. №1(28). С. 24-29.

Shumkov A.A., Matygullina E.V., Trapeznikov N.V., Mal'cev A.A. Influence of parameters of cellular structure on the accuracy of highly porous models casting. *Teoria i tehnologija metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2019, vol. 28, no. 1, pp.24-29.