

УДК 539.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ СТЕРЕОЛИТОГРАФИЧЕСКИМ СИНТЕЗ-МОДЕЛЯМ

© 2013 И.В. Самусев, О.Ю. Сметанников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 11.03.2013

В работе исследуются напряженно-деформированные состояния в керамической литейной форме при тепловом удалении литьевой синтез-модели. Рассматриваются стереолитографические литьевые модели с различными внутренними ячеистыми структурами из фотополимерных композиционных материалов.

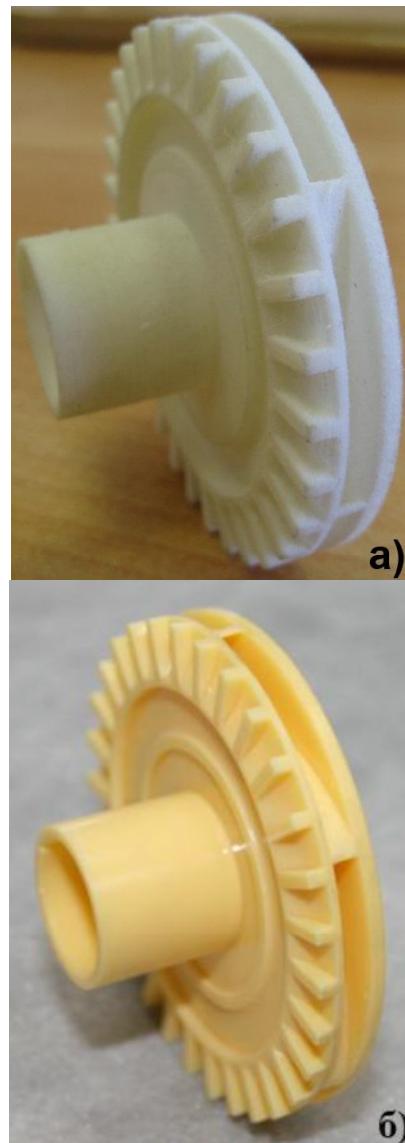
**Ключевые слова:** *прототипирование, стереолитография, литье, выплавляемая модель, ячеистая структура, метод конечных элементов*

Одной из основных областей применения изделий, полученных по технологии послойного синтеза (быстрого прототипирования) является литейное производство. Использование синтез-моделей в качестве выплавляемых литьевых моделей стало большим шагом к сокращению времени и снижению трудозатрат при выпуске продукции за счет отсутствия необходимости в дополнительных подготовительных операциях, таких как создание приспособлений, оснастки или закупки специального инструмента. В западной литературе такой процесс получил название «быстрое литье» (quick cast). Наибольшая экономическая эффективность данного подхода достигается, когда требуется получить небольшую партию сложных по форме деталей в сжатые сроки.

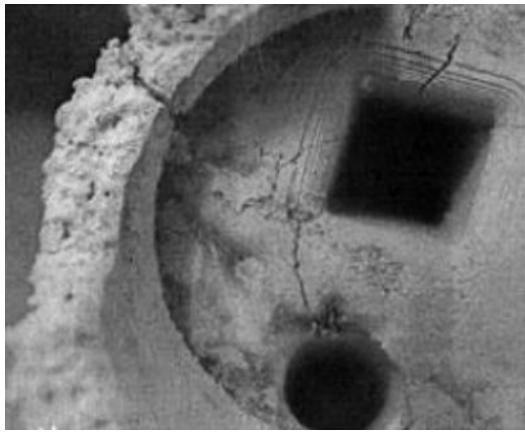
Для промышленного изготовления литьевых синтез-моделей используют технологию послойного спекания гранулированного полистирола (процесс SLS). Получаемые полистирольные синтез-модели имеют размерную точность в среднем  $\pm 0,15$  мм и шероховатость поверхности  $12 Ra-18 Ra$  [1]. Синтез-модели, построенные стереолитографией из жидких фотополимерных композиций на основе акриловых и эпоксидных смол (процесс SLA) характеризуются размерной точностью соответствующей квалитету  $IT\ 10-12$  и шероховатостью поверхности до  $0,1 Ra$ . Такие параметры аналогичны традиционным литьевым восковым моделям, получаемым в пресс-формах.

Самусев Илья Валерьевич, ассистент кафедры конструирования машин и технология обработки материалов. E-mail: samusev@yandex.ru

Сметанников Олег Юрьевич, доктор технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики. E-mail: sou2009@mail.ru



**Рис. 1.** Синтез-модели: а) SLS модель из полистирола; б) SLA модель из фотополимерного композита Envisiontec SI500



**Рис. 2.** Литейная форма с трещиной

**Цель работы:** оценка изменения напряженного состояния между литьевой синтез-моделью и керамической оболочкой при различных видах ячеистых структур, заполняющих внутреннее пространство литьевой синтез-модели в условиях теплового воздействия.

**Описание материалов и математической модели.** Для проведения численных экспериментов использовалась универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS. Математическая постановка задачи включает в себя (1.1)-(1.5) - уравнения равновесия:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma} = 0, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (1)$$

где  $\hat{\sigma}(\mathbf{x}, t)$  - тензор напряжений.

- геометрические соотношения Коши:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T), \quad \mathbf{x} \in V. \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$  - вектор перемещений,  $\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t)$  - тензор полных деформаций.

- определяющие соотношения:

$$\hat{\sigma} = \hat{C} \cdot (\hat{\varepsilon} - \hat{\varepsilon}_T), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (3)$$

где  $\hat{\varepsilon}_T$  - тензор температурной деформации,  $\varepsilon_T = \alpha T$ ,  $\alpha$  - коэффициент температурного расширения.

- граничные условия в перемещениях:

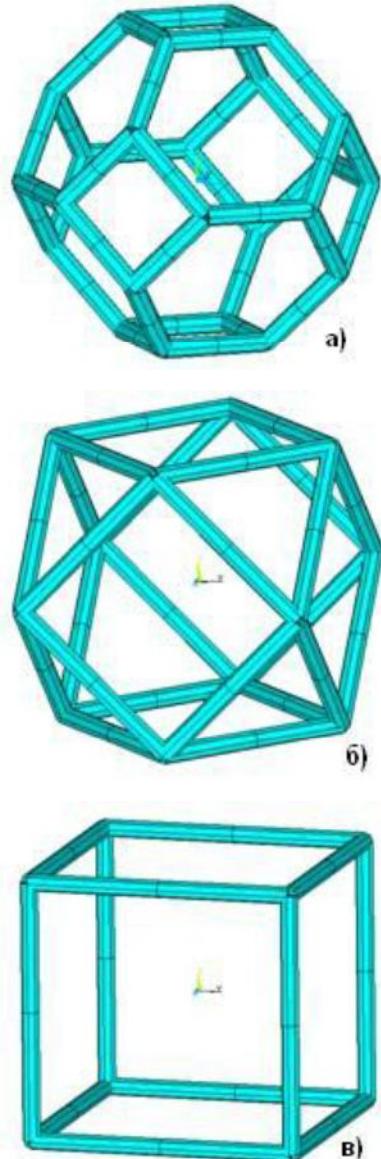
$$\mathbf{u} = \mathbf{U}, \quad \mathbf{x} \in S_u \quad (4)$$

и напряжениях

$$\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{P}, \quad \mathbf{x} \in S_\sigma \quad (5)$$

где  $S_u, S_\sigma$  - части границы с заданными перемещениями и нагрузками соответственно.

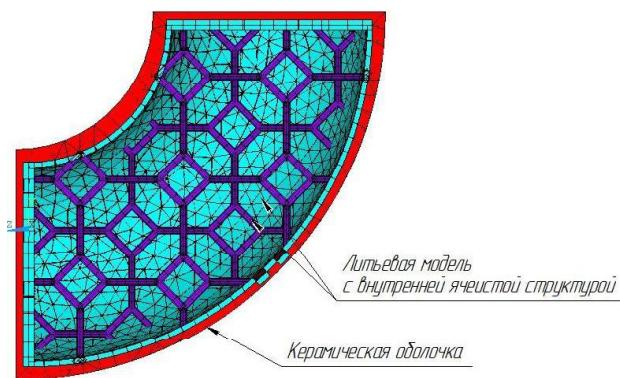
Для моделирования внутренней структуры использовались три варианта типовых ячеек: объемно-центрированная кубическая ячейка Вигнера-Зейтца, кубическая ячейка и кубооктаэдрическая ячейка (рис 3). Сама внутренняя ячеистая структура представляет собой стержневой массив, образованный периодическим копированием типовой единичной ячейки.



**Рис. 3.** Различные виды ячеек: а) ячейка Вигнера-Зейтца; б) кубооктаэдрическая ячейка; в) кубическая ячейка

Конечно-элементная модель исследуемого процесса строится следующим образом. В геометрическую фигуру в форме тора вписывается ячеистая структура, представляющая стержневой массив. При этом геометрические параметры типовых ячеек подбираются таким образом, чтобы обеспечить одинаковую пористость для всех исследуемых вариантов ячеистых структур. Выполняется операция пересечения объемов, для

выполнения условия целостности ячеистого массива и оболочки литьевой модели. Внешние области получившейся модели разбиваются элементами SHELL63, а внутренний ячеистый массив элементами BEAM189. Далее моделируется керамическая оболочка. В данном исследовании нас интересует напряженно-деформированное состояние керамической оболочки, так как именно в ней может возникнуть брак в процессе удаления синтез-модели. Фрагмент такой конечно-элементной модели представлен на рис. 4, внутренне пространство заполнено ячейками Вигнера-Зейтца.



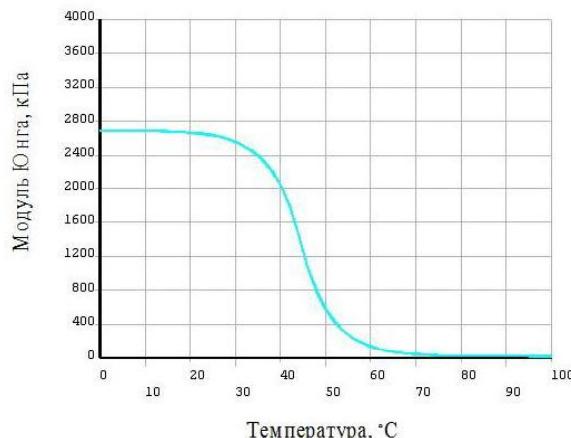
**Рис. 4. Фрагмент расчетной конечно-элементной модели**

В расчетной конечно-элементной модели материалом литьевой модели выступает фотополимерный композит Envisiontec SI500. Этот материал относится к классу сшитых полимеров на основе акрилатов, до полимеризации представляет собой желтую непрозрачную жидкость с запахом акрилата. Имеет следующие документированные физико-механические характеристики при нормальных условиях [3]: модуль упругости на растяжение  $E^s=2,68$  МПа; предел прочности на разрыв  $[\sigma]_p=78,1$  МПа; относительная деформация при разрыве  $[\varepsilon]_p=4,39\%$ ; предел прочности на изгиб  $[\sigma]_b=65$  МПа; модуль сдвига  $G^s=2,5$  МПа; температура стеклования  $T_g=61^\circ\text{C}$ ; плотность  $\rho_{liq}=1,1$  г/см<sup>3</sup> в жидком состоянии; плотность  $\rho=1,2$  г/см<sup>3</sup> в твердом состоянии.

Дополнительно для учета нелинейного поведения данного материала при нагревании была установлена зависимость между модулем Юнга и температурой при постоянной скорости нагрева в 2°C/мин (рис. 5). Для проведения эксперимента использовался цифровой динамический анализатор Netzsch DMA 242 C.

Для керамической оболочки взяты физико-механические характеристики кварца кристаллического (аморфного) из справочных материалов: плотность 2200 кг/м<sup>3</sup>; коэффициент

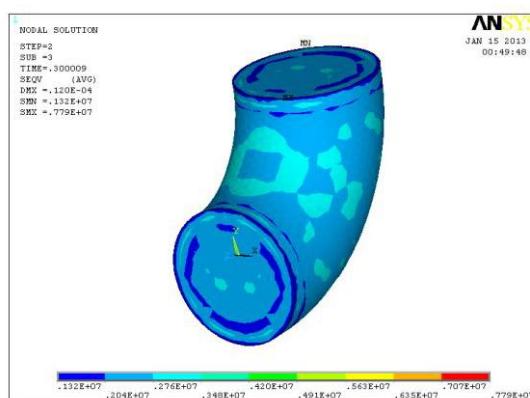
температурного расширения  $\alpha=5 \cdot 10^{-5} 1/\text{°C}$ ; коэффициент Пуассона 0,3; модуль Юнга 350 ГПа. Каждая из моделей подвергалась температурной нагрузке – нагрев от 20°C до 150°C.



**Рис. 5. Зависимость модуля Юнга от температуры при скорости нагрева 2°C/мин**

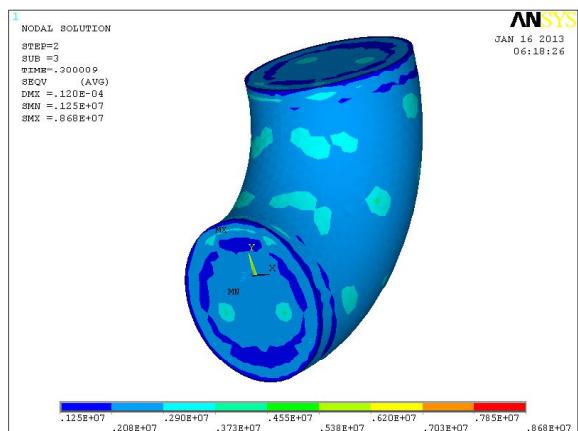
#### Полученные результаты и выводы.

Картинами интенсивности напряжений в керамической оболочке при различных типах ячеек, заполняющих внутренний объем литьевой модели представлены на рис. 6-8. Из них видно, как распределяются напряжения в керамической оболочке литейной формы. Максимальные напряжения образуются не на внешней поверхности, а на внутреннем ребре торцевого сечения тора. Неравномерная картина распределения интенсивности напряжений на внешней поверхности обусловлена наличием внутренней ячеистой структуры.

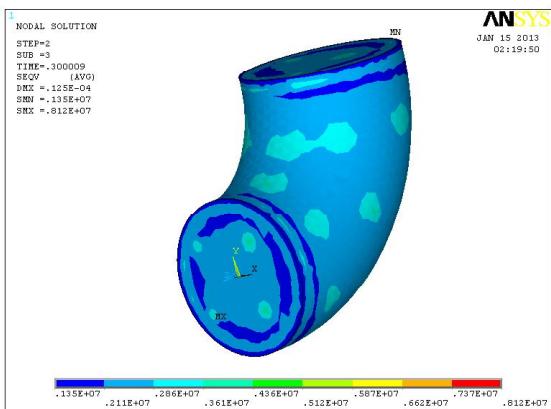


**Рис. 6. Напряжения в керамической оболочке для модели с внутренней ячеистой структурой, состоящей из ячеек Вигнера-Зейтца, Па**

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании ячеистой структуры на основе ячейки Вигнера-Зейтца (рис. 6) максимальные напряжения меньше, чем при использовании ячеек кубооктаэдрических и кубических ячеек.



**Рис. 7.** Напряжения в керамической оболочке для модели с внутренней ячеистой структурой, состоящей из кубооктаэдрических ячеек, Па



**Рис. 8.** Напряжения в керамической оболочке для модели с внутренней ячеистой структурой, состоящей из кубических ячеек

Так, максимальные напряжения для модели с ячейками Вигнера-Зейтца равны 7,79 МПа, с кубооктаэдрическими ячейками – 8,68 МПа и кубическими ячейками – 8,12 МПа. Из этого можно сделать вывод, что для изготовления литьевых моделей более предпочтительно использовать ячеистую структуру на основе ячейки Вигнера-Зейтца, так как снижается риск рас трескивания керамической оболочки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Иванов, В.Н. Литье по выплавляемым моделям. – М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
2. Морозов, В.В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выплавляемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии : Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04: Москва, 2005. 161 с.
3. Material Safety Data Sheet Photopolymer Industrial Shell: SI 500.
4. Сметаников, О.Ю. Экспериментальная идентификация модели термомеханического поведения стеклующихся полимеров / О.Ю. Сметаников, Н.А. Труфанов // Вестник удмуртского университета. Механика. 2009. Вып. 4. С. 133-145.
5. Зинкевич, О. Метод конечных элементов в технике. – М: Мир, 1975. 543 с.
6. Сапченко, И.Г. Теория и практика формирования пористых структур в литье по выплавляемым моделям. Автореферат дис. на соискание ученой степени д.т.н. – Комсомольск-на-Амуре, 2011. 31 с.
7. Norouzi, Y. A Novel Lattice Structure for SL Investment Casting Patterns / Y. Norouzi, S. Rahmati, Y. Hojjat // Tsinghua Science and Technology. 2009. Vol. 14. P. 255-263
8. Hopkinson, N. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. – John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 304 p.

## RESEARCH THE CELLULAR STRUCTURES IN MOULDING ON MELTED STEREOLITHOGRAPHIC SYNTHESIS-MODELS

© 2013 I.V. Samusev, O.Yu. Smetannikov

Perm National Research Polytechnical University

In work stress-strained states in ceramic molding box during thermal removal disposal the synthesis model are investigated. Stereolithographic molding models with various internal cellular structures from photopolymeric composites are considered.

Key words: *prototyping, stereolithograph, molding, melted model, cellular structure, finite element method*

Ilya Samusev, Assistant at the Department of Machines Construction and Technology of Processing the Materials. E-mail: samusev@yandex.ru  
Oleg Smetannikov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computing Mathematics and Mechanics. E-mail: sou2009@mail.ru