

УДК 531

**О.Ю. Сметанников, Е.С. Михалев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **КОМПЕНСАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ФОРМЫ ЛИТЬЕВЫХ ПРОТОТИПОВ В ANSYS**

Представлена численная модель процесса стереолитографии (SLA) для изготовления фотополимерных прототипов, реализованная в ANSYS. Предложена методика уменьшения дефектов формы путем модификации исходной геометрии. Выполнен сравнительный анализ отклонений формы после двух этапов расчета (с исходной и модифицированной геометрией) для трех вариантов конструктивного исполнения прототипа простейшей детали. Показано, что представленная методика позволяет снизить дефекты формы более чем в 5 раз.

**Ключевые слова:** ANSYS, стереолитография, дефекты формы, фотополимерный прототип.

**O.Iu. Smetannikov, E.S. Mikhalev**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **THE COMPENSATION OF TECHNOLOGICAL DEFECTS OF SHAPE OF CASTING PROTOTYPES IN ANSYS**

A numerical model of stereolithography (SLA) for the manufacture of photopolymer prototypes implemented in ANSYS is presented. A method for reducing defects by modifying the shape of the original geometry is offered. A comparative analysis of deviations of the form after two stages of analysis (the original and modified geometry) for three variants of design of a prototype of the simplest detail is done. It is shown that the presented method allows to reduce shape defects by more than 5 times.

**Keywords:** ANSYS, stereolithography, defects of shape, photopolymeric prototype.

Стереолитография (SLA) представляет собой процесс наращивания фотополимерных прототипов по компьютерной CAD-модели путем послойной полимеризации ультрафиолетовым лазером жидкого мономера. При этом платформа с прототипом, погруженная в мономер, пошагово опускается на толщину одного слоя под поверхностью жидкости перед каждым засвечиванием. Одной из основных проблем стереолитографии является наличие дефектов формы из-за усадки полимера.

Термомеханические эффекты при изготовлении литьевых прототипов рассмотрены, в частности, в работах [1–3]. Диссертация [1] по-

священа детальному анализу факторов, влияющих на качество литевой формы и ее разрушение. В статье [2] предложен алгоритм выбора метода оперативного макетирования и производства прототипов по эффективности обработки и геометрическим параметрам качества формируемой поверхности. В [3] представлена модель динамического затвердевания смол при фотополимеризации, выполнены численный конечно-элементный прогноз дефектов формы, сравнение его с экспериментом. В настоящей статье решение задачи компенсации усадочных дефектов формы проводится стандартными средствами пакета ANSYS.

## 1. Постановка задачи

Ранее был предложен вариант конструкции фотокомпозитного прототипа в виде оболочки с внутренним наполнителем из ячеек Вигнера-Зейтса [4]. В этом случае существенно снижаются расход материала и вероятность разрушения керамической литевой формы, а в сравнении с пустотелой конструкцией – предотвращается потеря устойчивости. Однако остается проблема остаточных усадочных деформации. Поэтому на данном этапе решаются две задачи: 1) моделирование послойного наращивания прототипа из фотокомпозита Envisiontec SI 500 в различных вариантах конструктивного исполнения с целью верификации расчетного алгоритма и сравнения их по критерию формоизменения; 2) задача компенсации дефектов формы на основе решения первой задачи.

## 2. Математическая модель

Математическая постановка задачи включает в себя: уравнения равновесия, геометрические соотношения Коши с учетом гипотезы малых деформаций, граничные условия в перемещениях и определяющие соотношения для линейно-вязкоупругого материала с учетом гипотезы о наличии температурно-временной аналогии по модели Вильямса – Ланделла – Ферри.

$$\hat{\sigma}(x, t) = \int_0^t \hat{R}(t'_R - \tau'_R) \cdot d(\hat{\epsilon}(x, \tau) - \hat{\epsilon}_T(x, \tau)), \quad x \in V, \quad (1)$$

$$t'_R = \int_0^t \frac{d\omega}{a_T^R(T(x, \omega), T_H^R)}, \quad x \in V; \quad \lg a_T^R = -C_1 \frac{T(x, t) - T_b}{C_2 + (T(x, t) - T_b)},$$

где  ${}^4\hat{R}$  – ядро релаксации;  $t'_R$  – приведенное время релаксации;  $a_T^R$  – коэффициент температурно-временного сдвига;  $T_b, C_1, C_2$  – эмпирические константы. ЛКТР испытывает скачок на величину линейного коэффициента полимеризационной усадки материала в малом интервале  $[T_H^R, T_1]$ .

$$\hat{\epsilon}_T(x, t) = \begin{cases} \alpha(T(x, t) - T_0), & T(x, t) \in [T_0, T_1], \\ \alpha(T_1 - T_0) + \frac{k_{yc}(T(x, t) - T_1)}{3(T_2 - T_1)}, & T(x, t) \in [T_1, T_2], \quad x \in V, \\ \frac{k_{yc}}{3} + \alpha(T(x, t) - T_0), & T(x, t) \in [T_2, T_k], \end{cases} \quad (2)$$

где  $\hat{\epsilon}_T$  – тензор температурной деформации;  $T_0, T_k$  – начальная и конечная температура;  $k_{yc}$  – коэффициент объемной усадки;  $C_1, C_2$  – эмпирические константы.

### 3. Алгоритм численного решения

При реализации модели в ANSYS используется линейно-вязкоупругая модель Prony с ядром сдвиговой релаксации в виде суммы экспонент и отсутствием объемной ползучести. Все материальные константы для фотополимерного композита Envisiontec SI 500 найдены из термомеханических экспериментов, описанных в работе [5]. Процесс наращивания материала реализуется в пакете ANSYS с использованием технологии «оживления» элементов (*Element Dead and Birth*). В начальном состоянии геометрический аналог будущего прототипа представляет собой его идеальную (требуемую) форму. Далее геометрия разбивается на горизонтальные слои с толщиной, соответствующей реальной толщине слоя (50–100 мкм). На полученный каркас наносится сетка объемных элементов Solid186. Перед началом расчета все элементы образца умерщвляются (EKILL) и закрепляются по всем степеням свободы. Начальная температура  $T_0 = T_1$ . Наращивание очередного слоя проводится в два этапа. На первом освобождаются соответствующие узлы и оживляются элементы слоя (EALIVE). На вто-

ром – моделируется усадка путем подъема температуры слоя до  $T = T_2$  в течение 10 с.

#### 4. Верификация модели

Для проверки выбранного алгоритма проведено сравнение с результатами эксперимента, поставленного на полнотельном кубике с отверстием в работе [3].

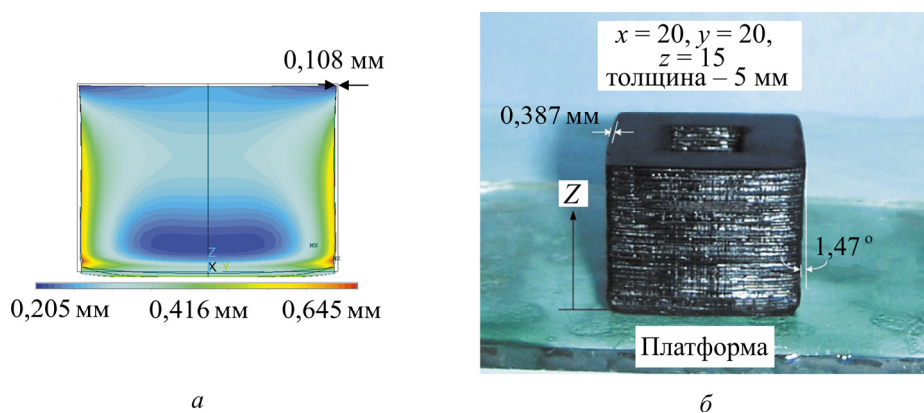


Рис. 1. Форма прототипа: *a* – расчет; *б* – эксперимент [3]

С учетом расхождения в свойствах материалов сравнение имеет качественный характер. Из рис. 1 видно, что экспериментальные и расчетные отклонения от идеальной формы абсолютно подобны. Наиболее деформированными являются нижние слои. Нижняя часть параллелепипеда имеет выпуклую форму, что хорошо согласуется с использованной в решении методикой наращивания без натяга.

#### 5. Сравнение вариантов конструктивного исполнения прототипа

Рассматривается три вида прототипов в виде параллелепипеда: полый, сплошной, с ячеистым наполнителем. Эффективные термомеханические свойства наполнителя определялись численно в ANSYS из решения ряда задач деформирования ячейки периодичности (сжатие, простой сдвиг). Размер ячейки – 3,5 мм, толщина связи – 0,2 мм. С учетом симметрии исследуется восьмая часть (рис. 2). Габаритные размеры образцов: 20×20×15 мм, толщина стенок 1,5 мм.

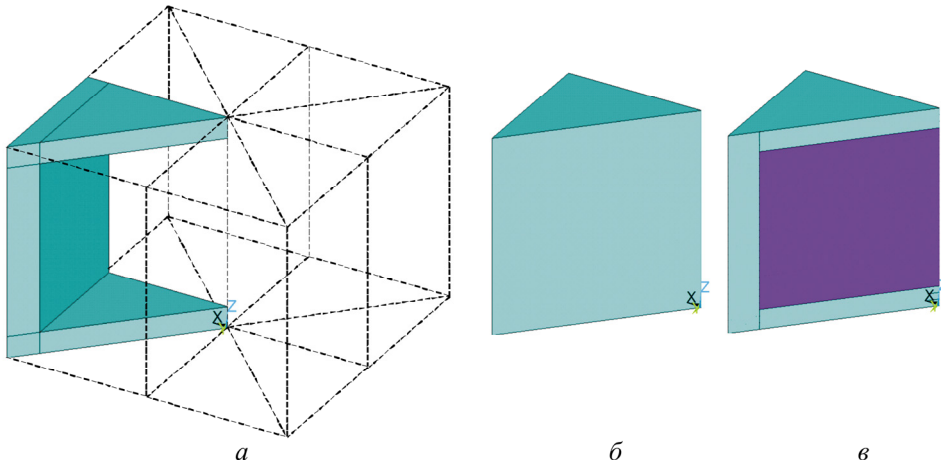


Рис. 2. Геометрия расчетной области прототипов:  
*a* – полоого; *б* – сплошного; *в* – с наполнителем

Число конечных элементов: 5731 – для полоого; 11 024 – сплошного; 12 719 – с эффективными свойствами. Нижняя грань моделей закреплена по вертикальным перемещениям (аналог закрепления на платформе), которые удаляются по окончании наращивания. Остальные границы свободны. На рис. 3 представлены результаты расчетов.

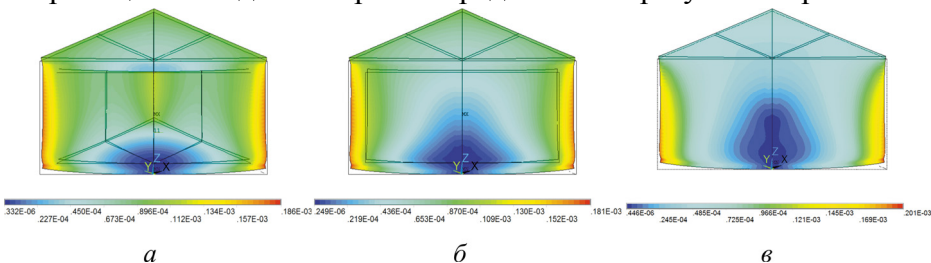


Рис. 3. Поля суммарных остаточных перемещений прототипа:  
*a* – полоого; *б* – сплошного; *в* – с эффективными свойствами

Из рис. 3 видно, что качественно дефекты формы идентичны, их максимальная величина в полнометельном прототипе больше наполненного на 10 % (0,201 и 0,181 мм соответственно). Наиболее деформированными оказались первые слои, особенно в области вертикальных ребер.

## 6. Компенсация усадочных дефектов формы

По результатам первого этапа расчетов исходная геометрия моделей корректируется путем вычитания полученных перемещений из координат соответствующих узлов (модифицированный профиль) с помощью

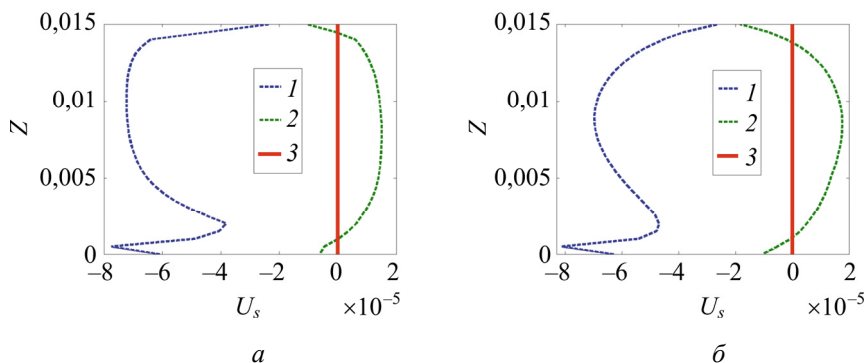


Рис. 4. Финальный профиль вертикальных ребер прототипа:  
 а – ячеистый, б – сплошной; 1 – идеальная начальная геометрия,  
 2 – модифицированная, 3 – эталон

макроса UPCOORD, –1. Далее алгоритм первого этапа повторяется. На рис. 4 показаны горизонтальные остаточные перемещения на вертикальных ребрах идеальных и модифицированных моделей.

### Заключение

Подтверждена адекватность физической модели фотополимера и ее численной реализации в ANSYS для прогнозирования дефектов формы стереолитографических прототипов. Показано, что разница в величинах отклонений для разных вариантов строения заготовок не превышает 10 %. Предложенная методика компенсации отклонений позволяет, как следует из численного эксперимента, снизить их уровень в 5 раз.

### Список литературы

1. Морозов В.В. Исследование и разработка технологических режимов изготовления отливок по выжигаемым моделям, полученных методом лазерной стереолитографии: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – С. 9–10.
2. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Хейфец М.Л. Оперативные макетирование и производство изделий сложной формы из композиционных материалов // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 3–8.
3. Huang Y.M., Jiang C.P. Numerical analysis of a mask type stereolithography process using a dynamic finite-element method // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2003. – № 21. – P. 649–655.

4. Патент на полезную модель 114430 РФ. Литейная форма / И.В. Самусев, А.М. Ханов, В.А. Дубровский; 2011141319; Заяв. 13.10.2011; Опубл. 27.03.2012.

5. Сметанников О.Ю., Самусев И.В. Экспериментальная идентификация параметров определяющих соотношений для фотополимерного композита // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 105–116.

### References

1. Morozov V.V. Issledovanie i razrabotka tekhnologicheskikh rezhimov izgotovleniia otlivok po vyzhigaemym modeliam, poluchennykh metodom lazernoi stereolitografii [Research and development of technological modes of manufacturing of casts on the burnt out models produced by laser stereolithography]. Thesis of Ph.D's degree dissertation, Moscow, 2015, pp. 9-10.

2. Vitiaz' P.A., Il'iushhenko A.F., Heifets M.L. Operativnye maketirovanie i proizvodstvo izdelii slozhnoi formy iz kompozitsionnykh materialov [The operational layout and production of complex shapes made of composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 2, pp. 3-8.

3. Huang Y.M., Jiang C.P. Numerical analysis of a mask type stereolithography process using a dynamic finite-element method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, no. 21, pp. 649-655.

4. Samusev I.V., Hanov A.M., Dubrovskii V.A. Liteinaia forma [Mold]. *Patent na polesnuiu model' 114430 (Russian Federation)*, 2012.

5. Smetannikov O.Iu., Samusev I.V. Eksperimental'naia identifikatsiia parametrov opredeliaiushchikh sootnoshenii dlia fotopolimernogo kompozita [Experimental identification of the parameters of constitutive relations for composite photopolymer]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstrukcii*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 105-116.

Получено 10.11.2015

### Об авторах

**Сметанников Олег Юрьевич** – доктор технических наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sou2009@mail.ru).

**Михалев Евгений Сергеевич** (Пермь) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: [michalewzheka@mail.ru](mailto:michalewzheka@mail.ru)).

#### **About the authors**

**Oleg Iu. Smetannikov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: [sou2009@mail.ru](mailto:sou2009@mail.ru)).

**Evgenii S. Mikhalev** (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: [michalewzheka@mail.ru](mailto:michalewzheka@mail.ru)).