

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ ПРИ ИХ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Бычков П.С., Козинцев В.М., Попов А.Л., Ченцов А.В.

Аннотация. Предложена расчётно-экспериментальная модель определения усадочных напряжений, проявляющихся после аддитивного изготовления деталей методом DLP печати. Модель разработана на основе анализа изгибных усадочных деформаций серии образцов в форме пластин-полос из фотополимерной смолы с одинаковыми размерами, но с разным временем полимеризации.

Введение. Усадка деталей из полимеров, изготовленных с помощью 3D принтеров, является одной из основных проблем соответствия детали исходному проекту. Для ее решения производители принтеров используют при печати специальные подложки, которые препятствуют усадке материала детали в ходе изготовления. Однако при этом в детали формируются остаточные усадочные напряжения, которые при отделении детали от подложки стремятся продеформировать деталь, нарушая её проектные размеры.

1. Формирование усадочных напряжений при 3D печати. Из-за того, что при засветке жидкого фотополимера происходит образование полимерной цепочки с уменьшением расстояния между молекулами мономера, твердеющий материал проявляет склонность к усадке, которой препятствует адгезия материала к подложке. В результате, в полученной детали возникают усадочные напряжения. При отделении детали от подложки, на которой происходил рост, усадочные напряжения создают деформации, искажающие проектные размеры детали [1].

2. Теоретическая модель для оценки усадочных напряжений. Напряжённно-деформированное состояние, вызванное усадочными деформациями при 3D печати, может быть описано с помощью модели внецентренного изгиба упругой пластины-полосы. Такое представление объясняется тем, что каждый последующий напечатанный слой получает неодинаковую по сравнению с предыдущим слоем дозу облучения, что объясняется светопрозрачностью фотополимера. Вследствие этого, первый слой, примыкающий к подложке, оказывается твёрже второго, второй твёрже третьего и т.д. Вместе с тем, увеличивается модуль упругости полосы [2].

Уравнение, связывающее кривизну $1/\rho$ нейтрального слоя балки прямоугольного поперечного сечения с крайними изгибающими моментами M имеет вид [3]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ}, \quad J = \frac{bh^3}{12}$$

где E – модуль упругости, b , h – соответственно, ширина и толщина поперечного сечения балки.

Величина изгибающего момента M может быть выражена через максимальное значение приведённых усадочных напряжений $\sigma_{sm} = \max \sigma_s(y) = \sigma_s(h/2)$, результирующую осевую силу P и

плечо δ , задающее расстояние точки приложения результирующей силы (центр тяжести прямоугольного треугольника с катетами h и σ_{sm}) от положения нейтральной оси балки:

$$M = P\delta, \quad P = \frac{1}{2}\sigma_{sm}bh, \quad \delta = \frac{h}{6}$$

Сопоставляя две предыдущие формулы, получим простое выражение для максимального значения приведённого усадочного напряжения

$$\sigma_{sm} = E \frac{h}{\rho}$$

3. Экспериментальное моделирование усадочных деформаций. Для экспериментального моделирования деформаций, обусловленных усадочными напряжениями при послойной 3D печати, исследовались прямоугольные полосы с одинаковыми размерами, но разным числом слоёв и временем засветки отдельных слоёв. Одновременно были напечатаны образцы с тонкой рабочей частью и широкими краями для определения механических характеристик на разрывной машине получающихся материалов с тем же количеством слоёв и теми же временами засветки, что и у тестовых прямоугольных полосок.

Определение модулей упругости образцов производилось на испытательной установке MTS Synergie 400. Растяжение образцов, напечатанных в тех же условиях засветки, что и полоски, производилась синхронно с окончанием изгибной усадки полосок.

Исследования показали, что реальный изгиб снятой с подложки полоски затвердевшего фотополимера под действием усадочных напряжений вполне адекватно аппроксимируется окружностью. Таким образом, предложенный экспериментально-теоретический подход позволяет определять остаточные напряжения, возникающие при аддитивном изготовлении пластины-полоски методом послойной фотополимеризации.

REFERENCE

1. Z. Chen, G.S. Huang, I. Trase, X.M. Han, Y.F. Mei. Mechanical self-assembly of a strain-engineered flexible layer: Wrinkling, rolling and twisting. *Phys. Rev. Applied* 2016, 5, pp. 017001-33.
2. Z. Zhao, J. Wu, X. Mu, H. Chen, H.J. Qi, D. Fang. Origami by frontal photopolymerization. *Sci. Adv.* 2017, 3, e1602326, pp. 1-7.
3. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1974. 560 с.

Сведения об авторах:

Бычков П.С. – м.н.с., Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, лаборатория моделирования в механике деформируемого твёрдого тела.

Ченцов А.В. – к.ф.-м.н., н.с., Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Лаборатория механики прочности и разрушения материалов и конструкций.

Козинцев В.М. – к.ф.-м.н., н.с., Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Лаборатория механики прочности и разрушения материалов и конструкций.

Попов А.Л. – д.ф.-м.н., в.н.с., Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Лаборатория механики прочности и разрушения материалов и конструкций. **E-mail:** popov@ipmnet.ru

УДК 531/534:06

ББК 22.25

А 437

**Институт механики НАН РА
Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН
Национальный комитет по теоретической и прикладной механике Армении
Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике
Национальный университет архитектуры и строительства Армении**

Сопредседатели: д.ф.-м.н. В.Н. Акопян (Армения)

д.ф.-м.н. А.В. Манжиров (Россия)

д.ф.-м.н. А.А. Гукасян (Армения)

Зам. председателя: д.ф.-м.н. А.В.Саакян (Армения), д.ф.-м.н. М.А.Сумбатьян (Россия)

Ученые секретари: к.ф.-м.н. Л.Л.Даштоян (Армения), к.ф.-м.н. Е.В.Мурашкин (Россия)

Ответственный редактор: д.ф.-м.н. В.Н. Акопян

Технический редактор: к.ф.-м.н. Г.З.Геворкян

Редактор: Ж.А.Авдалян

А 437

Актуальные проблемы механики сплошной среды. Материалы V
международной конференции 02-07 октября 2017, Цахкадзор,
Армения.- Ер.: НУАСА, 2017.-252 с.

В сборник включены доклады, представленные на V-ую международную конференцию «Актуальные проблемы механики сплошной среды», включающую специальную сессию, посвященную 60-летию юбилею иностранного члена НАН РА, профессора А.В.Манжирова.

УДК 531/534:06

ББК 22.25

ISBN 978-9939-63-285-8

© ИМ НАН РА, 2017

© ИПМех РАН, 2017

© NUACA, 2017