

05.1;06.3;06.5;15

## Локализация деформации в решетчатых структурах 3D-печатных образцов стали 03X17H14M2

© Д.Г. Фирсов, С.Д. Конев, О.Н. Дубинин, С.А. Евлашин, И.В. Шишковский<sup>¶</sup>

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

<sup>¶</sup>E-mail: i.shishkovsky@skoltech.ru

Поступило в Редакцию 6 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 6 апреля 2020 г.

Принято к публикации 9 апреля 2020 г.

Методом цифровой корреляции изображений исследовано деформационное поведение в условиях сжатия созданных методом селективного лазерного плавления 3D-образцов стали 03X17H14M2 с различными вариантами решетчатых структур. Изучены пространственно-временные картины локализации поперечных ( $\epsilon_{xx}$ ) и продольных ( $\epsilon_{yy}$ ) деформаций актуальных типов топологических структур. Обнаружено, что возможно достижение относительной плотности 20% для 3D-печатных изделий с решетчатыми G-структурами и размером ячейки 1.5 и 3 mm. Однако при этом у всех решетчатых 3D-образцов исчезает пластичность, модуль Юнга уменьшается более чем на порядок, а коэффициент Пуассона возрастает в 1.3–2 раза по сравнению с соответствующими параметрами для сплошных 3D-образцов.

**Ключевые слова:** метод корреляции цифровых изображений, селективное лазерное плавление, топологическая оптимизация, решетчатые структуры, локализация деформации.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.14.49658.18329

Конструирование облегченных трехмерных (3D) изделий актуально во многих областях человеческой деятельности, где уменьшение массы основных силовых элементов означает увеличение полезной нагрузки (аэрокосмическая отрасль), экономию материалов на производстве и энергоэффективность (облегчение подвижных элементов различных установок), сближение с модулем упругости костной ткани, что является важной задачей биоматериаловедения [1,2]. Топологическая оптимизация (ТО) — один из самых быстрых и эффективных методов облегчения 3D-деталей, полученных методами аддитивных технологий, при сохранении их характеристик прочности и жесткости.

Целью ТО является определение оптимального распределения материала в области проектирования при заданных нагрузках с удовлетворением критериев и ограничений оптимизации [2,3]. В качестве критериев ограничения в рамках ТО в основном при использовании численных методов могут применяться различные функции (их комбинации), такие, например, как соответствие или потенциальная энергия деформации, объем, смещение или характеристики прочности. В настоящей работе для 3D-печатных структур и образцов с вариантами ТО используется экспериментальный метод оптической диагностики, который называется методом цифровой корреляции изображений (DIC) [4,5]. Обсуждаются найденные параметры прочности и результаты оценки напряженно-деформированного состояния топологических решетчатых структур (TPC).

В экспериментах использовался порошок нержавеющей стали 03X17H14M2 с размером частиц 20–53  $\mu\text{m}$ . 3D-печать образцов была выполнена методом селективного лазерного плавления (СЛП) [1]. Режим печати ре-

комендован производителем установки: мощность лазера 113 W, скорость сканирования лазера 700 mm/s, диаметр лазерного луча 55  $\mu\text{m}$ , расстояние штриховки 50  $\mu\text{m}$ , толщина одного слоя 20  $\mu\text{m}$ . Стратегия сканирования в слое шахматная (квадраты со стороной 4 mm).

Топологическое проектирование внутренней структуры трехмерных деталей (в настоящей работе в форме куба) было выполнено на основе возможностей встроенного программного обеспечения для подготовки к печати 3D-изделий, которое доступно на технологической установке TruPrint 1000. В нашем случае варианты структуры сетки моделировались с использованием программного обеспечения для 3D-печати Materialise Magics 22.0. На рис. 1, а показаны три характерных типа структур (G-структуры, средний додекаэдр, ромбододекаэдр), которые были использованы в настоящей работе. Параметры элементарной ячейки и условия генерации сетки задавались нами уже в программном обеспечении nTopology Element (nTE, версия 1.24). Если выбран тип конструкции объекта (в нашем случае куб), nTE предлагает 22 варианта ячейки и 9 параметров заполнения. Мы задавали в nTE толщину ребер самой ячейки, которая по факту не может быть меньше диаметра лазерного луча. В перспективе нами планируется изучение влияния переменной толщины ребер TPC, т.е. программное формирование градиента механических свойств изделия, путем создания „модификаторов“ (это могут быть точки, векторы или поверхности) и редактирования зависимости толщины элемента от расстояния до „модификатора“ путем редактирования свойств графики изделия в САПР (САПР – системы автоматизированного проектирования). С физической точки зрения изменение коэффициента заполнения TPC (т.е. отношение объема, запол-

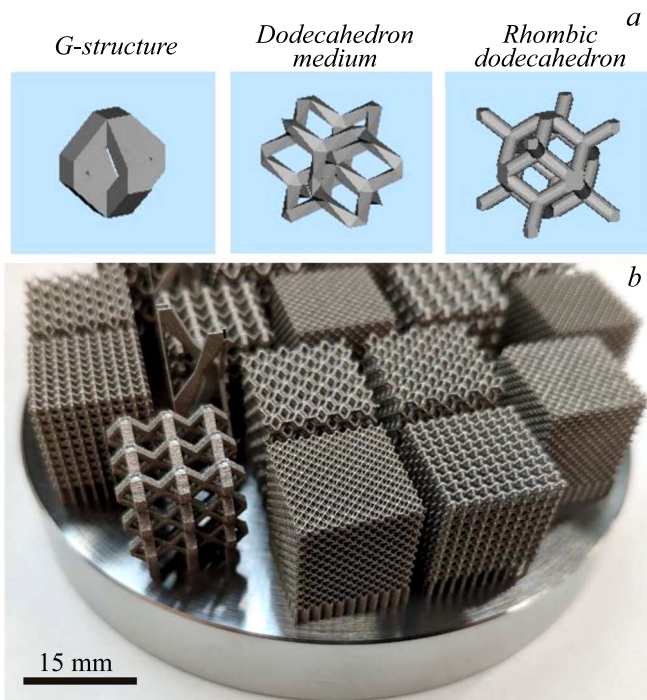


Рис. 1. *a* — типы создаваемых структур, *b* — внешний вид 3D-печатных ТРС.

ненного материалом, к пустотам) влияет на плотность образца и его механические свойства. Проведенный нами топологический дизайн на стадии подготовки к 3D-печати показывает, что чем короче элементы, угол между осью которых с вертикалью составляет от 45 до 90°, тем больше вероятность того, что 3D-сетка будет успешно напечатана без деформации и подпорок.

Механическая нагрузка на сжатие проводилась на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5969 с постоянной скоростью сближения 2 mm/min при комнатной температуре. Сравнивались механические характеристики топологических образцов (рис. 1, *b*) по измерениям в соответствии с ASTM E9.

Система бесконтактной трехмерной DIC использовалась во время механического испытания для получения трехмерных полей смещения на поверхности образца вплоть до разрушения. Специализированное программное обеспечение Vic-3D (Vic-Snap) от Correlated Solutions Inc. контролировало процесс съемки и обрабатывало полученные изображения с использованием двух цифровых 5MP камер Point Grey GRAS-50S5M-C. Математический аппарат программного обеспечения оптической системы основан на подходах DIC. Обе камеры были установлены на расстоянии 600 mm и под углом 30° к образцу. Перед тестами проводилась калибровка системы 3D DIC. Ранее было показано [4], что такая видеосистема позволяет различать значения деформации с точностью, сравнимой с точностью установленного датчика динамической осевой деформации (согласно сертификату заводских испытаний). Чтобы понять

природу изменения механических свойств образцов с вариацией ТРС, мы напечатали набор 3D-деталей для последующего механического испытания (рис. 1, *b*). Образцы представляли собой кубики с площадью поперечного сечения 15 × 15 mm, а размеры внутренних ячеек варьировались (1.5, 3 и 5 mm).

Испытание на сжатие позволило определить характеристики прочности, упругости и пластичности, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести и характеристики деформационного упрочнения. Типичные инженерные кривые деформация–напряжение для 3D-печатных ТРС сплава 03X17H14M2 представлены на рис. 2 (см. также таблицу). При аналогичном режиме 3D-печати сплошных образцов этого же сплава модуль Юнга был равен 75 GPa, предел прочности 575 MPa, коэффициент Пуассона 0.397, а удлинение достигало 70%. Измеренная микротвердость сплошных 3D-печатных образцов из сплава 03X17H14M2 составила 190 HV<sub>0.2</sub>. Как видно из рис. 2, если сравнивать с 3D-печатью сплошных образцов, практически все решетчатые образцы потеряли пластичность, модуль Юнга уменьшился на порядок и более, а коэффициент Пуассона возрос в 1.3–2 раза. *G*-структуры с коэффициентом 1.5 и 3 имели максимальный модуль Юнга и коэффициент Пуассона. ТРС „средний додекаэдр“ показали минимальный модуль Юнга, а минимальный коэффициент Пуассона наблюдался для ТРС „ромбический додекаэдр“.

Сопоставление данных (см. рис. 2 и таблицу) показывает, что варьирование типа решетчатой структуры также существенно изменяет механические свойства образцов. Большую прочность имели образцы *G*-структуры (относительная плотность ~ 22.42% от таковой для сплошного образца), далее следовал ромбический додекаэдр (~ 19.32%), и совсем низкую прочность имел средний додекаэдр (~ 12.59%). Это хорошо коррелирует с экспериментальными данными работы [6], в кото-

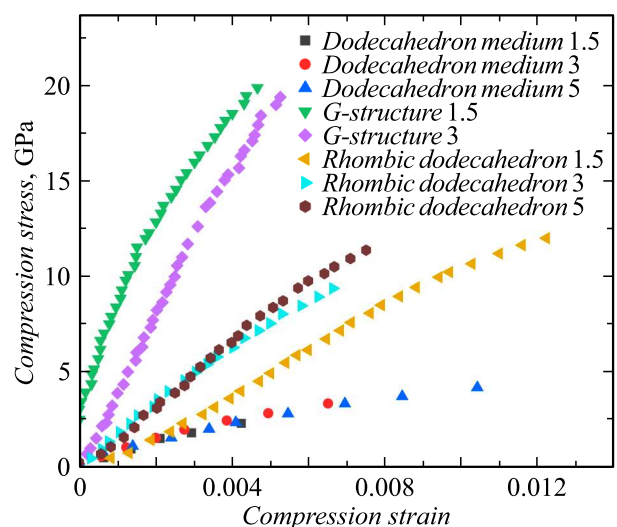


Рис. 2. Диаграмма деформация–напряжение для 3D-печатных топологических образцов.

Механические свойства ТРС с вариацией размеров ячейки

Тип структуры	Коэффициент заполнения ячейки	Пористость, %	Модуль Юнга, GPa	Коэффициент Пуассона	$\varepsilon_{xx}, \%$ (max/min)	$\varepsilon_{yy}, \%$ (max/min)	$\varepsilon_{xy}, \%$ (max/min)
G-структура	3	77.58	3.83	0.74	0.29/0.0	0.0/–0.248	0.119/–0.033
	1.5	77.58	3.69	0.80	0.096/–0.001	0.0005/–0.115	0.18/–0.020
Ромбододекаэдр	5	80.68	1.6	0.50	–	–	–
	3	80.68	1.42	0.58	0.292/–0.006	0.0/–0.278	0.051/–0.082
Средний додекаэдр	1.5	80.68	1.08	0.50	–	–	–
	5	87.41	0.404	0.63	–	–	–
	3	87.41	0.49	0.66	0.314/–0.002	0.002/–0.266	0.0565/–0.053
	1.5	87.41	0.428	0.61	–	–	–

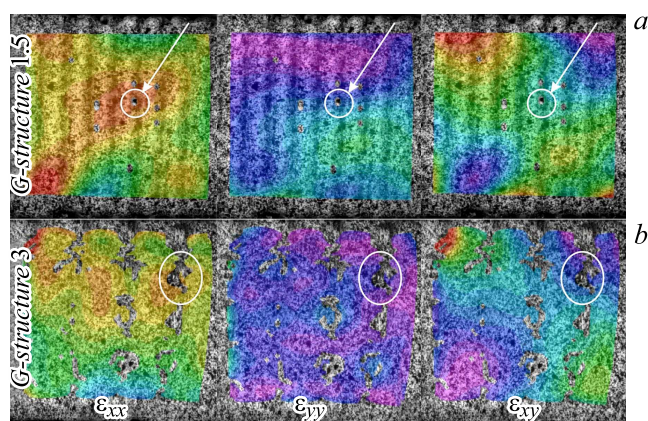


Рис. 3. G-структуры с размером ячейки 1.5 (a) и 3 mm (b). Слева —  $\varepsilon_{xx}$ , в центре —  $\varepsilon_{yy}$ , справа —  $\varepsilon_{xy}$ .

рой было показано, что относительная плотность 20% при сравнении с плотностью сплошного 3D-материала оказалась соответствующей нижней границе для объемно центрированной кубической структуры с распорками по краям куба с размером ячеек 3 mm. Таким образом, облегчение 3D-конструкции ячейками такого типа еще сохраняет стабильность изделия. С другой стороны, изменение коэффициента заполнения ячейки при фиксированном типе ТРС слабо влияет на прочностные параметры топологических 3D-образцов и не изменяет относительную плотность (см. таблицу, второй и третий столбцы). Причины такого поведения фактора заполнения ячейки в отношении механических свойств решетчатых структур нами пока не выяснены.

По результатам испытаний образцов на сжатие с использованием метода цифровой корреляции изображений построены поля поперечной, продольной и сдвиговой деформации на плоскости боковой грани ( $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{xy}$ ). Максимальные и минимальные значения компонентов тензора деформации приведены в таблице. На рис. 3, a, b мы привели пример поперечных ( $\varepsilon_{xx}$ ), продольных ( $\varepsilon_{yy}$ ) и сдвиговых ( $\varepsilon_{xy}$ ) деформаций в конце сжатия образца для топологических конструкций

с решетчатой G-структурой и размерами ячеек 1.5 и 3 mm. Области черного цвета соответствуют местам зарождения разрушений образцов. Наиболее проблемные места выделены белыми кругами и овалами. Стрелками показано, как эти локализации выглядят при поперечных, продольных и сдвиговых нагрузках. Цвет сечения характеризует конфигурацию полей неоднородных деформаций. Наиболее нагруженные области в электронной версии статьи окрашены в красный цвет (более светлые области в печатной версии), а наименее нагруженные области — в синий цвет (более темные области). Полученные результаты фактически характеризуют прочность поверхностного сечения образца. Изменение степени наполнения (рис. 3, a и b) показывает, что при меньшем размере ячейки (1.5 mm) максимальные значения поперечных и сдвиговых деформаций меньше (вторая строка таблицы). При размере ячейки 3 mm наблюдается большая неоднородность распределения поля напряжений.

Таким образом, в работе, насколько известно авторам, впервые получены и проанализированы следующие экспериментальные данные: локализация деформаций в решетчатых структурах 3D-печатных образцов стали 03X17H14M2; численные значения модуля Юнга, коэффициента Пуассона, предела текучести и характеристик деформационного упрочнения для трех типов часто используемых в топологическом дизайне решетчатых структур; влияние типа решетчатой структуры и размера ячейки на прочностные свойства 3D-образцов после СЛП.

Цифровая оптическая система Vic-3D, которая была использована для анализа геометрии расположения концентраторов напряжений, позволяет достаточно точно локализовать место разрушения и увидеть динамику распределения нагрузки. Показано, что 3D-образцы с решетчатыми структурами по сравнению со сплошными теряют пластичность, их модуль Юнга уменьшается на порядок и более, а коэффициент Пуассона возрастает в 2 раза. Впервые обнаружено, что методом СЛП можно существенно снизить относительную плотность до 20% для 3D-печатных образцов с G-структурой и размерами

ячейки 1.5 и 3 мм, однако далее прочностные свойства изделий значительно ухудшаются.

### Благодарности

Авторы благодарны nTopology Element Inc. за возможность использования программного обеспечения.

### Финансирование работы

Работа частично финансировалась в рамках проекта Единого отраслевого тематического плана ЕОТП-МТ-097 Госкорпорации Росатом.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016. 400 с.
- [2] Wang X., Xu S., Zhou S., Xu W., Leary M., Choong P., Choong P., Qian M., Brandt M., Xie Y. // *Biomaterials*. 2016. V. 83. P. 127–141. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2016.01.012
- [3] Liu J., Gaynor A.T., Chen S., Kang Z., Suresh K., Takezawa A., Li L., Kato J., Tang J., Wang C., Cheng L., Liang X., To A. // *Struct. Multidiscip. Optim.* 2018. V. 57. P. 2457–2483. DOI: 10.1007/s00158-018-1994-3
- [4] Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 364 p.
- [5] Gamboa C.B., Martín-Béjar S., Vilches F., López G., Hurtado L. // *Materials*. 2019. V. 12. P. 4156–4170. DOI: 10.3390/ma12244156
- [6] Sola A., Defanti S., Mantovani S., Merulla A., Denti L. // *3D Printing Additive Manufactur.* 2020. V. 7. N 1. DOI: 10.1089/3dp.2019.0119