

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СЖАТИИ
СЕТЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

Н.О. Яковлев

lab30@viam.ru

Д.В. Гриневич

lab30@viam.ru

П.Б. Мазалов

viam.lab6@mail.ru

**Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов
Государственного научного центра Российской Федерации,
Москва, Российская Федерация**

Аннотация

Рассмотрены подходы к математическому моделированию деформирования при сжатии образцов сетчатой конструкции с фермообразной элементарной ячейкой периодичности (звездчатый октаэдр — *octet-truss*), синтезированных методом селективного лазерного сплавления порошка стали CL20ES. Проведено моделирование элементарных ячеек с применением объемной и балочной моделей, а также для вариантов корректировки жесткости балочной модели с помощью дополнения модели ячейки жесткими связями в угловых точках, балочными элементами или равномерного распределения жесткости по модели. Применение скорректированной балочной модели с жесткими связями в угловых точках, равными 1/4 длины грани октаэдра (0,88 мм), и эффективным диаметром стержней 0,8 мм позволило с высокой точностью получить расчетную диаграмму деформирования при сжатии образца сетчатой конструкции со стороной ячейки периодичности 5 мм и диаметром стержней ячейки около 1 мм

Ключевые слова

Сетчатые конструкции, аддитивные технологии, моделирование, метод конечных элементов, объемная модель, балочная модель

Поступила в редакцию 27.02.2018
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Для авиационной техники важно соответствие используемых материалов и технологий требованиям надежности и экономической эффективности, что приводит к дальнейшему развитию технологии и созданию новых материалов, отвечающих современным требованиям [1–4].

Аддитивные технологические процессы открывают новые возможности в проектировании конструкций свободной формы, например сетчатых регулярных и нерегулярных конструкций. Получаемые сетчатые структуры имеют преимущество по массе по сравнению со сплошными, а по сравнению с пенными и стохастическими — значительно более высокую прочность [5].

В настоящее время наблюдается широкое внедрение в авиацию изделий, изготовленных методами аддитивного производства, в частности изделий, полу-

ченных из металлических порошков методом селективного лазерного сплавления. При этом такие изделия должны отвечать предъявляемым к конструкции требованиям, в частности, по комплексу физико-механических свойств, включая жесткость, несущую способность и др. [6, 7].

Для использования сетчатых структур в проектировании необходима их расчетно-экспериментальная отработка, позволяющая получить подтвержденные данные об особенностях деформирования конструкции [8–11].

Расчетно-экспериментальная отработка включает в себя построение верифицированной математической модели. Подобную модель можно построить на основе результатов испытаний элементов конструкций или элементарных образцов, состоящих из ограниченного числа ячеек периодичности. Далее модель элементарного образца может быть расширена на модель реальных элементов конструкций и деталей. С ее помощью оптимизируется форма элементарной ячейки и заполняемость деталей конструкции. Для проектирования важна размерность получаемой задачи. Размноженная элементарная ячейка многократно увеличивает размерность будущих задач расчета прочности сетчатых конструкций, поэтому приоритет для дальнейшего использования стоит перед моделями меньшей размерности, например, состоящих из балочных элементов или представляющих аппроксимацию в виде сплошной среды [12, 13].

В работе рассмотрена применимость балочной модели для оценки напряженно-деформированного состояния сетчатой конструкции в форме призматического образца при сжатии для расчетного построения диаграммы деформирования [1]*.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования взят образец призматический сетчатой конструкции (рис. 1, а), синтезированный методом селективного лазерного сплавления из порошка стали CL20ES. Модуль упругости стали, полученной по традиционной технологии, составляет около 200 ГПа, плотность 7 900 кг/м³, предел прочности при растяжении 570 МПа, предел текучести 470 МПа. Площадь сечения образца 20 × 20 мм², высота 60 мм. Для равномерного приложения нагрузки торцы образцов выполняли монолитными толщиной 2 мм.

В качестве элементарной ячейки периодичности была выбрана фермообразная структура, представляющая собой звездчатый октаэдр — *octet-truss* (рис. 1, б), как одна из наиболее универсальных структур к воспринимаемой внешней нагрузке [10] и достаточно широко используемых. Размер ячейки периодичности составлял 5×5×5 мм, диаметр стержня ячейки около 1 мм (рис. 1, в). Другие наиболее распространенные виды элементарных ячеек, представляющие собой пространственные многогранники, приведены на рис. 1, г [14].

* Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2: Квалификация и исследования материалов («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

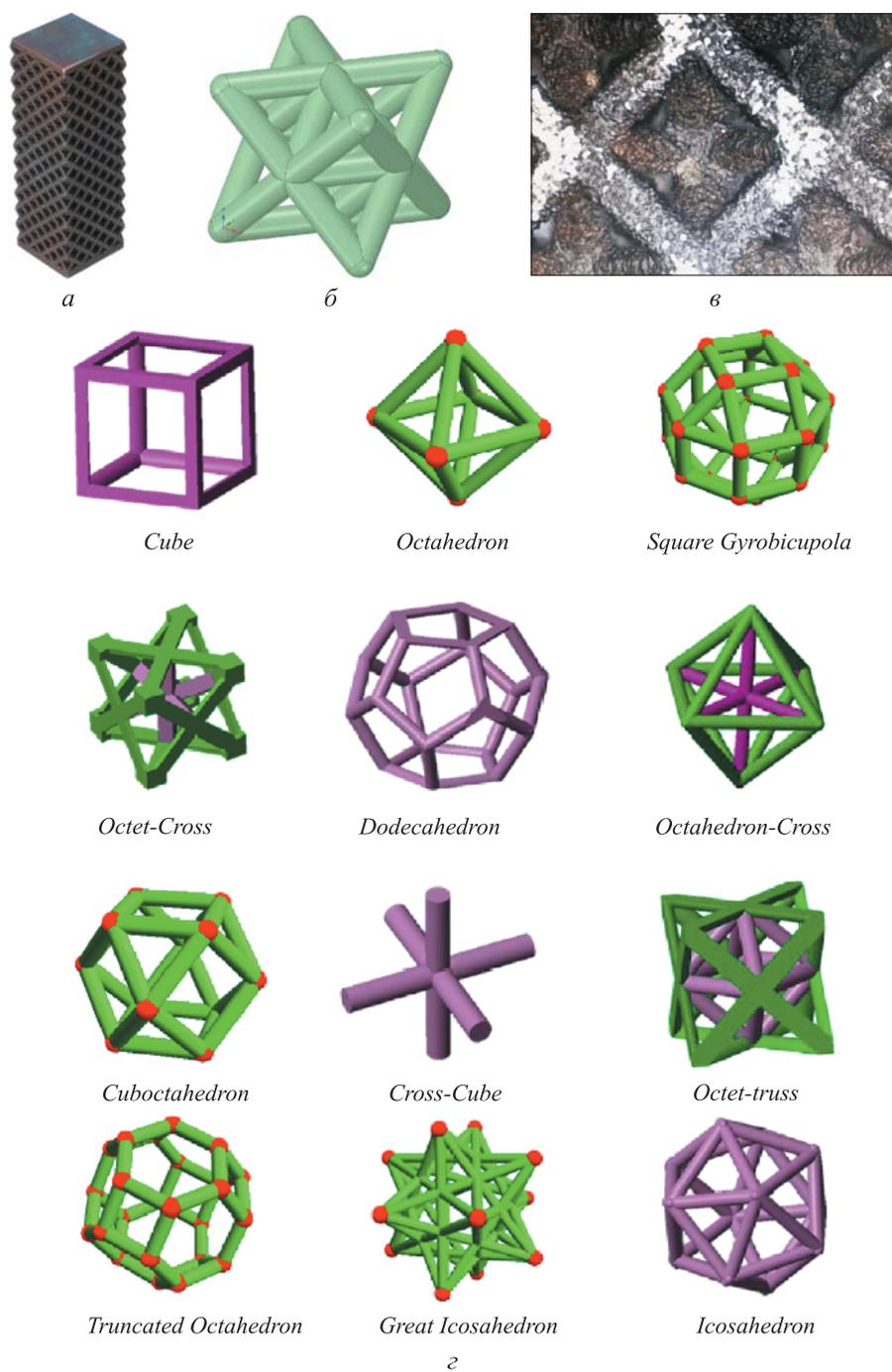


Рис. 1. Образец призматической сетчатой конструкции (а), элементарная ячейка периодичности в виде звездчатого октаэдра (б), элементарная ячейка периодичности образца сетчатой конструкции (в), наиболее распространенные виды элементарных ячеек (z)

В связи с отсутствием в настоящее время стандартов в области механических испытаний изделий, полученных методами аддитивного производства, испытания на сжатие образца сетчатой конструкции проводили по ГОСТ 25.503–97. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементарной ячейки периодичности и образца сетчатой конструкции выполняли с помощью конечно-элементного (КЭ) анализа.

Моделирование элементарной ячейки периодичности. Наиболее точно форму конструкции может описать объемная модель. Ее основной недостаток — размерность получаемой задачи. Вычислительные возможности позволяют комфортно работать только с моделью нескольких элементарных ячеек периодичности. В то же время фермообразную структуру можно описать балочными элементами, что существенно снизит размерность задачи. Для оценки двух вариантов был проведен сравнительный анализ балочной и объемной моделей одной элементарной ячейки периодичности.

Конечно-элементная (КЭ) объемная модель одной четверти элементарной ячейки периодичности показана на рис. 2, а. В силу симметрии рассчитывалась четверть ячейки. Модель состояла из 30 000 тетраэдральных элементов второго порядка. Нижняя грань была закреплена жестко, к верхней — приложена сила. Критическая сила, при которой наблюдается потеря устойчивости модели элементарной ячейки периодичности при распространении в ней текучести, составила 3440 Н.

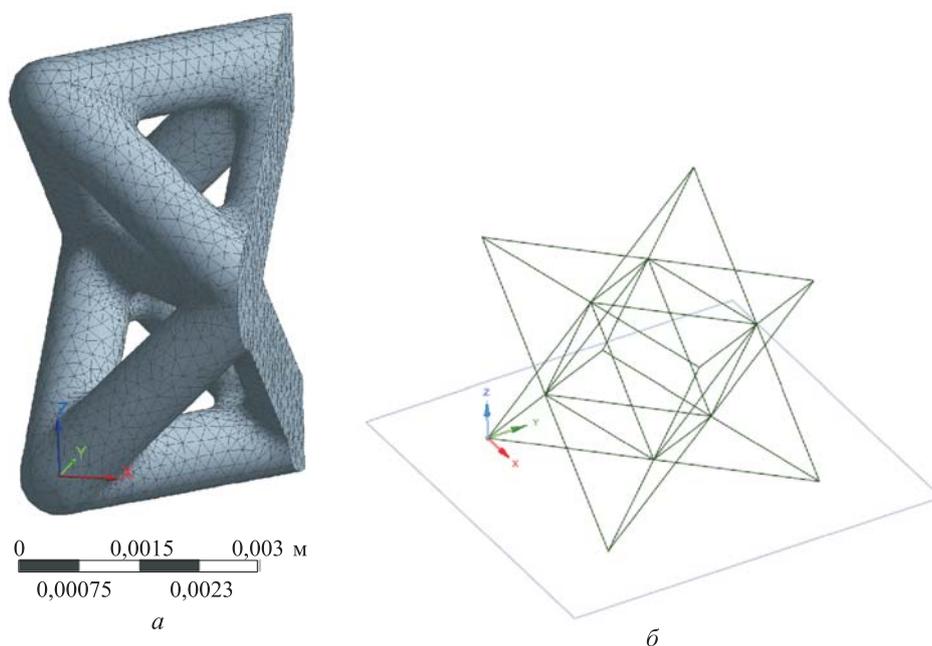
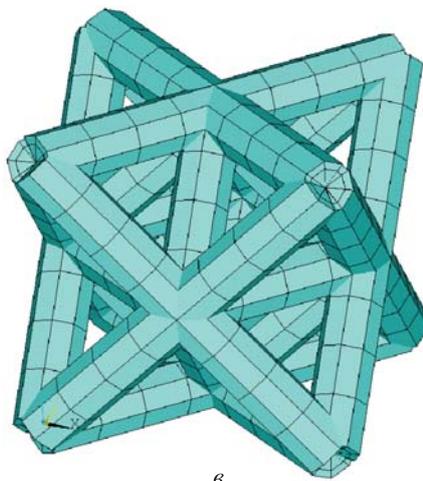


Рис. 2 (начало). Конечно-элементная объемная модель одной четверти элементарной ячейки периодичности (а), балочная КЭ-модель элементарной ячейки периодичности без отображения сечения (б)



б

Рис. 2 (окончание). Балочная КЭ-модель элементарной ячейки периодичности с объемной визуализацией стержней (б)

Балочная модель элементарной ячейки периодичности приведена на рис. 2, б, в. Звездчатый октаэдр содержит 36 граней при разбивке по 10 элементов на грань с общим числом балочных элементов 360. С позиции числа уравнений размерность такой балочной модели будет приблизительно в 40 раз меньше размерности модели полной объемной ячейки. При расчетной схеме, аналогичной схеме объемной модели, была получена критическая сила потери устойчивости ячейки 3240 Н, что приблизительно на 6 % меньше результата для объемной модели.

Распределение эквивалентного по Мизесу напряжения в материале элементарной ячейки периодичности в зависимости от значения внешней нагрузки показано на рис. 3. С увеличением внешней нагрузки возрастает напряжение в стержнях ячейки. При превышении критического значения нагрузки элемент пластически деформируется, и образец теряет устойчивость.

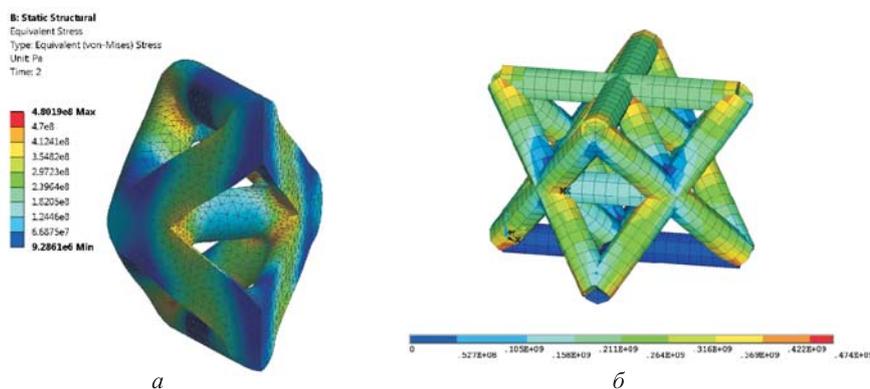


Рис. 3 (начало). Распределения эквивалентного по Мизесу напряжения в материале элементарной ячейки периодичности в зависимости от значений внешней нагрузки 1600 Н (а, б) для объемной (а) и балочной (б) моделей

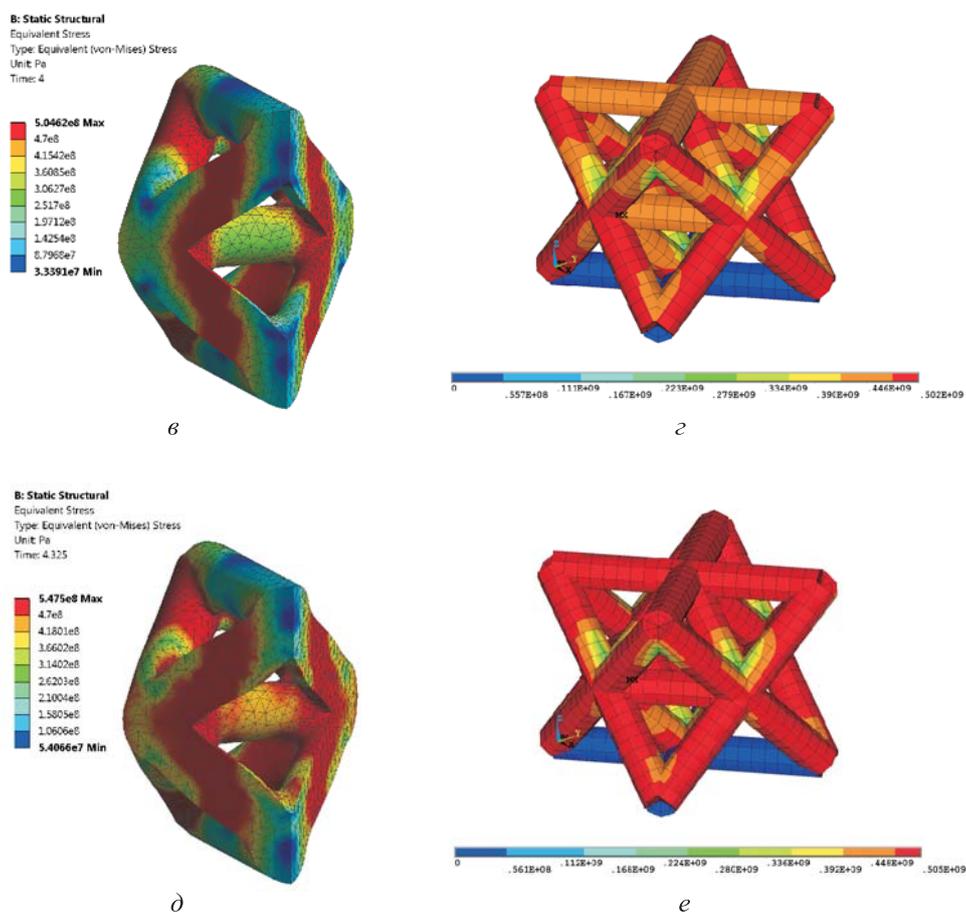


Рис. 3 (окончание). Распределения эквивалентного по Мизесу напряжения в материале элементарной ячейки периодичности в зависимости от значений внешней нагрузки 3200 Н (β , ζ) и при критическом значении нагрузки (δ , ϵ) для объемной (β , δ) и балочной (ζ , ϵ) моделей

Результаты оценки сеточной сходимости для балочной КЭ-модели элементарной ячейки периодичности, по которым можно оценить влияние числа элементов разбиения на точность получаемого решения, приведены в табл. 1. Измельчение КЭ-сетки приводит к сходимости получаемого результата. Значения нагрузки быстро сходятся, и разбиения стержня на четыре и даже два элемента достаточно для использования при оценке несущей способности образцов, построенных на основе указанной элементарной ячейки периодичности.

Рассматривая элементарную ячейку периодичности как упругий элемент, получаем следующие значения коэффициентов упругости, Н/м:

- для объемной модели $C_{3D,0} = 174$;
- для балочной модели $C_{1D,0} = 106$.

Объемная модель получилась примерно в 1,6 раза жестче балочной. При этом выше не только коэффициент упругости модели элементарной ячейки пе-

риодичности, но и приблизительно на 6 % больше значение критической нагрузки. Столь существенное различие жесткости объясняется соединением стержней ячейки в узловых точках — стержни октаэдра, пересекаясь в узлах, создают жесткую конструкцию, в то время как в балочной модели пересечение происходит только в самом узле. Аналогично в реальном образце соединение с утолщением в узлах может существенно повлиять на конечный результат (рис. 4). Причем итоговый результат может отличаться и от объемной модели, учитывая особенности аддитивного технологического процесса [15]. В связи с этим необходима корректировка балочной модели, причем универсальная, позволяющая верифицировать модель по результатам испытаний с учетом особенностей аддитивного технологического процесса.

Таблица 1

**Результаты оценки сеточной сходимости для балочной КЭ-модели
элементарной ячейки периодичности**

Число элементов на одном стержне ячейки, шт.	Критическая нагрузка, Н	Значение сеточной сходимости, %
1	3850	–
2	3277	14,9
4	3241	1,1
6	3243	0,1
10	3238	0,2
20	3236	0,1

Рис. 4. Узел элементарной ячейки периодичности:

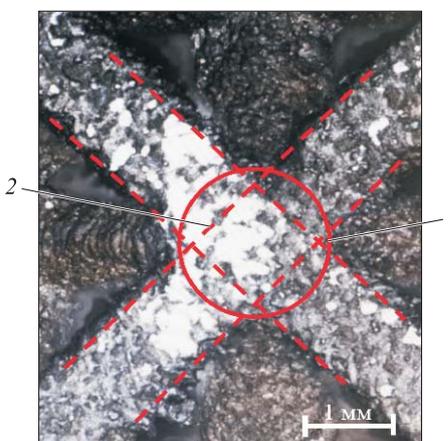
1 — контур узла; 2 — контуры стержней

В качестве корректировки жесткости балочной модели можно использовать несколько вариантов:

- жесткие связи в угловых точках, повторяющие соединение объемных стержней (рис. 5, а);
- балочные элементы, аналогичные стержням модели (рис. 5, б);

– равномерное распределение жесткости по модели за счет изменения модуля упругости материала модели.

Значения коэффициентов упругости балочных моделей элементарной ячейки периодичности с жесткими элементами различного радиуса приведены в табл. 2, также ниже представлены значения коэффициентов упругости балочных моделей элементарной ячейки периодичности с равномерно распределенной дополнительной жесткостью.



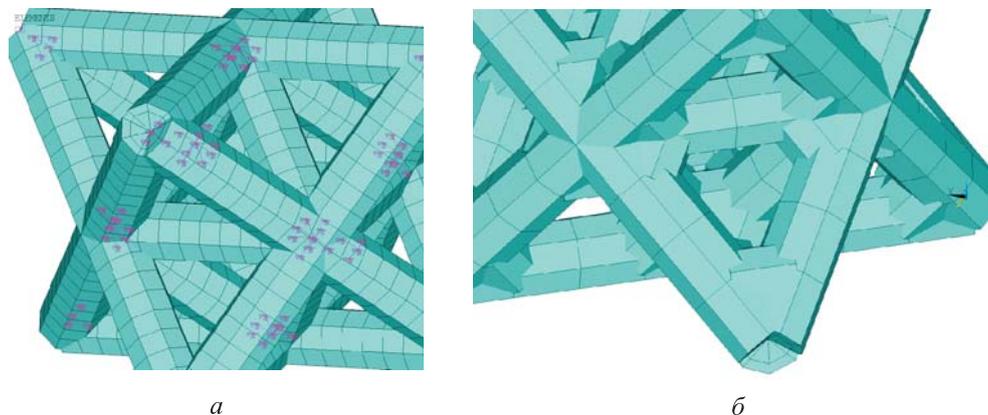


Рис. 5. Балочная КЭ-модель элементарной ячейки периодичности с дополнительными узловыми связями (а) и с дополнительными узловыми элементами (б)

Таблица 2

Значения коэффициентов упругости балочных моделей элементарной ячейки периодичности с жесткими элементами различного радиуса

Радиус дополнительного узлового элемента (часть длины грани октаэдра / мм)	Коэффициент упругости ячейки, Н/м	
	Жесткие связи	Дополнительные элементы
1/4 (0,88)	268	160
1/6 (0,59)	184	140
1/10 (0,35)	147	128
1/20 (0,18)	128	113

Значения коэффициентов упругости балочных моделей элементарной ячейки периодичности с равномерно распределенной дополнительной жесткостью

Модуль упругости, ГПа	500	400	300	200
Коэффициент упругости, Н/м	280	224	168	112

Наиболее близкий результат к жесткости объемной модели элементарной ячейки периодичности 174 Н/м дает балочная модель с корректировкой жесткости за счет использования жесткой связи. Для жесткого элемента радиусом 1/6 длины грани октаэдра жесткость получается равной 184 Н/м. Во всех случаях окончательную корректировку моделей следует проводить по результатам натурных испытаний образцов. Следует также отметить, что жесткость модели одной ячейки будет выше по сравнению с жесткостью образца в результате влияния краевого эффекта, при этом на масштабной модели влияние граничных условий будет меньше.

Вычислительный и натуральный эксперименты на образце. Натурные испытания на сжатие проводились на образцах сетчатой конструкции, состоящих из ячеек 4×4×12. Образец и визуализация математической модели приведены на рис. 1, а и рис. 6, а. При испытании записывалась диаграмма сжатия в координатах нагрузка–перемещение.

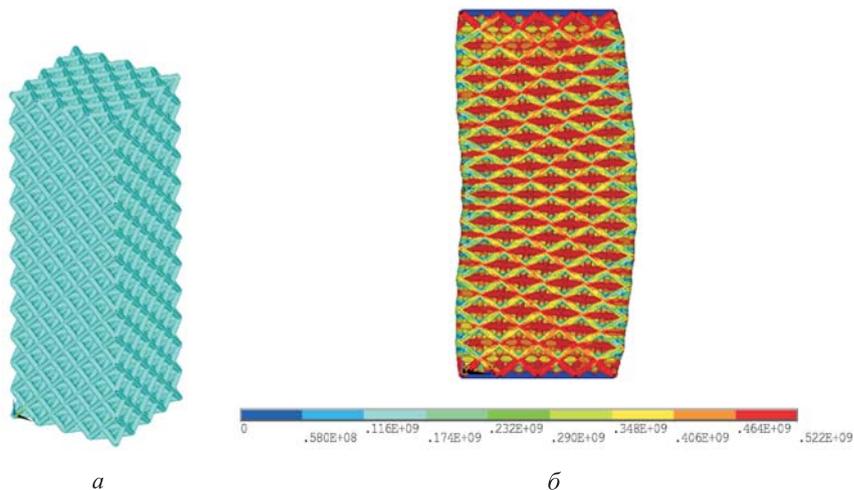


Рис. 6. Модель образца сетчатой конструкции (а) и распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в момент потери устойчивости модели (б)

Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в КЭ-модели образца в момент потери устойчивости, когда внешняя нагрузка равна критическому значению, приведено на рис. 6, б. Область с наибольшим значением напряжения находится в центральной точке образца. Образец после натурных испытаний на сжатие, а также модели образцов при проведении вычислительного эксперимента с различным типом корректировки жесткости модели показаны на рис. 7. Деформированные модели приведены в масштабе реального образца, но демонстрируют начало потери устойчивости модели, в то время как реальный образец показан уже после завершения испытаний.

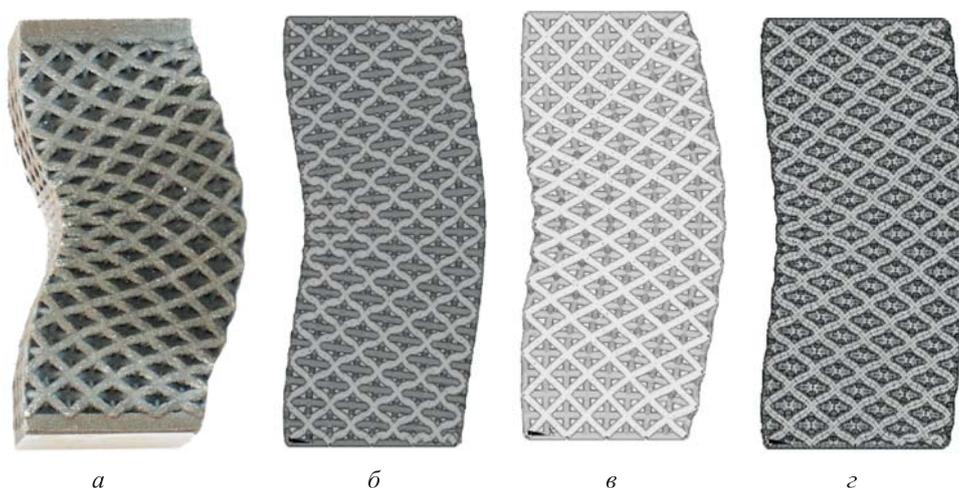


Рис. 7. Деформированный образец после испытания на сжатие (а), образцы в момент начала потери устойчивости модели в вычислительном эксперименте с дополнительными узловыми жесткими связями (б), с дополнительными узловыми балочными элементами (в), с дополнительной равномерной жесткостью (г)

В вычислительном эксперименте для модели с равномерно распределенными свойствами места с наибольшими возникающими напряжениями находятся в центре образца и вблизи от его монолитных торцов, что соответствует натурному эксперименту. Однако следует отметить, что у образцов при натурных испытаниях начало потери устойчивости наблюдалось и в нецентральных ячейках, в зависимости от случайных несовершенств конструкции.

Диаграммы деформирования, полученные по модели образца с дополнительными узловыми жесткими связями радиусом 0,88 мм (1/4 длины грани октаэдра), приведены на рис. 8, а. Результаты представлены для разных значений диаметра стержней, составляющих конструкцию сетчатого образца. Модель получается перекрепленной, а значению критической нагрузки соответствует результат для стержня меньшего диаметра, чем в образце при натурном испытании. Кроме того, на реальном образце со стержнями диаметром около 1 мм, но с концентраторами напряжений в виде поверхностных дефектов (см. рис. 2, б, в) может быть получен такой же результат, что и для математической модели с идеальным сечением, но меньшего диаметра. Подобная задача рассмотрена в работе [16], где проведен подробный сравнительный анализ аналитических и численных моделей с результатами испытаний образцов, изготовленных методами аддитивного производства (с решеткой типа «алмаз», для различных размеров ячейки периодичности из полимерного материала). В исследовании введено понятие эффективной (фактической) толщины стержня, которая воспринимает нагрузку в образце и будет меньше проектной в силу дефектов и неоднородности верхних слоев стержней, получаемых в процессе изготовления. Сходимость указанных значений толщины в зависимости от размеров стержня составляла 15...40 % (чем тоньше стержни, тем разность выше, чем толще — ниже). В среднем для толщины 1 мм сходимость составляла 20 %. В настоящей работе получен схожий результат. Далее этот вопрос требует более подробного исследования.

Диаграммы деформирования, полученные моделированием с применением равномерного распределения жесткости модели за счет изменения модуля упругости ее материала, приведены на рис. 8, б. Подход с выбранными условиями распределения жесткости не дает удовлетворительной сходимости расчетной и экспериментальной диаграмм деформирования.

Диаграммы деформирования, полученные с применением исходной балочной модели и рассмотренных вариантов корректировки ее жесткости, приведены на рис. 8, в. Наиболее точно диаграмму деформирования, полученную при натурных испытаниях на сжатие образца сетчатой конструкции, воспроизводит балочная модель с жесткими связями в угловых точках. На основе результатов можно сделать вывод о возможности использования балочных моделей для оценки механических свойств конструкций с деталями сетчатого строения. Полученные скорректированные балочные модели позволяют получить вполне удовлетворительный оценочный результат несущей способности сетчатой конструкции, они также обладают достаточной размерностью, что дает возможность решать задачи по моделированию сетчатых конструкций.

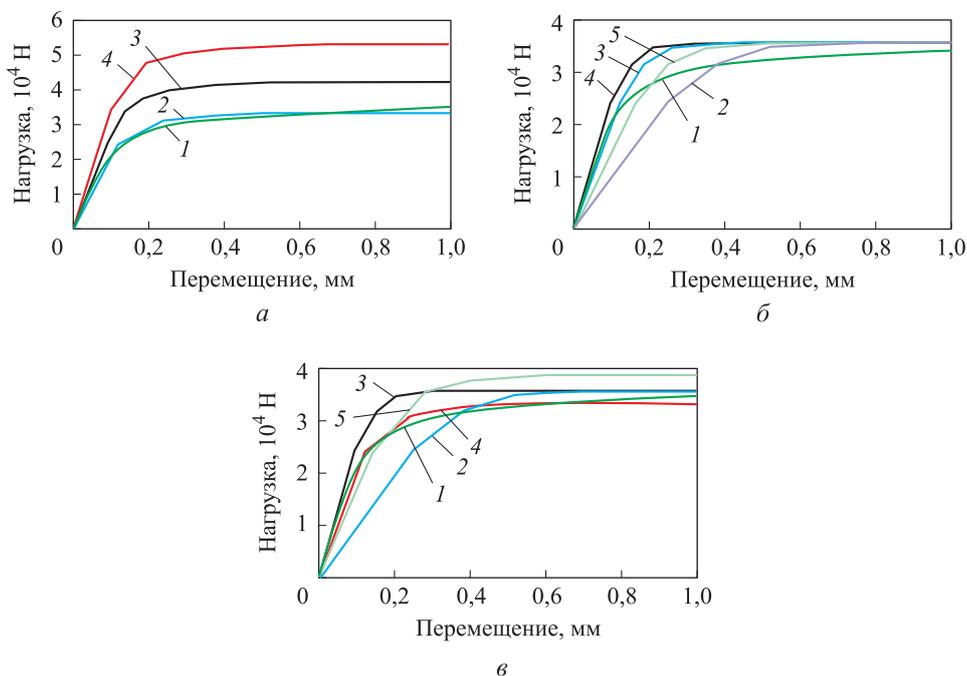


Рис. 8. Диаграммы деформирования образца сетчатой конструкции при натуральных испытаниях (1) на сжатие и диаграммы, полученные при моделировании:

a — с дополнительными узловыми жесткими связями радиусом, равным $1/4$ длины грани октаэдра (0,88 мм) для стержней диаметром 0,8 (2), 0,9 (3), 1,0 мм (4); *б* — с использованием равномерного распределения жесткости (2 — $E = 200$ ГПа; 3 — $E = 300$ ГПа; 4 — 400 ГПа; 5 — 500 ГПа); *в* — с применением исходной балочной модели и рассмотренных вариантов корректировки ее жесткости (2 — балочная модель без корректировки; 3 — с распределенной жесткостью $E = 500$ ГПа; 4 — с угловыми элементами, радиус $1/4$; 5 — с узловыми элементами, радиус $1/4$, диаметр 0,8 мм)

Результаты и заключения. По результатам моделирования сетчатых конструкций, полученных методом селективного лазерного сплавления, можно сделать вывод о возможности использования балочной модели для получения диаграмм деформирования при сжатии и оценки физико-механических свойств образцов сетчатой конструкции.

Объемные модели имеют существенную размерность (модель испытываемого образца с грубой сеткой уже будет содержать около миллиона элементов), и их использование крайне затруднительно на моделях деталей со значительным объемом сетчатых частей. Таким образом, для инженерных приложений возникает необходимость применения упрощенных моделей с меньшей размерностью. Такой моделью является балочная модель образца сетчатой конструкции с дополнительными узловыми жесткими связями, которая позволяет расчетным путем с высокой точностью получать диаграммы деформирования при сжатии.

Для рассмотренных образцов сетчатой конструкции (фермообразная структура, представляющая собой звездчатый октаэдр), синтезированных методом селективного лазерного сплавления из порошка стали CL20ES, с длиной сторо-

ны ячейки периодичности 5 мм и диаметром стержней ячейки около 1 мм наиболее корректный результат показала модель с эффективным диаметром стержней 0,8 мм и радиусом дополнительных узловых жестких связей, равным 1/4 длины грани октаэдра (0,88 мм).

Следует отметить, что объемные модели позволяют проводить корректировку упрощенных балочных моделей с помощью более точного анализа узловых соединений, отклонений от формы сечения, дефектов поверхности и др.

Для дальнейшего развития работ по созданию сетчатых структур можно отметить необходимость расчетно-экспериментальной отработки получения диаграммы деформирования при основных видах нагружения, а также точной верификации характеристик используемых материалов. Полученную модель можно использовать для оптимизации конструкции с помощью подбора формы элементарной ячейки для применения в конкретных деталях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 8. С. 7–17.
2. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий — текущий статус и перспективы развития // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3
3. Каблов Е.Н. Ключевая проблема — материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
4. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии — доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. № 2 (11). С. 52–55.
5. Gibson L.J., Ashby M.F. *Cellular solids: structure and properties*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1999. 532 p.
6. Герасимов В.В. От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья монокристаллических лопаток ГТД) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1
7. Способ изготовления деталей послойным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля / Д.Н. Сухов, Е.Н. Каблов, С.А. Василенко и др. Патент РФ 2623537. Заявл. 13.11.15, опубл. 27.06.2017.
8. *Metal foams: a design guide* / M. Ashby, A. Evans, N. Fleck, L. Gibson, et al. // *Appl. Mech. Rev.* 2001. Vol. 54. Iss. 6. P. B105–B106. DOI: 10.1115/1.1421119
9. Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Неруш С.В., Ходырев Н.А. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионно-стойкой стали // *Труды ВИАМ*. 2017. № 8 (56). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4
10. Ashby M.F. The properties of foams and lattices // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2006. Vol. 364. No. 1838. P. 15–30. DOI: 10.1098/rsta.2005.1678
11. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013. 222 с.

12. *Deshpande V.S., Fleck N.A., Ashby M.F.* Effective properties of the octet-truss lattice material // *J. Mech. Phys. Solids*. 2001. Vol. 49. Iss. 8. P. 1747–1769.

DOI: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2

13. *Dakshnamoorthy V., Taylor R.M.* Automated lattice optimization of hinge fitting with displacement constraint // *Solid Freeform Fabrication 2016. Proc. 26th Annual Int. Solid Freeform Fabrication Symp. — An Additive Manufacturing Conf.* 2016. P. 2123–2138.

14. *Nguyen D.S., Vignat F.* A method to generate lattice structure for additive manufacturing // *Int. Conf. Industrial Eng. and Eng. Management (IEEM)*. 2016. P. 966–970.

DOI: 10.1109/IEEM.2016.7798021

15. *Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В., Мазалов П.Б.* Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // *Изв. вузов. Машиностроение*. 2017. № 9 (690). С. 73–84.

DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-73-84

16. *Neff C., Hopkinson N., Crane N.B.* Selective laser sintering of diamond lattice structures: experimental results and FEA model comparison // *Solid Freeform Fabrication 2015. Proc. 25th Annual Int. Solid Freeform Fabrication Symp. — An Additive Manufacturing Conf.* 2015. P. 1104–1117.

Яковлев Николай Олегович — канд. техн. наук, начальник лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов Государственного научного центра Российской Федерации (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Гриневич Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, ведущий инженер лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов Государственного научного центра Российской Федерации (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Мазалов Павел Борисович — начальник лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов Государственного научного центра Российской Федерации (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Яковлев Н.О., Гриневич Д.В., Мазалов П.Б. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при сжатии сетчатой конструкции, синтезированной методом селективного лазерного сплавления // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2018. № 6. С. 113–127. DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-113-127

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE
MANIFESTING DURING COMPRESSION OF A LATTICE STRUCTURE
MANUFACTURED BY MEANS OF SELECTIVE LASER MELTING**

N.O. Yakovlev

lab30@viam.ru

D.V. Grinevich

lab30@viam.ru

P.B. Mazalov

viam.lab6@mail.ru

**All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials
(State Scientific Centre of the Russian Federation), Moscow, Russian Federation**

Abstract

The study considers approaches to mathematical simulation of compression deformation in lattice structure samples featuring a truss-like primitive cell (stellated octahedron, or *octet-truss*), manufactured by means of selective laser melting of powdered CL20ES steel. We simulated the primitive cells using three-dimensional and beam modeling, employing a number of options for adjusting beam model rigidity by augmenting the cell model with rigid constraints in the corner points, beam elements or uniform rigidity distribution over the model. An adjusted beam model featuring rigid constraints in its corner points, the constraint length being equal to 1/4 of the octahedron face length (0.88 mm) and the effective bar diameter measuring 0.8 mm, made it possible to obtain a highly precise computational strain curve for compression of a lattice structure sample featuring a 5 mm primitive cell edge, the cell bars being approximately 1 mm in diameter

Keywords

Lattice structure, additive technologies, simulation, finite element method, three-dimensional model, beam model

Received 27.02.2018

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Kablov E.N. Strategical areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. 5, pp. 7–17 (in Russ.).
- [2] Vostrikov A.V., Sukhov D.I. The production of powders by PREP method for additive manufacturing — current situation and development prospects. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 8 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3
- [3] Kablov E.N. Klyuchevaya problema — materialy. Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii [Key problem — materials. In: Tendencies and milestones of Russian innovative development]. Moscow, VIAM Publ., 2015, pp. 458–464 (in Russ.).
- [4] Kablov E.N. Additive technology: a dominant of national technology initiative. *Intellekt i tekhnologii*, 2015, no. 2 (11), pp. 52–55 (in Russ.).
- [5] Gibson L.J., Ashby M.F. Cellular solids: structure and properties. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1999. 532 p.
- [6] Gerasimov V.V. From single-crystal uncooled blades to turbines blades with penetration (transpiration) cooling made by additive technologies (review on technology of single-crystal GTE bladescasting). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 10 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1
- [7] Sukhov D.N., Kablov E.N., Vasilenko S.A., et al. Sposob izgotovleniya detaley posloynym lazernym splavlaniem metallicheskih poroshkov zharoprochnykh splavov na osnove nikelya [Parts manufacturing method by laser layer alloying of heat-resistant alloys from nickel-based metallic powders]. Patent RF 2623537. Appl. 13.11.15, publ. 27.06.2017 (in Russ.).
- [8] Ashby M., Evans A., Fleck N., Gibson L., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., Delale F. Metal foams: a design guide. *Appl. Mech. Rev.*, 2001, vol. 54, iss. 6, pp. B105–B106. DOI: 10.1115/1.1421119

- [9] Sukhov D.I., Mazalov P.B., Nerush S.V., Khodyrev N.A. The influence of SLS parameters on pores formation in stainless steel material. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 8 (56) (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4
- [10] Ashby M.F. The properties of foams and lattices. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 2006, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30. DOI: 10.1098/rsta.2005.1678
- [11] Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technologies in machine engineering]. Saint Petersburg, Izd-vo politekhn. univ. Publ., 2013. 222 p.
- [12] Deshpande V.S., Fleck N.A., Ashby M.F. Effective properties of the octet-truss lattice material. *J. Mech Phys. Solids*, 2001, vol. 49, iss. 8, pp. 1747–1769. DOI: 10.1016/S0022-5096(01)00010-2
- [13] Dakshnamoorthy V., Taylor R.M. Automated lattice optimization of hinge fitting with displacement constraint. *Solid Freeform Fabrication 2016. Proc. 26th Annual Int. Solid Freeform Fabrication Symp. — An Additive Manufacturing Conf.*, 2016, pp. 2123–2138.
- [14] Nguyen D.S., Vignat F. A method to generate lattice structure for additive manufacturing. *Int. Conf. Industrial Eng. and Eng. Management (IEEM)*, 2016, pp. 966–970. DOI: 10.1109/IEEM.2016.7798021
- [15] Sukhov D.I., Nerush S.V., Belyakov S.V., Mazalov P.B. The research of surface roughness parameters and accuracy of additive manufacturing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2017, no. 9 (690), pp. 73–84 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-73-84
- [16] Neff C., Hopkinson N., Crane N.B. Selective laser sintering of diamond lattice structures: experimental results and FEA model comparison. *Solid Freeform Fabrication 2015. Proc. 25th Annual Int. Solid Freeform Fabrication Symp. — An Additive Manufacturing Conf.*, 2015, pp. 1104–1117.

Yakovlev N.O. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (State Scientific Centre of the Russian Federation) (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Grinevich D.V. — Cand. Sc. (Eng.), Leading Engineer, Laboratory of the All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (State Scientific Centre of the Russian Federation) (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Mazalov P.B. — Head of Laboratory, All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials (State Scientific Centre of the Russian Federation) (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Yakovlev N.O., Grinevich D.V., Mazalov P.B. Mathematical Simulation of the Stress-Strain State Manifesting During Compression of a Lattice Structure Manufactured by means of Selective Laser Melting. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2018, no. 6, pp. 113–127 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2018-6-113-127