

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АУКСЕТИКОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТЕНТОВ КОРОНАРНЫХ СОСУДОВ

А.В. Буланов

andyb5@mail.ru

О.А. Блудова

boa96@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены существующие методы стентирования и типы сосудистых стентов, выявлены их существенные недостатки. В ходе анализа установлено, что эти недостатки могут быть устранены путем применения ауксетиков в качестве материалов для создания стентов. Проведен численный анализ нано- и микротрубок из ауксетиков. Предложены модели сегментов классических сосудистых стентов и стентов из ауксетиков.

Ключевые слова

Ауксетик, рестеноз, ангиопластика, шунтирование, катетер, автоматизация, голометаллический стент, стент с лекарственным покрытием, коронарный сосуд

Поступила в редакцию 20.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В настоящее время заболевания сердечно-сосудистой системы, как и прежде, занимают лидирующие позиции среди причин смертности. Методики лечения сердечно-сосудистых заболеваний развиваются наиболее интенсивно. На современном этапе наиболее значимые результаты лечения атеросклеротического поражения сосудов показывают эндоваскулярные технологии, в частности коронарная ангиопластика путем стентирования сосудов. В настоящее время при стентировании в основном используют металлические устройства.

Несмотря на заметный прогресс в этой отрасли медицины, тромбоз стента по-прежнему остается грозным осложнением. Проблемы, возникающие при повторном закупоривании сосудов, могут быть решены путем использования стентов из нового материала-ауксетика. В отличие от применяемых металлических стентов, стенты из ауксетика при необходимости можно будет извлекать из сосуда, что позволит избежать сложнейшей операции-шунтирования (**создаются новые обходные пути — шунты**). Это решит главную проблему, связанную с извлечением стента после окончания срока его полезного использования или при возникновении проблем во время эксплуатации.

Целью данной работы является создание модели стента для коронарного сосуда из ауксетика. Для этого необходимо решить следующие задачи:

- организовать и провести информационно-поисковые работы;
- исследовать структуры различных ауксетиков;
- реализовать численную модель сегмента стента при помощи программы ANSYS.

Рассмотрим основные группы стентов. В настоящее время, среди стентов для коронарных сосудов можно выделить две основные группы: голометаллические и стенты с лекарственным покрытием.

Голометаллический стент — это стент, который имеет металлический каркас без фиксации лекарства на нем (рис. 1). Такие стенты хорошо зарекомендовали себя в лечении таких случаев, как острый инфаркт миокарда или нестабильная стенокардия — прединфарктное состояние.

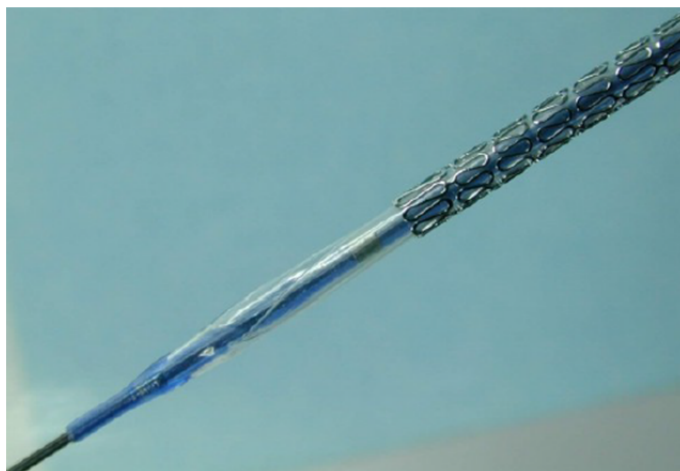


Рис. 1. Голометаллический стент на катетере

Голометаллические стенты могут применять также при лечении стенозов крупных по диаметру коронарных артерий, без угрозы повторного гемодинамически значимого (влияющего на ток крови в сосуде и кровоснабжение сердечной мышцы) рестеноза, поскольку пролиферация (разрастание) внутренней выстилки сосуда в крупных артериях не всегда приведет к возникновению сужений, которые могут повлиять на возникновение повторной клиники заболеваний. В настоящее время голометаллические стенты изготавливают из тантала, нитинола, сплава платины и иридия, а также сплавов кобальта.

Стенты с лекарственным покрытием. Кроме голометаллических, существуют стенты с лекарственным покрытием (СЛП или DES). Эти стенты нашли широкое применение в области лечения ишемической болезни сердца. Имея на своей поверхности лекарственное покрытие — цитостатик, эти стенты препятствуют развитию такого осложнения, как рестеноз и реокклюзия в стенте. Следует отметить, что эти стенты имеют несколько поколений (поколений), однако только стенты двух последних поколений применяют в лечебной практике.

Стенты второго поколения, или биосовместимые (рис. 2), характеризуются менее выраженной реакцией со стороны сосуда, в частности воспалительной, тромботической и т. д.

Стенты третьего поколения характеризуются тем, что лекарство направленно действует именно на стенку сосуда, благодаря его фиксации на стороне стента, контактирующей непосредственно со стенкой сосуда (рис. 3). Эта инновация получила название «Abluminal preference». В некоторых стентах третьего поколения полимер, на котором фиксируется цитостатик, является растворимым и растворяется постепенно вместе с лекарством.



Рис. 2. СЛП второго поколения, или биосовместимый стент

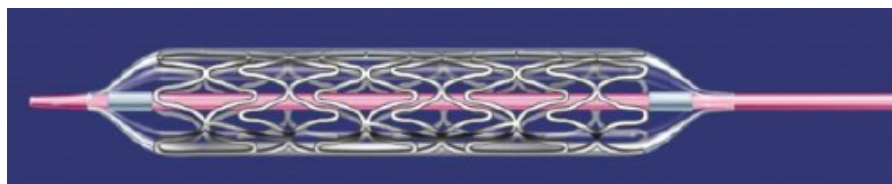


Рис. 3. СЛП третьего поколения

Достоинства и недостатки стентирования. В ходе исследования выявлены следующие основные достоинства применения данного метода:

- не требует длительной госпитализации;
- позволяет быстро восстановиться после оперативного вмешательства;
- вероятность возникновения осложнений минимальна.

Наряду с описанными достоинствами стентирования, использование металла для изготовления стента имеет существенный недостаток, который может привести к серьезным осложнениям в будущем. Дело в том, что после введения металлического стента в сосуд его уже нельзя извлечь. Поэтому при возникновении тромба или после окончания срока службы стента, приходится проводить сложные операции по созданию каналов в обход стента.

Применение принципиально нового материала позволит решить эту проблему. В качестве такого материала предлагается использовать ауксетик.

Создание новых стентов на основе ауксетиков. При растяжении материалы-ауксетики становятся толще в направлении, перпендикулярном приложенной силе. Это происходит по причине шарнирно-подобной структуры ауксетиков, которая деформируется при растяжении. Такое свойство может обуславливаться свойствами отдельных молекул или определяться структурными особенностями материала на макроскопическом уровне [1].

Ученые обнаружили, что тетрамеры, несмотря на прочные связи с соседними молекулами, способны слегка поворачиваться в двумерном слое. При этом в решетке возникают поры/пустоты между соседями — увеличивается расстояние между тетрамерами и материал расширяется. Строение вещества не позволяет порам возникать лишь вдоль одного направления, поэтому деформация белкового слоя вдоль одной из осей подобным образом деформирует его и в другом направлении (рис. 4). Это свойство называют ауксетичностью, а для того, чтобы описать его количественно используют коэффициент Пуассона (рис. 5) [2].

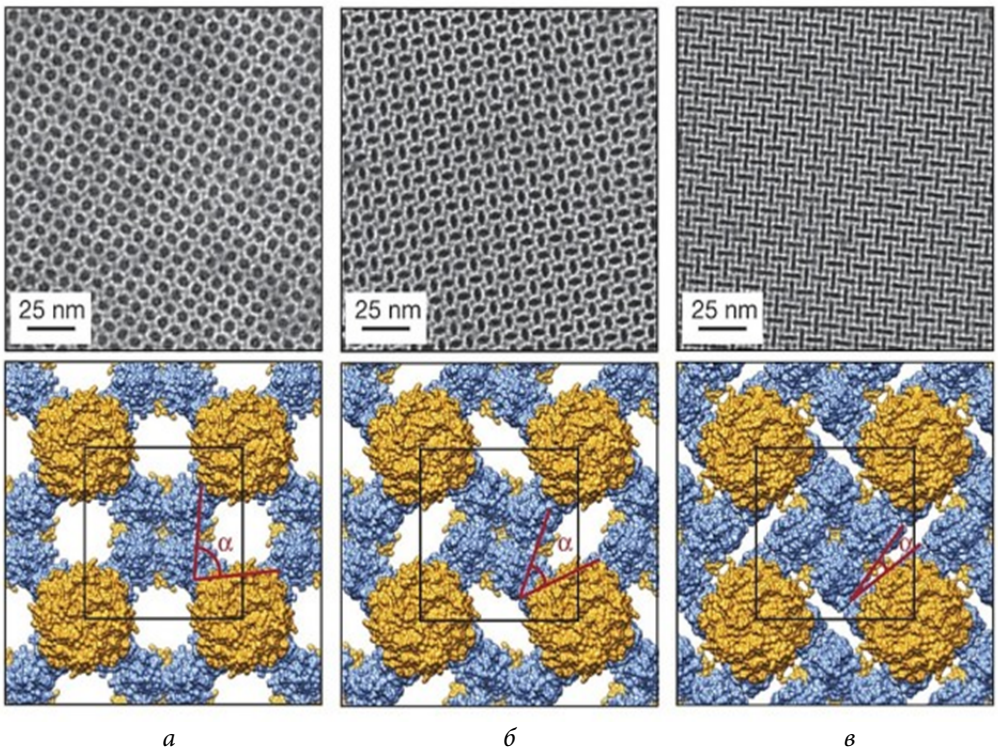
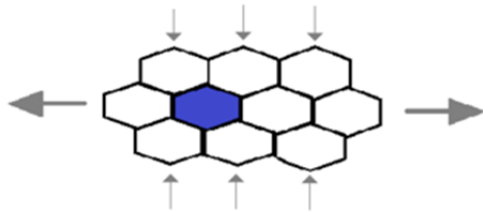
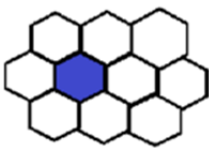


Рис. 4. Материал-ауксетик (вверху) и решетка соответствующей конформации (внизу):
a — максимальное растяжение; *б* — промежуточное состояние; *в* — максимальное сжатие;
 α — угол поворота квадратов

NORMALE MATERIALIEN



AUXETISCHE MATERIALIEN

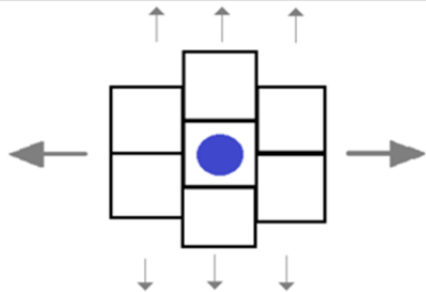
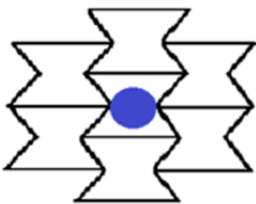


Рис. 5. Структуры обычного материала (вверху) и ауксетика (внизу) в состоянии покоя и при разнонаправленном растяжении

Ауксетичностью обладают полимерные материалы и анизотропные кристаллы. Одним из примеров природных ауксетиков является минерал натролит, также содержащий натролит, структуру которого можно представить в виде вращающихся квадратов (в белковом монослое их роль играют тетрамеры). Другой известный ауксетик — это бумага.

Маленькие деформации линейного анизотропного эластичного материала описывают с помощью закона Гука: $\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl}$ — линейное соотношение между тензорами напряжения и деформации с тензорами коэффициентов соответствия S_{ijkl} . Модуль Юнга при одноосном растяжении кристалла в направлении единичного вектора N определяется выражением

$$\frac{1}{E(n)} = n_i n_j n_k n_l S_{ijkl}, \quad (1)$$

а коэффициент Пуассона —

$$\nu(n, m) = \frac{m_i m_j n_k n_l S_{ijkl}}{n_q n_r n_s n_t S_{qrst}} \quad (2)$$

где m_i — компоненты единичного вектора m , перпендикулярного вектору n .

Матрица соответствующих коэффициентов для 7-константных ромбоэдрических кристаллов имеет вид [3]:

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & -S_{14} & -S_{15} & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ S_{14} & -S_{14} & 0 & S_{44} & 0 & -2S_{15} \\ S_{15} & -S_{15} & 0 & 0 & S_{44} & 2S_{14} \\ 0 & 0 & 0 & -2S_{15} & 2S_{14} & 2(S_{11} - S_{12}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Для этой матрицы верны следующие соотношения для ее компонентов и компонентов тензоров: $S_{11} = S_{1111}$; $S_{33} = S_{3333}$; $S_{44} = 4S_{2323}$; $S_{12} = S_{1122}$; $S_{14} = 2S_{1123}$; $S_{15} = 2S_{1113}$. Если растяжения направлений выразить через углы Эйлера φ , θ , ψ , то эта матрица позволяет написать модуль Юнга и коэффициент Пуассона в виде зависимости от углов Эйлера с периодами $T\varphi = 2\pi$, $T\theta = \pi$ и $T\psi = 2\pi$, $T\theta = 2\pi$, $T\psi = \pi$ соответственно. Численный анализ этих угловых зависимостей с использованием экспериментальных данных по матрице соответствия коэффициентов, приведенных выше, показал, что три из восьми 7-константных ромбоэдрических кристаллов частично являются ауксетиками, то есть имеют отрицательный коэффициент Пуассона в направлении растяжения кристаллов. Максимальные, минимальные и средние значения коэффициента Пуассона представлены в таблице. Кроме того, указаны максимальные и минимальные значения для трех конкретных направлений. В случае совпадения показатели локальных экстремумов (в частности и ориентации) и глобальные экстремумы отмечены жирным шрифтом. Средние значения коэффициента Пуассона для всех кристаллов являются положительными и варьируются в диапазоне от 0,10–0,32 [4]. Поверхности с нулевым коэффициентом Пуассона («поверхности — ауксетики») $\nu(\varphi, \theta, \psi) = 0$ разделяют

области отрицательных и положительных коэффициентов для частичных ауксетиков. Такие поверхности для двух кристаллов $MgSiO_3$ и $CaMg(CO_3)_2$ относят к «закрытому» типу, кристалл SbI_3 — к «открытому» типу вследствие периодичности угловых ячеек (рис. 6). Посчитанные глобальные экстремумы модулей Юнга для ромбоэдрических кристаллов приведены в табл. 1. Кристаллы Be_2SiO_4 и $MgSiO_3$ имеют высокие значения модуля Юнга ($E_{min} > 220$ ГПа) [5].

Таблица 1

Глобальные экстремумы модулей Юнга для ромбоэдрических кристаллов

Вид кристалла	v_{min}	v_{max}	$\langle v \rangle$	$n_1 = 1$		$n_2 = 1$		$n_3 = 1$
				v_{min}	v_{max}	v_{min}	v_{max}	
SbI_3	-0,60	0,71	0,10	-0,44	0,62	-0,46	0,62	0,40
Be_2SiO_4	0,22	0,37	0,28	0,23	0,34	0,22	0,35	0,28
$BiI_3(83K)$	0,01	0,47	0,23	0,01	0,40	0,10	0,31	0,27
$Ce_2Mg_3(NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$	0,17	0,54	0,32	0,21	0,42	0,20	0,43	0,38
$CaMg(CO_3)_2$	-0,07	0,73	0,30	0,01	0,66	0,10	0,57	0,21
$Pb_{4,7}Ba_{0,3}Ge_3O_{11}$	0,15	0,34	0,25	0,15	0,34	0,15	0,34	0,20
$Pb_5Ge_3O_{11}$	0,13	0,34	0,25	0,13	0,34	0,13	0,34	0,20
$Pb_5Ge_3O_{11}, s^E$	0,12	0,37	0,25	0,12	0,36	0,12	0,37	0,19
	0,12	0,37	0,25	0,12	0,36	0,12	0,37	0,19
$MgSiO_3$	-0,02	0,51	0,25	0,03	0,63	0,04	0,45	0,11

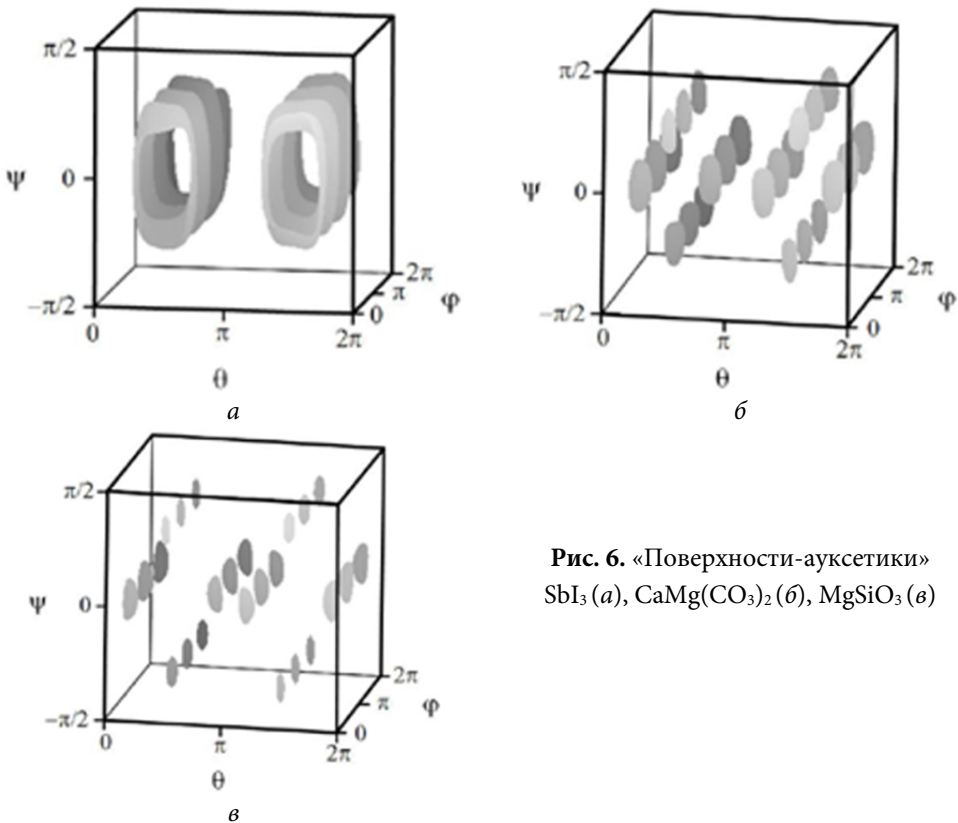


Рис. 6. «Поверхности-ауксетики» SbI_3 (а), $CaMg(CO_3)_2$ (б), $MgSiO_3$ (в)

Результаты численного анализа. Анализ показал, что среди восьми линейных анизотропных 7-константных ромбоэдрических кристаллов есть три ауксетика: SbI_3 , $CaMg(CO_3)_2$, $MgSiO_3$ и что количество ауксетиков среди нано- и микротрубок из таких кристаллов увеличено до шести. Рассмотрена изменчивость коэффициента Пуассона и модуля Юнга для 7-константных ромбоэдрических кристаллов и нано-, микротрубок, также оценена зависимость этих коэффициентов и жесткость при кручении, исходя из параметра толщины для нано- и микротрубок. Важной особенностью анализа является то, что четыре основных механических характеристик нано/микротрубок из 7-константных ромбоэдрических кристаллов (модуль Юнга, два коэффициента Пуассона и жесткость при кручении) не зависят от коэффициентов соответствия s'_{14} и s'_{15} , которые меняются в зависимости от значения хирального угла (между гранью и направлением сворачивания). В таких нано- и микротрубках не проявляется эффект Пойнтинга. Нано- и микротрубки из ромбоэдрических кристаллов существенно отличаются этим качеством от нано- и микротрубок из многих других кристаллов, например ромбической и тетрагональной системы [6].

Ауксетика и классические материалы. Для проектирования стента из принципиально нового материала нужно сравнить сегмент классического стента (рис. 7) из упругого материала и сегмент стента из ауксетика. Данная задача была решена при помощи программы ANSYS. В качестве модели для классического стента взяты две двухузловые балки из стали радиусом 0,5 мм. Балки выполнены в форме синусоид, закрепленных в точках экстремумов. Нагруженное состояние задано перемещением концов балок на 4 мм. На рис. 8 представлена зависимость силы от перемещения для данной модели.

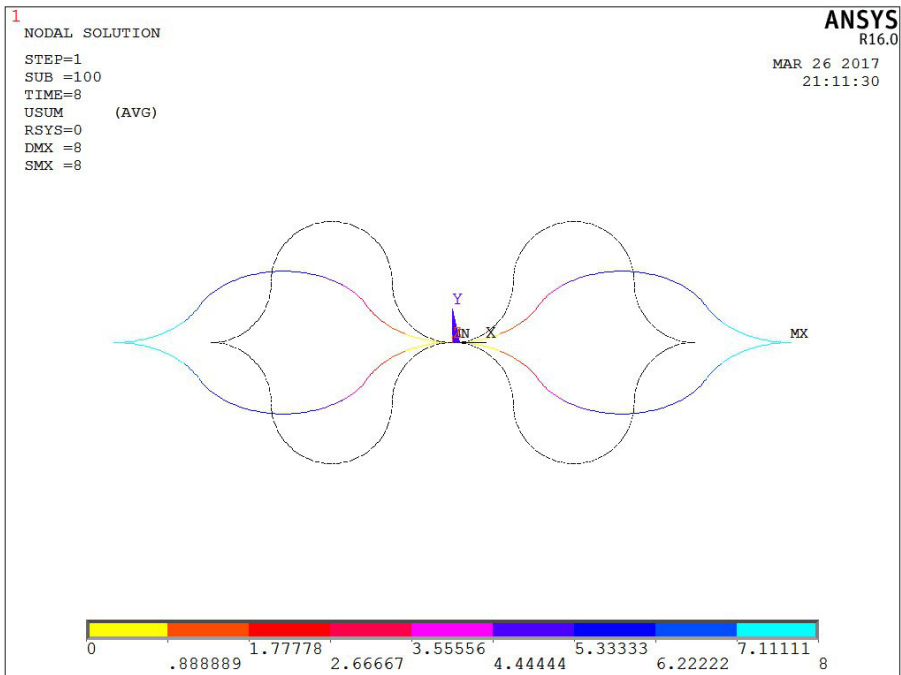


Рис. 7. Стент из упругого материала

1
POST26
FX_2

ANSYS
R16.0
MAR 26 2017
21:11:11

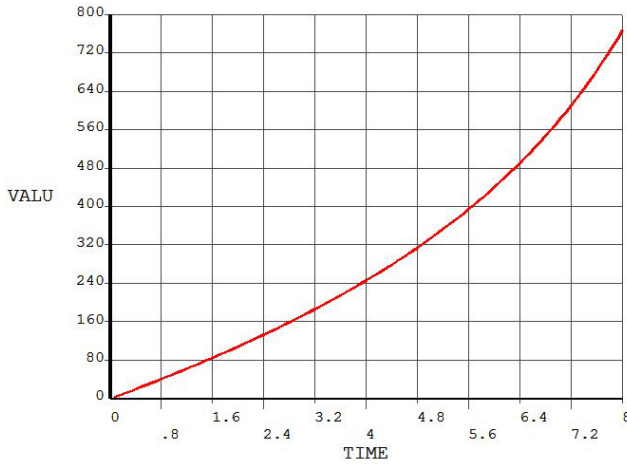


Рис. 8. Зависимость силы от перемещения для упругого элемента

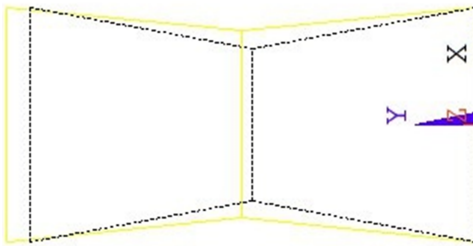


Рис. 9. Модель сегмента стента из ауксетика:

пунктирная линия — начальное положение;
сплошная желтая — деформированное

В качестве модели сегмента стента из ауксетика применим конструкцию, представленную на рис. 9. Модель создана при помощи программы ANSYS из семи элементов link (пружина), шесть из которых обладают большой жесткостью (1000 Н/м), а одна — маленькой (100 Н/м). Как и в предыдущей задаче, нагруженное состояние задано перемещением верхних узлов на 4 мм.

На рис. 10 изображена зависимость силы от перемещения для данной модели [7].

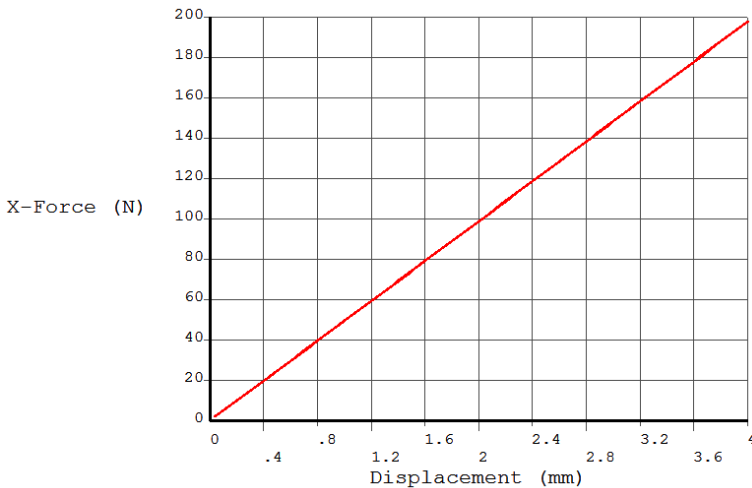
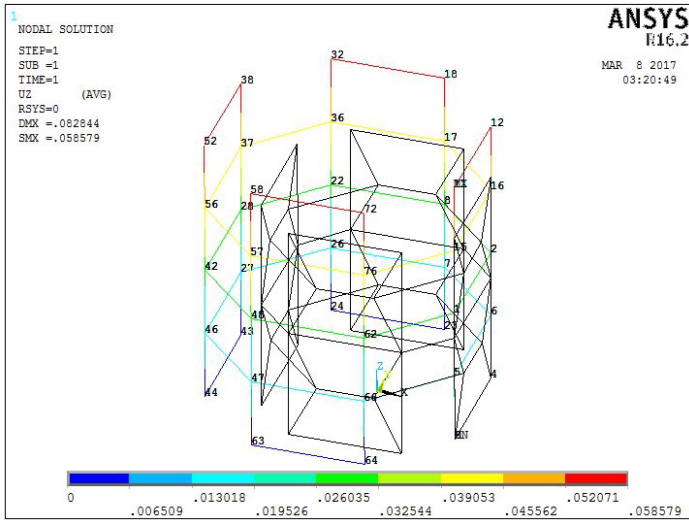


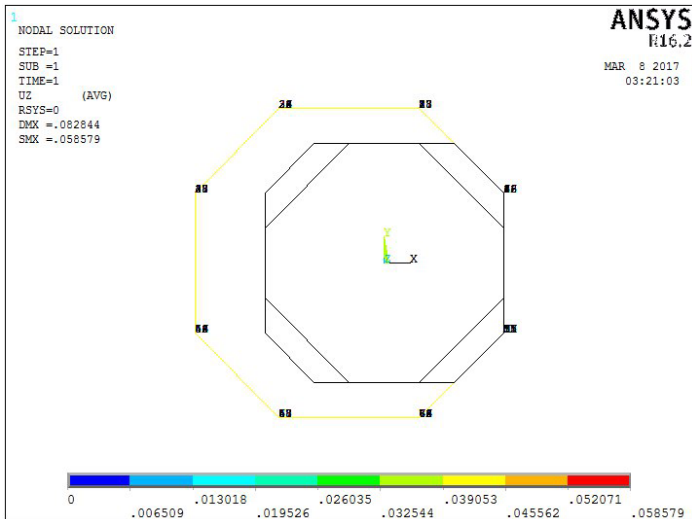
Рис. 10. Зависимость силы от перемещения для сегмента стента из ауксетика

Стент из ауксетика. Исходя из данных, полученных в результате анализа сегментов классического стента и стента из ауксетика, можно сделать вывод, что ауксетик подходит в качестве материала для конструирования стента коронарного сосуда.

Теперь построим модель самого стента, используя сегмент, описанный выше, для этого также применим программу ANSYS. Модель будет состоять из 16 сегментов, замкнутых в цилиндр. Каждый сегмент модели — из семи элементов link (пружина), шесть из которых обладают большой жесткостью (1000 Н/м), а один — маленькой (100 Н/м). Как и в предыдущих задачах, нагруженное состояние задано перемещением верхних узлов на 4 мм [7]. Механические свойства модели и начальные условия взяты из задачи расчета сегмента (рис. 11).



а



б

Рис. 11. Деформированная модель стента из ауксетика в изометрии (а) и то же, вид сверху (б)

В ходе проведенного исследования изучены существующие стенты, выявлены их преимущества и недостатки, рассмотрены структура и физические свойства ауксетиков, созданы численные модели для сегментов стентов из классического материала и из ауксетика при помощи программы ANSYS, а также модель самого стента. В ходе решения этих задач получена линейная зависимость силы от перемещения. В результате доказана возможность проектирования стентов из ауксетиков.

Литература

- [1] Evans K.E. Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour*, 1991, vol. 15, no. 4, pp. 170–174.
- [2] Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 1987, vol. 235, no. 4792, pp. 1038–1040.
- [3] Колпаков А.Г. К определению усредненных характеристик упругих каркасов. *Прикладная математика и механика*, 1985, т. 49, № 6, с. 969–977.
- [4] Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Ауксетическая механика кристаллических материалов. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, 2010, № 4, с. 43–62.
- [5] Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Изменчивость коэффициента Пуассона для гексагональных кристаллов под давлением. *Труды МАИ*, 2016, № 87. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=69526>.
- [6] Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона криволинейно анизотропных гексагональных и ромбоэдрических нанотрубок. Нанотрубки-ауксетики. *Доклады Академии наук*, 2013, т. 452, № 3, с. 279–283.
- [7] Berinskii I.E. Elastic networks to model auxetic properties of cellular materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 115–116, pp. 481–488.

Буланов Андрей Викторович — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Блудова Ольга Александровна — студентка кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — С.С. Гаврюшин, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

USING AUXETICS FOR DESIGNING THE CORONARY VESSELS STENTS

A.V. Bulanov

andyb5@mail.ru

O.A. Bludova

boa96@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article considers the existing stenting techniques and vascular stents types and identifies their essential disadvantages. During analysis it was established that these disadvantages can be eliminated by applying the auxetics as the materials for making stents. We have conducted a numerical analysis of nano- and microtubules made of auxetics. The article suggests the models of classical vascular stents segments and stents made of auxetics.

Keywords

Auxetics, restenosis, angioplasty, shunting, catheter, automation, hol-metallic stent, stent with the medicamentous coating, coronary vessel

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Evans K.E. Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour*, 1991, vol. 15, no. 4, pp. 170–174.
- [2] Lakes R.S. Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science*, 1987, vol. 235, no. 4792, pp. 1038–1040.
- [3] Kolpakov A.G. Determination of the average characteristics of elastic frameworks. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1985, vol. 49, no. 6, pp. 969–977. (Eng. version: *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1985, vol. 49, no. 6, pp. 739–745.)
- [4] Gol'dshteyn R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Auxetic mechanics of crystalline materials. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela*, 2010, no. 4, pp. 43–62. (Eng. version: *Mechanics of Solids*, 2010, vol. 45, no. 4, pp. 529–545.)
- [5] Gol'dshteyn R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Variability of Poisson's ratio for hexagonal crystals under pressure. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=69526>.
- [6] Gol'dshteyn R.V., Gorodtsov V.A., Lisovenko D.S. Young's moduli and Poisson's ratios of curvilinear anisotropic hexagonal and rhombohedral nanotubes. Nanotubes-auxetics. *Doklady Akademii nauk*, 2013, vol. 452, no. 3, pp. 279–283. (Eng. version: *Doklady Physics*, 2013, vol. 58, no. 9, pp. 400–404.)
- [7] Berinskii I.E. Elastic networks to model auxetic properties of cellular materials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 115–116, pp. 481–488.

Bulanov A.V. — student, Computer Systems of Manufacture Automation Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Bludova O.A. — student, Computer Systems of Manufacture Automation Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Gavryushin S.S., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Computer Systems of Manufacture Automation Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.