

6. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.

УДК 004.942+616.74

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АРТЕРИИ ПРИ РАСКРЫТИИ СТЕНТА

А. И. Столяров, Е. В. Зайцев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Выполнен расчет напряжений и деформаций в артерии и бляшке при раскрытии стента.

Ключевые слова: артерия, атеросклеротическая бляшка, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, стент.

ASSESSMENT OF THE STRESSED STATE OF THE ARTERY DURING STENT OPENING

A. I. Stolyarov, E. V. Zaitsev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this work, the stresses and deformations in the artery and plaque were calculated when the stent was opened.

Keywords: stent, artery, stress-strain state, finite element method.

Одним из наиболее распространенных сосудистых заболеваний является атеросклероз, который может привести к сужению и блокировке артерий. Для восстановления нормального кровотока применяются эндоваскулярные методы лечения, среди которых особое место занимает стентирование. Основной целью этой процедуры является устранение стенозов – сужений сосудов, которые ограничивают кровоток к сердечной мышце. Этот метод предполагает введение в артерию специального устройства – стента, которое позволяет удерживать стенки сосуда открытыми и восстанавливать проходимость.

Открытие стента вызывает изменения в напряженном состоянии стенки артерии, что, в свою очередь, может влиять на его функциональность и долговечность. Напряженное состояние стенки артерии в процессе раскрытия стента подвергается влиянию целого ряда факторов, таких как материал, из которого изготовлен стент, его геометрия, а также механические свойства артериальной стенки. Эти взаимодействия имеют значение для предотвращения таких осложнений, как рестеноз (вторичное сужение артерии) и тромбообразование.

Цель данной работы – провести оценку напряженного состояния артерии при раскрытии стента. Для достижения этой цели использован метод конечных элементов, позволяющий детализировать и визуализировать распределение напряжений и деформаций в артерии во время процесса раскрытия стента. Основное внимание в данной работе уделено анализу влияния на напряженное состояние конструкции стента и механических свойств атеросклеротической бляшки, а также выявлению критических точек, где возможно возникновение неблагоприятных последствий.

Предполагали, что артерия и бляшка изотропны и гиперупруги. Модель артерии была структурно разделена на три слоя: интима, медиа и адвенция. Для описания механического поведения артерии и бляшки приняли модели Ogden и Mooney-Rivlin соответственно. Параметры модели Mooney-Rivlin для стенозированной бляшки [1]: $C_{10} = -0,49596$; $C_{01} = 0,50661$; $C_{20} = 1,1935$; $C_{11} = 3,6378$; $C_{02} = 4,7373$; кальцинированной бляшки [2]: модуль упругости $E = 2,19$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,49$; значения параметров модели Ogden для слоев артерии приняли в соответствии с работой [3].

На рис. 1 показана физическая модель системы «артерия – бляшка – стент».

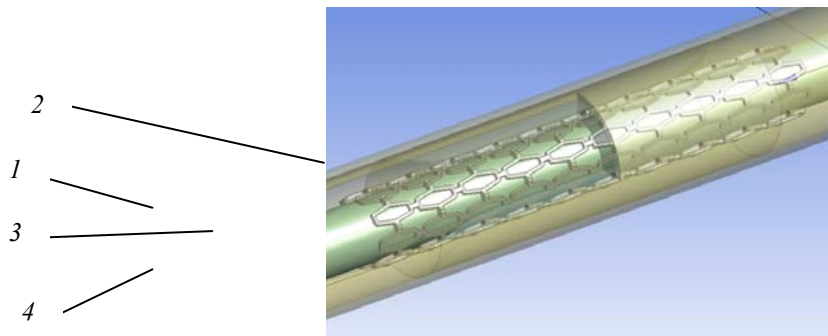


Рис. 1. Физическая модель системы «артерия–бляшка–стент»:
1 – артерия; 2 – бляшка; 3 – стент; 4 – баллон

Материал стента – нержавеющая сталь 12Х18Н10. Физико-механические свойства стали: модуль упругости $E = 1,98 \cdot 10^5$ МПа; плотность $\rho = 7920$ кг/м³; предел прочности $\sigma_b = 550$ – 650 МПа, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 225$ – 315 МПа [4]. Приняли, что начальные напряжения в стенте отсутствуют, нагрузка равномерно распределена по внутренней поверхности баллона.

Рабочее давление задавали на внутреннюю стенку дилатационного баллона, который, для упрощения модели, представлен в виде жесткой цилиндрической оболочки.

В результате расчета были получены значения напряжений и деформаций. На рис. 2 показаны эквивалентные напряжения в артерии и бляшке: 2, а, в – кальцинированная бляшка; 2, б, г – стенозирующая бляшка.

Из рис. 2 видно, что после раскрытия стента возникают значительные локальные напряжения, которые могут привести к повреждению бляшки и эндотелия. При этом уровень напряжений в стенозирующей бляшке $\sigma_{\text{экв}} = 4,2$ – $5,4$ МПа значительно больше, чем в кальцинированной $\sigma_{\text{экв}} = 1,2$ – $1,5$ МПа. Очевидно, что сама бляшка будет повреждена. Наибольшее значение эквивалентных напряжений в стенте по варианту 1 составляет ≈ 500 МПа, а для стента по варианту 2 – 330 – 400 МПа, что не превышает предел прочности для материала стента.

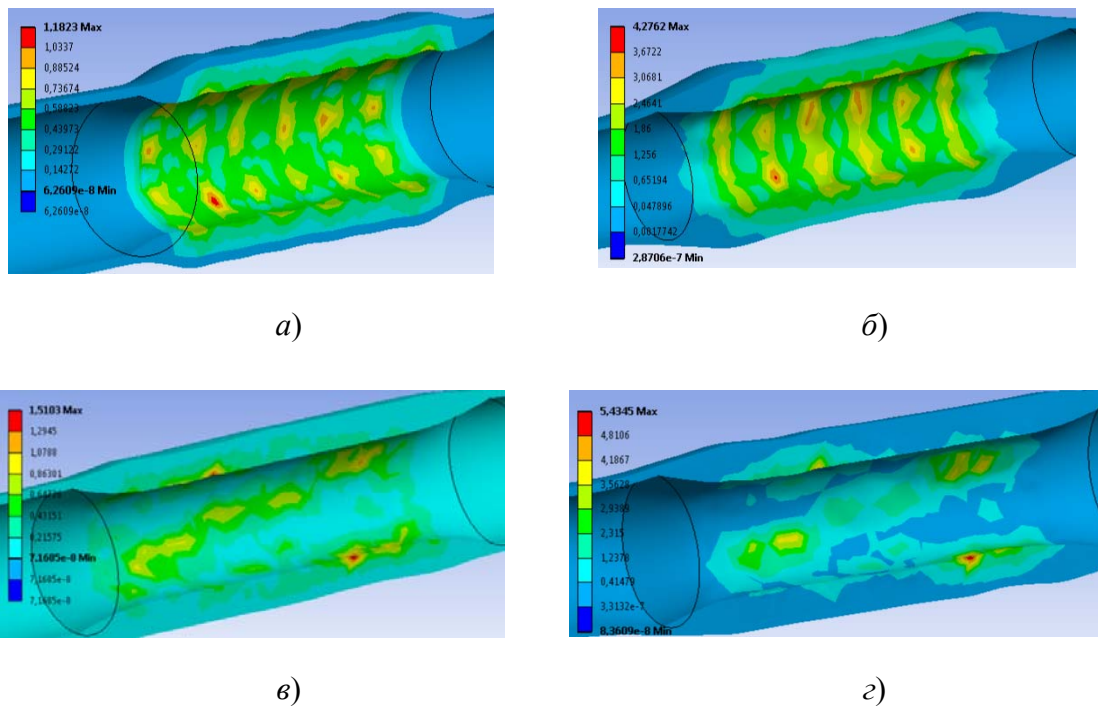


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений в стенке артерии и бляшке по Мизесу, МПа:

a, б – стент по варианту 1; *в, з* – стент по варианту 2

Нужно отметить, что выбранные для анализа напряженного состояния стенки артерии конструкции стентов не являются оптимальными при данных размерах бляшки и ее стенозированном состоянии.

Оценка напряженно-деформированного состояния артерии при раскрытии стента является важным аспектом в кардиологии и ангиологии. Она требует комплексного подхода, объединяющего клинические наблюдения, современные методы визуализации и вычислительные модели.

Литература

1. Zahedmanesh, H. Determination of the influence of stent strut thickness using the finite element method: implications for vascular injury and in-stent restenosis, *Medical and Biological Engineering and Computing* / H. Zahedmanesh, C. Lally. – 2009. – Vol. 47. – P. 385–393.
2. Lally, C. Cardiovascular stent design and vessel stresses: a finite element analysis / C. Lally, F. Dolan, P. J. Pendergrast // *Journal of Biomechanics*. – 2005. – N 38. – P. 1574–1581.
3. Wei L, Leo H. L., Chen Q. and Li Z. Structural and Hemodynamic Analyses of Different Stent Structures in Curved and Stenotic Coronary Artery. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 7:366. – DOI 10.3389/fbioe.2019.00366.
4. Марочник сталей и сплавов / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский [и др.] ; под общ. ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. – 4-е изд., переработ. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 1216 с. : ил.