ОЦЕНКА ОСЕВОЙ ЖЕСТКОСТИ СТЕНТОВ

Д. В. Нуштаев[1], С. И. Жаворонок[2],
К. Ю. Клышников[3], Е. А. Овчаренко[3]

[1] ООО «ТЕСИС»
[2] Институт прикладной механики РАН,
[3] ФГБУ НИИ «Комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний» СО РАМН,

Стент представляет собой изготовленную в форме цилиндрического каркаса металлическую конструкцию, которая под контролем рентгеновского аппарата подводится к месту паталогического сужения сосуда и расширяется, стабилизируя кровоток.

В процессе движения человека происходит деформирование сосудов, что создаёт дополнительную, помимо радиальной, нагрузку на стент, в том числе и осевую [1]. При стентировании, помимо положительного эффекта армирования стенок сосуда, происходит локальное увеличение осевой жесткости сосуда в месте установки стента, что ухудшает аккомодацию сосуда. Уменьшение степени аккомодации увеличивает нагрузку на стент и прилегающую к месту стентирования область сосуда, что может привести к большим перегибам и разрушению стента [2, 3]. Для уменьшения риска вероятного разрушения конструкции или повреждения сосуда необходима оценка поведения стентированного участка при эксплуатационных нагрузках.

Проведение экспериментальных исследований поведения стентированного участка, с учетом сложного характера внешних воздействий, крайне затруднительно. В то же время, использование современных конечно-элементных комплексов позволяет проводить имитационное моделирование процессов с различными уровнями детализации постановки задачи и сложными условиями нагружения, которые трудно воспроизвести в лабораторных условиях. Также, в случае использования численных методов анализа, возможно получение дополнительной информации, недоступной при экспериментальной оценке, и проведение исследования влияния конструктивных параметров стента без необходимости производства новых экспериментальных образцов. Заметим также, что предварительный вычислительный эксперимент является важнейшим этапом планирования и подготовки сложного физического эксперимента.

В рамках проведенного нами исследования, на базе конечно-элементного комплекса SIMULIA Abaqus создана численная методика оценки деформированного состояния стентов при осевом сжатии.

Численное моделирование

Создание методики численного анализа осевой жесткости стентов проводилось на базе метода конечных элементов в программном комплексе SIMULIA Abaqus. На основе плоской развертки стента была построена трехмерная конечно-элементная модель с использованием 8-ми узловых элементов первого порядка интерполяции и редуцированной схемой интегрирования (C3D8R).

Представленная на рисунке 1 конечно-элементная модель стента использовалась без изменений на всех этапах последующего моделирования.

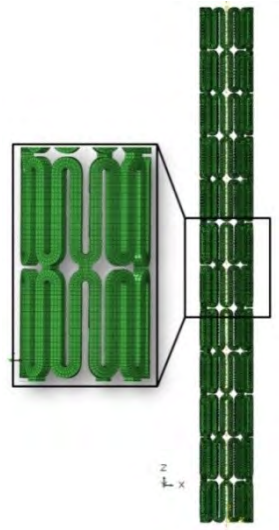


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели стента. Кол-во элементов – 60300

Программный комплекс SIMULIA Abaqus позволяет проводить решение задач устойчивости в нелинейной постановке с использованием метода Ньютона – Рафсона, модифицированного метода Рикса, либо на основе методов явной динамики. Однако, применительно к данной задаче, при задании возможных контактных взаимодействий между ячейками стента, использование метода Ньютона-Рафсона и модифицированного метода Рикса неэффективно, а в некоторых расчетных случаях - невозможно. Это объясняется существенными проблемами численного характера, возникающими при проведении анализа закритического поведения конструкции с использованием данных подходов.

Для проведения нелинейного анализа был выбран метод явной динамики, реализованный в решателе Abaqus\Explicit. Выбранный решатель основан на явной схеме интегрирования уравнений движения во времени. Производиться решение динамического уравнения равновесия с диагональной матрицей масс элементов.

$$\ddot{u} = (M)^{-1}(P - I) \quad (1)$$

Здесь $\ddot{u}$ – ускорения узлов модели; M – диагональная матрица масс элементов; P – внешние силы; I – внутренние силы.

Метод является условно устойчивым. Предел устойчивости ограничен размером временного приращения, которое равно времени прохождения волны через один конечный элемент.

$$\Delta t = L^e \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2)$$

Здесь L^e - текущий характерный размер элемента; ρ - плотность материала; E – модуль Юнга.

На рисунке 2 представлена общая расчетная схема задачи. Для полного удовлетворения экспериментальным условиям нагружения, в расчетную область введены геометрические модели оправок. Они моделируются как абсолютно жесткие тела. Передача нагрузок и кинематических ограничений осуществляется через контактные взаимодействия в системе «оправка-стент», что полностью соответствует экспериментальным условиям нагружения. Оправка №1 жестко зафиксирована по всем степеням свободы.

$$U_{1,2,3,4,5,6} = 0 \quad (3)$$

Движение оправки №2 ограничено по всем степеням свободы, кроме вертикального перемещения вдоль оси Oz - U_3. Задается кинематическое нагружение – вертикальное перемещение оправки №2.

$$\begin{gathered} U_{1,2,4,5,6} = 0 \\ U_3 = -0.5 \text{ мм} \end{gathered} \quad (4)$$

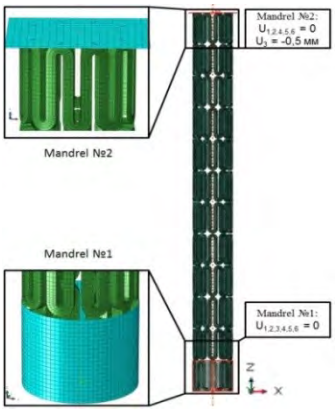


Рис. 2 – Расчетная схема задачи в нелинейной постановке. Установка нижней торцевой секции стента в абсолютно жесткую оправку№1 с нулевым зазором. Контактирование верхней торцевой секции стента с абсолютно жесткой поверхностью оправки №2

Моделирование квазистатических задач с использованием метода явной динамики в реальных временных рамках не представляется возможным ввиду небольшого размера приращения по времени и, как следствие, больших временных затрат на проведение анализа. Например, в нашем случае размер приращения по времени составляет - $\Delta t \approx 10^{-9}$. Для получения экономичного численного решения, производилось искусственное увеличение скорости нагружения за счёт уменьшения общего времени моделирования. Однако при больших скоростях нагружения инерционная составляющая нагрузки становится доминирующей. Для получения квазистатического отклика системы необходимо обеспечение выполнения следующего соотношения на всём протяжении расчета [4].

$$\frac{E^{KE}}{E^{P}} < 0,05 \quad (5)$$

Здесь E^P - потенциальная энергия модели; E^{KE} - кинетическая энергия модели.

В модели определены возможные контактные взаимодействия между всеми ячейками стента с использованием технологии автоматического поиска контактных пар. Для обеспечения реализации условий контактных взаимодействий был использован метод штрафов с формированием контактной жесткости на основе жесткости контактирующих элементов. Учтено фрикционное взаимодействие контактирующих поверхностей в рамках модели трения Кулона с наличием начального «упругого» сдвига. Проскальзывание контактирующих поверхностей друг относительно друга возможно при превышении величины эквивалентных касательных напряжений τ_{eq} критического значения τ_{crit}, определяемого формулой (6) .

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (6)$$

Где μ – коэффициент трения, p – контактное давление.

Результаты моделирования

В результате проведения нелинейного анализа осевого сжатия стентов с использованием метода явной динамики произведена оценка напряженно-деформированного состояния конструкции, построены кривые равновесных состояний и получены значения предельных нагрузок в закритическом состоянии.

Кривая равновесных состояний, полученная с использованием коэффициента трения $\mu = 0{,}2$, представлена на рисунке 3. На начальном этапе наблюдается упругое деформирование стента с линейным увеличением осевой жесткости. Точка А обозначает начало образования необратимых пластических деформаций. Происходит локализация пластических деформаций в перемычках стента с образованием пластических шарниров (Рисунок 4).

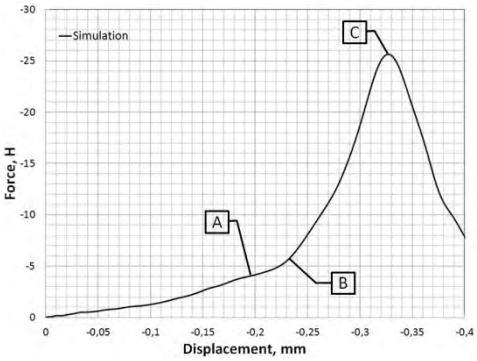


Рис. 3 – Кривая равновесных состояний ($\mu = 0{,}2$). Выделены характерные участки кривой: А – начало пластической деформации стента; В – вход в контакт ячеек стента; С – выход ячеек стента из контакта, потеря устойчивости

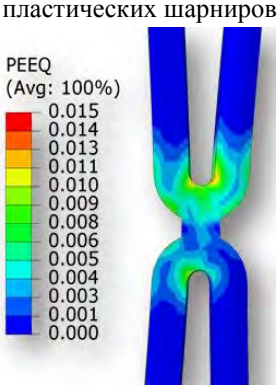


Рис. 4 – Локализация пластических деформаций в перемычках стента. Приведена цветовая палитра эквивалентных пластических деформаций

После точки В наблюдается резкое увеличение осевой жесткости стента. Это объясняется полной выработкой начального осевого зазора между ячейками и началом их контактрирования. Из анализа характера контактных взаимодействий, представленного на рисунке 5, следует, что на данном этапе стент работает, как замкнутая оболочка. В точке С происходит потеря устойчивости с выходом ячеек стента из контакта и последующим падением несущей способности конструкции. При этом наблюдается значительный рост кинетической энергии модели.

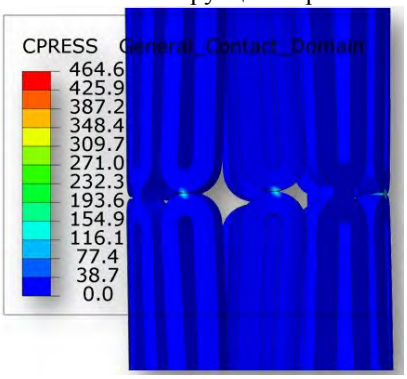


Рис. 5 – Контактирование ячеек центральной секции стента (точка В). Приведена цветовая палитра контактных напряжений, МРа

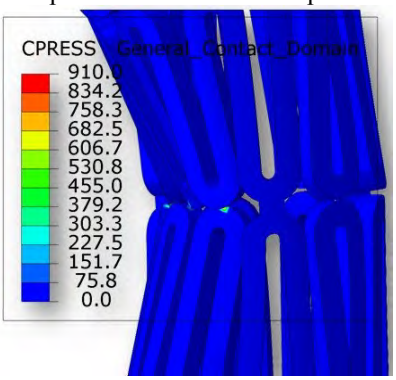
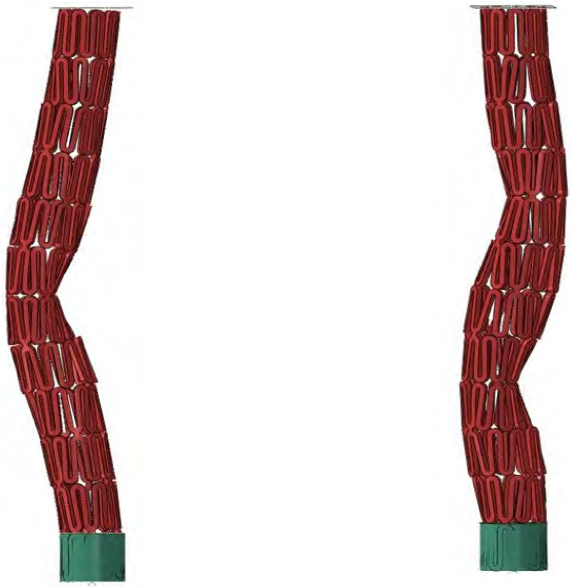


Рис. 6 – Выход ячеек стента из контакта (точка С). Приведена цветовая палитра контактных напряжений, МРа

На рисунке 7 приведено сравнение форм потери устойчивости стента, полученных в рамках численного анализа с использованием различных коэффициентов трения. Стоит отметить, что при увеличении коэффициента трения ($\mu = 0{,}25$) реализуется более высокоэнергетическая форма потери устойчивости с образованием двух полуволн.



Коэффициент трения: $\mu = 0{,}2$ Коэффициент трения: $\mu = 0{,}25$

Рис. 7 – Сравнение форм потери устойчивости стента

Список литературы

1. Smouse HB, Nikanorov A, LaFlash D. Biomechanical forces in the femoropopliteal arterial segment. What happens during extremity movement and what is the effect on stenting? Endovascular Today 2005; 4(6): 60-66.
2. Scheinert D, Scheinert S, Sax J. Prevalence and clinical impact of stent fractures after femoropopliteal stenting. Journal of the American College of Cardiology 2005; 45(2):312-315.
3. Duda SH, Wiskirchen J, Tepe G. Physical properties of endovascular stents: an experimental comparison. Journal of Vascular & Interventional Radiology 2000; 11(5):645-654.
4. Zahedmanesh H., Kelly D., Lally C. Simulation of a balloon expandable stent in a realistic coronary artery—Determination of the optimum modeling strategy. Journal of Biomechanics 43 (2010) 2126–2132.