

Остаточные напряжения в мягких тканях: краткий обзор

Саламатова В.Ю. (Сеченовский Университет)
salamatova@gmail.com

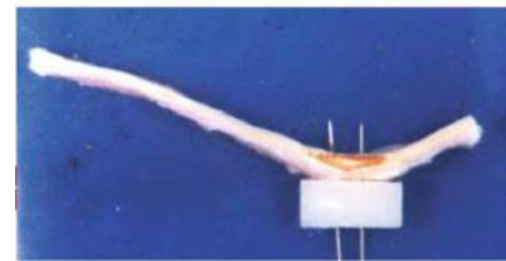
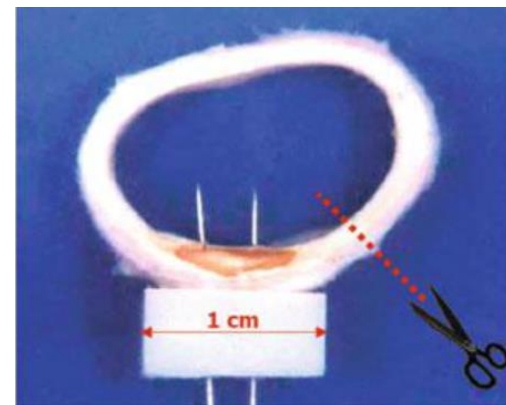
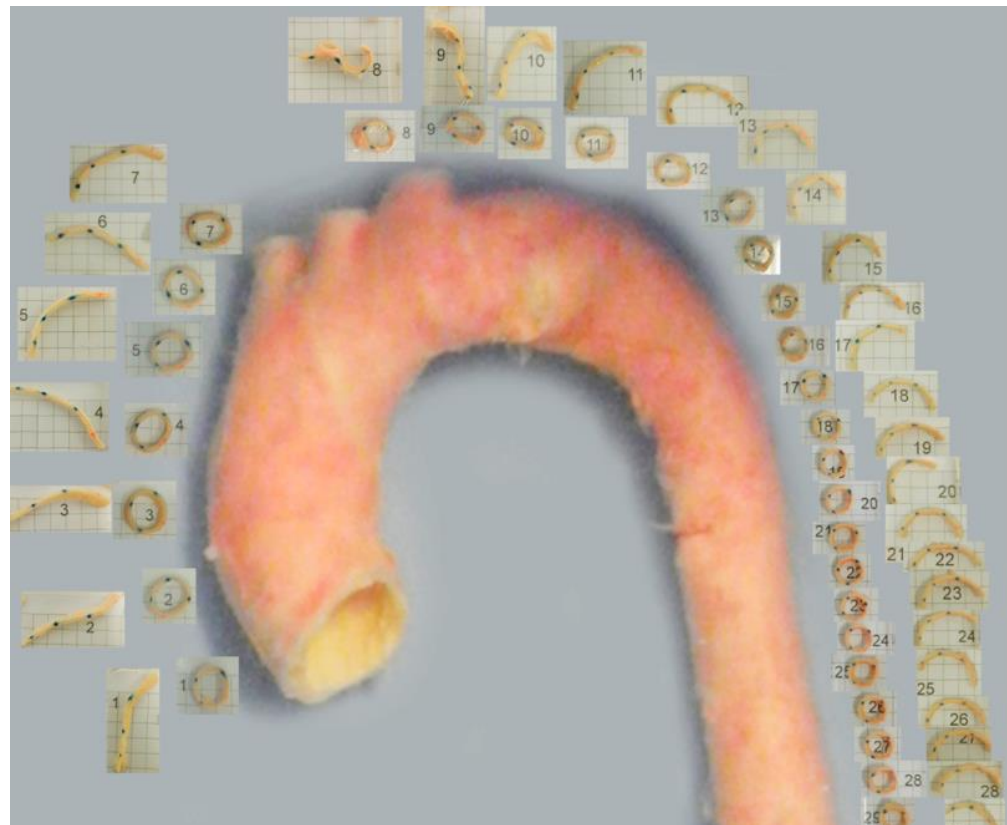


Остаточные напряжения: что это такое?

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}^{(res)} = \mathbf{0}, \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{B}_R,$$
$$\boldsymbol{\sigma}^{(res)} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{0} \text{ на } \partial \mathcal{B}_R.$$



Остаточные напряжения: оценка наличия



Основные направления исследований

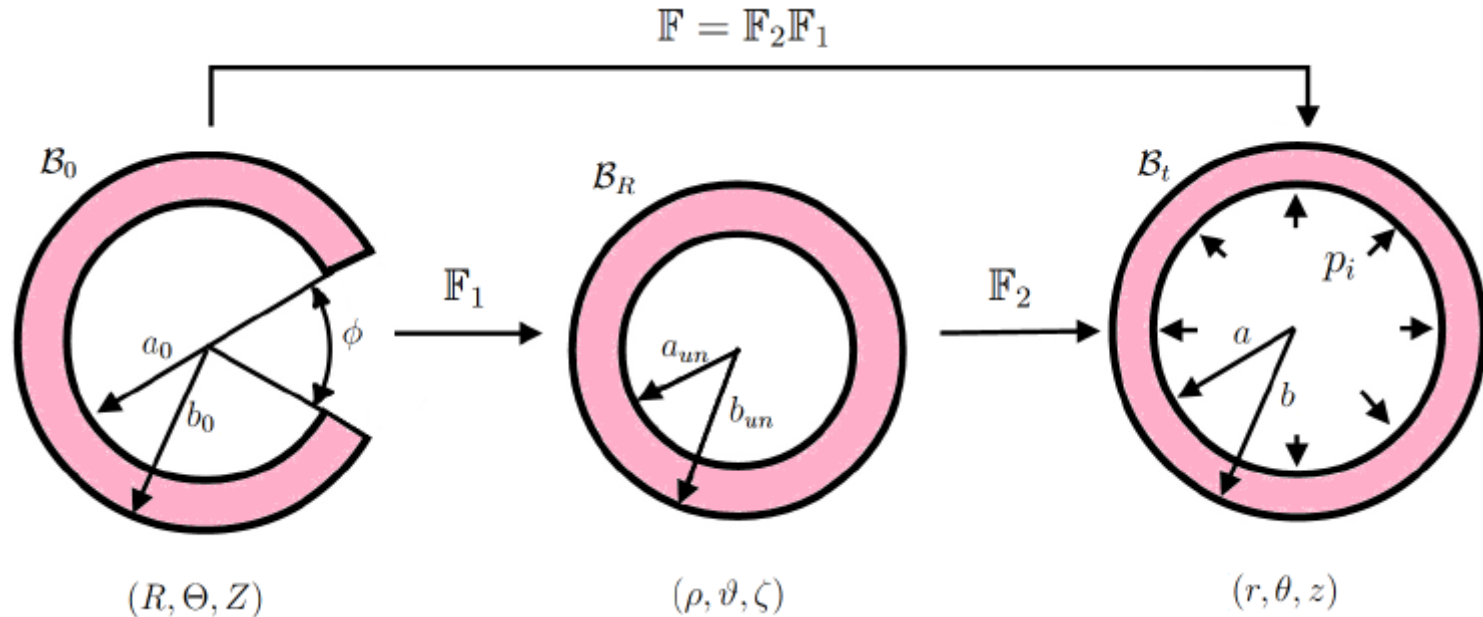
1. Биомеханическая роль
2. Методы измерения и количественной оценки
3. Построение определяющих соотношений
4. Влияние на рост, ремоделирование тканей

1. Биомеханическая роль

Остаточные напряжения считаются критически важными для снижения градиентов напряжений и поддержания физиологических функций, особенно в артериях и других тканях, несущих нагрузку.

- Fung, Y. C. (1991). What are the residual stresses doing in our blood vessels?. *Annals of biomedical engineering*, 19(3), 237-249.
- Ogden, R. W. (2003). Nonlinear elasticity, anisotropy, material stability and residual stresses in soft tissue. In *Biomechanics of soft tissue in cardiovascular systems* (pp. 65-108). Vienna: Springer Vienna.
- Sigaeva, T., Sommer, G., Holzapfel, G., & Di Martino, E. (2019). Anisotropic residual stresses in arteries. *Journal of the Royal Society Interface*, 16.
- Ciarletta, P., Destrade, M., & Gower, A. L. (2016). On residual stresses and homeostasis: an elastic theory of functional adaptation in living matter. *Scientific reports*, 6(1), 24390.

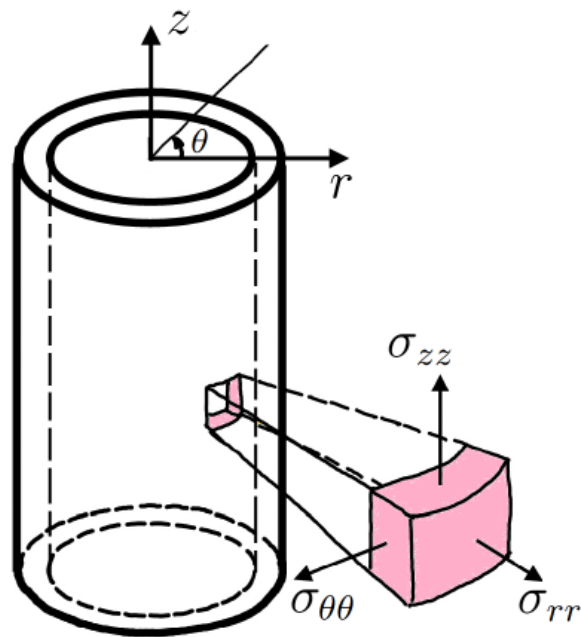
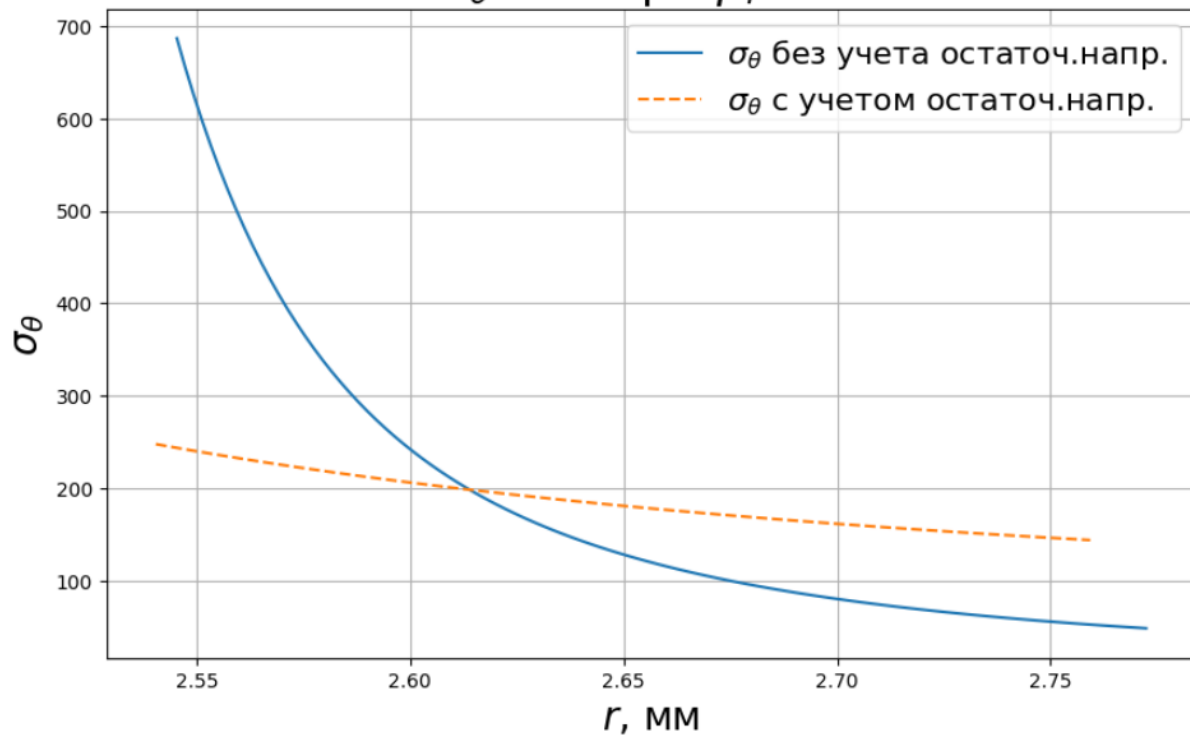
Снижение градиентов напряжений



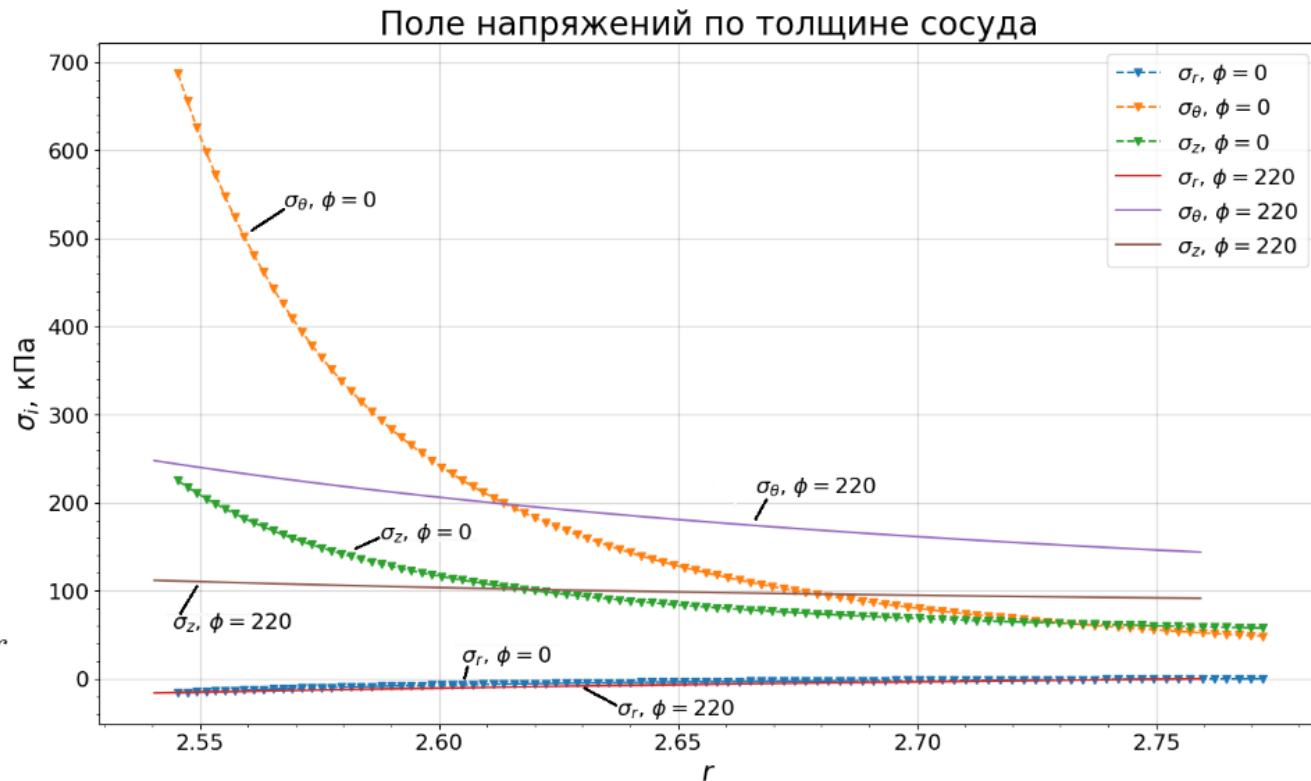
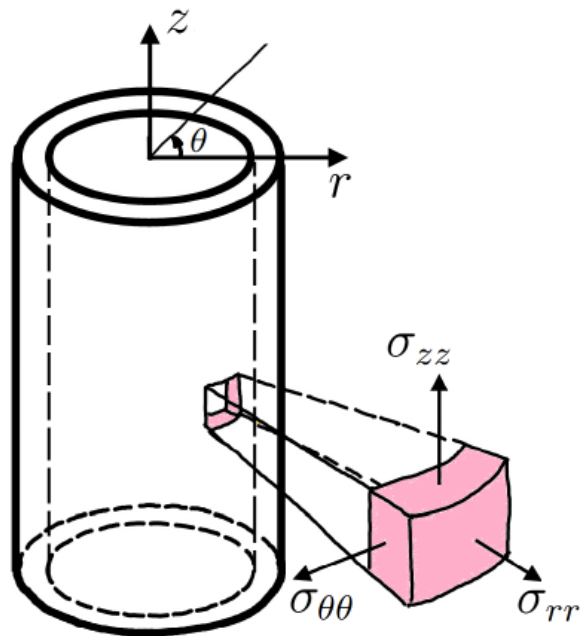
Fung, Y. C. (1991). What are the residual stresses doing in our blood vessels?. *Annals of biomedical engineering*, 19(3), 237-249.

Снижение градиентов напряжений

Зависимость σ_θ от r при $p_i = 16\text{кПа}$ и $\lambda = 1.69$



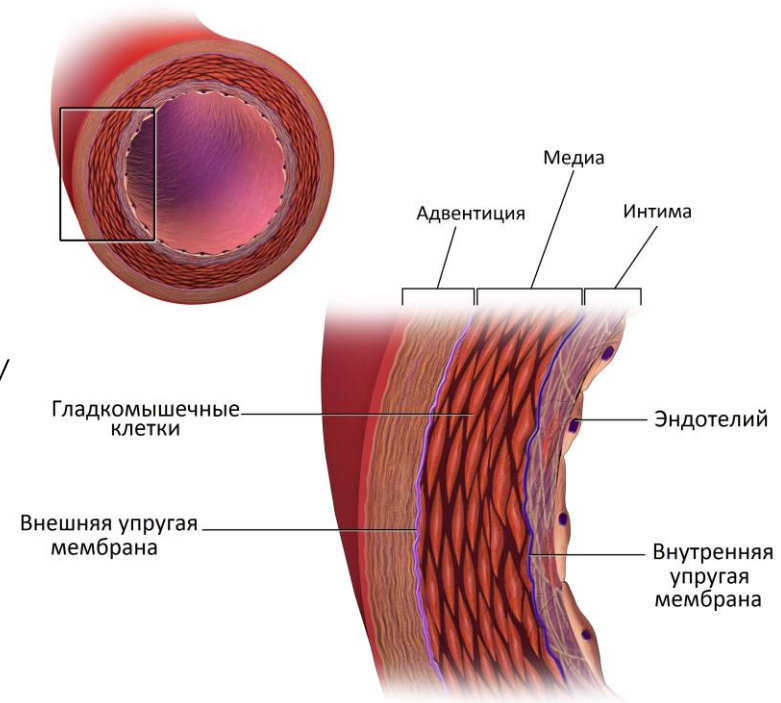
Снижение градиентов напряжений



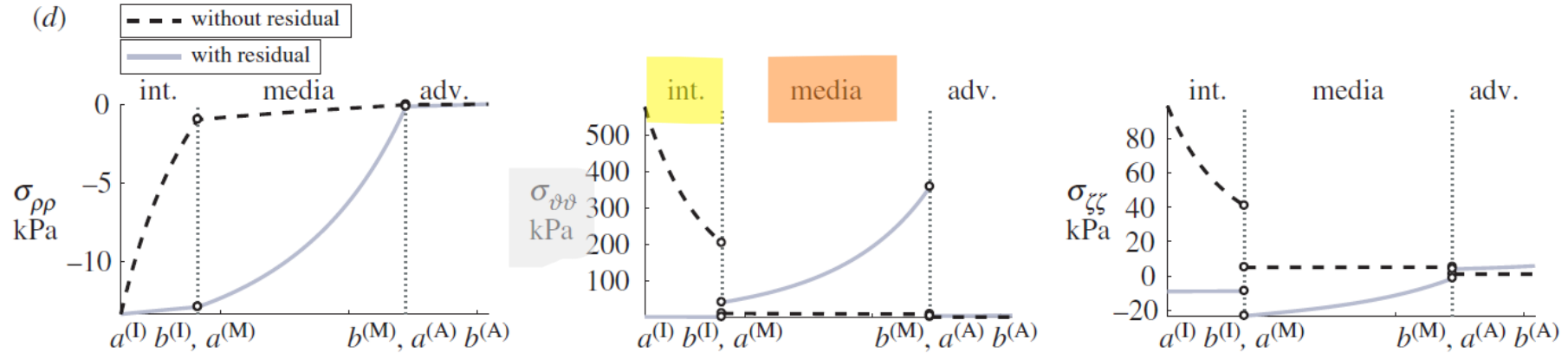
Остаточные напряжения: биомеханическая роль

- Равномерное распределение напряжений повышает эффективность артерии в выдерживании нагрузок.
- Согласованная работа гладкомышечных волокон: каждое волокно вносит почти одинаковый вклад в сократительную силу при регулировании кровотока
- Концепция гомеостатических напряжений

Остаточные напряжения необходимы для функционирования тканей и гомеостаза.



Аорта как слоистая структура

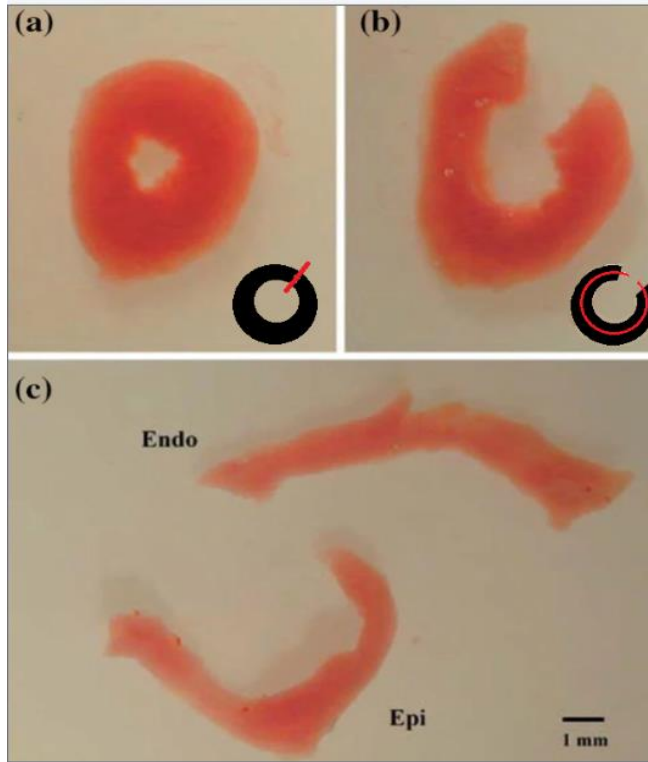


«it is not clear whether the transmural stresses became more uniform due to residual stresses or not».

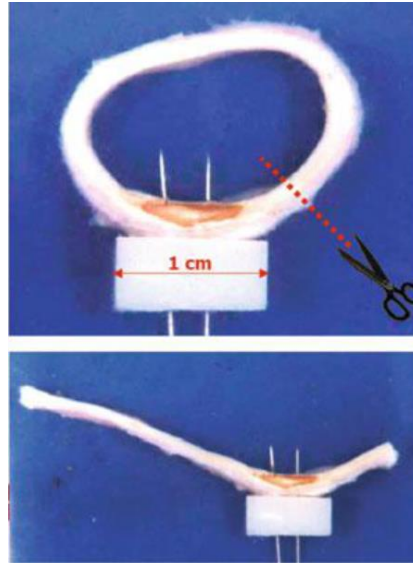
Sigaeva, T., Sommer, G., Holzapfel, G. A., Di Martino, E. S. (2019). Anisotropic residual stresses in arteries. *Journal of the Royal Society Interface*, 16(151), 20190029.

2. Методы измерения и количественной оценки

- Эксперимент с углом раскрытия



Nelson, D. (2012). Review of methods for determining residual stresses in biological materials. In *Experimental and Applied Mechanics, Volume 4: Proceedings of the 2012 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics* (pp. 173-182)



- Модели роста и ремоделирования для нахождения поля остаточных напряжений

3. Построение определяющих соотношений

- Старт с конфигурации свободной от нагрузок и напряжений, некой виртуальной конфигурации
 - Остаточные напряжения включены в определяющее соотношение
-
- o Ciarletta, P., Destrade, M., & Gower, A. L. (2016). On residual stresses and homeostasis: an elastic theory of functional adaptation in living matter. *Scientific reports*, 6(1), 24390
 - o Johnson, B. E., & Hoger, A. (1995). The use of a virtual configuration in formulating constitutive equations for residually stressed elastic materials. *Journal of elasticity*, 41(3), 177-215.

4. Влияние на рост, ремоделирование тканей

- Влияют на рост, устойчивость, морфогенез

- o Dong, H., Liu, M., Martin, C., & Sun, W. (2020). A residual stiffness-based model for the fatigue damage of biological soft tissues. *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 143, 104074.
- o Liu, C., Du, Y., Lü, C., & Chen, W. (2020). Growth and patterns of residually stressed core-shell soft sphere. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 127, 103594.
- o Huang, W., Li, B., & Feng, X. (2023). Mechanobiological tissue instability induced by stress-modulated growth. *Soft matter*

- Контроль начального остаточного напряжения для управления паттернов

- o Du, Y., et al. (2019). Prescribing patterns in growing tubular soft matter by initial residual stress. *Soft matter*, 15(42), 8468-8474.

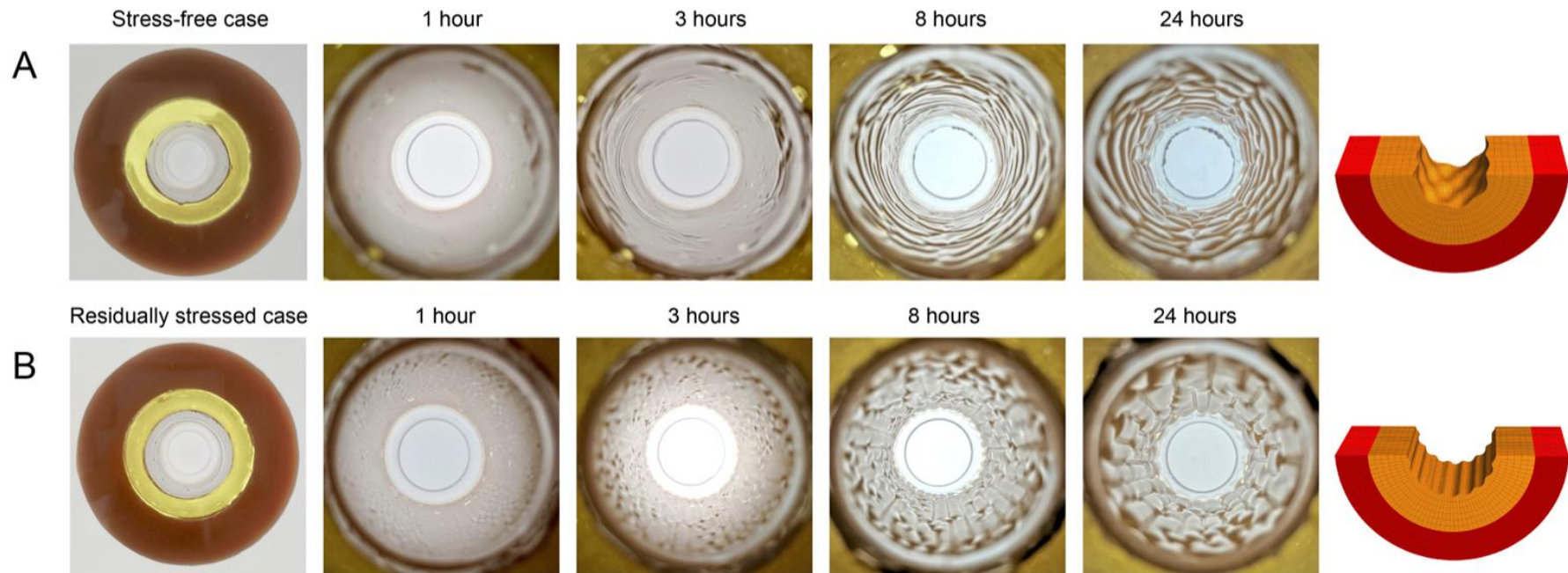


Fig. 3 Growth-induced buckling of bilayer tubes (inner layer: swelling hydrogel, outer layer: inert rubber) with (A) stress-free and (B) residually stressed initial states. By shrink-fitting, we created a non-zero initial residual stress in (B) (compressive hoop stress in the hydrogel, tensile hoop stress in the rubber). Otherwise, (A) and (B) have the same initial geometry and material parameters ($R_o/R_s \simeq 1.8$, $R_s/R_i = 1.5$, $\mu^{\text{inn}}/\mu^{\text{out}} \simeq 0.2$).

Спасибо за внимание