

УДК 531/534: [57+61]

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА

С.В. Шилько\*, В.Ф. Хиженок\*, А.В. Чарковский\*\*,  
И.М. Тхорева\*\*, Ю.П. Островский\*\*\*, И.Н. Стакан\*\*\*

\* Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Беларусь, 246050, Гомель, ул. Кирова, 32а, e-mail: shilko\_mpri@mail.ru

\*\* Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск, Московский проспект, 72

\*\*\* Республиканский научно-практический центр «Кардиология», Беларусь, Минск, ул. Р. Люксембург, 110

**Аннотация.** Экспериментально изучены деформационно-прочностные свойства поддерживающего устройства желудочков сердца до и после стерилизации. Показана перспективность имплантата на основе трикотажа сетчатой структуры. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании имплантатов сердца для хирургического лечения аневризм желудочков.

**Ключевые слова:** желудочки сердца, поддерживающие устройства, физическое моделирование, деформационные свойства, анизотропия, стерилизация.

### 1. Введение

В увеличении активного долголетия населения существенную роль играет восстановительная и пластическая хирургия, направленная на восстановление форм и функций отдельных органов. Так, ряд заболеваний приводит к прогрессирующей дилатации полостей сердца и хронической сердечной недостаточности. Для их лечения хирургическими методами предложены поддерживающие устройства желудочков сердца [1–4] в виде оболочки, размещаемой подобно корсету снаружи дилатирующего органа и препятствующей развитию аневризмы.

Для изготовления указанного средства протезирования целесообразно использовать эластичные материалы, модифицированные биосовместимым покрытием [4, 5]. После имплантации, благодаря развитой пространственной структуре, они способны прорасти биотканью с образованием выстилки, обеспечивающей совместимость с организмом.

Биомеханический анализ поддерживающих устройств желудочков сердца актуален потому, что эффективность данного имплантата во многом определяется деформационными свойствами. С одной стороны, устройство не должно препятствовать диастоле желудочков и травмировать биоткани, с другой – иметь жесткость при растяжении, достаточную для ограничения дилатации стенок желудочка. Кроме того, имплантат должен быть пористым для прорастания и вживления в послеоперационный период. Важно также исследовать влияние стерилизации на

деформационно-прочностные характеристики протезирующего материала. Эти вопросы являются предметом настоящей статьи.

## 2. Определение деформационно-прочностных характеристик материала поддерживающих устройств желудочков сердца до и после стерилизации

Можно заметить, что весьма ограниченный перечень гемосовместимых низкомолекулярных материалов имеет полимерную основу. Данные материалы, к числу которых относятся полиуретан, политетрафторэтилен, полиэтилентерефталат, полисилоксан, поливинилхлорид, полиакрилат, характеризуются упругой изотропией и диаграммой растяжения с «падающей» жесткостью (рис. 1).

Это не является оптимальным, исходя из протезирующей функции эластичных имплантатов, к которым следует отнести поддерживающие устройства желудочков сердца. Вместе с тем, требуемыми упругими свойствами обладают многие биоматериалы (например, стенки артерий), представляющие собой относительно жесткие (обычно коллагеновые) волокна, определенным образом ориентированные в низкомолекулярной соединительной ткани, пористость которой достаточна для метаболизма. Исходя из функциональной аналогии, поддерживающие устройства желудочков сердца следует формировать из ячеистого материала, обладающего упругой анизотропией и возрастающей жесткостью при растяжении. В связи с этим рассмотрим поддерживающее устройство в виде оболочки, форма которой близка к конической, изготовленное из трикотажа сетчатой структуры (рис. 2).

Деформационно-прочностные характеристики исходных материалов поддерживающих устройств желудочков сердца в виде тканей различной плотности определялись на машине для механических испытаний *INSTRON 5567* (Великобритания, 2002), обеспечивающей прецизионное определение усилий и перемещений при заданной скорости приложения нагрузки. Были исследованы два варианта трикотажных полотен: № 2 из нити полиэфирной комплексной линейной плотности 5,3 текс и нити полиэфирной текстурированной мультифиламентной линейной плотности 5,6 текс; № 4 из нити полиэфирной комплексной (гладкой) линейной плотности 5,3 текс\*. Испытывались образцы в виде полосок 20 x 200 мм толщиной 0,45 мм (№ 2) и 0,3 мм (№ 4), соответственно. Среднее значение показателя определялось по пяти испытаниям.

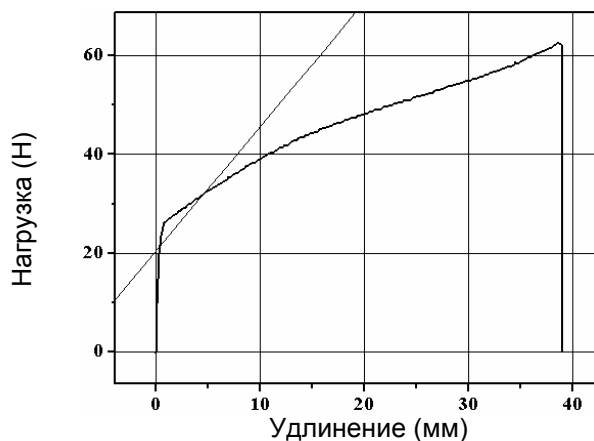


Рис. 1. Типичная зависимость «усилие–перемещение» при растяжении образца из материала Фторопласт-4

\* 1 текс равен массе 1000 м нити в граммах.



Рис. 2. Имплантация поддерживающего устройства из трикотажа сетчатой структуры

Таблица 1

**Значения нагрузки  $P_p$  и деформации  $\varepsilon_p$  при разрыве в продольном и поперечном направлениях после стерилизации протезирующих материалов**

Способ обработки	Параметр	№ варианта полотна и направление растяжения			
		2		4	
		продольное	поперечное	продольное	поперечное
Спирто-эфирной смесью	$P_p$ , Н	50,24	55,78	46,73	74,68
	$\varepsilon_p$ , %	111,89	113,36	115,7	74,67
Радиационный	$P_p$ , Н	42,39	52,19	50,62	76,72
	$\varepsilon_p$ , %	102,25	106,84	119,66	74,92
Этилен-оксидный	$P_p$ , Н	48,40	55,97	43,00	80,85
	$\varepsilon_p$ , %	112,71	104,55	108,47	72,61
Автоклавирование	$P_p$ , Н	51,00	67,89	56,07	71,25
	$\varepsilon_p$ , %	121,32	123,95	125,49	98,27

Для количественной оценки анизотропии проводились испытания образцов, вырезанных в продольном и поперечном направлениях из лоскутов тканей различной плотности (варианты В1, В2).

Обработка образцов протезирующих тканей и поддерживающих устройств проводилась спирто-эфирной смесью, автоклавированием (паром), радиационным и этилен-оксидным способами.

Проведенные испытания позволили оценить изменения деформационно-прочностных характеристик материалов поддерживающих устройств желудочков сердца после стерилизации (табл. 1, рис. 3).

В целом, стерилизация любым из предложенных способов не приводит к существенному изменению механических характеристик.

Наименее устойчивым к обработке радиационным способом является трикотаж варианта № 2, прочность которого в продольном направлении снижается на 16 %, а в поперечном – на 6 %. Вместе с тем, этот вариант трикотажного материала выдерживает значительную нагрузку в продольном и поперечном направлениях после стерилизации автоклавированием.

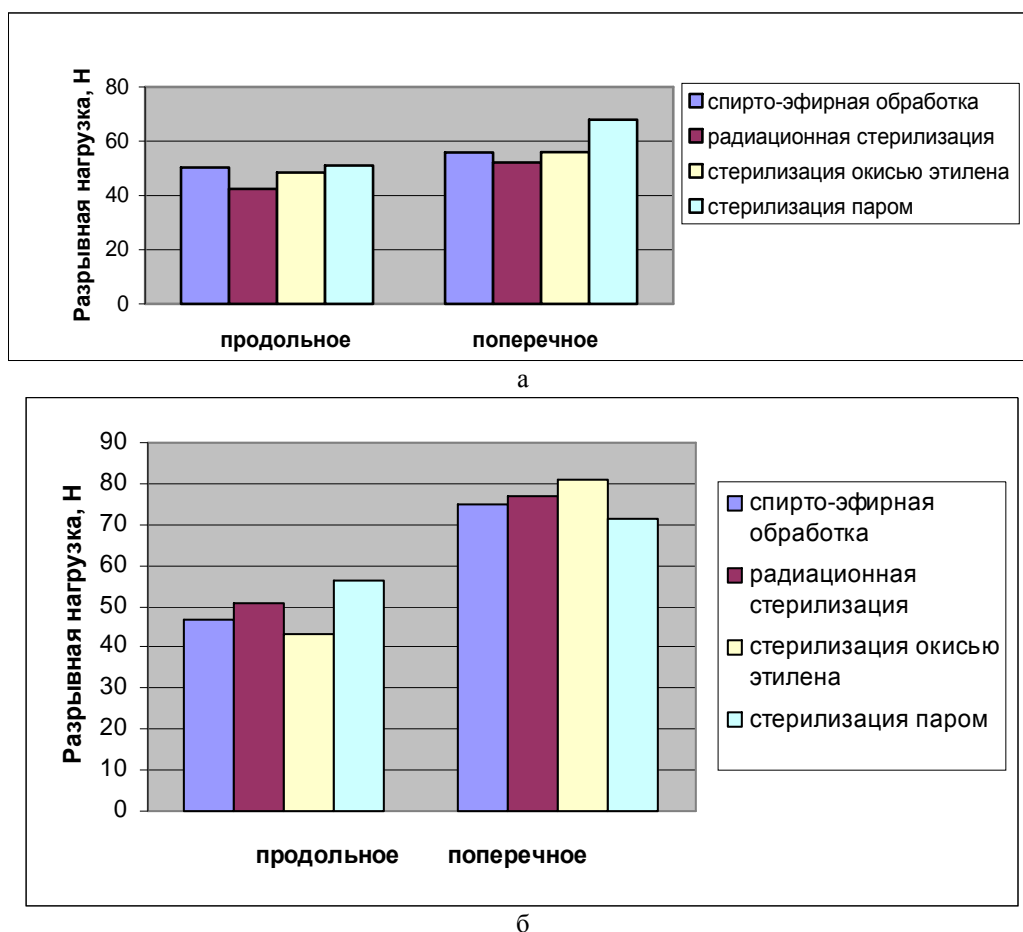


Рис. 3. Сопоставление разрывной нагрузки при различных способах стерилизации

Прочность трикотажного полотна варианта № 4 в поперечном направлении примерно в два раза выше прочности в продольном направлении при любом способе стерилизации. Наименее устойчив вариант № 4 к воздействию газовой стерилизации этилен-оксидом в продольном направлении (потеря прочности составляет 8%). Однако в поперечном направлении прочность остается достаточно высокой (рис. 1б).

После стерилизации трикотажного материала варианта № 4 автоклавным способом потеря прочности в поперечном направлении составляет 5 %.

Наилучшие показатели прочности имеет вариант № 4 после стерилизации радиационным способом. Таким образом, при стерилизации поддерживающих устройств желудочков сердца, изготовленных из трикотажного материала варианта № 2, можно рекомендовать автоклавирование, а в случае поддерживающего устройства желудочков сердца из трикотажного материала варианта № 4 – радиационный способ.

### 3. Деформационно-прочностные характеристики поддерживающих устройств желудочков сердца

Биомеханическое исследование готовых изделий заключалось в проведении статических испытаний поддерживающих устройств желудочков сердца на имитаторе левого желудочка в виде эластичной резиновой оболочки. В качестве нагружающего и силоизмерительного устройства применяли стенд *INSTRON 5567*.

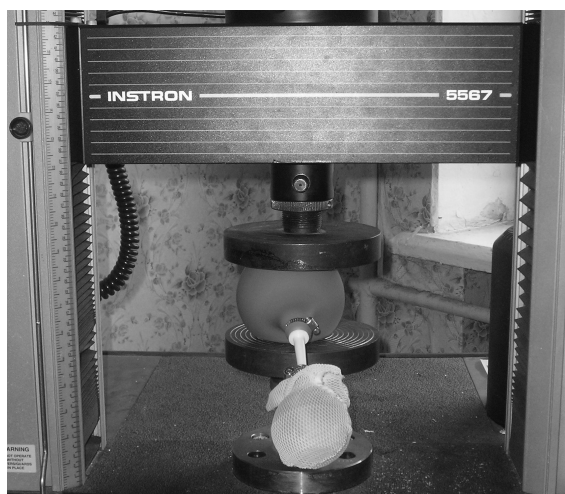


Рис. 4. Нагружение поддерживающего устройства желудочков сердца при помощи имитатора желудочков сердца

Таблица 2

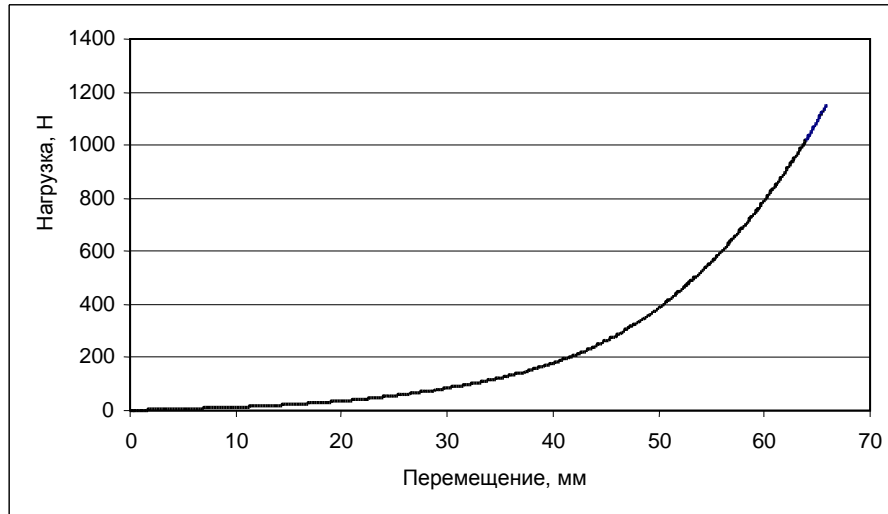
**Характеристики деформирования и разрушения различных вариантов поддерживающих устройств желудочков сердца**

№ образца	Описание образца	Диаметр имитатора $D$ , мм			Состояние поддерживающего устройства желудочков сердца
		Исходное состояние	Под нагрузкой	Под нагрузкой с поддерживающим устройством желудочков сердца	
B2	1–5 С текстурированной нитью	63	74	74	Разрушение вблизи шва при $D = 90,0$ мм
B1	6 7 8 Нити без текстуры	63	74	71	Разрушение вблизи шва при $D = 80,0$ мм
				71	
				72	

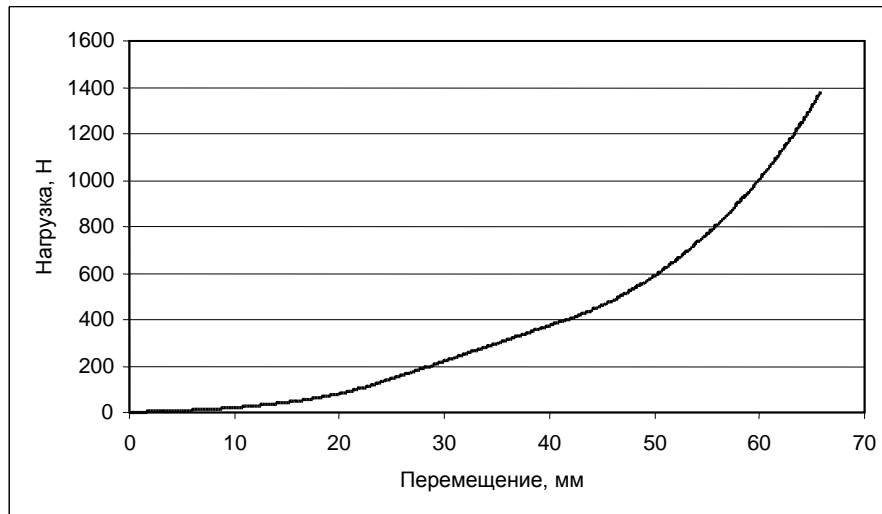
Поддерживающее устройство желудочков сердца из указанных тканей закреплялось нитью Пролен 4-0 на имитаторах левого желудочка двух конфигураций (диаметром  $D_n = 63$  и  $74$  мм) и производилось их растяжение посредством нагнетателя – второй эластичной резиновой оболочки, размещенной между опорными плитами стенда и гидравлически соединенной с имитатором (рис. 4).

Экспериментальная оценка прочности поддерживающего устройства желудочков сердца после стерилизации проводилась путем определения величины разрушающей нагрузки и удлинения при разрыве на имитаторе диаметром  $63$  мм с использованием варианта материала № 4 (полиэфирная комплексная нить с линейной плотностью  $5,3$  текс) (табл. 2, рис. 5). За контрольную группу приняты образцы, прошедшие только процесс горячего экстрагирования органическими растворителями. Среднее значение показателей прочности определялось по пяти испытаниям.

Можно заметить, что поддерживающий эффект оболочки из текстурированной нити незначителен, в отличие от поддерживающего устройства желудочков сердца из нетекстурированной нити, оказывающего определенное влияние на деформирование имитатора желудочка.



а



б

Рис. 5. Диаграмма деформирования имитатора до (а) и после (б) закрепления поддерживающего устройства желудочков сердца

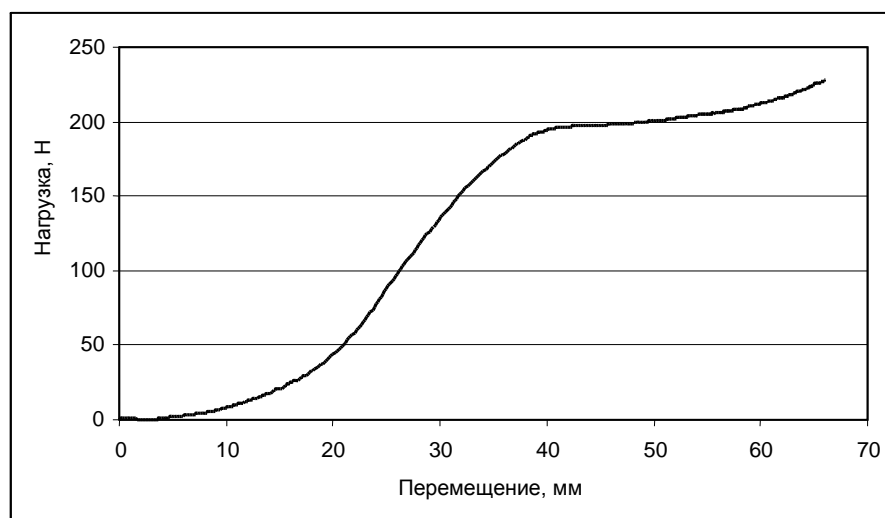


Рис. 6. Диаграмма деформирования поддерживающего устройства

Характеристика деформирования собственно поддерживающего устройства желудочков сердца из нетекстурированной нити получается из указанных диаграмм путем вычитания (рис. 6).

Видно, что деформирование поддерживающего устройства для данного варианта характеризуется плавным возрастанием жесткости, что позволяет выполнить параметрическую оптимизацию данного имплантата.

### Заключение

Разработана методика физического моделирования для экспериментальной оценки деформационно-прочностных свойств характеристик поддерживающего устройства желудочков сердца. Показана перспективность имплантата на основе трикотажа сетчатой структуры, реализующего упругую анизотропию и возрастающую жесткость при растяжении в упругой стадии деформирования. Проведенные испытания показали достаточную статическую прочность и требуемую эластичность поддерживающего устройства из ткани на основе полиэфирной комплексной нити. Установлено, что материал имплантата сохраняет достаточный уровень прочности после стерилизации известными способами.

### Список литературы

1. *Buckberg, G.D.* The structure and function of the helical heart and its buttress wrapping. vi. geometric concepts of heart failure and use for structural correction / G.D. Buckberg, H.C. Coghlan, and F. Torrent-Guasp // *Seminars in Thoracic and Cardiovascular Surgery*. – 2001. – Vol. 13, № 4. – P. 386–401.
2. *Chaudhry, P.A.* Passive ventricular constraint with the acorn prosthetic jacket prevents progressive left ventricular remodeling and functional mitral regurgitation in dogs with moderate heart failure / P.A. Chaudhry, G. Paone, V.G. Sharov, et al. // *AATS 79<sup>th</sup> Annual Meeting Program*. – 1999. – P. 66.
3. *Oh, J.H.* The effects of prosthetic cardiac binding and adynamic cardiomyoplasty in a model of dilated cardiomyopathy / J.H. Oh, V. Badhwar, B.D. Mott, et al // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* – 1998. – № 116. – P. 148–153.
4. *Чарковский, А.В.* Разработка и исследование свойств трикотажа медицинского назначения. / А.В. Чарковский // *Матер. междунар. науч.-тех. конф. «Ресурсо- и энергосб. технологии пром. производства»*. – Ч. I. – Витебск, 2003. – С. 224–230.
5. *Shilko, S.V.* Biomechanical properties of surgical threads covered with functional coatings / S.V. Shilko, P.N. Grakovich, V.F. Khizhenok, S.V. Parkalov // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2003. – Vol. 7, № 2. – P. 53–58.
6. *Ostrovsky, Y.* Preliminary results of researches of physicomachanical and biological properties of the Belorussian cardiac support device / Y. Ostrovsky, S. Shilko, I. Stakan, et al // *Cardiology Update 2006*. – Albena, Bulgaria, 2006. – Sept. 21–24. – P. 32–33.

## DETERMINATION OF STRAIN-STRENGTH PROPERTIES OF A SUPPORT DEVICE FOR HEART VENTRICLES

**S.V. Shilko, V.F. Khizhenok, A.V. Charkovsky, I.M. Thoreva, Yu.P. Ostrovsky,  
I.N. Stakan (Gomel, Vitebsk; Belarus)**

Strain-strength characteristics of the support device used for the heart ventricles have been studied experimentally prior to and after sterilization. A great potential of the stockinet-

based implant with a netted structure has been verified. The results obtained can be employed in elaboration of the heart implants for surgical cure of ventricle aneurysms.

**Key words:** heart ventricles, support device, physical simulation, deformation properties, anisotropy, sterilization.

*Получено 2 октября 2006 года*