

УДК 616-001.68

С. В. Сиваконь, А. Н. Митрошин, А. И. Кислов, А. К. Абдуллаев,  
С. В. Сретенский, А. А. Голядькина, О. А. Щукина, А. С. Сиваконь

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КСЕНОПЕРИКАРДА И СУХОЖИЛИЙ ЧЕЛОВЕКА

*Аннотация.* Проведено исследование механической прочности трупных сухожилий сгибателей пальцев кисти и ксеноперикарда на разрывных машинах INSTRON- 3342 и INSTRON-5944 BIO PULS с целью выяснения возможности использования ксеноперикарда для пластики сухожилий. Изучались разрывная нагрузка, предел прочности, растяжимость, модуль упругости Юнга. Образцы ксеноперикарда показали намного большую прочность и жесткость, чем образцы сухожилий. Разрывная нагрузка образцов оказалась больше в 5 раз, предел прочности – в 7,5 раз, растяжимость – в 1,3 раза, модуль упругости Юнга – в 3 раза. При сравнении нагрузок, возникающих при прорезывании шовным материалом, образцы ксеноперикарда также оказались намного прочнее. Разрывная нагрузка больше в 4 раза, предел прочности в 4,5 раза, растяжимость – в 1,3 раза, модуль упругости Юнга – более чем в 3 раза.

*Ключевые слова:* механические свойства сухожилий, модуль Юнга.

*Abstract.* The authors have studied the mechanical strength of cadaveric flexor tendons of fingers and xenopericardium on discontinuous machines INSTRON-3342 and INSTRON-5944 BIO PULS to ascertain the possibility of using xenopericardium for plastic tendons. The researchers investigated the tensile strength, ultimate strength, elongation, Young's modulus of elasticity. The samples of xenopericardium showed much greater strength and stiffness than the tendon specimens. Breaking strength of samples was 5 times greater, the tensile strength - 7.5 times, the elongation - 1.3 times, Young's modulus – 3 times. During the comparison of loads arising from the eruption suture, the samples of xenopericardium also proved to be much stronger. Breaking load was 4 times greater, the tensile strength - 4.5 times, the elongation - 1.3 times, Young's modulus of elasticity - more than 3 times.

*Key words:* mechanical properties of tendons, the Young's modulus.

### Введение

Лечение больных с дефектами сухожильно-связочных структур опорно-двигательного аппарата продолжает оставаться одной из актуальных проблем современной хирургии. Наряду с аутотрансплантатами из собственных тканей пациента широкое применение находят трансплантаты из чужеродного материала, которые в свою очередь представлены трансплантатами из синтетических материалов и из биоматериалов [1, 2].

Пластика сухожильно-связочных структур синтетическими полимерными материалами нашла широкое распространение в самых разных направлениях хирургии [3, 4]. Однако эти материалы не лишены негативных свойств. Во-первых, при биоинтеграции они не рассасываются, а, вызывая перифокальное хроническое воспаление, покрываются рубцовой соединительнотканной капсулой. При этом механические свойства сформированного рубцового регенерата не всегда соответствуют функциональным нагрузкам на эту область. Во-вторых, синтетические материалы имеют определенный запас прочности и при отсутствии биоинтеграции и прорастания соединительной тканью рано или поздно происходит механический разрыв трансплантата.

В последние годы появились пластические материалы биологического происхождения, в основе которых находится естественный белок соединительной ткани – коллаген. В частности, материал из перикарда крупного рогатого скота, обработанный глутаровым альдегидом (ксеноперикард), нашел широкое применение в сосудистой хирургии для пластики дефектов сосудистой стенки [5]. Экспериментальные исследования биоинтеграции этого материала, имплантированного в сухожилие, показали, что он полностью рассасывается к концу первого года после операции, замещаясь сухожилеподобной рубцовой тканью [6].

### **Материал и методы исследования**

С целью выяснения возможности использования ксеноперикарда для пластики сухожилий был проведен эксперимент по исследованию сравнительной механической прочности человеческого сухожилия и ксеноперикарда.

Материал для исследования забирался у трупов с давностью смерти не более 24 ч. В исследование включены сухожилия глубоких сгибателей, полученные от трупов разного пола и разных возрастных групп.

Трупный материал стандартизировался по длине и диаметру поперечного сечения. В исследование включены сухожилия с поперечным диаметром 4...5 мм. Длина исследуемой части образцов составила 6...7 см. Всего в исследование включено 40 образцов от 10 трупов.

Исследуемые образцы ксеноперикарда представляли собой пластины толщиной 0,5...0,6 мм. Для репрезентативности высчитывали площадь поперечного сечения сухожилий по формуле  $S = p \cdot r^2$  (где  $p = 3,14$ ;  $r$  – радиус поперечного сечения сухожилия), которая составила 12,5...19,6 мм<sup>2</sup>, в среднем 16 мм<sup>2</sup>. Необходимую ширину образца ксеноперикарда рассчитывали по формуле  $B = s / a$  (где  $s$  – площадь поперечного сечения;  $a$  – толщина образца), она составила 25...30 мм. Пластины ксеноперикарда сворачивали в рулоны (40 образцов) с длиной исследуемой части 6...7 см.

Исследование проводили на разрывных машинах INSTRON- 3342 и INSTRON-5944 BIO PULS с заданной постоянной скоростью 50 мм/мин (рис. 1). Статистическая обработка данных выполнялась автоматически с помощью встроенного пакета прикладных компьютерных программ BLUEHILL-3 INSTRON.

Определение механических свойств образцов проходило следующим образом. Противоположные концы образца помещали между зажимами испытательной машины, затем определяли геометрию образца, снимали размеры (длину, ширину, толщину или радиус) и задавали скорость перемещения траверсы. После запуска испытания траверса с верхним зажимом перемещалась с заданной скоростью, растягивая образец. На экране монитора машины отображался график полициклических нагрузок – кривая «нагрузка – растяжение». По окончании всей серии испытаний машина высчитывала окончательный график средних значений «нагрузки – растяжения» и средние значения измеряемых параметров (разрывная нагрузка, предел прочности, растяжимость и модуль Юнга).

### **Результаты исследования**

При выполнении исследования нас прежде всего интересовали **прочность** – способность материала противостоять действию внешних нагрузок,

не разрушаясь. Она характеризуется величиной разрывной нагрузки и пределом прочности.



Рис. 1. Разрывные машины INSTRON- 3342 (слева) и INSTRON-5944 BIO PULS (справа)

**Разрывная нагрузка** – наибольшее усилие до разрыва, выдерживаемое образцом. Она характеризует способность материала как целостного образования воспринимать действие внешних сил, не разрушаясь, выражается в Н (ньютонках). **Предел прочности** – напряжение, приходящееся на квадратный миллиметр поперечного сечения образца, при действии на его разрывной нагрузки, выражается в МПа (мегапаскалях). **Растяжимость** – это способность материала удлиняться вплоть до разрыва при действии растягивающей нагрузки. Растяжимость показывает, на какую часть первоначальной длины может быть растянут образец, выражается в процентах (%) и не зависит от первоначальной длины образца. **Упругость** – это свойство материала восстанавливать свою форму, объем и размеры после прекращения действия внешних сил, которая характеризуется эластичностью и жесткостью. **Эластичность** – это способность материала испытывать значительные упругие деформации при небольших усилиях. Способность сопротивляться образованию деформации называется **жесткостью**. Эластичность и жесткость материала численно выражаются через модуль упругости первого рода – модуль Юнга. Чем модуль Юнга больше, тем материал жестче, чем меньше – тем эластичнее. Выражается в МПа (мегапаскалях).

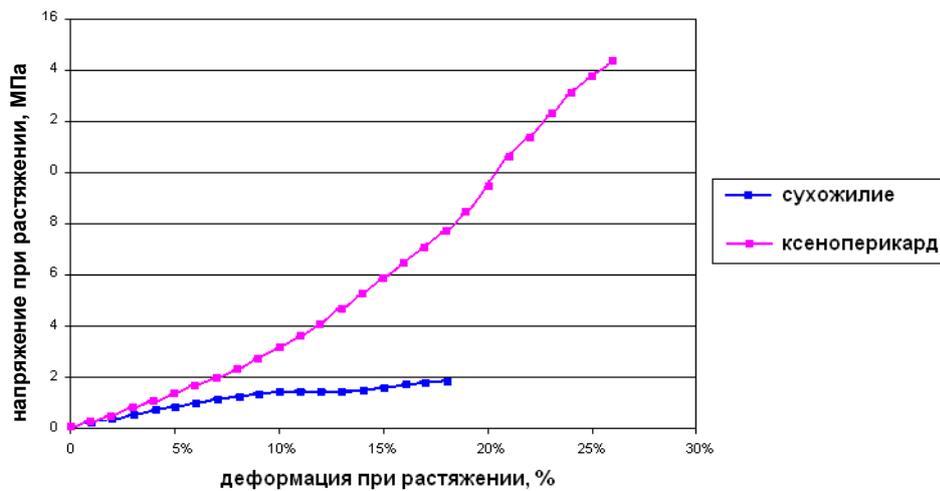
Проведено две серии экспериментов в каждой по 20 образцов сухожилий и ксеноперикарда. В первой серии сравнивались механические свойства сухожилия и ксеноперикарда. Во второй серии образцы сухожилий и ксеноперикарда прошивались в поперечном направлении нитью (с прочностью заведомо большей, чем у образцов) и растяжение осуществлялось за нити, с целью выяснения нагрузок прорезывания шовным материалом. В результате были получены следующие данные (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Сравнительные данные механических свойств сухожилия и ксеноперикарда

	длина, мм	диаметр, мм	разрывная нагрузка, Н	предел прочности, МПа	растяжимость, %	модуль Юнга, МПа
<b>Первая серия испытаний</b>						
Сухожилие	66,5	4,5	31,07	1,87	18	21,08
Ксеноперикард	67	4,4	155,33	14,37	24	69,95
<b>Вторая серия испытаний (прорезывание)</b>						
Сухожилие	65	4	25,14	0,57	22	4,45
Ксеноперикард	65	4	125,69	2,62	29	14,52

**Первая серия экспериментов**



**Вторая серия экспериментов**

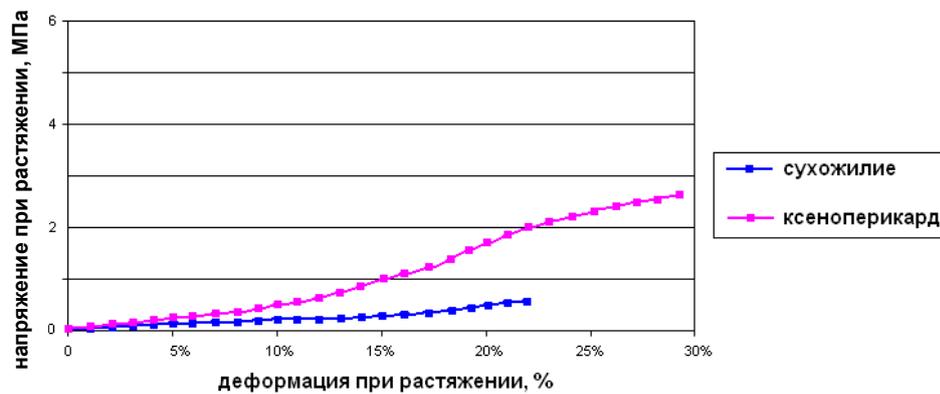


Рис. 2. Графики средних значений «нагрузки – растяжения» первой и второй серий испытаний

Как видно из данных табл. 1 и рис. 2, образцы ксеноперикарда показали намного большую прочность и жесткость, чем образцы сухожилий. Так,

в первой серии экспериментов при выяснении механических свойств образцов разрывная нагрузка оказалась больше в 5 раз, предел прочности – в 7,5 раза, растяжимость – в 1,3 раза, модуль упругости Юнга – более чем в 3 раза.

Сравнительно большая прочность и жесткость ксеноперикарда может быть объяснена особенностями его химической обработки глутаровым альдегидом. При обработке образуются поперечные «сшивки» между волокнами коллагена, повышающие устойчивость ткани к биодegradации под воздействием протеолитических ферментов организма реципиента. Эти же «сшивки» повышают и механическую прочность.

При сравнении нагрузок, возникающих при прорезывании шовным материалом, образцы ксеноперикарда также оказались намного прочнее. Разрывная нагрузка больше в 5 раз, предел прочности – в 4,5 раза, растяжимость – в 1,3 раза, модуль упругости Юнга – более чем в 3 раза.

Обнаружено, что при прорезывании шовным материалом растяжимость образцов увеличивается. При этом предел прочности у сухожилий уменьшается в 3,2 раза по сравнению с исходным, а у ксеноперикарда – в 5,4 раза.

Это явление может быть объяснено различием структуры расположения коллагеновых волокон в сухожилии и ксеноперикарде. Так, в сухожилии волокна коллагена ориентированы продольно оси возникающих нагрузок, что обеспечивает его прочность на продольный разрыв. В ксеноперикарде, являющемся грубой неоформленной соединительной тканью, волокна коллагена расположены хаотично, и поэтому он легче разрушается при нагрузке на лигатуры.

### Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Ксеноперикард обладает в 5 раз большей механической прочностью по сравнению с сухожилиями.

2. При прорезывании шовным материалом предел прочности у сухожилий уменьшается в 3,2 раза по сравнению с исходным, а у ксеноперикарда – в 5,4 раза.

3. Для полноценного (с точки зрения прочности) замещения дефекта сухожилия можно использовать трансплантаты из ксеноперикарда с меньшим поперечным сечением, что особенно важно в случае пластики на протяжении косно-фиброзных каналов и синовиальных оболочек.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования ксеноперикарда в качестве пластического материала при устранении дефектов сухожилий и связок.

### Список литературы

1. **Лаврищева, Г. И.** Морфологические и клинические аспекты репаративной регенерации опорных органов и тканей / Г. И. Лаврищева, Г. А. Оноприенко. – М. : Медицина, 1996. – С. 49–57, 176–181.
2. **Казарезов, М. В.** Восстановительная хирургия повреждений опорно-двигательного аппарата / М. В. Казарезов, А. М. Королева, В. А. Головнев и др. – М. ; Новосибирск : НГМА, 2004. – С. 56–63.
3. **Edwards, S. L.** Design of nonwoven scaffold structures for tissue engineering of the anterior cruciate ligament / S. L. Edwards // *Autex Research J.* – 2004. – № 4. – P. 2.

4. **Vacanti, J.** Tissue engineering in orthopedic surgery / J. Vacanti // Orthopedic Clinics of North America. – 2000. – № 31. – P. 351–356.
5. **Чернявский, А. М.** Ближайшие результаты пластики сонных артерий заплатой из ксеноперикарда, обработанного диэпоксисоединениями при каротидной эндартерэктомии / А. М. Чернявский // Бюллетень НИЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. – 2002. – Т. 3, № 11. – С. 162.
6. **Митрошин, А. Н.** Исследование биоинтеграции ксеноперикарда при пластике дефектов сухожильно-связочных структур / А. Н. Митрошин, С. В. Сиваконь, С. А. Мозеров и др. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 35–42.

---

***Сиваконь Станислав Владимирович***

доктор медицинских наук, доцент,  
заведующий кафедрой травматологии,  
ортопедии и военно-экстремальной  
медицины, Медицинский институт,  
Пензенский государственный  
университет

E-mail: sivakon@mail.ru

***Sivakon Stanislav Vladimirovich***

Doctor of medical sciences, associate  
professor, head of sub-department  
of traumatology, orthopedics and extreme  
military medicine, Medical Institute,  
Penza State University

***Митрошин Александр Николаевич***

доктор медицинских наук, профессор,  
заведующий кафедрой хирургии,  
Медицинский институт, Пензенский  
государственный университет

E-mail: an-mitroshin@mail.ru

***Mitroshin Alexander Nikolaevich***

Doctor of medical sciences, professor,  
head of sub-department of surgery,  
Medical Institute, Penza State University

***Кислов Александр Иванович***

доктор медицинских наук, профессор,  
ректор, Пензенский институт  
усовершенствования врачей

E-mail: giuv@sura.ru

***Kislov Alexander Ivanovich***

Doctor of medical sciences, professor,  
rector of the Penza Institute  
of Advanced Medical Studies

***Абдуллаев Арслан Кудратович***

старший преподаватель, кафедра  
травматологии, ортопедии  
и военно-экстремальной медицины,  
Медицинский институт, Пензенский  
государственный университет

E-mail: dr\_aslan@mail.ru

***Abdullaev Arslan Kudratovich***

Senior lecturer, sub-department  
of traumatology, orthopedics  
and extreme military medicine,  
Medical Institute, Penza State University

***Сретенский Сергей Владимирович***

аспирант, Пензенский  
государственный университет

E-mail: ssv\_84@mail.ru

***Sretensky Sergey Vladimirovich***

Postgraduate student,  
Penza State University

**Голядькина Анастасия Александровна**  
начальник отдела биомеханики,  
Образовательно-научный институт  
наноструктур и биосистем, Саратовский  
государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского

E-mail: GramakovaAA@info.sgu.ru

**Golyadkina Anastasiya Alexandrovna**  
Head of department of biomechanics,  
Academic and Research Institute  
of Nanostructures and biosystems,  
Saratov State University  
named after N. G. Chernyshevsky

**Щукина Ольга Александровна**  
инженер, отдел биомеханики,  
Образовательно-научный институт  
наноструктур и биосистем, Саратовский  
государственный университет  
имени Н. Г. Чернышевского

E-mail: Biometsgu@mail.ru

**Shchukina Olga Alexandrovna**  
Engineer, department of biomechanics,  
Academic and Research Institute  
of Nanostructures and biosystems,  
Saratov State University  
named after N. G. Chernyshevsky

**Сиваконь Артем Станиславович**  
студент, Медицинский институт,  
Пензенский государственный  
университет

E-mail: sivakon@mail.ru

**Sivakon Artyom Stanislavovich**  
Student, Medical Institute,  
Penza State University

---

УДК 616-001.68

**Исследование биомеханических свойств ксеноперикарда и сухожилий человека** / С. В. Сиваконь, А. Н. Митрошин, А. И. Кислов, А. К. Абдуллаев, С. В. Сретенский, А. А. Голядькина, О. А. Щукина, А. С. Сиваконь // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2012. – № 2 (22). – С. 19–25.