

О.В.Калмин

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Изучены коррелятивные взаимоотношения внутривольной структуры и деформативно-прочностных свойств срединных, локтевых и седалищных нервов трупов людей обоего пола в возрасте от 21 до 60 лет. Установлено, что на стадии малых деформаций основными структурными компонентами нервов, определяющими их прочность и упругость, являются эластические и коллагеновые волокна соединительнотканых оболочек, преимущественно эпиневерия. Причем роль коллагена с возрастом увеличивается вследствие его накопления и снижения порога компенсации продольных растяжений. При больших деформациях прочность и жесткость нервов детерминируются, преимущественно, нервными волокнами и, в меньшей степени, соединительной тканью оболочек. В момент разрыва, так же как и при пластической деформации, прочность и жесткость нервов определяются в большей степени нервными волокнами и, в меньшей степени, коллагеновыми волокнами эпиневерия и периневерия.

Известно, что механические свойства органов и тканей детерминируются их структурой [9, 10, 11, 13, 20]. Каждый из тканевых компонентов, входящих в состав данного органа, вносит свой определенный вклад в его прочность, растяжимость и упругость [18]. Вследствие того, что каждый из компонентов имеет свой интервал прочности и упругости, то на каждом этапе деформирования механические свойства органа определяются одним или немногими его тканевыми компонентами.

Периферические нервы не являются гомогенными образованиями. Основными их компонентами являются соединительная ткань, включающая в себя коллагеновые и эластические волокна, и нервные волокна [16, 17, 18].

Как отмечает S.Sunderland [18], не представляется возможным разделить нерв на его отдельные компоненты и изучить их индивидуальные механические свойства. Однако возможно математическими методами оценить вклад различных тканей в деформативно-прочностные свойства нервов на разных стадиях их продольной деформации.

В связи с этим целью данного исследования явилось изучение взаимосвязи параметров внутривольной структуры и деформативно-прочностных свойств нервов на различных стадиях их продольной деформации

Материал и методы исследования

Материалом исследования послужили срединные, локтевые и седалищные нервы 78 трупов взрослых людей обоего пола в возрасте от 21 до 60 лет, причина смерти которых не была связана с заболеванием или травмой периферической нервной системы. Материал был разделен на 4 возрастные

группы: 1) 21-30 лет, 2) 31-40 лет, 3) 41-50 лет, 4) 51-60 лет.

Образцы срединных и локтевых нервов для исследования брали на уровне средней трети плеча, образцы седалищных нервов - на уровне средней трети бедра. Сегменты нервов фиксировали в 10%-м нейтральном формалине. Парафиновые срезы нервов окрашивали гематоксилином-эозином, по Ван Гизону, импрегнировали азотнокислым серебром по Грос-Бильшовскому-Кампосу. На препаратах измеряли площадь сечения нервов, толщину соединительнотканых оболочек, абсолютную и относительную площадь поперечного сечения пучков нервных волокон, соединительной ткани и отдельных пучков, подсчитывали количество пучков и нервных волокон.

Исследование деформативно-прочностных свойств нервов проводили на нативном материале, взятом от трупов не позднее 16-18 часов после наступления смерти. Эксперименты проводили в день взятия материала, не позднее 2-3 часов после аутопсии. Образцы нервов длиной 20 мм растягивали в продольном направлении со скоростью 20 мм/мин. до момента полного разрыва на разрывных машинах ZM-40 и 2166 P-5. Проводили графическую регистрацию зависимости «нагрузка-деформация». Определяли абсолютную и относительную нагрузку и коэффициент упругости при растяжении нервов на 10% и 25% их первоначальной длины, общую прочность (разрывную нагрузку), предел прочности, коэффициент жесткости (модуль Юнга) и максимальную относительную деформацию в момент разрыва.

Результаты исследования обрабатывали вариационно-статистическими методами на ЭВМ с помощью программных пакетов «Statgraphics», «Winstat» и «Varstat».

Результаты и обсуждение

Так как целью исследования явилось изучение взаимосвязей между морфологическими и механическими параметрами нервов, то абсолютные величины этих параметров в данной работе не имеют большого значения и поэтому не приводятся. Кроме того, показатели внутривольного строения и механических свойств у разных нервов имеют свой диапазон изменений, и это приведет лишь к перегрузке работы цифровым материалом.

Одинаковые параметры у разных нервов имеют примерно сходную однонаправленную динамику в течение изученного периода. Относительный параллелизм изменений внутривольной структуры и деформативно-прочностных свойств нервов с различной локализацией в течение периода зрелого возраста свидетельствует о единых тенденциях взаимосвязи их морфологических и механических показателей в организме.

В течение периода зрелого возраста абсолютная и относительная деформирующие нагрузки и коэффициент упругости (I секущий модуль) при малой степени удлинения (10%) непрерывно увеличиваются. Причем с возрастом темп изменения этих механических параметров нарастает (табл. 1).

Такая возрастная динамика механических параметров при малых деформациях связана с изменением структуры, качественного и количественного состава соединительнотканых оболочек нервов. На начальной стадии деформация нервов происходит преимущественно за счет сглаживания волн извилистости самого нерва, отдельных его пучков в стволе, выпрямления складок нервных волокон и растяжения соединительнотканых, в основном эластических, волокон [1, 4, 15, 18, 19, 20]. С возрастом происходит накопление в нерве соединительной ткани, утолщение его оболочек (табл. 2). Однако изменяется состав соединительной ткани, наблюдается обеднение оболочек нерва эластическими волокнами, и накопление в них коллагеновых волокон [3]. Кроме того, повышается жесткость коллагена вследствие молекулярной перестройки, и уменьшается извилистость соединительнотканых и нервных волокон [5, 7]. В связи с этим снижается порог структурной компенсации продольных деформаций коллагеновых и нервных волокон, и все большее количество этих структур вовлекается в процесс деформирования. Наряду с увеличением жесткости коллагена это приводит к нарастанию упругости нервов при данной степени деформации.

Корреляционный анализ показал, что наиболее значительное положительное влияние на величину абсолютной и относительной нагрузок оказывают толщина оболочек нервов (0.50-0.72), абсолютная и относительная площади поперечного сечения соединительной ткани (0.60-0.95) (табл. 3). Коэффициент упругости при 10%-й деформации в наибольшей степени также был связан с относительным содержанием соединительной ткани в стволе нервов (0.62). Количество нервных волокон и их плотность на 1 мм² площади поперечного сечения пучков оказывали на механические параметры при 10%-й деформации нервов отрицательное влияние.

При больших деформациях (25%), значительно превышающих порог упругости, механические параметры нервов ведут себя иначе.

Абсолютная нагрузка и модуль упругости при 25%-й деформации нервов значительно уменьшаются к 50 годам, а позже снова возрастают и почти достигают уровня, характерного для четвертого десятилетия жизни (табл. 1). Относительная нагрузка при этом уровне растяжения в течение периода зрелого возраста непрерывно и довольно равномерно возрастает.

Подобная динамика абсолютной деформирующей нагрузки и коэффициента упругости объясняется возрастными особенностями структуры нервов. При больших деформациях растяжение нерва происходит за счет всех его компонентов: и нервных, и соединительнотканых, преимущественно коллагеновых [6, 12, 19]. Известно, что коллагеновые волокна в значительной степени определяют жесткость мягких тканей [2, 8, 21]. Кроме того, в нервах другим фактором прочности и упругости считают нервные волокна [14, 18].

Возрастная физиологическая дегенерация нервных волокон приводит к

уменьшению количества нервных волокон и, следовательно, к снижению абсолютной прочности и упругости нервов (табл. 2). Дополнительно, в эпиневррии с возрастом накапливается жировая ткань, что особенно характерно для седалищного нерва. Это вызывает разрежение соединительнотканых волокон в эпиневррии и является еще одной причиной уменьшения жесткости нерва. Параллельно происходящее накопление коллагеновых волокон в соединительнотканых оболочках не компенсирует падения жесткости в силу вышеназванных причин.

После 50 лет дальнейшее количественное накопление коллагена приводит к качественным изменениям. Вследствие перестройки молекулярной структуры соединительной ткани происходит постепенное увеличение ее жесткости и, следовательно, жесткости и прочности оболочек нерва и всего нерва в целом [5]. Однако процесс склерозирования только начинается и еще не оказывает значительного влияния на механические свойства нервов. Постоянное увеличение с возрастом относительной деформирующей нагрузки можно объяснить более интенсивным падением величины общей прочности, относительно которой она и рассчитывается.

Корреляционный анализ показал, что наибольшее положительное влияние на абсолютную деформирующую нагрузку и модуль упругости при данной степени деформации оказывают абсолютная и относительная площади поперечного сечения пучков нервных волокон (0.34-0.60), а также количество и плотность нервных волокон (0.42-0.53) (табл. 3). Влияние соединительной ткани было менее значительным и чаще отрицательным.

Показатели прочности и жесткости нервов в момент разрыва изменяются почти параллельно. Общая прочность, предел прочности и коэффициент жесткости значительно снижаются до 50 лет, а затем снова начинают увеличиваться. Однако у первых двух параметров тенденция к увеличению только намечается, а модуль Юнга почти достигает к 60 годам до уровня, наблюдаемого в 31-40 лет. В противоположность этим показателям максимальная относительная деформация нервов непрерывно уменьшается в течение всего периода зрелого возраста (табл. 1).

Динамика механических параметров также легко объясняется с позиций возрастных изменений внутривольевой структуры в течение исследуемого периода.

Так как разрыв нерва происходит в условиях растяжения тех же структур, что и при большой степени деформации, то прочность и жесткость детерминируют те же структуры, что и при пластической деформации. Снижение количества нервных волокон приводит к уменьшению сопротивления нерва растягивающему усилию (табл. 2). Причем до 50 лет накопление коллагена в соединительнотканых оболочках не компенсирует этого падения прочности и жесткости, так как депонирующаяся в эпиневррии жировая ткань нейтрализует в значительной степени увеличение жесткости коллагена вследствие разрежения соединительнотканых волокон.

Возрастание прочности и жесткости после 50 лет связано, в большей степени, с возрастной перестройкой молекулярной структуры соединительной ткани и, в меньшей степени, с собственно накоплением коллагена в нерве [4]. Так как установлено, что до 50 лет увеличение количества соединительной ткани не приводило к повышению общей прочности нервов.

Снижение растяжимости детерминируется преимущественно процессами перестройки нейрофиброархитектоники и молекулярной структуры соединительной ткани. Повышение с возрастом жесткости коллагеновых волокон и снижение компенсационных резервов структуры всего нерва вызывает уменьшение его растяжимости.

Корреляционный анализ выявил, что разрывная нагрузка, предел прочности и коэффициент жесткости наиболее тесно связаны положительной корреляцией с абсолютной и относительной площадями поперечного сечения пучков нервных волокон (0.40-0.79), общим количеством и плотностью нервных волокон (0.48-0.70) (табл. 3). Содержание соединительной ткани и толщина оболочек отрицательно коррелируют с механическими параметрами нервов в момент разрыва.

ВЫВОДЫ

1. На стадии малых деформаций (в пределах упругой деформации) основными структурными компонентами нервов, определяющими их прочность и упругость, являются эластические и коллагеновые волокна соединительнотканых оболочек, преимущественно эпиневррии. Причем роль коллагена с возрастом увеличивается вследствие его накопления и снижения порога компенсации продольных растяжений.
2. При больших деформациях, близких к моменту разрыва, основными структурными факторами, определяющими прочность и жесткость нервов, являются, преимущественно, нервные волокна и, в меньшей степени, соединительная ткань оболочек.
3. В момент разрыва, так же как и при пластической деформации,

основными структурными факторами, определяющими прочность и жесткость нервов, являются, преимущественно, нервные волокна и, в меньшей степени, соединительная ткань оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бер Э., Хилтнер А., Фридман Б. Взаимосвязи между ультраструктурой и механическими свойствами в коллагене сухожилия - высокоупорядоченном макромолекулярном композите // Механика полимеров. - 1975. - № 6. - С.1051-1060.
2. Годлевска М.А., Слуцкий Л.И., Пурина Б.А. Сопоставление механических и биохимических характеристик артериальных сосудов головного мозга человека // Механика полимеров. - 1974. - № 6. - С.1096-1106.
3. Головченко Ю.И. Нейроморфологические особенности старения нервных стволов // Журнал невропатологии и психиатрии. - 1975. - Т.75, № 12. - С.1824-1828.
4. Никитин В.Н., Перский Е.Э., Утевская Л.А. Возрастная и эволюционная биохимия коллагеновых структур. - Киев: Наукова думка, 1977. - 280 с.
5. Перский Е.Э., Утевская Л.А. О возрастных изменениях физико-химических свойств коллагеновых волокон // Онтогенез. - 1971. - Т.2, № 2. - С.188-192.
6. Серов В.В., Шехтер А.Б. Соединительная ткань: функциональная морфология и общая патология. - М.: Медицина, 1981. - 310 с.
7. Слуцкий Л.И. Биохимия нормальной и патологически измененной соединительной ткани. - Л., 1969. - 368 с.
8. Dobrin Ph.V. Mechanical properties of arteries // *Physiol. Rev.* - 1978. - Vol. 58, № 2. - P.397-460.
9. Gross J. Collagen // *Scient. Am.* - 1961. - Vol. 204. - P.120-130.
10. Harkness R.D. Biological function of collagen // *Biol. Rev.* - 1961. - Vol. 36. - P.399-463.
11. Harkness R.D. Mechanical properties of collagenous tissues // *Intern. review of connect. tiss. res.* - 1968. - Vol. 4. - P.255-263.
12. Hooley C.J., McCrum N.G., Cohen R.E. The visco-elastic deformation of tendon // *J. Biomech.* - 1980. - Vol. 13, № 6. - P.521-528.
13. Minns R.J., Soden P.D., Jackson D.S. The role of the fibrous components and ground substance in the mechanical properties of biological tissues: a preliminary investigation // *J. Biomech.* - 1973. - Vol. 6, № 2. - P.153-165.
14. Ommaya A.K. Mechanical properties of tissues of the nervous system // *J. Biomech.* - 1968. - Vol. 1. - P.127-138.

15. (Reich G.) Райх Г. Коллаген / Пер. с нем. – М.: Легкая индустрия, 1969. – 328 с..
16. Stolinski C. Microscopic observations on the outer sheath of the peripheral nerve // J. Anat. - 1994. - Vol. 185. - P.211-212.
17. Stolinski C. Structure and composition of the outer connective tissue sheaths of peripheral nerve // J. Anat. - 1995. - Vol. 186. - P.123-130.
18. Sunderland S. The connective tissues of peripheral nerve // Brain. - 1965. - Vol. 88. - P.841-854.
19. Viidik A. Functional properties of collagen tissues // Int. Rev. Connective Tissue Res. - 1973. - № 6. - P.127-215.
20. Viidik A., Danielsen C.C., Oxlund H. On fundamental and phenomenological models, structure and mechanical properties of collagen, elastin and glucosaminoglycan complexes // Bioirheology. - 1982. - Vol. 19. - P.437-451.
21. Vogel H.G. Correlation between tensile strength and collagen content in rat skin: Effect of age and cortisol treatment // Connect. Tissue Res. - 1974. - Vol. 36, № 3. - P.177-182.

Structural fundamentals of strength of peripheral nerves

O.V.Kalmin

Studied correlation relationship of intratrunkal structure and mechanical properties of median, ulnar and sciatic nerves of 78 adult cadavers of both sexes aged 21-60. The research has shown that on stage of small deformation strength and elasticity of nerves define elastic and collagen fibres of connective tissue of sheaths, mainly of epineurium. Role of collagen with an age increases in consequence of its accumulations and reducing a threshold to longitudinal sprain compensations. Under greater deformation strength and elasticity of nerves define, mainly, nerve fibres and, to a lesser extent, connective tissue of sheaths. At a breaking point, as well as under greater deformation, strength and elasticity of nerves are defined in greater degrees by nerve fibres and, to a lesser extent, collagen fibres of epineurium and perineurium.