

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕДРЕННОЙ КОСТИ ПОСЛЕ ХИРУРГИЧЕСКОЙ РЕЗЕКЦИИ: ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ⁸

С.М. Босьяков*, М.А. Афанасьева**, С.А. Голякевич***, И.Э. Шпилевский****

* Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, bosiakov@bsu.by

** Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск, marina15111@gmail.com

*** Белорусский государственный технологический университет, Беларусь, Минск, gsa@belstu.by

**** Республиканский научно-практический центр травматологии и ортопедии, Беларусь, Минск, ihar760@gmail.com

Аннотация. Основным методом лечения новообразований трубчатых костей является хирургическое удаление пораженного участка (секторальная или хирургическая резекция) с образованием костного (секторального) дефекта. После хирургической резекции прочность костного сегмента и его функциональные возможности снижаются. Представлены результаты экспериментального определения максимальных и минимальных главных деформаций, возникающих в бедренной кости после хирургической резекции, на основании тензометрических испытаний. Пострезекционные дефекты характеризуются различными угловыми и линейными размерами. Нагружение кости соответствует статическому действию собственного веса человека. Полученные результаты могут быть использованы для оценки прочности бедренной кости с пострезекционным дефектом, прогнозирования патологического перелома на уровне костного дефекта, а также могут найти применение при стандартизации показаний к применению армирования кости после хирургической резекции.

Ключевые слова: хирургическая резекция, бедренная кость, главная деформация, тензометрические испытания.

ASSESSMENT OF FEMUR STRENGTH AFTER SURGICAL RESECTION: TENSOMETRIC TESTS

S.M. Bosiaikov*, M.A. Afanasieva**, S.A. Goliakovich***, I.E. Shpileuski****

* Belarusian State University, Belarus, Minsk, bosiaikov@bsu.by

** Belarusian State University, Belarus, Minsk, marina15111@gmail.com

*** Belarusian State Technological University, Belarus, Minsk, gsa@belstu.by

**** Republican Scientific and Practical Centre for Traumatology and Orthopaedics, Belarus, Minsk, ihar760@gmail.com

Abstract. The main treatment method of tubular bone tumors is the surgical removal of the diseased area (sectoral or surgical resection) with the formation of a bone (sectoral) defect. The strength of the bone segment and its functionality are reduced after surgical resection. The aim of the study is the experimental assessment of the maximum and minimum principal strains in the femur after surgical resection based on tensometric tests. Post-resection defects are characterized by different angular and linear dimensions. Bone loading corresponds to the static action of a person's own weight. The obtained results can be used to assess the strength of a femur with a post-resection defect, for prediction of a pathological fracture at the level of a bone defect, and can also be utilized to standardize indications for the use of bone reinforcement after surgical resection.

Keywords: surgical resection, femur, principal strain, tensometric test.

Основным методом лечения доброкачественных опухолей и метастатических поражений трубчатых костей конечностей является хирургическое удаление пораженного участка в пределах неизмененных тканей (секторальная или хирургическая резекция) с образованием костного (секторального) дефекта. В результате хирургической резекции кости прочность костного сегмента, а также функциональные возможности конечности снижаются, поскольку повышается риск патологического перелома в области резекции. Одним из подходов, применяемых к оценке прочности длинных трубчатых костей с костными дефектами (опухолеподобными поражениями и пострезекци-

⁸ Работа выполнена при финансовой поддержке задания 1.8.01.1 Государственной программы научных исследований «Конвергенция».

онными отверстиями) является определение коэффициента увеличения главных деформаций (напряжений) костной ткани в окрестности дефекта [1, 2]. Целью настоящей работы является экспериментальное определение главных и максимальных касательных деформаций в области пострезекционного дефекта на основании тензометрических испытаний для прогнозирования изменения прочности бедренной кости.

В качестве образца использовалась интактная (неповрежденная) сухая бедренная кость взрослого человека, полученная от РНПЦ травматологии и ортопедии Министерства здравоохранения Республики Беларусь, которая хранилась при температуре -23°C. Эксперимент выполнялся при температуре +18°C (размораживание кости происходило в течение суток при температуре +18°C). Бедренная кость жестко закреплялась в металлическом цилиндрическом сосуде с помощью эпоксидной смолы. Нагрузка прикладывалась в верхней трети головки бедренной кости, таким образом, что линия действия нагрузки проходит от верхнего полюса головки бедра через середину расстояния между крайними нижними отделами мышечков бедра, что соответствует действию собственного веса человека. Для определения деформаций использовались проволочные тензорезисторы FRA-6-11 (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.) (рис. 1), номинальным сопротивлением каждого из трех элементов – 120 Ом [3].

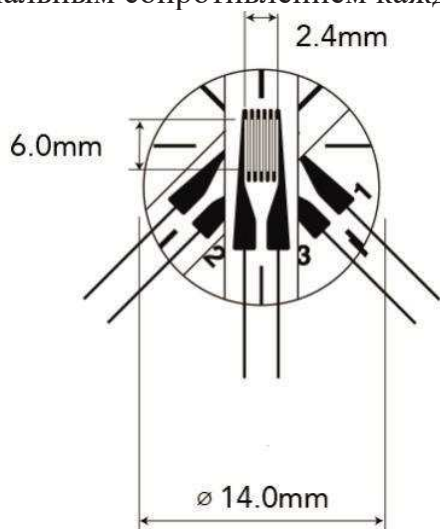


Рис. 1. Схема тензометрического датчика FRA-6-11 [3]

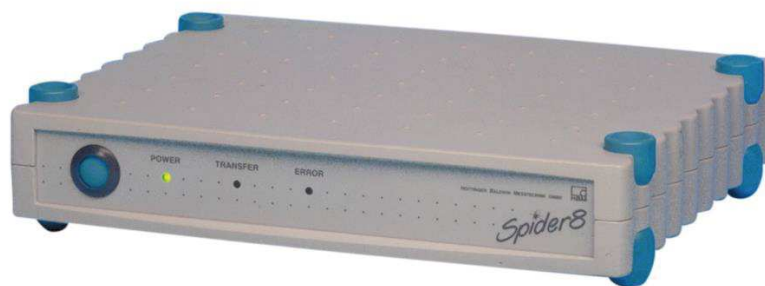


Рис. 2. Тензометрическая станция Spider 8

Монтаж датчиков осуществлялся с использованием клея циакрен CN (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Япония). Температурная компенсация тензодатчиков осуществлялась путем подключения дополнительных тензодатчиков по схеме полного измерительного моста.

Показания тензодатчиков обрабатывались с использованием тензометрической станции Spider 8 (HBM GmbH, Германия) (рис. 2) и специализированного программного обеспечения Catman [4]. Хирургическая резекция выполнялась в средней трети внутренней поверхности бедренной кости с помощью хирургической дрели Stryker 4205 System 7 (Stryker, USA) с сагиттальной насадкой (толщина и ширина насадки 0,9 мм и 23,1 мм, соответственно) (рис. 3).



Рис. 3. Хирургическая дрель Stryker 4205 с сагиттальной насадкой

Продольная длина костного дефекта составляла 54 мм, (длина диафиза кости 310 мм,

внешний диаметр в средней части на уровне резекции 32 мм, внутренний диаметр – 14 мм). Угловые размеры пострезекционных дефектов составляли 180° и 270° . Нагружение бедренной кости осуществлено на испытательной машине УМ-5А (максимальная нагрузка 1200 Н, скорость нагружения 2 мм/мин, точность измерения $\pm 1\%$). Тензометрические датчики, осуществляющие измерение деформаций, располагались в окрестности расположенных ближе к нижней трети бедренной кости углов пострезекционных дефектов. Расположение тензометрических датчиков на интактной бедренной кости и бедренная кость с пострезекционными дефектами различных угловых размеров представлены на рис. 4.

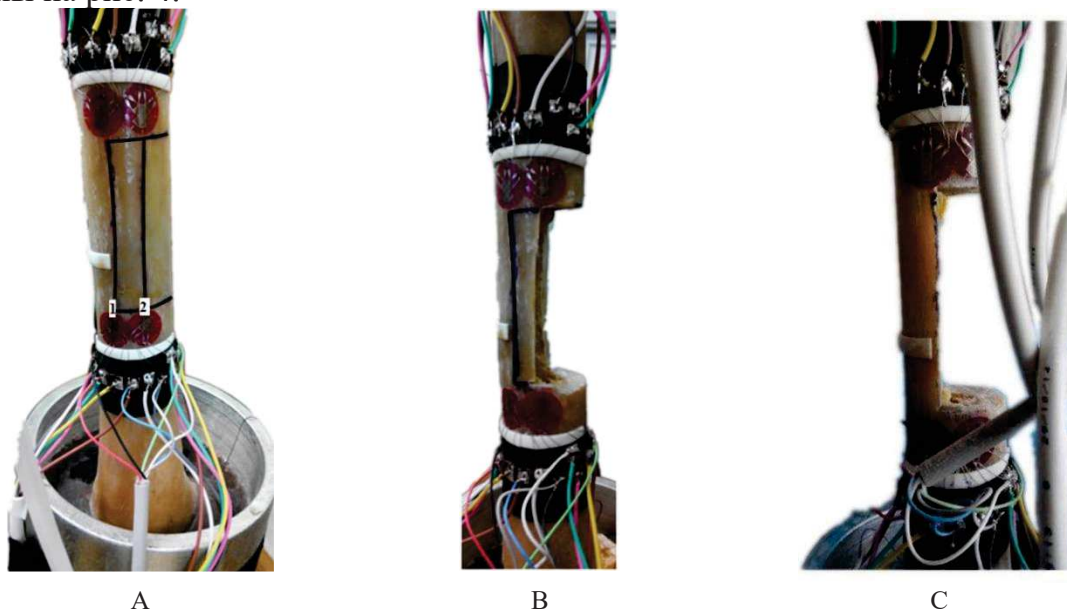


Рис. 4. Расположение тензометрических датчиков на бедренной кости: А – интактная бедренная кость; В – бедренная кость с пострезекционным дефектом (угловой размер дефекта равен 180°); С – бедренная кость с пострезекционным дефектом (угловой размер дефекта равен 270°); 1, 2 – тензометрические датчики, осуществляющие измерение деформаций; сплошной линией обозначены линии иссечения кости при формировании пострезекционных дефектов

В ходе эксперимента получены функциональные зависимости главных деформаций, возникающих в интактной бедренной кости и бедренной кости с пострезекционными дефектами, имеющими угловой размер 180° и 270° , от нагрузки, действующей на бедренную кость. Результаты в соответствии с показаниями первого и второго тензометрических датчиков представлены на рис. 5 и 6.

Из рис. 5 и 6 видно, что для неповрежденной кости с увеличением нагрузки наблюдается незначительное увеличение максимальных и минимальных главных деформаций в областях расположения тензометрических датчиков 1 и 2. Максимальные главные деформации имеют практически одинаковые значения, наибольшее отличие между максимальными главными деформациями при нагрузке 120 кг для датчиков 1 и 2 составляет $\approx 1,12$ (значение наибольшей максимальной главной деформации для датчиков 1 и 2, соответственно). Минимальные главные деформации по абсолютной величине для тех же датчиков и при той же нагрузке достигают больших по абсолютной величине значений и для датчиков 1 и 2 соответственно. Наибольшее отличие между минимальными главными деформациями при нагрузке 120 кг для датчиков 1 и 2 составляет $\approx 2,42$.

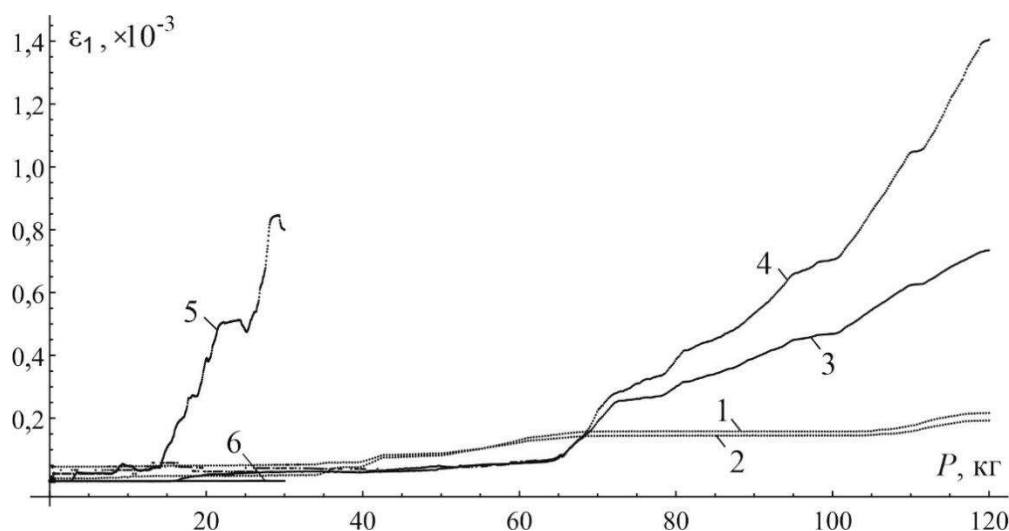


Рис. 5. Зависимость максимальной главной деформаций от нагрузки для бедренной кости: 1 – показания датчика 1 для неповрежденной бедренной кости; 2 – показания датчика 2 для неповрежденной бедренной кости; 3 – показания датчика 1 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° ; 4 – показания датчика 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° ; 5 – показания датчика 1 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270° ; 6 – показания датчика 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270°

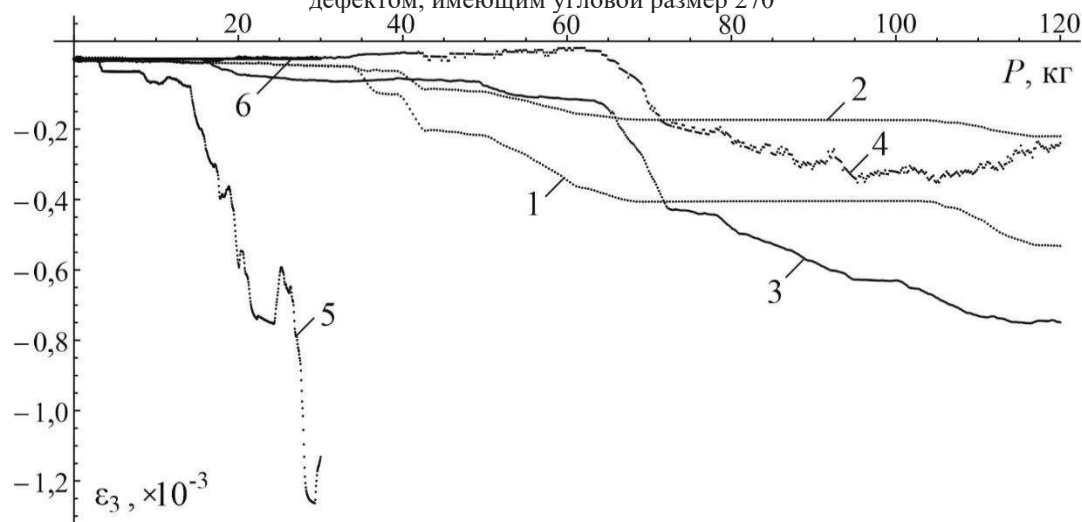


Рис. 6. Зависимость минимальной главной деформаций от нагрузки для бедренной кости: 1 – показания датчика 1 для неповрежденной бедренной кости; 2 – показания датчика 2 для неповрежденной бедренной кости; 3 – показания датчика 1 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° ; 4 – показания датчика 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° ; 5 – показания датчика 1 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270° ; 6 – показания датчика 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270°

Для всех диаграмм, полученных для бедренной кости с пострезекционными дефектами на основании показаний тензометрических датчиков 1 и 2, является характерным наличие участков, которые практически полностью совпадают с участками диаграмм для неповрежденной бедренной кости. Для случая пострезекционных дефектов с угловыми размерами 180° и 270° такие участки как для датчика 1, так и для датчика 2, располагаются в пределах значений нагрузки от 0 до ≈ 70 кг и от 0 до ≈ 14 кг соответственно. Для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270° , максимальные и минимальные главные деформации в области расположения датчика 2 практически равны нулю и не изменяются с увеличением нагрузки. Такой характер изменения деформаций показывает, что для бедренной кости с пострезекционными дефектами в средней трети, угло-

вой размер которых не превышает 180° , можно рекомендовать пациенту только разгрузочный режим и не прибегать к армированию и иммобилизации конечности. В то же время, при угловом размере пострезекционного дефекта около 270° необходимо армирование или иммобилизация бедренной кости, поскольку патологический перелом в области дефекта может произойти даже при статическом действии собственного веса.

Увеличение главных деформаций в области датчиков 1 и 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° , наблюдается при превышении нагрузки 70 кг. Следует отметить, что максимальная главная деформация больше для одних и тех же значений нагрузки в области датчика 2 по сравнению с датчиком 1, тогда как минимальная главная деформация больше (по абсолютной величине) больше в области датчика 1 по сравнению с датчиком 2. Наибольшее отношение между максимальными главными деформациями в области датчика 2 для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 180° , и для интактной бедренной кости при нагрузке 120 кг составляет $\approx 7,3$.

Для бедренной кости с пострезекционным дефектом, имеющим угловой размер 270° , диаграммы максимальных и минимальных деформаций указывают на то, что величина предельной нагрузки (предшествующая пределу упругости, при превышении которого возникают пластические деформации) составляет $\approx 21,4$ кг. Предела прочности бедренная кость с таким пострезекционным дефектом достигает при нагрузке равной $\approx 29,0$ кг. Коэффициент увеличения максимальных и минимальных деформаций, соответствующий пределу упругости бедренной кости в этом случае, составляет $\approx 29,0$ и $\approx 52,3$, соответственно. Такое различие в коэффициентах увеличения для максимальных и минимальных главных деформаций для пострезекционных дефектов с различными угловыми размерами указывает на то, что оценку прочности длинной трубчатой кости следует осуществлять не только на основании максимальной главной деформации [1], но и с учетом минимальной главной деформации.

Библиографический список

1. Sternheim A., Giladi O., Gortzak Ya., Drexler M., Salai M., Trabelsi N., Milgrom Ch., Yosibash Z. Pathological fracture risk assessment in patients with femoral metastases using CT-based finite element methods. A retrospective clinical study // *Bone*. 2018. Vol. 110. pp. 215–220.
2. Morozov V.P., Petrova E.G. Surgical treatment of children with benign tumors and tumor-like diseases of long tubular bones // *Novosti Khirurgii*. 2012. Vol 20 (5). pp. 91-99.
3. Description of strain gauge FRA-6-11 [Electronic resource] – Mode of access : <https://store.technimeasure.co.uk/product/fra-6-11/>. Date of access: 08.05.2020.
4. Spider 8 – the friendly alternative for PC based measurement [Electronic resource] – Mode of access : <http://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/Day2/spider8.pdf>. – Date of access: 08.05.2020.