

УДК 616.728.2-06-089-77:612.76

ЛАЗАРЕВ І.А., КОСТОГРИЗ О.А., СКИБАН М.В.

ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ

БІОМЕХАНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗВИТКУ ТА ПРОГРЕСУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЗМІН У ТРАВМОВАНОМУ ХРЯЦІ КОЛІННОГО СУГЛОБА

Резюме. Під час хірургічних артроскопічних втручань після травм колінного суглоба часто спостерігаються структурні зміни суглобового хряща у вигляді ділянок розм'якшення хряща з його флюктуацією. Це викликано швидкою втратою води матриксом колагену і відшаруванням хряща від субхондральної кістки. На основі імітаційного моделювання методом кінцевих елементів вивчені механізми руйнування суглобового хряща колінного суглоба в умовах гострої травми і при подальшому функціональному навантаженні. На моделі суглобового хряща виростків стегна сформована ослаблена ділянка діаметром 10 мм, в якій механічні властивості зменшені у 2 рази для імітації ділянки ушкодження. Максимальні показники напружень на хрящі виникають на кордоні переходу різних механічних властивостей і на суглобовій поверхні перевищують показники інтактних ділянок в 6,9 рази, а на субхондральній поверхні — в 4,2 рази. Концентрація напружень зосереджена в зоні переходу властивостей на інтактній ділянці хряща, тоді як на пошкодженій ділянці з ослабленими властивостями напруження значно менші, хоча також розташовані на кордоні різних властивостей. Максимальні показники деформацій локалізуються на ділянці травмованого суглобового хряща зі зміненими механічними властивостями. У зв'язку з цим на кордоні переходу механічних властивостей інтактного і пошкодженого хряща може з'явитися вдавнена тріщина з подальшим поширенням зони руйнування хряща. Більш значна шкідлива дія відбувається на переході механічних властивостей з боку інтактною зони, ніж зони пошкодження. Місце переходу інтактною хрящової тканини в ослаблену внаслідок травми стає концентратором напружень і місцем подальшого прогресуючого руйнування суглобового хряща при циклічних навантаженнях, з поширенням зони пошкодження.

Ключові слова: колінний суглоб, суглобовий хрящ, зона ушкодження, напруження, деформація.

Вступ

В умовах технічного прогресу у процесі розвитку виробництва збільшується кількість травм, серед постраждалих 80 % осіб молодого віку [2], травматичні ураження колінного суглоба (КС) становлять 10–24 % від усіх травм нижньої кінцівки [1]. Частота ушкоджень суглобового хряща, ізольованих та поєднаних з ушкодженням інших тканинних структур колінного суглоба, дорівнює 48–61,5 % [4].

Під час хірургічних артроскопічних втручань у хворих після травм колінного суглоба досить часто спостерігаються зміни суглобового хряща, що являють ділянки пом'якшення суглобового хряща, на яких при пальцьовому дослідженні визначається флюктуація. На МРТ ділянка пом'якшення суглобового хряща виглядає як локальне відшарування його з накопиченням (або без нього) рідини між шаром хряща та підхрящовою кістковою пластинкою (рис. 1). Існує думка, що ці структурні зміни викликані швидкою втратою рідинної фази тканин, насамперед рідини колагенового матриксу суглобового хряща.

Залишення таких змін без уваги призводить до руйнування структури та формування дефекту суглобового хряща, подальшого оголення підхрящової субхондральної кісткової пластинки та прогресуючого розвитку дегенеративно-некротичних змін хрящової та кісткової тканин, тобто деформівного артрозу. Вчасне клінічне та інструментальне виявлення патологічних змін з боку суглобового хряща після травми колінного суглоба та раннє адекватне медикаментозне та артроскопічне усунення визначеного ураження попереджає розвиток прогресуючих патологічних змін у травмованому суглобі.

Мета дослідження — на основі комп'ютерного імітаційного моделювання гострого травматичного ушкодження колінного суглоба визначити механізм руйнування та прогресування деструктивного процесу з боку суглобового хряща при функціональному навантаженні.

© Лазарев І.А., Костогриз О.А., Скибан М.В., 2014

© «Травма», 2014

© Заславський О.Ю., 2014

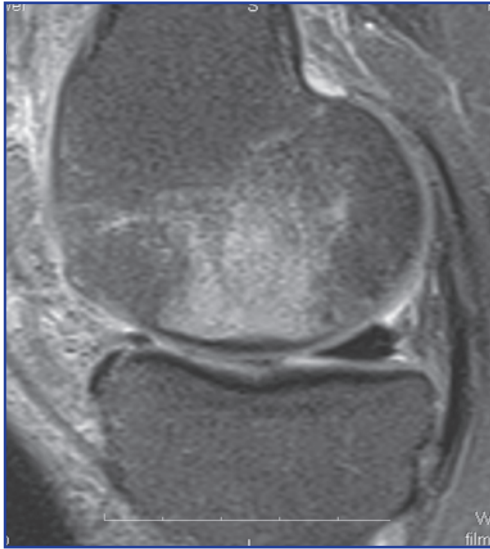


Рисунок 1. Локальне відшарування суглобового хряща з накопиченням рідини між шаром хряща та підхрящовою кістковою пластинкою

Матеріали та методи

Для пояснення механізму виникнення після травми колінного суглоба в ділянці удару поверхні суглобового хряща порушення локальної структурно-функціональної організації хряща, з якого починається його руйнування, побудовано кінцево-елементну модель колінного суглоба, на якій на суглобовому хрящі виростка стегна утворювали ослаблену ділянку хряща діаметром 10 мм, що імітує ділянку ушкодження з втратою води матриксом та механічних властивостей. На рис. 2 наведена розрахункова модель КС (а) та його елементи — феморальний компонент (б), суглобовий хрящ виростків

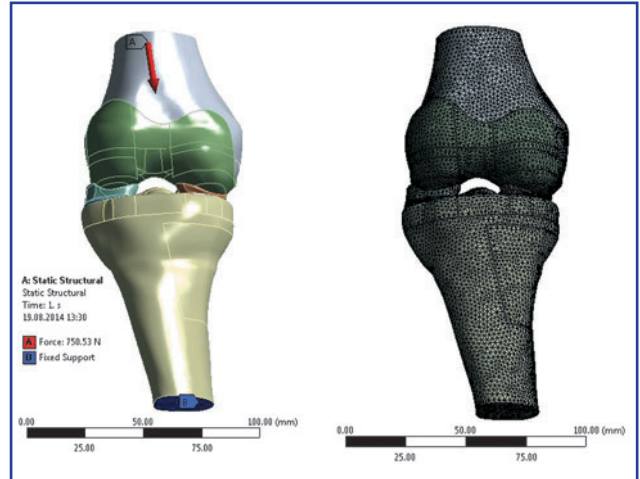


Рисунок 3. Схема розрахунку (а) та кінцево-елементна модель (б) колінного суглоба

стегна (в), меніски (г), суглобовий хрящ тибіально-го компонента (д), тибіальний компонент (е).

На наступному етапі модель експортували в програмне середовище ANSYS для подальшого розрахунку. На рис. 3а наведено умови закріплення і навантаження моделі, на рис. 3б — кінцево-елементну модель, яка налічує 146 970 точок та 81 556 елементів.

Модель колінного суглоба була закріплена за дистальний відділ тибіального компонента. Силу 750 Н, що дорівнювала середньостатистичній масі тіла людини, прикладали зверху до феморального компонента колінного суглоба. На досліджуваних ділянках та на ділянках переходу механічних властивостей матеріалу для збільшення точності розрахунків кінцево-елементна сітка зроблена більш густою. Для розрахунку застосовували механічні

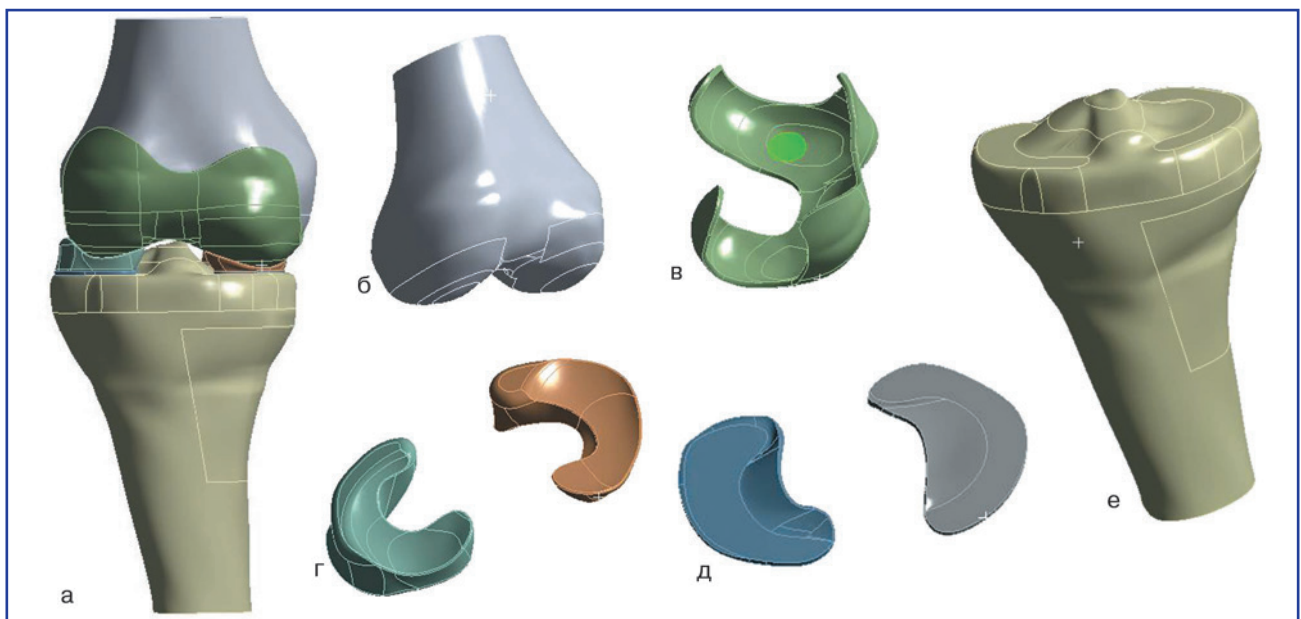


Рисунок 2. Тривимірна твердотільна біомеханічна модель КС

Таблиця 1. Механічні властивості кісткової та хрящової тканини

Тканина та її стан	E, Па	ν
Кісткова тканина (норма)	$1,2 \cdot 10^8$	0,3
Хрящ (норма)	$1,56 \cdot 10^6$	0,25
Хрящ (ушкодження матриксу)	$0,75 \cdot 10^6$	0,2

властивості суглобового хряща, які взяті з літературних джерел. Значення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона наведені у табл. 1 [3, 5].

Розрахунки проводили тільки для суглобового хряща та субхондральної кісткової тканини виростка стегнової кістки.

Результати та їх обговорення

За отриманими результатами розрахунків максимальні показники напружень (σ_{max}) виникають на межі переходу неушкодженого суглобового хряща в ділянку ушкодження, механічні властивості яких різні (рис. 4а та 4б).

Так, на суглобовій поверхні хряща на межі зміни механічних властивостей напруження перевищують показники інтактних ділянок у 6,9 раза. При цьому на субхондральній поверхні суглобового хряща напруження на межі переходу були майже в 4,2 раза більші, ніж в інших інтактних ділянках. Порівнюючи показники напруження на межі здорового суглобового хряща з показниками ділянки його ушкодження ми бачимо, що їх значення на перехідній ділянці більші у 2,8 раза, що порівнянно менше за аналогічні показники на інтактних ділянках. Як ви-

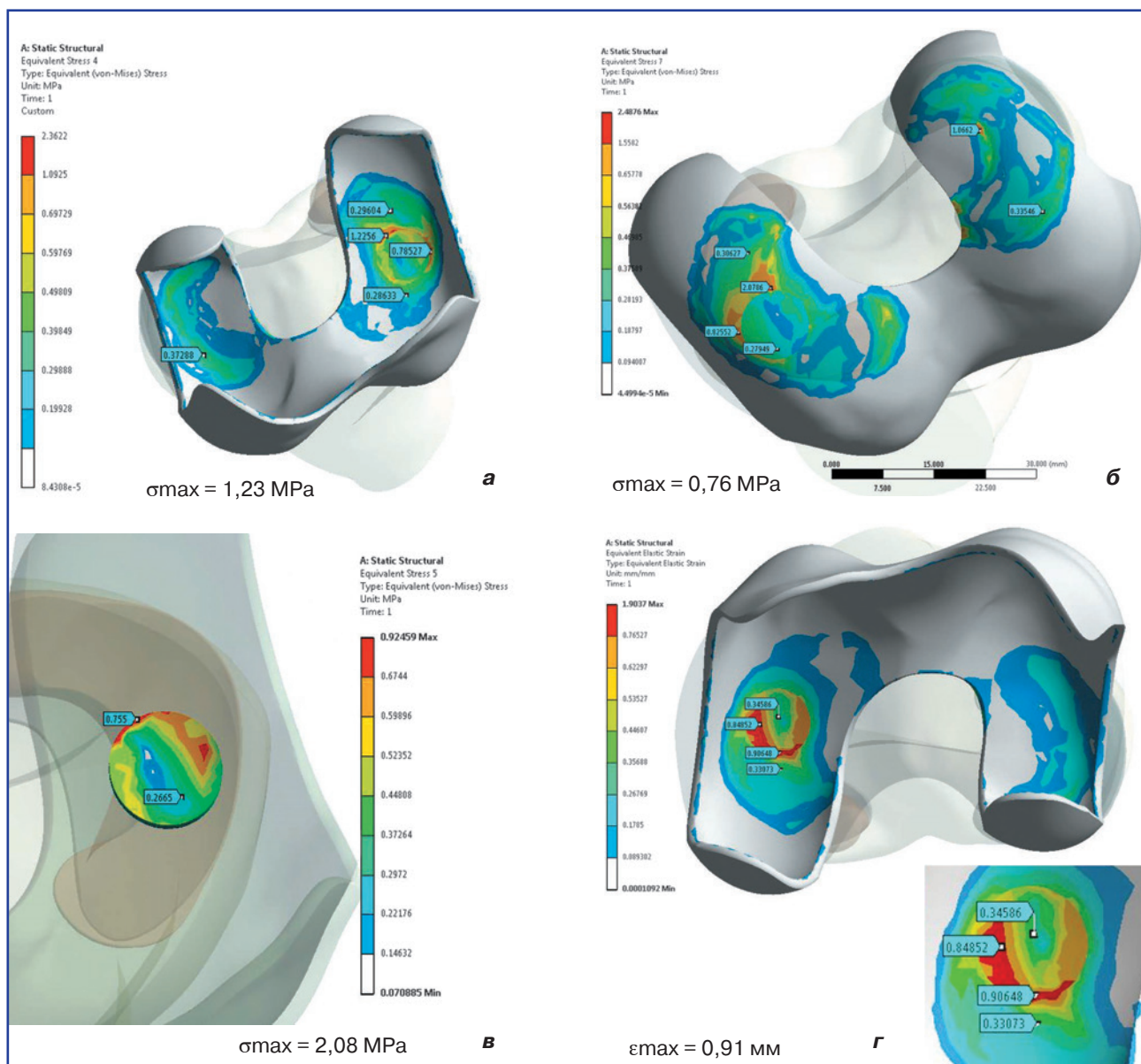


Рисунок 4. НДС суглобового хряща колінного суглоба при травмі (пояснення в тексті)

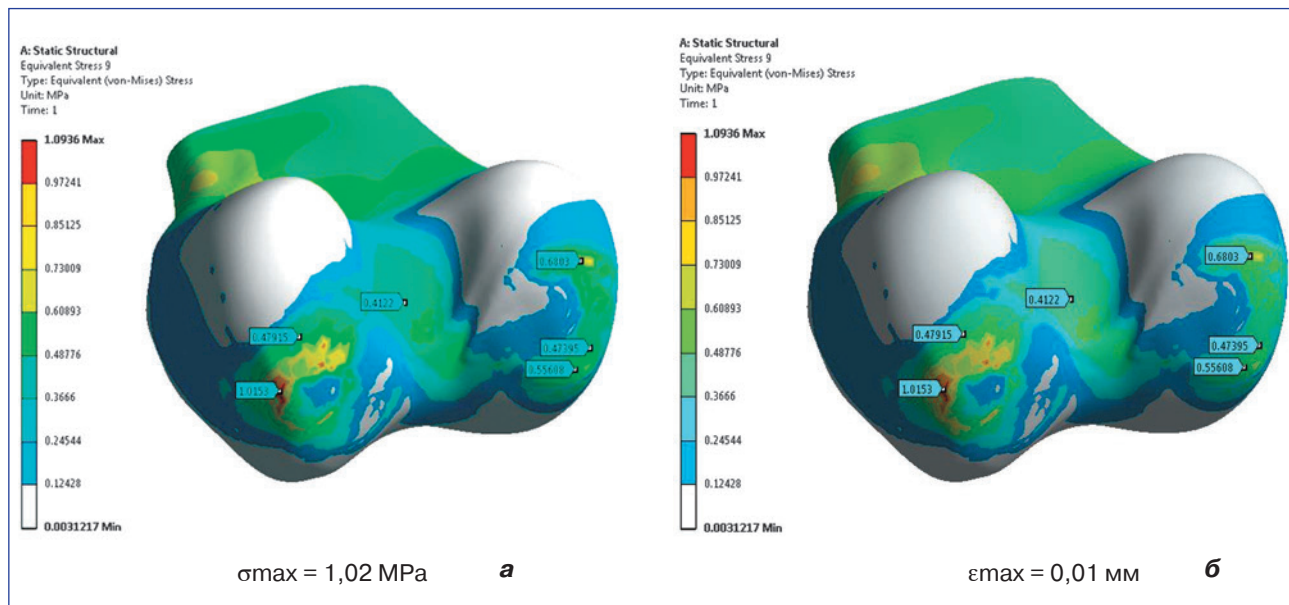


Рисунок 5. НДС субхондральної кістки стегнового компонента кульшового суглоба при травмі

дно, максимальні напруження зосереджені на межі інтактного суглобового хряща з ділянкою uszkodженого, тоді як на uszkodженій ділянці напруження значно менші.

Максимальні показники деформацій (ϵ_{\max}) зосереджені саме на ділянці uszkodження травмованого суглобового хряща із зміненими механічними властивостями (зона розм'якшення) (рис. 4г). Це означає, що при навантаженні масою тіла 75 кг ця ділянка змінюється набагато більше, ніж інтактний суглобовий хрящ. Тому на межі переходу механічних властивостей інтактного хряща в ділянку uszkodженого суглобового хряща можуть виникати вдавнення та тріщини, з подальшим поширенням зони руйнування.

Субхондральна кісткова тканина також реагує зміною НДС у ділянках проекції суглобового хряща із зміненими механічними властивостями (рис. 5).

Так, на ділянках зміни властивостей максимальні напруження вдвічі більші, ніж на інших оточуючих ділянках. Рівень деформацій перевищує в 1,4 раза деформації в інших ділянках. Такі зміни напружено-деформованого стану можуть порушити зв'язок хряща із субхондральною кістковою тканиною та прискорити дегенеративні процеси в тібіофemorальній зоні.

Висновки

1. Підвищені показники механічних напружень виникають на межі переходу неушкодженого хряща в ділянку uszkodженого внаслідок травми (удару) суглобового хряща.

2. Зосереджені на ділянці uszkodження травмованого суглобового хряща максимальні показники деформацій при навантаженні масою тіла можуть

викликати вдавнення та тріщини з подальшим поширенням зони руйнування.

3. Місце переходу інтактною хрящовою тканиною в ділянку uszkodженої, викликаючи локальну концентрацію напружень, стає чинником подальшого руйнування та поширення зони uszkodження суглобового хряща.

4. При динамічних навантаженнях під час ходи руйнуючий ефект посилюється, що й призводить до прискорення прогресування uszkodження суглобового хряща.

Список літератури

1. Королев А.В. Физическая реабилитация пациентов после артроскопических операций на коленном суставе / Королев А.В., Головская В.В., Дедов С.Ю. и др. // *Скорая медицинская помощь. Специальный выпуск*. — Санкт-Петербург, 2003. — 48 с.
2. Маланин Д.А. Экспериментальные аспекты изучения хондрогенного потенциала мезенхимальных плюрипотентных и малодифференцированных клеток, культивируемых *in vivo* / Маланин Д.А., Писарев В.Б., Шилов В.Г. и др. // *Гений ортопедии*. — 2002. — № 1. — С. 90-98.
3. Маланчук В.О. Імітаційне комп'ютерне моделювання в щелепно-лицевій хірургії. Навчальний посібник / Маланчук В.О., Крищук М.Г., Копчак А.В. — К.: Видавничий дім «Асканія», 2013. — 231 с.
4. Angermann P. Arthroscopic chondrectomy as a treatment of cartilage lesions / Angermann P., Harager K., Tobin L.L. // *Knee Surg. Sports. Traumatol. Arthrosc.* — 2002. — Vol. 10(1). — P. 6-9.
5. Kubicek M. Stress strain analysis of knee joint Engineering / Kubicek M., Florian Z. // *Mechanics*. — 2009. — Vol. 16(5). — P. 315-322.

Отримано 26.08.14 ■

Лазарев И.А., Костогрыз О.А., Скибан М.В.
 ГУ «Институт травматологии и ортопедии НАМН Украины»,
 г. Киев

БИОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ И ПРОГРЕССИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В СУСТАВНОМ ХРЯЩЕ КОЛЕННОГО СУСТАВА

Резюме. Во время хирургических артроскопических вмешательств после травм коленного сустава часто наблюдаются структурные изменения суставного хряща в виде участков размягчения хряща с его флюктуацией. Это вызвано быстрой потерей воды матриком коллагена и отслоением хряща от субхондральной кости. На основе имитационного моделирования методом конечных элементов изучены механизмы разрушения суставного хряща коленного сустава в условиях острой травмы и при дальнейшей функциональной нагрузке. На модели суставного хряща мышелка бедра сформирован ослабленный участок диаметром 10 мм, на котором механические свойства уменьшены в 2 раза для имитации участка повреждения. Максимальные показатели напряжений на хряще возникают на границе перехода разных механических свойств и на суставной поверхности превышают показатели интактных участков в 6,9 раза, а на субхондральной поверхности — в 4,2 раза. Концентрация напряжений сосредоточена в зоне перехода свойств на интактном участке хряща, тогда как на поврежденном участке с ослабленными свойствами напряжения значительно меньше, хотя также расположены на границе разных свойств. Максимальные показатели деформаций локализуются на участке травмированного суставного хряща с измененными механическими свойствами. В связи с этим на границе перехода механических свойств интактного и поврежденного хряща может появиться вдавленная трещина с дальнейшим распространением зоны разрушения хряща. Более значительное повреждающее воздействие происходит на переходе механических свойств со стороны интактной зоны, чем зоны повреждения. Место перехода интактной хрящевой ткани в ослабленную вследствие травмы становится концентратором напряжений и местом дальнейшего прогрессирующего разрушения суставного хряща при циклических нагрузках, с распространением зоны повреждения.

Ключевые слова: коленный сустав, суставной хрящ, зона повреждения, напряжение, деформация.

Lazarev I.A., Kostohryz O.A., Skiban M.V.
 SI «Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

BIOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF DEVELOPMENT AND PROGRESSION OF STRUCTURAL CHANGES IN KNEE JOINT

Summary. During knee surgeries after knee injury there are often determined structural changes of articular cartilage as areas of cartilage softening with its fluctuation. It is resulted by rapid water loss by collagen matrix and cartilage abruption from subchondrial bone. On the basis of imitating modeling by the finite elements method the mechanisms of destruction of a knee articulate cartilage in acute trauma and at further functional loading were studied. On a model of an articulate cartilage of the hip condyle the weakened site with a diameter of 10 mm with twice reduced mechanical properties, imitating a damage site, has been created. The maximum stress on a cartilage arise on the border of transition of different mechanical properties and on an articulate surface exceed levels in intact sites by 6.9 times, and on a subchondrial surface by 4.2 times. Stress concentrated in a zone of transition of properties on an intact site of a cartilage, whereas on a damaged site with the weakened properties the stress considerably lower though they are also located on the border of different properties. The maximum strain localized on the injured articulate cartilage with the changed mechanical properties. Because of it, on border of mechanical properties transition of the intact and injured cartilage there can be a pressed crack with further distribution of a zone of cartilage destructions. More considerable damaging influence occurs on mechanical properties transition area from an intact zone rather than a damage zone. The place of transition of intact cartilage to weakened one because of trauma becomes the concentrator of stress and a place of further destruction progressing of an articulate cartilage at cyclic loadings, with wide distribution of damaged area.

Key words: knee, articulate cartilage, zone of damage, stress, strain.