

Визуализация морфологии разрушения ребра при воздействии колюще-режущим предметом

М.А. Кислов¹, К.Н. Крупин²

Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова (Сеченовский университет)

¹ ORCID: 0000-0002-9303-7640, kislov@1msmu.ru

² ORCID: 0000-0001-6999-8524, krupin@1msmu.ru

Аннотация

С помощью натуральных экспериментов и математического моделирования установлены и визуализированы морфологические признаки колото-резаного повреждения ребра. Выявлены закономерности распределения нагрузки в костной ткани при этом виде травмы. С помощью объективных методов исследования объяснена локализация зоны действия острия клинка ножа и перехода торцевого резания в продольное с последующей визуализацией. Предложено применение метода конечно-элементного анализа колото-резаного повреждения костной ткани.

Ключевые слова: конечно-элементный анализ, колото-резаное повреждение, визуализация, ребро.

1. Введение

В современных условиях работы судебно-медицинских экспертов предъявляются повышенные требования к оценке представленных материальных объектов исследования. Для этого применяется большое количество различных физических и химических методов инструментального исследования. При этом обычно применяется метод нестрогой аналогии, где непосредственный исследуемый признак не связан со сходным. Результаты исследования по этой методике зачастую носят вероятностный характер. Нестрогая аналогия – это такое уподобление, когда зависимость между сходными и переносимыми признаками мыслится, как необходимая лишь с большей или меньшей степенью вероятности. В этом случае, обнаружив у другого предмета признак сходства, можно лишь в логически ослабленной форме заключить о принадлежности последнему переносимого признака [1].

Тем не менее судебно-медицинская экспертиза не допускает использование методов, дающих только вероятностные результаты. Поэтому в современной судебной медицине применяют данные статистического анализа при определении диагностических признаков, характерных для конкретных видов травмирующего воздействия [2-4].

В настоящее время в биомеханике и судебной медицине стали распространены современные компьютерные технологии, позволяющие применять трехмерное программное моделирование объектов, математическое моделирование и т.д., что соответствует общему направлению на высокотехнологичные методы исследования в медицине. Все большее распространение приобретают методы и программные продукты, позволяющие визуализировать физические процессы. Для решения экспертных вопросов применяются данные из физики и математики, используются понятия и законы механики деформированного твердого тела, теории резания материалов и др.

Так, для оценки распределения энергии в твёрдых тканях применяется метод конечно-элементного анализа (англ. Finite Element Analysis, FEA, МКЭ), широко используемый при решении задач механики деформируемого твердого тела, электро- и

магнитостатики, газодинамики, а также других областей физики. Конечно-элементный анализ основан на использовании математического метода конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики, который применяется с 1950-х. В это время метод не получил широкого применения из-за низкого уровня вычислительной техники. С развитием технических возможностей расширились возможности применения метода. В настоящее время метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела в науке «сопротивление материалов», теплообмена, гидрогазодинамики и электродинамики [6, 7].

В современных условиях стало невозможно применение трассологических исследований на живых тканях, что приводит к сомнениям в достоверности результатов экспериментов и ценности исследования в целом. Перспективным методом исследования в этих условиях становится метод математического моделирования разрушения биологических тканей с учётом механических свойств биологических тканей и граничных условий [8-12, 15]. Целью настоящей работы было провести анализ возможности применения метода конечных элементов в современных условиях для решения задач в исследовании колото-резаных повреждений рёбер.

2. Методы исследования

Ребро представляет собой винтообразно изогнутый неправильный эллиптический цилиндр, состоящий из губчатой костной ткани с тонким слоем компактной костной ткани по наружной поверхности (Рис. 1).



Рис. 1. Фото нативного очищенного ребра. Стрелкой указана передняя плоская часть ребра.

Подготовка препаратов ребер проводилась следующим способом: в водном растворе лаурата натрия костные препараты обезжиривались, затем высушивались в течение 2-3 суток.

В некоторых случаях проводилось контрастирование графитовым порошком, который наносился на края повреждения для устранения бликов при фотографировании и микроскопии.

Также производили обезжиривание образца и оттенивание поверхности повреждения.

Для снижения отражения света при фотографировании и микроскопии колото-резаных повреждений, а также для увеличения контрастности отдельных элементов профиля костей производили оттенивание поверхности. Края повреждений костей обрабатывали 5% раствором йода и раствором бриллиантовой зелени (2%) с затем напыляли на поверхность повреждения мелкодисперсную сажу.

Далее макропрепараты костей исследовались при помощи бинокулярной лупы и стереомикроскопа МБС-10.

В натуральных экспериментальных исследованиях на биоманекенах были исследованы морфологические признаки повреждений ребра человека при ударном действии колюще-режущим предметом в условиях поступательного движения руки с ножом со скоростью до 10 м/с по плоской части передней трети закреплённого ребра при ориентации оси лезвия клинка ножа вдоль оси кости.

В экспериментальных исследованиях использовались данные клинка ножа: глубина погружения клинка 54 мм; ширина клинка на этом уровне погружения составила 17-17,5 мм; толщина клинка в средней части обуха была равна 1,2 мм; у ножа имелась выраженная зона острия (Рис. 2) [13, 16].



Рис. 2. Фото ножа, использованного в натуральных экспериментах.

Для визуализации и выяснения возможности математического моделирования процесса формирования повреждения ребра, возникающего в точке вкола, использовали МКЭ.

При программном математическом моделировании использовали программу ANSYS EXPLICIT DYNAMICS 2020 R2 [17], в которой создавали трехмерные графические модели клинка колюще-режущего следообразующего объекта и следовоспринимающего материала — кости.

ANSYS является одной из популярных программных сред конечно-элементного анализа, для решения линейных и нелинейных задач механики деформируемого твёрдого тела, разрабатываемых американской компанией Ansys inc. и применяемых для анализа разрушения твердых тел, в том числе и в судебной медицине.

Биофизические параметры ребра задавали как усредненные, полученные при исследовании различных участков ребра. Клинок ножа смоделирован по данным натурального эксперимента из стали со стандартными параметрами [18]. Была построена модель отрезка ребра с физическими параметрами губчатой кости: плотность 200 кг/м³, модуль Юнга 17000 МПа, предел текучести 110 МПа [19]. Сетка конечных элементов сгенерирована в автоматизированном режиме конечными элементами типа Solid, которые используются для моделирования объемного напряженно-деформированного состояния. Задано ограничение движение кости и клинка ножа перпендикулярно плоскости симметрии ребра. Смоделировано ударное действие клинка ножа в модели перпендикулярно оси ребра с силой 5000 Н и скоростью 10000 мм/с, при этом его движения ограничены во всех направлениях, кроме вертикального, с приложением сил по верхней поверхности модели клинка. Ребро нами расценивалось как балка с заделкой концов (консольное крепление) (Рис. 3).

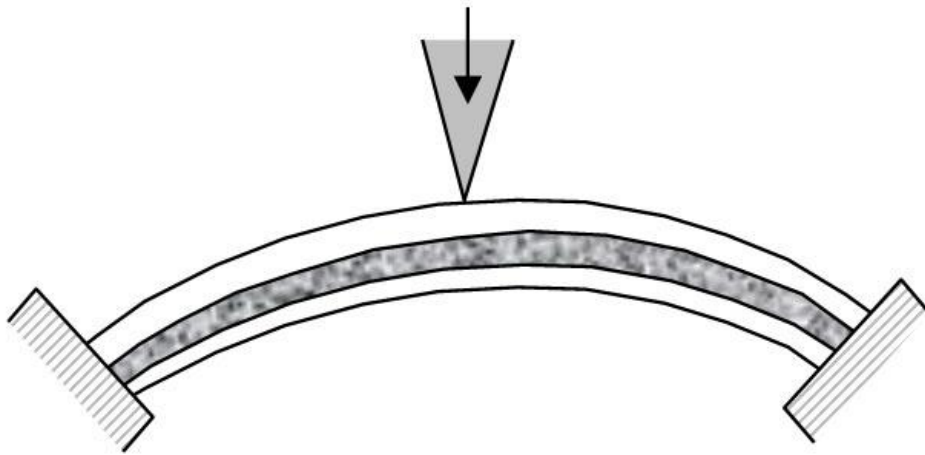


Рис. 3. Схема опирания ребра как балки с заделкой концов – консольное крепление.

3. Результаты и обсуждение

В проводимых натуральных экспериментах вдоль оси ребра сквозные повреждения повторяли форму односторонне острого клинка и отображали его форму поперечного сечения.

В зоне вкола обнаруживался дефект костной ткани с краями, образованными смятой костной тканью. Форма дефекта в точке вкола приближалась к равнобедренному треугольнику и соответствовала размерам зоны действия острия экспериментального ножа (Рис. 4).



Рис. 4. Вид колото-резаного повреждения ребра в натурном эксперименте (вид со стороны наружной костной пластинки).

В продолжении зоны смятия регистрировались ровные края повреждения костной ткани. Ровная, линейная зона разделения, параллельность противоположащих краев друг другу во всех плоскостях свидетельствовали о действии режущей кромки клинка на кость.

В профилограмме повреждений выделяются три зоны (рис. 5):

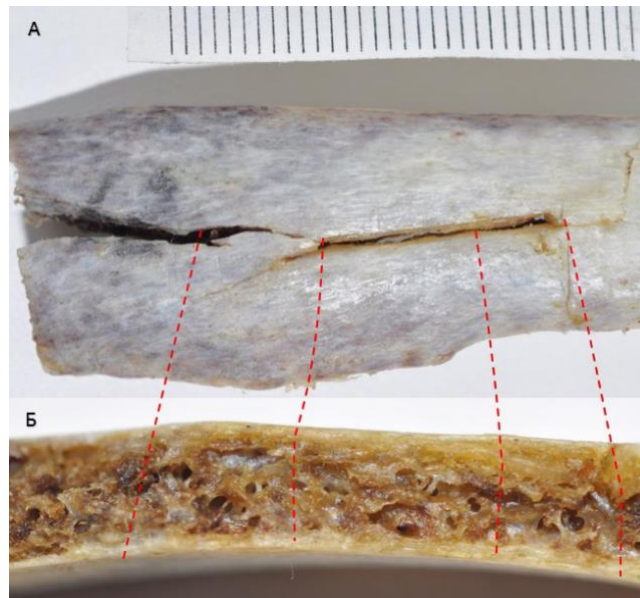


Рис. 5. Морфология колото-резаного повреждения ребра: а – вид со стороны наружной костной пластинки, б – профиль повреждения в кости. Линиями отмечены участки соответствия краев и стенок повреждения.

1. В зоне действия зоны острия ножа регистрируется продольное расслоение костной ткани, смятие (уплощение в поперечном направлении) ячеек губчатого вещества кости. Отмечается перенос осколков наружной костной пластинки вглубь повреждения. Соответственно действию ребра обуха клинка ножа отчетливо фиксируется невооруженным глазом участок зашлифованности (стертости, уплощения) компакты и губчатого вещества костной ткани. Указанное соответствие объясняется единым механизмом образования повреждений – торцевым резанием; профильное исследование стенок раневого канала повреждения позволяет четко определить точку вкола – зону действия острия клинка ножа. Характер деформации наружной костной пластинки и ячеек губчатого вещества позволяет дать оценку направления воздействия острия клинка и метрические характеристики острия клинка. Переход от первого участка ко второму регистрировался в виде углообразного изгиба края и стенки повреждения (рис. 6);



Рис. 6. Визуализация точки вкола колото-резаного повреждения ребра.

2. В участке действия лезвия (собственно резания) макроскопически деформация ячеек губчатой костной ткани отсутствует и определяется ровная плоскость отделения;

3. При исследовании участка зоны действия острия клинка ножа четко определяется плоскость разделения, которая была представлена в виде незначительно выступающих и западающих плавных волнистых участков. Наиболее выступающие участки кости имели выраженный блеск – это указывало на зашлифованность поверхности от действия полей заточки клинка (рис. 7). Указанный признак соответствует данным теории резания материалов: при продольном резании лезвие

перед собой формирует трещину распора, затем поля заточки воздействуя на стенки, обеспечивают погружение клина лезвия.



Рис. 7. Участок резания на стенке колото-резаного повреждения ребра: визуализируются мелкие осколки костной ткани (а - общий план стенки колото-резаного повреждения, б – микрофотография зоны опережающей трещины).

В результате математического моделирования методом конечно-элементного анализа получены результаты:

1. При воздействии клинка ножа происходит критическое нагружение костной ткани с её разрушением и формированием сквозного повреждения. На Рис. 8 изображен последний этап моделирования сквозного проникновения клинка ножа вдоль оси ребра с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу в различных отделах костной раны – максимальные эквивалентные напряжения возникают в зоне действия острия ножа на границе с обушковой частью в размере 223,3 МПа, смещением и деформацией конечных элементов в наружной поверхности по оси действия клинка модели ножа.

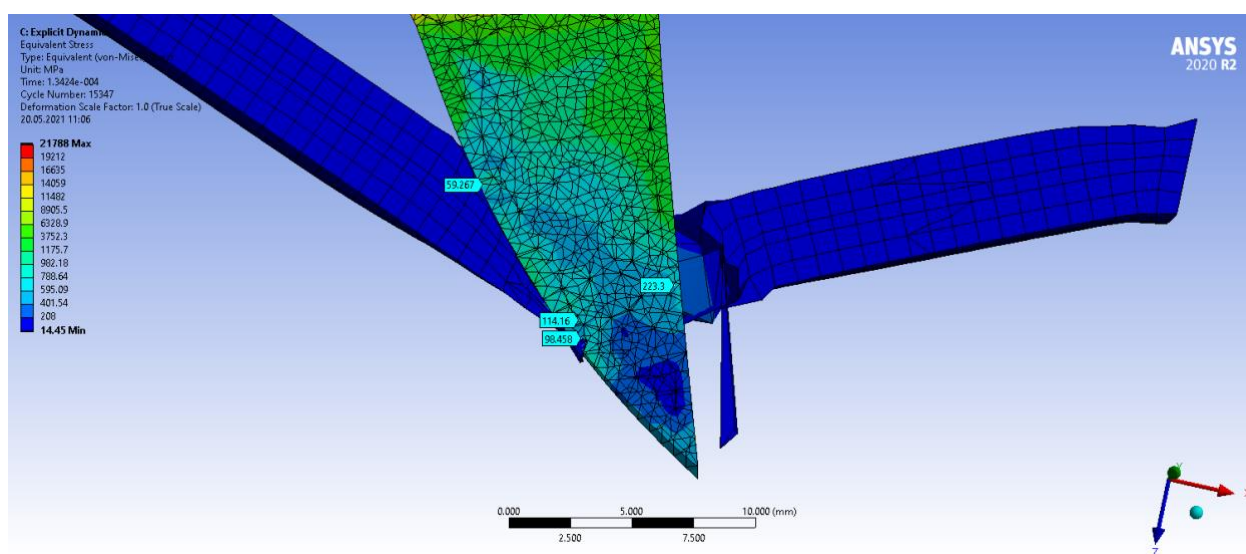


Рис. 8 Математическая модель формирования повреждения ребра при действии колюще-режущего предмета. Эквивалентные напряжения по Мизесу.

2. При формировании повреждения ребра лезвием клинка ножа происходит смещение фрагментов костной ткани по направлению и в зоне действия зоны острия клинка ножа с максимальной концентрацией эквивалентных напряжений на границе действия зоны острия (114,16 МПа), что указывает на изменение торцевого типа резания на продольный, что отображено на Рис. 9.

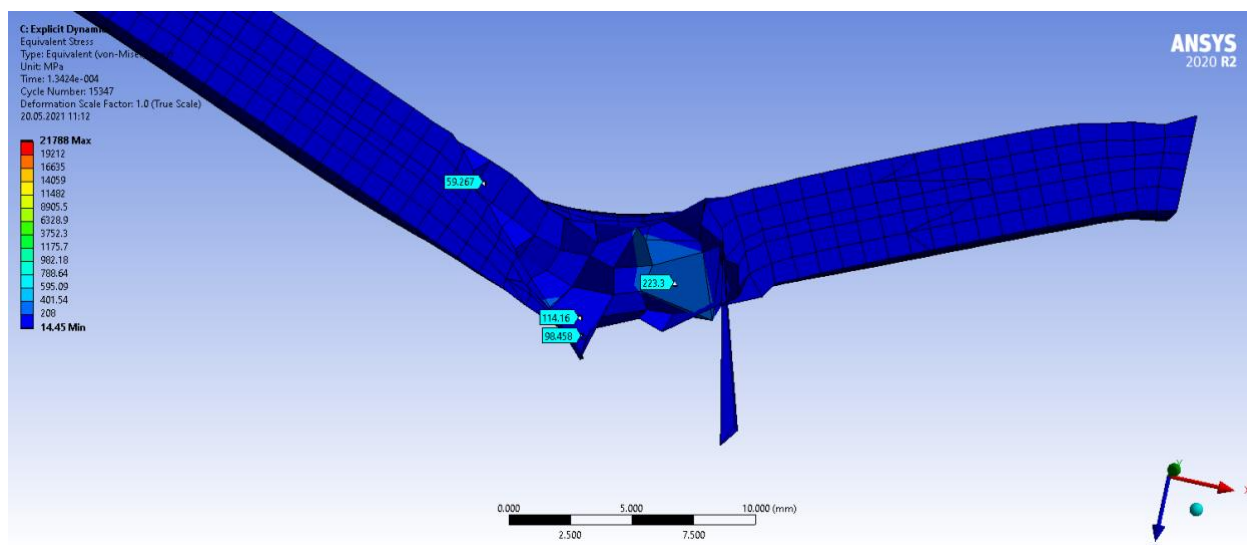


Рис. 9 Математическая модель формирования повреждения ребра при действии колюще-режущего предмета. Эквивалентные напряжения по Мизесу. Стрелкой указано место концентрации эквивалентных напряжений при резании.

3. При анализе сдвиговых напряжений в области костной раны установлено, что максимальная концентрация эквивалентных напряжений костной ткани на границе действия зоны острия формируется преимущественно за счёт сдвиговой деформации и составляет 36,378 МПа (Рис. 10).

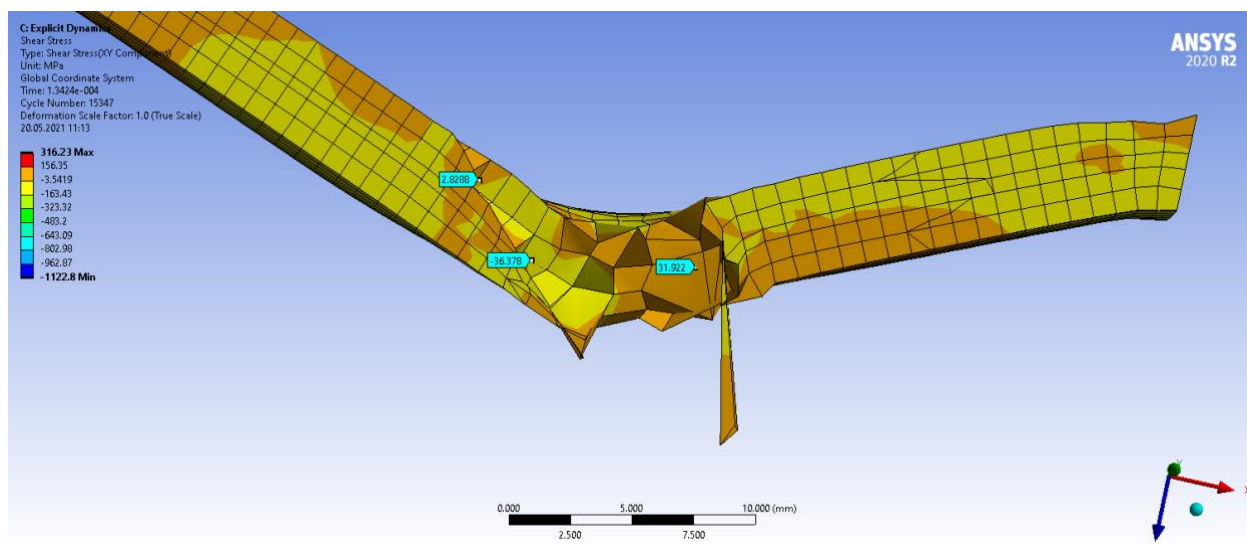


Рис. 10 Математическая модель формирования повреждения ребра при действии колюще-режущего предмета. Сдвиговые напряжения. Стрелкой указано место концентрации сдвиговых напряжений.

При сравнении результатов натуральных экспериментов и конечно-элементного анализа разрушения ребра от колюще-режущего действия клинка ножа установлено полное соответствие расположения зон костной раны и морфологических особенностей в профилограммах повреждений (Рис. 11):

- Обнаруживается зона действия острия ножа (точка вкола), проявляющаяся участком сдавливания, деформации и смещения элементов наружных пластинок внутрь повреждения с максимальной концентрацией эквивалентных напряжений;
- В зоне действия лезвия ножа отмечается смятие и смещение конечных элементов поперечно оси действия клинка ножа с минимальной концентрацией эквивалентных напряжений;
- На границе этих двух зон определяется всплеск эквивалентных напряжений за счёт сдвиговой деформации, указывающий на изменение торцевого типа резания на продольный и окончании зоны острия клинка ножа.

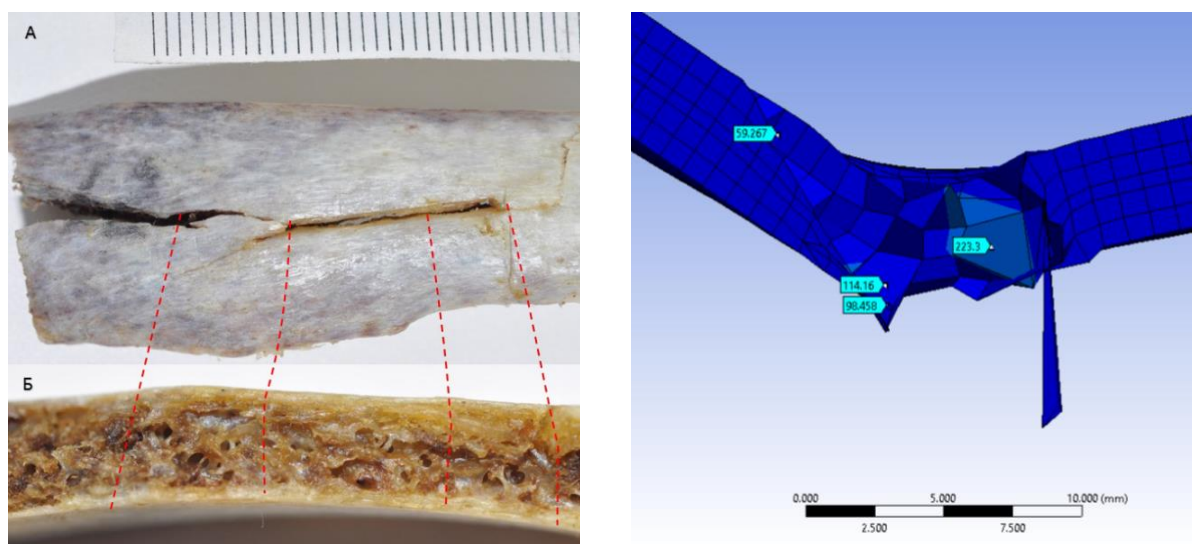


Рис. 11. Сравнение профилограммы экспериментального натурального повреждения (слева) и профиля результатов конечно-элементного моделирования (справа).

Отмечается сходство расположения и морфологии зон повреждения кости.

В математической модели прослеживаются все основные морфологические признаки нативного экспериментального колото-резаного повреждения ребра. В результате сравнительного исследования мы смогли установить возможность использования метода конечно-элементного анализа для исследования колото-резаных повреждений и обосновали морфологическую основу точки перехода торцевого резания в продольное на границе действия зоны острия ножа.

4. Заключение

Таким образом, применение математического моделирования МКЭ позволяет визуализировать и прогнозировать напряжения, возникающие в следовоспринимающем материале при воздействии выраженной зоны острия клинка колюще-режущего предмета. Полученные при моделировании данные подтверждаются результатами оригинальных натуральных экспериментов [13].

Необходимо отметить, что в настоящий момент в связи со слабым внедрением МКЭ в экспертную практику авторы статьи не могут оценить, насколько достоверно данный метод позволит прогнозировать процесс разрушения биологических объектов при различных видах механического воздействия, а также оценить объем практического использования и востребованность в судебной медицине математического моделирования МКЭ. В судебной медицине отсутствуют какие-либо методики по математическому анализу и моделированию процесса разрушения биологических объектов в результате воздействия механических факторов, поэтому мы считаем использование МКЭ в настоящий момент наиболее перспективным.

Данные иностранных источников по использованию МКЭ в моделировании падения, поведения имплантов в костной ткани, разрушения кожи позволяют предполагать высокую эффективность метода [11, 12, 14].

Применение в судебной медицине МКЭ в перспективе позволит достоверно прогнозировать процесс разрушения биологических объектов при различных видах механического воздействия с дальнейшей визуализацией, а в последующем, возможно, решать и обратную задачу — по морфологической картине разрушения высказываться о трасологических свойствах травмирующего орудия.

Список литературы

1. Кириллов В.И., Старченко А.А. Логика: Учебник для юридических вузов. — Изд. 5-е, перераб. и доп. — М.: Юристъ, 1999. — 256 с.
2. Леонов С.В., Крупин К.Н. Судебно-медицинская оценка морфологии колото-резаных ран, сформированных клинками ножей с различными дефектами острия / Медицинская экспертиза и право. 2012. № 1. С. 37-39.
3. Крупин К.Н., Власюк И.В. Отображение эксплуатационных дефектов острия колюще-режущего орудия в повреждениях кожного покрова / Медицинская экспертиза и право. 2013. № 2. С. 28-31.
4. Кислов М.А., Леонов С.В. Использование метода конечных элементов для прогнозирования разрушения колото-резаных повреждений плоских костей / Медицинская экспертиза и право. 2016. № 3. С. 22-24.
5. Леонов С.В., Кислов М.А. Морфологические особенности колото-резаных повреждений ребер при воздействии колюще-режущим предметом вдоль компакты / Медицинская экспертиза и право. 2015. № 3. С. 21-23.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М: Мир 1975; 318.
7. Леонов С.В., Пинчук П.В., Крупин К.Н., Панфилов Д.А. Математическое моделирование травмирующего воздействия на большеберцовую кость для оценки условий образования перелома / Судебно-медицинская экспертиза. 2017. Т. 60. № 2. С. 11-13. <https://doi.org/10.17116/sudmed201760211-13>
8. M. Milanowicz, K. Kedzior Active numerical model of human body for reconstruction of falls from height / Forensic Science International (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.10.009>
9. Panfilov D.A., Romanchikov V.V., Krupin K.N. Solving cross-disciplinary problems by mathematical modelling / В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. С. 022080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022080>
10. Пинчук П.В., Крупин К.Н., Петров В.В., Леонов С.В. Визуализация и теоретическое обоснование механизма формирования ложного отломка, образующегося при выстреле пулевым зарядом из гладкоствольного карабина с дистанции в упор / Научная визуализация. 2018. Т. 10. № 2. С. 15-28 <https://doi.org/10.26583/sv.10.2.02>
11. Terzini, M., Aldieri, A., Nurisso, S., De Nisco, G., Bignardi, C. Finite Element Modeling Application in Forensic Practice: A Periprosthetic Femoral Fracture Case Study / Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Volume 8, 23 June 2020, 619 DOI: 10.3389/fbioe.2020.00619
12. H. Muggenthaler, M. Hubig, A. Meierhofer. G. Mall Slip and tilt: modeling falls over railings / International Journal of Legal Medicine volume 135, pages245–251 (2021) <https://doi.org/10.1007/s00414-020-02432-8>
13. Кислов М.А. Морфология и механика разрушения костной ткани под действием колюще-режущих орудий: диссертация ... доктора Медицинских наук: 14.03.05 / Кислов Максим Александрович; - Москва, 2016.- 241 с.

14. Леонов С.В., Власюк И.В., Крупин К.Н. Моделирование механизма образования колото-резаных ран методом конечных элементов / Судебно-медицинская экспертиза. 2013. Т. 56. № 6. С. 14-16.
15. Крупин К.Н. Современные возможности применения математического моделирования методом конечных элементов в судебной медицине / Вестник медицинского института "РЕАВИЗ": реабилитация, врач и здоровье. 2017. № 6 (30). С. 127-132.
16. Леонов С.В., Кислов М.А. Морфология профиля плоских костей при колото-резаных повреждениях / Медицинская экспертиза и право. 2015. № 4. С. 10-11.
17. ANSYS® EXPLICIT DYNAMICS 2020, Release 2 <https://www.ansys.com/>
18. Structural steel fatigue data at zero mean stress, ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1, (1998).
19. Martin, R. B. Skeletal Tissue Mechanics / R. B. Martin, D. B. Burr, N. A. Sharkey. – New-York : Springer, 1998. – P. 347.

Visualization of Morphology by Rib Destruction When Exposed to A Stab-Cut Object

M.A. Kislov¹, K.N. Krupin²

I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University)

¹ ORCID: 0000-0002-9303-7640, kislov@1msmu.ru

² ORCID: 0000-0001-6999-8524, krupin@1msmu.ru

Abstract

This paper discusses the establishing and visualization of the morphological signs of stab injury to the rib with field experiments and mathematical modeling. We reveal the regularities of the load distribution in the bone tissue in this type of injury. With the help of objective research methods, the localization of the action zone of the knife blade tip and the transition of end cutting to longitudinal cutting with subsequent visualization is explained. The application of the method of finite element analysis of stab injury of bone tissue is proposed.

Keywords: finite element analysis, stab injury, visualization, rib.

References

1. Kirillov V.I., Starchenko A.A. Logika: Uchebnik dlya yuridicheskikh vuzov. — Izd. 5-e, pererab. i dop. — M.: YUrist", 1999. — 256 p. [in Russian]
2. Leonov S.V., Krupin K.N. Sudebno-medicinskaya ocenka morfologii koloto-rezanyh ran, sformirovannyh klinkami nozhej s razlichnymi defektami ostriya // Medicinskaya ekspertiza i pravo. 2012. № 1. P. 37-39.
3. Krupin K.N., Vlasyuk I.V. Otobrazhenieekspluatacionnyhdefektovostriyakolyushche-rezhushchegoorudiya v povrezhdeniyahkozhnogopokrova// Medicinskayaekspertiza i pravo. 2013. № 2. P. 28-31.[in Russian]
4. Kislov M.A., Leonov S.V. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlya prognozirovaniya razrusheniya koloto-rezanyh povrezhdenij ploskih kostej// Medicinskaya ekspertiza i pravo. 2016. № 3. P. 22-24. [in Russian]
5. Leonov S.V., Kislov M.A. Morfologicheskie osobennosti koloto-rezanyh povrezhdenij reber pri vozdejstvii kolyushche-rezhushchim predmetom vdol' kompakty// Medicinskaya ekspertiza i pravo. 2015. № 3. P. 21-23. [in Russian]
6. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike. M: Mir 1975; 318. [in Russian]
7. Leonov S.V., Pinchuk P.V., Krupin K.N., Panfilov D.A. The mathematical modeling of the injurious impact on the tibial bone for the evaluation of the conditions leading to its fracture // Forensic Medical Expertise. 2017. Volume. 60. № 2. P. 11-13. <https://doi.org/10.17116/sudmed201760211-13>
8. M. Milanowicz, K. Kedzior Active numerical model of human body for reconstruction of falls from height // Forensic Science International (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.10.009>
9. Panfilov D.A., Romanchikov V.V., Krupin K.N. Solving cross-disciplinary problems by mathematical modelling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 022080. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022080>
10. Pinchuk P.V., Krupin K.N., Petrov V.V., Leonov S.V. Specific fractures of the diaphysis of the femur formed by a traumatic multicomponent bullet shot charge from a smoothbore carbine "saiga 12k" at a distance in focus, visualization and theoretical study of

the fragment formation mechanism about them // Scientific Visualization. 2018. Volume. 10. № 2. P. 15-28 <https://doi.org/10.26583/sv.10.2.02>

11. Terzini, M., Aldieri, A., Nurisso, S., De Nisco, G., Bignardi, C. Finite Element Modeling Application in Forensic Practice: A Periprosthetic Femoral Fracture Case Study // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Volume 8, 23 June 2020, 619 DOI: 10.3389/fbioe.2020.00619

12. H. Muggenthaler, M. Hubig, A. Meierhofer. G. Mall Slip and tilt: modeling falls over railings // International Journal of Legal Medicine volume 135, pages245–251 (2021) <https://doi.org/10.1007/s00414-020-02432-8>

13. Kislov M.A. Morfologiya i mekhanika razrusheniya kostnoj tkani pod dejstviem kolyushche-rezhushchih orudij: dissertaciya ... doktora Medicinskih nauk: 14.03.05 // Kislov Maksim Aleksandrovich; - Moskva, 2016.- 241 p. [in Russian]

14. Leonov S.V., Vlasiuk I.V., Krupin K.N. Simulation of the mechanisms of formation of stab and slash wounds by the finite element method // Forensic Medical Expertise. 2013. volume. 56. № 6. P. 14-16.

15. Krupin K.N. Current application possibility of mathematical modeling using the finite element method in forensic medicine//Vestnik medicinskogo instituta "REAVIZ": reabilitaciya, vrach i zdorov'e. 2017. № 6 (30). P. 127-132.

16. Leonov S.V., Kislov M.A. The morphology of the profile flat bones with stab injuries / Medicinskaya ekspertiza i pravo. 2015. № 4. P. 10-11.

17. ANSYS®EXPLICIT DYNAMICS 2020, Release 2 <https://www.ansys.com/>

18. Structural steel fatigue data at zero mean stress, ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1, (1998).

19. Martin, R. B. Skeletal Tissue Mechanics / R. B. Martin, D. B. Burr, N. A. Sharkey. – New-York : Springer, 1998. – P. 347.