

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РЕЖИМОВ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ОСТЕОСИНТЕЗА С УЧЕТОМ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Рассмотрены проблемы экспериментальной оценки деформаций систем остеосинтеза длинных костей. Предложены способы оценки деформационной надежности этих систем при длительных или неоднократных механических воздействиях. Показаны преимущества использования циклических режимов испытаний по сравнению с традиционными квазистатическими или, иначе говоря, однократными, с медленно изменяющимися нагрузками. Установлено, что показатели надежности систем остеосинтеза, измеренные в процессе циклических испытаний, более чувствительны к типу устройства фиксации и могут быть использованы для ранжирования этих систем по степени механической надежности.

Ключевые слова: физиологические нагрузки, деформации, жесткость фиксации, остеосинтез, натурное моделирование.

Введение

Деформации, возникающие в системах остеосинтеза (ОС) при воздействии внешних и внутренних физиологических нагрузок, могут привести к наращению остеорепарации и, в конечном итоге, увеличить время лечения пациента. Системой ОС будем называть любую систему, применяемую для фиксации отломков костей, т.е. комплекс «отломки кости — устройство фиксации перелома». Под деформациями будем понимать не только абсолютные перемещения точек системы ОС, но и взаимные смещения смежных точек перелома.

С точки зрения традиционной механики уменьшение деформаций системы (повышение её жесткости) в большинстве случаев является однозначно положительным фактором. Последнее утверждение применительно к переломам длинных костей не столь очевидно. Некоторые вопросы влияния смещений отломков и оценка их допустимых значений на процессы регенерации костной ткани (КТ) при действии внешних нагрузок были рассмотрены в докладе¹.

Особенности биомеханических исследований систем ОС. Если использовать чисто механические подходы, то процессы деформирования систем ОС ничем не отличаются от процессов де-

формирования на любых, изучаемых в сопротивлении материалов, конструкций: действие внешних сил и моментов этих сил — влияние сопутствующих факторов — результат в виде деформаций (рис.1). Для оценки стабильности характеристик систем ОС следует, прежде всего ответить на такие вопросы: как система сопротивляется однократному действию нагрузки; как реагирует система на однократное изменение нагрузки; как происходит процесс накопления деформаций при многократном воздействии нагрузок (рис.2).

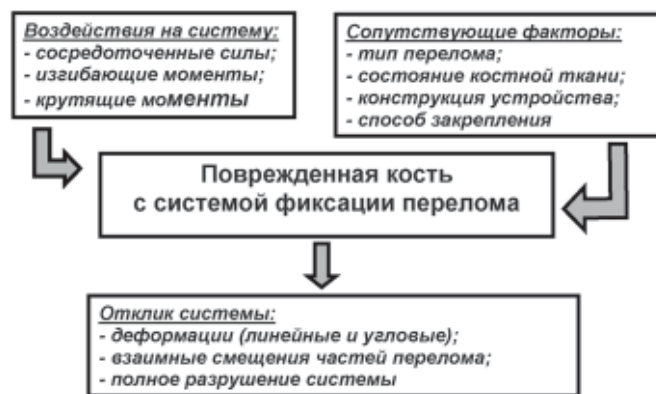


Рис. 1. Общая схема воздействий внешних факторов на системы остеосинтеза

В большинстве работ в экспериментальной биомеханике ОС [2, 5] рассматривались только статические (однократные) нагрузки, т.е. первые два вопроса. В наших исследованиях [1, 4, 6, 8] вопросы однократного деформирования систем ОС также рассмотрены и, как правило, проблем с испытаниями не возникало. При этом использовался один или несколько видов деформирования систем (компрессия, растяжение, изгиб или кручение) с записью диаграмм деформирования.

Однако, как показывает практика, многократные нагрузки приводят к более высоким уровням деформаций и смещений в месте перелома. Разрушение может наступить при меньших нагрузках, чем при однократных воздействиях. В связи с этим в последнее время при проведении экспериментов, проводимых в лаборатории биомеханики НТУУ «Киевский политехнический институт» с участием коллектива инженеров и хирургов-травматологов, используются также циклические режимы нагружения систем ОС [1, 4, 6, 7]. Это, на

¹ Попсуйшапка О.К., Літвишко В.О., Ярьсько О.В. Напруження регенерату та «допустимі» переміщення відламків при загоєнні діафізарного перелому (доповідь на Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми біомеханіки та медичного матеріалознавства», Київ, 21-22 листопада 2013 р.)



Рис. 2. Основные вопросы надежности систем остеосинтеза и способы испытаний

наш взгляд, более адекватно воспроизводит физиологические нагрузки, включая ходьбу.

Построение программы натуральных испытаний.

Аналитические расчеты уровней напряжений и деформаций, возникающих в системах фиксации переломов (СФП) и в соединяемых отломках костей, является достаточно сложной проблемой. В первую очередь это связано с особенностями механических характеристик костной ткани и сложной конфигурацией биологических объектов.

Натурные исследования поведения систем ОС на натуральных препаратах при реальных видах и уровнях физиологических нагрузок в настоящее время являются, на наш взгляд, наиболее достоверными и простыми способами оценки качества и надежности указанных систем. Все наши исследования проводились экспериментальным путем с применением трупных препаратов.

Каждое испытание системы ОС является достаточно трудоемким процессом. Для получения максимально большего количества информации мы с повышенным вниманием относимся к выбору способов оценки надежности систем ОС. Основное, на что мы обращаем внимание: уровень нагрузок должен находиться в пределах реального диапазона; количество точек, в которых

измеряются деформации и перемещения, должно быть максимально возможными.

Исследования состояли из следующих этапов: 1 – выбор параметров, которые характеризуют надежность средств фиксации переломов; 2 – разработка и создание средств измерения этих параметров; 3 – измерение характеристики различных систем фиксации переломов; 4 – анализ результатов и выбор оптимального с точки зрения надежности способа фиксации.

Основные принципы построения программы исследований заключались в следующем: 1 – измерение общих деформаций системы ОС под действием внешних нагрузок; 2 – измерение взаимных смещений отломков кости; 3 – выявление опасных видов и уровней нагрузки.

Режимы испытания были максимально приближены к реальным режимам физиологических нагрузок: 1 – исследовались действия компрессионных, изгибных и скручивающих нагрузок, действующих на кость с моделированным переломом и системой фиксации; 2 – кроме статических испытаний исследованы действия циклической нагрузки (имитация ходьбы).

Все эти подходы были учтены при разработке общего алгоритма биомеханических испытаний

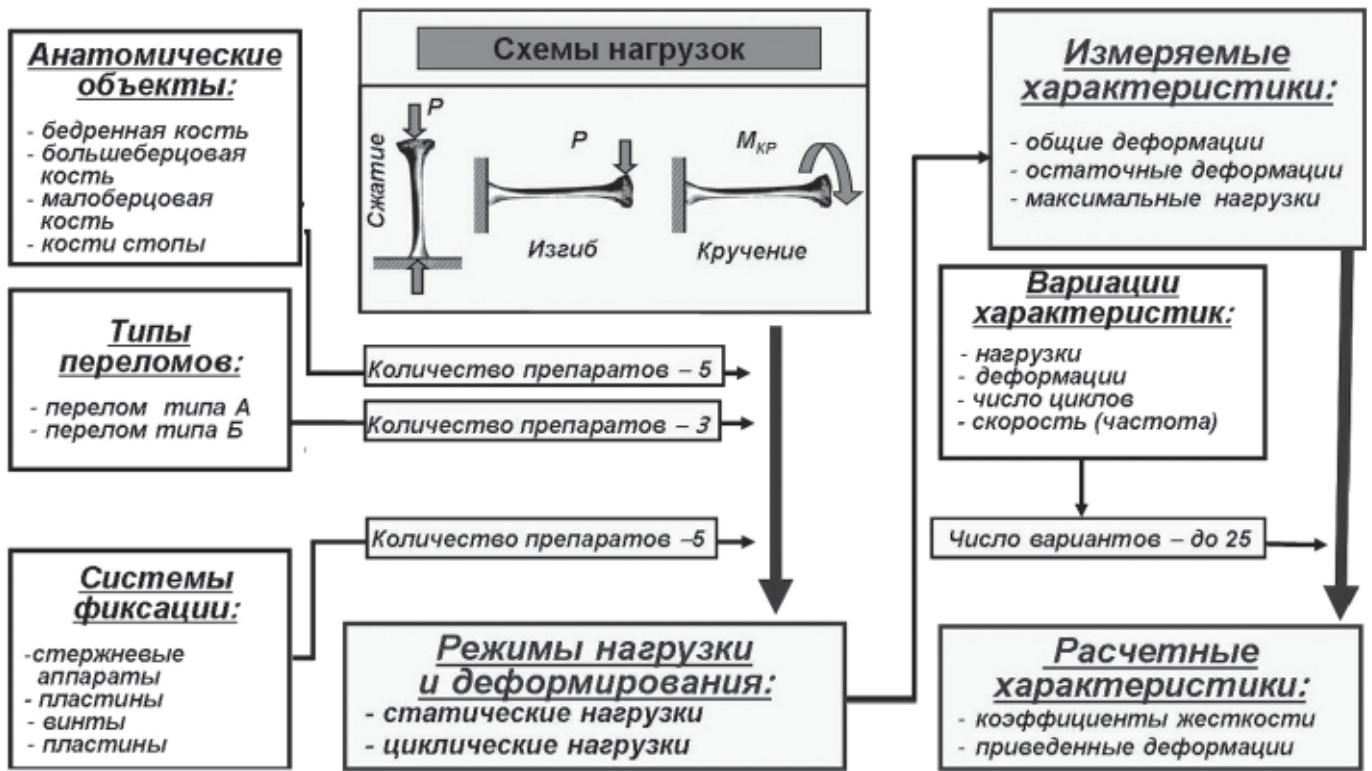


Рис. 3. Блок-схема комплексных исследований деформационной надежности систем остеосинтеза с учетом статических и циклических нагрузок

систем ОС (рис. 3). Как правило, в процессе испытаний производилась корректировка программы с учетом результатов предварительных и промежуточных экспериментов.

Для экспериментов использовали базовую испытательную систему, описанную в работе [6]. Указанная система включает устройство нагрузки и блок измерения перемещений точек препаратов с точностью ± 0.01 мм. При проведении экспериментов задавали и контролировали нагрузки, действующие на объект. Возможна имитация действия нагрузок, циклически изменяющихся в заданных диапазонах от 10 до 1000 Н. Испытательная система создает деформации сжатия, растяжения, изгиба и кручения препаратов. Фото- и видеокамеры регистрировали линейные и угловые перемещения точек препаратов.

На первом этапе для получения базовых (опорных) данных испытывали неповрежденную кость. Затем – препарат с моделированным переломом и исследуемой системой ОС.

Особенности регистрации взаимного смещения смежных точек перелома кости под действием сосредоточенных сил, изгибающих и крутящих моментов, приложенных к исследованным системам ОС, подробно рассмотрены в нашей работе [8]. Регистрацию перемещений выполняли методом цифровой фотографии с последующей компьютерной обработкой. На рис. 4 показаны задаваемые характеристики цикла испытаний

(верхний рисунок) и регистрируемые показатели (нижний рисунок).

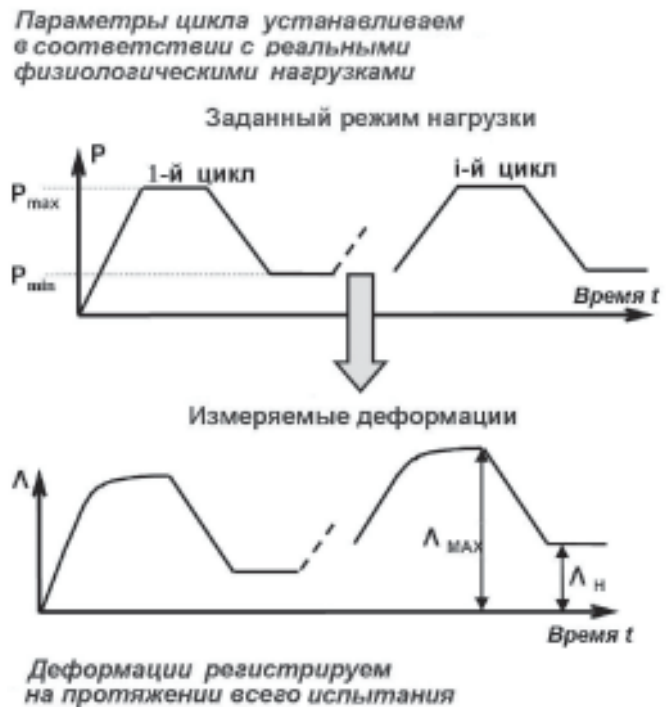


Рис. 4. Схемы (развертка во времени) процесса нагружения препаратов P и регистрации перемещения (смещения отломков) Δ .

Число циклов нагружения ограничивали 50-ми. Как показали предварительные эксперименты, увеличение числа циклов не приводило к изменению соотношения деформаций неповрежденных и поврежденных препаратов (рис. 5).

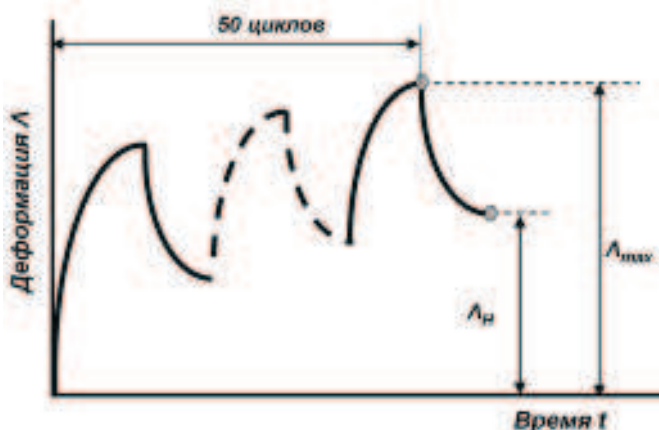


Рис. 5. Обработка кривых циклического деформирования (измерение максимальных Δ_{max} и необратимых Δ_n деформаций)

Для дальнейшего анализа использовали:

- максимальную деформацию Δ_{max} , которая была измерена в конце 50-го цикла (регистрируется в момент, предшествующий снятию нагрузки);
- необратимую деформацию Δ_n , которая была накоплена в объекте в течении 50 циклов и не исчезала после разгрузки препарата (остаточная или задержанная деформация).

Для сравнения деформаций неповрежденных (исходных) препаратов и деформаций костей с моделированными переломами и системами фиксации (рис. 6) в последующем изложении введены следующие обозначения:

$$\Psi_{max} = \Delta_{max}^c / \Delta_{max}, \quad \Psi_n = \Delta_n^c / \Delta_n,$$

где числители – это перемещения поврежденных препаратов с системами ОС, знаменатели – перемещения точек исходных объектов.

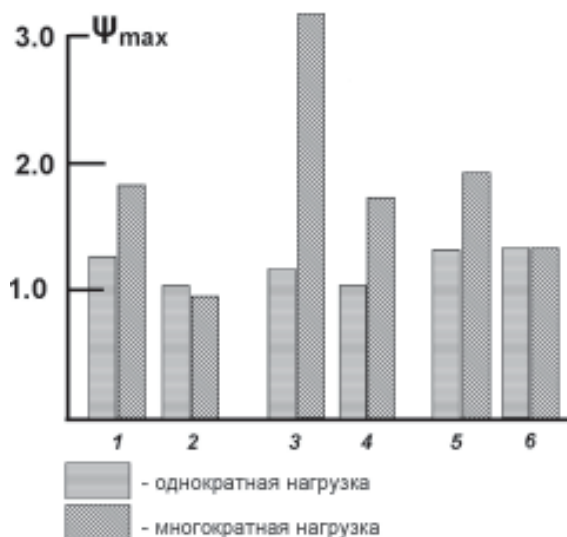


Рис. 6. Соотношения перемещений поврежденных и неповрежденных препаратов под нагрузкой: 1-2 – вертлюжный участок бедренной кости, 3-4 – диафиз большеберцовой кости, 5-6 – проксимальный эпифиз большеберцовой кости; 1 – угловая пластина, 2 – эндопротез, 3 – пластина с минимальным контактом, 4 – пластина с угловой стабильностью, 5 – стандартный винт, 6 – винт со встречной компрессией.

Результаты и их обсуждение

Сопоставление максимальных деформаций (использование параметра Ψ_{max}). Рассмотрим несколько примеров оценки деформационной надежности систем ОС по предложенной методике (рис. 6).

Пример 1. Способ циклического нагружения использован при испытаниях систем ОС вертлюжной части бедренной кости [7]. Результаты показали следующее (сравнительные диаграммы 1 и 2 на рис. 6):

- фиксация отломков угловой пластиной показывают низкую стабильность под действием нагрузок (диаграммы 1, увеличение перемещений точек поврежденной кости с фиксатором кости в 1.3 – 1.8 раз по сравнению с неповрежденным препаратом). Закрепление эндопротезом придает препаратам повышенную сопротивляемость внешним нагрузкам, как при однократном, так и при многократном нагружении (Ψ_{max} близко к единице).
- различие между показателями деформационной надежности при циклическом нагружении (диаграммы 1, правый столбик) существенно больше, чем при однократном нагружении (левый столбик). Это показывает большую чувствительность данных систем ОС к циклическому нагружению, чем к статическому.

Пример 2. Подобные результаты показали испытания [1] большеберцовых костей с системами ОС в виде пластин с минимальным контактом (рис. 6, диаграммы 3) и пластин с угловой стабильностью (рис. 6, диаграммы 4).

Пластины с угловой стабильностью показывают большую стабильность по сравнению с пластинами с минимальным контактом. Разница между показателями деформационной надежности Ψ_{max} в режиме циклического нагружения (правые столбики) существенно больше, чем при однократной нагрузке (левые столбики). Это показывает, что метод испытания с использованием циклических нагрузок позволяет более обоснованно выбирать пластины с повышенной деформационной надежностью.

Пример 3. Использованы данные, полученные при изучении надежности фиксации переломов эпифиза большеберцовой кости с помощью винтов различных конструкций [3]. Результаты обработаны по вышеприведенной методике и представлены на рис. 6 (диаграммы 5 – стандартные винты, 6 – винты с встречной компрессией).

Из диаграммы видно, что применение винтов

с встречной компрессией снижает циклические деформации практически до уровня статических, полученных при однократной нагрузке. Сопоставление уровней только статических деформаций (левые столбики) не показывает преимущества указанного закрепления.

Пример 4. На рис. 7 представлены результаты измерений перемещений точек перелома большеберцовой кости с переломом в области диафиза, зафиксированного стержневым аппаратом внешней фиксации, при изгибе и кручении [4]. Видно, что при таком способе фиксации и циклическом приложении нагрузки отличие поврежденных и неповрежденных препаратов существенно больше, чем при однократной нагрузке.

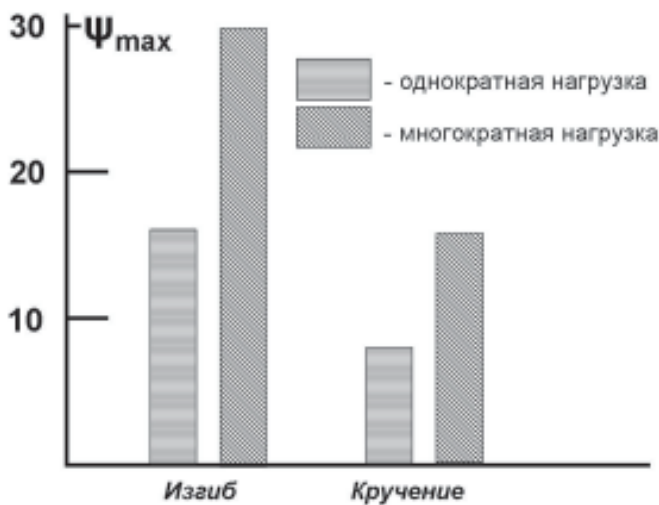


Рис. 7. Результаты испытаний перелома большеберцовой кости со стержневым аппаратом внешней фиксации.

Необходимо отметить, что значения характеристики Ψ_{max} в данном примере существенно больше, чем в примерах 1-3. Это связано с тем, что деформации системы, в которой применяется аппараты внешней фиксации, намного больше, чем в системах с наkostными и чрескостными фиксаторами (пластины, винты, эндопротезы).

Сопоставление необратимых деформаций (использование параметра Ψ_n). Все предыдущие примеры основаны на измерении максимальных деформаций Λ_{max} , измеренных в конце последнего цикла при действии нагрузки P_{max} . Представляет интерес оценить накопленные («остаточные», не исчезающие после разгрузки) деформации Λ_n . Эти деформации являются результатом смятия (необратимой деструкции) костной ткани преимущественно в месте закрепления элементов фиксации перелома. Они повышают общий уровень деформаций, вызывает расшатывание винтов или фиксирующих стержней и, в конечном итоге, снижают надежность системы ОС в целом.

Пример 5. На рис. 8 показано соотношение накопленных деформаций Λ_n (рис. 5) и деформаций, возникших на первом цикле нагружения Λ_1 (упругие, полностью обратимые деформации):

$$\Psi_n = (\Lambda_n / \Lambda_1) \cdot 100\% .$$

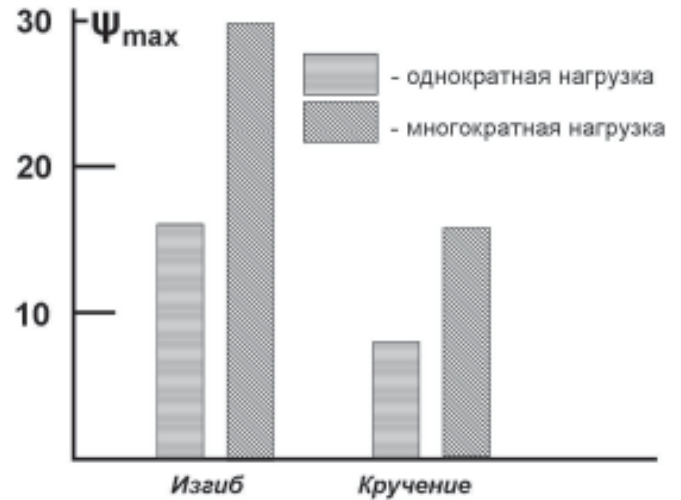


Рис. 8. Соотношения необратимых и упругих деформации БК с СТАВФ при сжатии, изгибе и кручении

Из диаграммы видно, что уровень деформаций, накопленных при циклически прикладываемых нагрузках, а следовательно и надежность фиксации, существенно зависят от вида нагружения (сжатие, изгиб, кручение). Данными экспериментами, например, показана опасность приложения крутящих моментов (возникают наибольшие необратимые деформации).

Выводы

1. При проведении экспериментальных исследований следует обращать внимание не только на мгновенно полученные деформации, но и на деформации (смещения в области переломов), развивающиеся во времени при многократных нагрузках.
2. Необратимые (неисчезающие) деформации могут являться одним из важных показателей надежности систем остеосинтеза.
3. По результатам испытаний можно производить ранжирование разных систем остеосинтеза по уровням надежности.
4. Следующим этапом исследований может быть обобщение накопленных данных и создание методов прогнозирования поведения систем остеосинтеза не только при однократных, но при многократных (циклических) нагрузках.

Литература

1. Анкін М.Л. Експериментально-біомеханічні випробування накісткового остеосинтезу при переломах діафіза великогомілкової кістки / М.Л. Анкін,

- Л.М. Анкін, Н.С. Шидловський, Сатишев М.М. // Вісник ортопедії, травматології та протезування. – 2011, – № 1 (68). – С. 68-73.
2. Биомеханический анализ вариантов остеосинтеза диафизарных переломов ключицы / А.Г.Шайко-Шайковский, С.В. Билык, И.С. Олексюк, М.Е. Белов // Травма. – 2011, – Том 12, №.4. – С. 67-71.
 3. Біомеханічні характеристики різних способів фіксації переломів в області колінного суглоба / Шидловський М.С., Бур'янов О.А., Лакша А.М. та ін. // Літопис травматології та ортопедії. – 2013, № 3-4. – С. 43-48.
 4. Лакша А.М., Шидловський М.С. Біомеханічні характеристики стрижньових систем фіксації великогомілкової кістки при короткочасних та циклічних навантаженнях // Літопис травматології та ортопедії. – 2011, № 1-2. – С. 29-35.
 5. Скрипкин С.П. Сравнительная биомеханическая характеристика на костных фиксаторов LCP и LC-DCP / С.П. Скрипкин, Ю.А. Барабаш, С.П. Шпиняк / Achievement of high school – 2011: материалы за VII международна научна практична конференция. София: «Бял ГРАД-БГ», 2011. – Т.24. Лекарство. – С.12-18.
 6. Шидловський Н.С. Критерии деформационной надежности систем остеосинтеза // Літопис травматології та ортопедії. – 2012, № 1-2. – С. 120-125.
 7. Шидловський Н.С. Механічні дослідження різних способів з'єднання переломів вертлюгової ділянки стегнової кістки людини / Н.С. Шидловський, Л.М. Юрійчук, Д.Ю. Шпак // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", Серія Машинобудування, – К: 2010, – № 59. – С. 271-276.
 8. Шидловський М.С. Уніфікація характеристик деформування в біомеханічних дослідженнях систем остеосинтезу / М.С. Шидловський, А.М. Лакша, Д.Ю. Шпак // Літопис травматології та ортопедії. – 2013, № 1-2. – С.113-117.

Н.С. Шидловський, А.М. Лакша, М.М. Димань
Особливості вибору режимів біомеханічних натурних випробувань систем остеосинтезу з урахуванням циклічних навантажень

Розглянуто проблеми експериментальної оцінки деформацій систем остеосинтезу довгих кісток. Запропоновані способи оцінки деформаційної надійності цих систем при тривалих або неодноразових механічних впливах. Показано переваги використання циклічних режимів випробувань у порівнянні з традиційними квазистатичними або, інакше кажучи, однократними, з повільно змінними навантаженнями. Встановлено, що показники надійності систем остеосинтезу, виміряні в процесі циклічних випробувань, більш чутливі до типу пристрою фіксації і можуть бути використані для ранжирування цих систем за ступенем механічної надійності.

Ключові слова: фізіологічні навантаження, деформації, жорсткість фіксації, остеосинтез, натурне моделювання.

N. Shidlovskii, A. Lakshya, M. Dyman

Features a choice of modes of biomechanical field tests of osteosynthesis considering cyclic loading

The problems of experimental evaluation of deformation systems osteosynthesis of long bones. The methods of evaluation of the deformation on the reliability of these systems during prolonged or repeated mechanical action. The advantages of using cyclic test conditions compared with conventional quasi-static or, in other words, a singly-governmental, with slowly varying loads. It is established that the reliability indices osteosynthesis systems measured during cyclic tests are more sensitive to the type of the fixing device and can be used to rank these systems for raising mechanical reliability.

Keywords: physiological load, strain, stiffness fixation, osteosynthesis, natural modeling