

УДК 616.717/.718-007.24:004.942](045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-59872021245-50>

3D-друк під час планування хірургічних втручань із приводу позасуглобових деформацій нижніх кінцівок

К. К. Романенко^{1,2}, Д. В. Прозоровський¹, Я. А. Долуда¹

¹ ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України», Харків

² Харківська медична академія післядипломної освіти МОЗ України

An adequate planning of the curative measures is an important factor providing good functional results in the treatment of consequences of long bones injuries, in particular, malunions (post traumatic deformities). 3D-modeling in the preoperative planning gives an opportunity to assess both deformity itself and joint status. Visualization of injured segment with three-dimensional model manufactured using 3D-print in actual size (1:1 scale) provides additional capacities. Objective. To analyze the capacity provided by the usage of three-dimensional models of damaged segments in scale 1:1 while the planning of corrective surgery. Methods. Practicability of the usage of 3D-models, that was worked out on the base of CT-scanning, was studied in the treatment of 52 patients with different post traumatic extraarticular deformities of femur and tibia, after the fractures with intraarticular extension. Clinical results were evaluated using SF-36 and AOFAS scales. Results. Calculation for 3D-modeling was performed mostly virtually using standard computer programs with 3D-reconstruction, but 3D-print technology was used for 5 patients with the most severe and sophisticated deformities of the lower extremities. Changes in functional outcomes, according to SF-36 and AOFAS, for the patients undergone operative treatment, were positive at 12 month of follow-up. Foreign colleagues expose analogous results of the investigations and suggest that the modeling with 3D-print provides mostly more safe, reliable and standardized clinical decisions for every particular patient. Conclusions. Preoperative usage of 3D-print on the stage of preoperative planning allows the surgeons to simulate different stages of operative intervention on the physical model, thus, help him to realize possible technical problems, choose adequate fixation device and proper instrumentation. It facilitates the shortening of surgery time, elimination of possible complications rate and achievement, in sum, good functional results in the treatment of this kind of patients. Key words. Extraarticular deformity, malunion, lower extremity, 3D-print.

Під час лікування наслідків ушкоджень довгих кісток, зокрема, деформації, украй важливою запорукою отримання хороших функціональних результатів є адекватне планування лікувальних заходів. Використання 3D-моделювання в процесі передопераційного планування дає змогу повніше оцінити як деформацію, так і стан суглобів. Додаткові можливості для планування надає візуалізація ушкодженого сегмента за допомогою об'ємної моделі в реальному розмірі, виготовленої методом 3D-друку в масштабі 1:1. Мета. Проаналізувати можливість використання об'ємних моделей деформованого сегмента в масштабі 1:1 під час планування коригувальних операцій. Методи. Вивчено доцільність використання 3D-моделей, розроблених за результатами КТ-обстеження, у лікуванні 52 хворих із різними післятравматичними позасуглобовими деформаціями стегна і гомілки, де під час первинної травми лінія перелому була поширена на ділянку суглоба. Клінічні результати оцінювали за класифікаціями SF-36 і AOFAS. Результати. Розрахунок 3D-моделей проводили переважно віртуально за допомогою стандартних комп'ютерних програм із 3D-реконструкцією, а технологію 3D-друку використано для 5 пацієнтів із найскладнішими випадками післятравматичних деформацій нижніх кінцівок. Динаміка функціональних результатів прооперованих хворих за SF-36 і AOFAS за 12 міс. була позитивною. Аналогічні результати досліджень демонструють зарубіжні колеги та вважають, що моделювання за допомогою 3D-друку здебільшого може сприяти розробленню безпечних, надійних і стандартизованих клінічних рішень для конкретного пацієнта. Висновки. Передопераційне використання 3D-друку на етапах планування хірургічного втручання дозволяє хірургу моделювати його етапи на фізичній моделі, усвідомити можливі технічні проблеми, адекватно вибрати конструкцію та інструментарій для її встановлення. Це сприяє скороченню часу операції, уникненню потенційних ускладнень і досягненню позитивних результатів функціонального лікування таких пацієнтів.

Ключові слова. Позасуглобова деформація, нижня кінцівка, 3D-друк

Вступ

Формування позасуглобових деформацій нижніх кінцівок обумовлено не лише тяжкістю травми та станом опорно-рухової системи, а й неадекватною ортопедо-травматологічною допомогою постраждалим, несвоєчасністю лікувально-реабілітаційних заходів, а також недостатнім аналізом причин розвитку ускладнень. Для оцінювання змін в ушкодженному сегменті під час лікування позасуглобових деформацій останнім часом використовують системний підхід. Важливою запорукою отримання добрих функціональних результатів є адекватне передопераційне планування [1, 2]. Багато років підхід до планування корекції деформації базувався на аналізі стандартних рентгенограм ушкодженого сегмента, виконаних у горизонтальному положенні у двох класичних проєкціях. Наступним етапом став аналіз рентгенограм ушкодженої нижньої кінцівки в положенні стоячи «зі схилом». Натепер адекватним слід вважати виконання рентгенографії обох нижніх кінцівок у стандартному положенні за D. Paley [3]. Найсучаснішим і таким, що відповідає рівню розвитку образотворчих методів дослідження, є використання 3D-моделей, що дає змогу повніше оцінити деформацію та стан суглобів і, відповідно, провести адекватне планування [4]. Додаткові можливості під час планування операції надає візуалізація ушкодженого сегмента за допомогою об'ємної моделі реального розміру, виготовленої методом 3D-друку.

Як наведено у дослідженні P. Yang і співавт. [5], технологія 3D-візуалізації допомагає точніше зробити коригувальну остеотомію, знизити ризик післяопераційної деформації й інтраопераційної крововтрати, скоротити час втручання та поліпшити результати лікування.

Оцінивши доречність використання 3D-друку в разі корекції деформації гомілки апаратом зовнішньої фіксації, M. Michielsen і співавт. [6] зауважили на перевазі методу під час планування втручання. Завдяки використанню цього підходу вдалося зменшити час додаткової корекції зовнішньої опори в операційній і полегшити планування власне виду цієї опори. Особливо доцільним є застосування методу в разі лікування складних багатоплощинних деформацій.

Наведену думку підтримали й дослідники з Барселони [7]. Використання 3D-друку під час планування хірургічного втручання з приводу переломів проксимального відділу великогомілкової кістки сприяло скороченню терміну вико-

нання операції та зменшенню інтраопераційної крововтрати. Тому автори вважають виконання оперативного лікування (ORIF) із попереднім відтворенням друкованих 3D-моделей значно кращим порівняно зі стандартним ORIF [8].

N. Bruns і С. Krettek [9] привертають увагу до використання методу 3D-друку для виготовлення індивідуальних інструментів для втручання з приводу корекції деформації.

Доказом збільшеної уваги до 3D-друку є підвищення кількості публікацій із цієї тематики, які ілюструють дослідження, виконані в Китаї, США, Великій Британії, та їхньої цитованості в різних базах даних (Pubmed, Cochrane, SCOPUS, Web of Science). Автори опублікованого аналізу дійшли оптимістичного висновку щодо перспектив використання цього методу в ортопедії та травматології [10]. Тому ми вважали за доцільне провести аналіз можливостей застосування методу 3D-візуалізації, зокрема 3D-друку, у лікуванні пацієнтів із наслідками травм кінцівок.

Мета: проаналізувати доцільність використання об'ємних моделей деформованого сегмента в масштабі 1:1 під час планування коригувальних операцій у пацієнтів із післятравматичними деформаціями нижніх кінцівок.

Матеріал і методи

Матеріали дослідження розглянуто і схвалено локальним комітетом із біоетики при ДУ «ІПХС ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України» (протокол № 179 від 14.05.2018) відповідно до чинних нормативних документів.

Для аналізу відібрано 52 пацієнти з різноманітними післятравматичними позасуглобовими деформаціями стегна та гомілки, в яких під час первинної травми лінія перелому буда поширена на ділянку суглоба. Усі вони отримали медичну допомогу у відділі травматології опорно-рухової системи ДУ «ІПХС ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України». Усім постраждалим для планування корекції деформації виконано комп'ютерну томографію (КТ), проведено обстеження за розробленими нами методиками [11]. Технологію 3D-друку використано для 5 пацієнтів із найскладнішими випадками застарілих післятравматичних позасуглобових деформацій нижніх кінцівок. При цьому було виготовлено моделі ушкодженого та контралатерального сегмента в масштабі 1:1.

Розрахунок 3D-моделей проводили переважно віртуально за допомогою стандартних комп'ютерних програм із 3D-реконструкцією. Під час робочого процесу 3D-друку використано

чотири основних типи програмного забезпечення, що дозволяє втілити цифрову 3D-модель у фізичний тривимірний об'єкт. Редагування, перегляд і відтворення моделей для друку проводили у форматі STL. Це програмне забезпечення дозволяє візуалізувати, змінювати і виправляти файли STL до друку. Нарізку моделі на шари проводили за допомогою слайсера, що перетворює STL-файл в G-код для принтера. Потім проводили калібрування параметрів моделі для оптимального друку.

Аналіз динаміки клінічних результатів проведений за SF-36 та AOFAS [12–14]. Вид первинної травми оцінювали за класифікацією АО/ОТА [15].

Результати та їх обговорення

Процес передопераційного планування розпочинався із проведення КТ-дослідження ушкодженого та контралатерального сегментів зі захватом суміжних суглобів. На підставі результатів КТ виконували 3D-реконструкцію зображень, при цьому контралатеральний сегмент після створення його дзеркального зображення відіграв роль лекала для відтворення нормальної довжини та форми ушкодженого. Після цього дані виводили на пристрій для 3D-друку та виробляли об'ємні моделі. Наступним етапом розраховували корекцію деформації (зокрема, локалізацію та вид остеотомії) та обирали метод фіксації. Кінцевим етапом планування хірургічного втручання моде-

лювали остеотомію, відновлення осі та довжини кінцівки, обирали фіксувальний пристрій і варіанти його розташування, що дозволило би зменшити тривалість операції.

Усіх пацієнтів, в лікуванні яких на етапі передопераційного планування виконано КТ-дослідження зі запропонованою методикою 3D-моделювання, у подальшому прооперовано з урахуванням індивідуальних особливостей деформації. Динаміка функціональних результатів прооперованих хворих за SF-36 та AOFAS за 12 міс. була позитивною.

Прикладом клінічного використання моделей, виготовлених за допомогою 3D-друку на підставі КТ-сканів ушкодженої та контралатеральної кінцівки, є лікування пацієнтки М., 1965 року народження, яку госпіталізовано з діагнозом: перелом дистального відділу кісток гомілки, що зрісся із залишковою деформацією $varus$ (21°) та $recurvatio$ (32°) за наявності фрагмента металевого фіксатора в дистальному епіфізі великогомілкової кістки (уламок гвинта) (рис. 1, а), поширені рубцеві зміни м'яких тканин дистального відділу правої гомілки, змішана контрактура правого над'яtkово-гомілкового суглоба, зменшена опороспроможність лівої нижньої кінцівки (рис. 1, б).

Після первинної травми в пацієнтки діагностовано ушкодження $pilon$ правої гомілки (43С3.1 за класифікацією АО/ОТА).



Рис. 1. Рентгенограми (а) та зовнішній вигляд ушкодженого сегмента (б) хворої М. на момент госпіталізації



Рис. 2. Маркування магістральних артерій на шкірі пацієнтки М. за даними ультрасонографії



Рис. 3. Зовнішній вигляд пластикової моделі ушкодженої частини кісток гомілки та стопи, виготовленої методом 3D-друку в масштабі 1:1 на підставі результатів КТ-дослідження

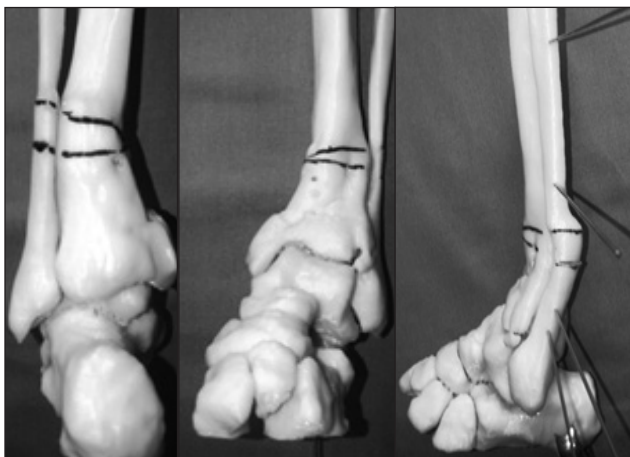


Рис. 4. Маркування коригувальної остеотомії та часткової резекції кісток лівої гомілки на пластиковій моделі ушкоджених кісток гомілки та стопи хворої М.

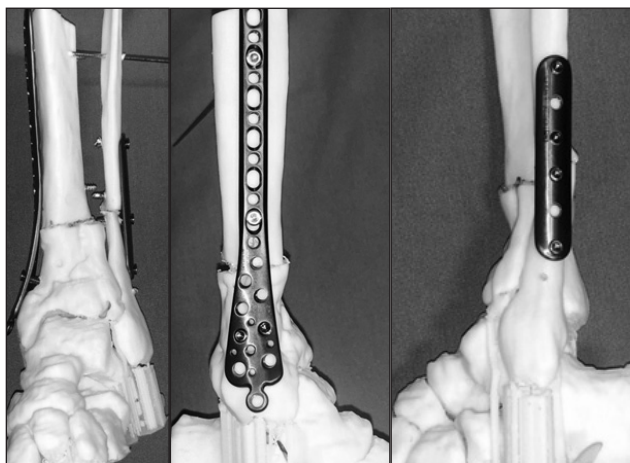


Рис. 5. Моделювання на пластиковій моделі накісткової фіксації відламків великогомілкової кістки по внутрішній стороні та малогомілкової — по зовнішній після відтворення коригувальної остеотомії та часткової резекції кісток гомілки

Із цього приводу в іншому лікувальному закладі було здійснено декілька хірургічних втручань із використанням фіксації відламків апаратом зовнішньої фіксації, накістковою пластиною та гіпсовою пов'язкою. В умовах інституту проведено передопераційне обстеження, зокрема й ультрасонографію ушкодженого сегмента, під час якої встановлено та промарковано на шкірі локалізацію *a. tibialis anterior / a. dorsalis pedis*, *a. tibialis posterior* та *a. peronea* (рис. 2).

Крім того, вивчено рубцеві зміни шкірного покриву в дистальній ділянці гомілки та прийнято рішення виконати коригувальне втручання з використанням двох доступів: переднього та задньолатерального.

Однією з частин передопераційної підготовки та планування було виконання КТ-дослідження та виготовлення пластикових моделей частин сегментів (ушкодженого та контралатерального) в масштабі 1:1 (рис. 3). При цьому комп'ютерне 3D-зображення контралатерального сегмента відображалось дзеркально та ставало шаблоном для планування коригувального втручання. Після цього помічали рівні та вид остеотомії (за типом замкненого клину) великогомілкової кістки та резекції ділянки малогомілкової (рис. 4).

Після встановлення рівня остеотомії проведено симуляцію коригувального втручання з виконанням резекції ділянки малогомілкової кістки, коригувальної остеотомії великогомілкової кістки та двома варіантами фіксації фрагментів: 1) накісткової фіксації відламків великогомілкової кістки по внутрішній поверхні та малогомілкової —

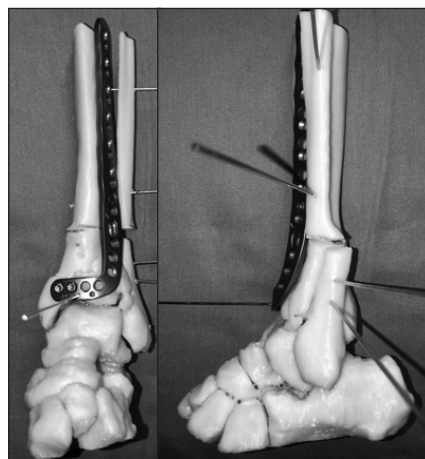


Рис. 6. Моделювання на пластиковій моделі накісткової фіксації відламків великогомілкової кістки (по зовнішній стороні) після відтворення коригувальної остеотомії та часткової резекції кісток лівої гомілки. Два латеральних отвори в горизонтальній частині пластики не використано, бо імплантат, що залишився від попередніх втручань, та дефект кістки, який виникне після його видалення, робить використання цих отворів недоречним

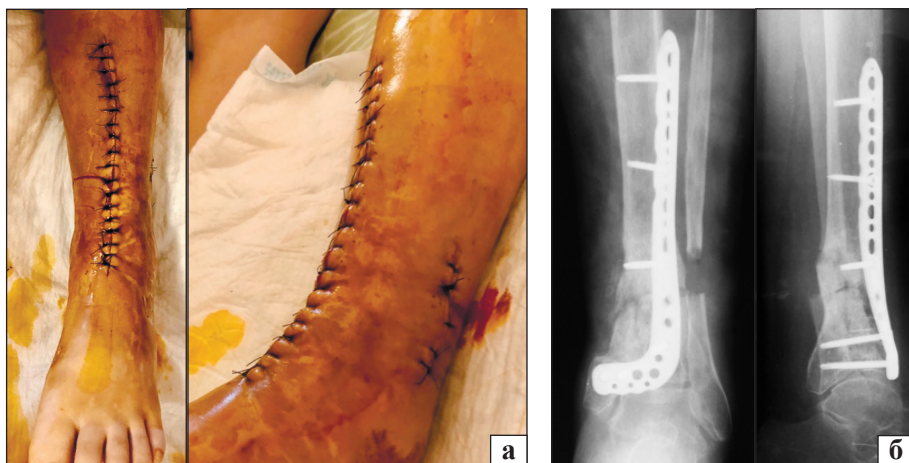


Рис. 7. Зовнішній вигляд лівої гомілки та стопи (а) і рентгенограми (б) хворої М. після виконання коригувальних операцій



Рис. 8. Рентгенограми (а), зовнішній вигляд (б) та функція ушкодженого сегмента хворої М. через 4,5 міс. після виконання коригувальних операцій: розгинання (в), нейтральне положення (г), згинання в над'ятковко-гомілковому суглобі (д)

по зовнішній (рис. 5); 2) у разі інтраопераційного встановлення великого ризику ушкодження рубцево змінених м'яких тканин дистального відділу гомілки — фіксації фрагментів великогомілкової кістки пластиною та гвинтами по зовнішній поверхні (рис. 6).

Під час операції, виконаної із запланованих доступів, обрано другий варіант фіксації (рис. 7).

Через 4,5 міс. констатовано зрощення фрагментів великогомілкової кістки (рис. 8, а) та значне поліпшення функціональних можливостей ушкодженої кінцівки (рис. 8, б). Динаміка за AOFAS становила від 37 балів до операції до 78 балів через 6 міс. після втручання.

Отримані нами результати узгоджуються з досвідом зарубіжних колег щодо доцільності та можливості використання тривимірного друку в ортопедичній хірургії. Ця технологія забезпечує гнучкість у процесі проектування хірургічного втручання на скелеті та дозволяє ефективно впроваджувати як готові, так і персоналізовані лікарські вироби, які краще відповідають потребам пацієнтів, ніж традиційні виробничі процеси [10]. Методом 3D-друку виготовляють не лише анатомічні моделі, а й нестандартні індивідуальні імплантати, інструменти та протези [9]. На сьогодні це дуже перспективна гілка хірургічної ортопедичної науки, що потребує ретельної уваги та вивчення.

Моделювання за допомогою 3D-друку, за досвідом зарубіжних колег, має сприяти розробленню безпечних, надійних і стандартизованих клінічних рішень для конкретного пацієнта [16].

Висновки

Використання тривимірних комп'ютерних моделей під час планування коригувального хірургічного втручання надає можливість хірургу підвищити точність корекції та значно скоротити час виконання операції. Додаткове відтворення пластикових моделей частин сегментів (ушкодженого та контралатерального), виготовлених методом 3D-друку в масштабі 1:1, дає змогу хірургові моделювати етапи втручання на фізичній моделі, усвідомити можливі технічні проблеми, адекватно вибрати конструкцію та інструментарій для її встановлення. Це сприяє скороченню часу операції, уникненню потенційних ускладнень і досягненню позитивних результатів функціонального лікування таких пацієнтів. Крім того, 3D-моделювання з 3D-друком включно може бути ефективним інструментом для проведення навчального процесу.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури

1. Соломин Л. Н. Биомеханические основы модульной трансформации аппаратов для чрескостного остеосинтеза длинных костей / Л. Н. Соломин, В. А. Назаров, П. И. Бегун // Травматология и ортопедия России. — 2005. — № 4 (38). — С. 39–47.
2. Современные методы лечения переломов и их последствий / С. А. Хмызов, А. В. Плоткин, А. А. Тихоненко [и др.] // Таврический медико-биологический вестник. — 2009. — Т. 13, № 4 (52). — С. 193–199.
3. Paley D. Principles of deformity correction / D. Paley. — 2002. — 806 p.
4. Marti R. K. Osteotomies for posttraumatic deformities / R. K. Marti, R. J. van Heerwaarden. — Georg Thieme Verlag, 2008. — 704 p.
5. 3D-printing-assisted osteotomy treatment for the malunion of lateral tibial plateau fracture / P. Yang, D. Du, Z. Zhou [et al.] // Injury. — 2016. — Vol. 47 (12). — P. 2816–2821. — DOI: 10.1016/j.injury.2016.09.025.
6. Use of three-dimensional technology for complications of upper limb fracture treatment / M. Michielsen, A. Van Haver, M. Vanhees [et al.] // EFORT Open Rev. — 2019. — Vol. 4 (6). — P. 302–312. — DOI: 10.1302/2058-5241.4.180074.
7. Preliminary results using patient-specific 3D-printed models to improve preoperative planning for correction of post-traumatic tibial deformities with circular frames / P. S. Corona, M. Vicente, K. Tetsworth, V. Glatt // Injury. — 2018. — Vol. 49 (Suppl 2). — P. S51–S59. — DOI: 10.1016/j.injury.2018.07.017.
8. Three-dimensional printing assisted ORIF versus conventional ORIF for tibial plateau fractures: A systematic review and meta-analysis / L. Xie, C. Chen, Y. Zhang [et al.] // The International Journal of Surgery. — 2018. — Vol. 57. — P. 35–44. — DOI: 10.1016/j.ijso.2018.07.012.
9. Bruns N. 3D-printing in trauma surgery: Planning, printing and processing / N. Bruns, C. Krettek // Unfallchirurg. — 2019. — Vol. 122 (4). — P. 270–277. — DOI: 10.1007/s00113-019-0625-9.
10. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: current applications and future developments / C. M. Wixted, J. R. Peterson, R. J. Kadakia, S. B. Adams // JAAOS Global Research & Reviews. — 2021. — Vol. 5 (4). — Article ID: e20.00230-11. — DOI: 10.5435/JAAOSGlobal-D-20-00230.
11. Клінічне значення післятравматичних деформацій довгих кісток нижніх кінцівок / К. К. Романенко, Я. А. Долуда, Д. В. Прозоровський, В. Б. Парій // Ортопедия, травматология и протезирование. — 2020. — № 4. — С. 72–79. — DOI: 10.15674/0030-59872020472-79.
12. Прозоровский Д. В. Оценка результатов хирургического лечения деформаций переднего отдела стопы / Д. В. Прозоровский // Украинский морфологический альманах. — 2010. — Т. 8, № 3. — С. 61–63.
13. Validation of American College of Foot and Ankle Surgeons Scoring Scales / J. J. Cook, E. A. Cook, B. I. Rosenblum [et al.] // Foot Ankle Surgery. — 2011. — Vol. 50 (4). — P. 420–429. — DOI: 10.1053/j.jfas.2011.03.005.
14. SF-36 Health Survey. Manual and interpretation guide / J. E. Ware, K. K. Snow, M. Kosinski, B. Gandek // The Health Institute, New England Medical Center. — Boston : Mass, 1993.
15. Fracture and dislocation classification compendium — 2018 / J. F. Kellam, E. G. Meinberg, J. Agel [et al.] // Journal of Orthopaedic Trauma. — 2018. — Vol. 32, Suppl. 1. — P. S1–S170.
16. Charbonnier B. Additive manufacturing pertaining to bone: Hopes, reality and future challenges for clinical applications / B. Charbonnier, M. Hadida, D. Marchat // Acta Biomater. — 2021. — Vol. 121. — P. 1–28. — DOI: 10.1016/j.actbio.2020.11.039.

Стаття надійшла до редакції 26.05.2021

3D-PRINT IN THE PLANNING OF SURGICAL TREATMENT IN THE CASE OF EXTRAARTICULAR DEFORMITY OF LOWER LIMBS

K. K. Romanenko^{1,2}, D. V. Prozorovskiy¹, Ya. A. Doluda¹

¹Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv

²Kharkiv Medical Academy of Postgraduate Education of the Ministry of Health of Ukraine

✉ Kostiantyn Romanenko, MD, PhD in Traumatology and Orthopaedics: romanen_kost@yahoo.com,

✉ Dmytro Prozorovskiy, MD, PhD in Traumatology and Orthopaedics: prozorovskiy1973@gmail.com

✉ Yaroslav Doluda, MD, PhD in Traumatology and Orthopaedics: dol-yaroslav@yandex.ua