

УДК 004.2

Антонова-Рафі Юлія Валеріївна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри біобезпеки і здоров'я людини, orcid.org/0000-0002-9518-4492
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

Соломін Андрій Вячеславович

Кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри біобезпеки і здоров'я людини,
orcid.org/0000-0002-5226-8813
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

Гетун Галина В'ячеславівна

Кандидат технічних наук, професор кафедри архітектурних конструкцій, orcid.org/0000-0002-3317-3456
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Вихляєв Юрій Миколайович

Доктор педагогічних наук, професор кафедри біобезпеки і здоров'я людини, orcid.org/0000-0001-8446-8070
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

Матвієнко Людмила Василівна

Студентка кафедри біобезпеки і здоров'я людини, спеціальність “Біомедична інженерія” (спеціалізація “Реабілітаційна інженерія”)
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ОРТОПЕДИЧНОГО СУПІНАТОРА ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЙНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ В СЕРЕДОВИЩІ ANSYS

Анотація. В задачах реабілітаційної інженерії, зокрема при проектуванні і виготовленні ортопедичних супінаторів, є нагальна потреба комп'ютерного моделювання процесів механічних деформацій при навантаженнях в цих виробах, оскільки ступінь деформації відображає їх якість щодо виконання реабілітаційних функцій, а пацієнти суттєво різняться за своїми параметрами: вагою, розміром стоп, типом їх деформацій. Наразі проектування супінаторів ґрунтується більше на практичному досвіді фахівців, ніж на інженерних розрахунках. В інших інженерних галузях, зокрема в будівництві та машинобудуванні, зараз досить ефективно використовується програмне середовище ANSYS, де розрахунки комп'ютерних моделей здійснюються із застосуванням методів скінченних елементів, і пропонуються сучасні засоби створення таких 3D-моделей. Після завершення розрахунків результати можна представляти у зручному для використання вигляді, можна досить просто змінювати геометричні параметри моделей, параметри навантажень та матеріалів і швидко отримувати відповідні результати. В роботі запропоновано використати програмне середовище ANSYS для математичного моделювання процесів функціонування виробів реабілітаційної інженерії. Реалізовано комп'ютерну модель ортопедичного супінатора в середовищі ANSYS, що закладає засади інженерного підходу до проектування таких реабілітаційних засобів. Продемонстровано переваги комп'ютерного моделювання, пов'язані з можливістю оптимізації конструкцій і параметрів виробів, прогнозуванням особливостей їх функціонування, здешевленням етапу розроблення.

Ключові слова: супінатор; реабілітаційна інженерія; комп'ютерна модель; метод скінченних елементів; ANSYS

Вступ

Середовище комп'ютерного моделювання ANSYS створювалось для інженерного аналізу складних конструкцій в різних галузях промисловості і насамперед в будівництві та машинобудуванні. Але технології цього середовища виявились надзвичайно універсальними та ефективними, що перспективно для використання у багатьох суміжних галузях.

Водночас задачі реабілітаційної інженерії потребують удосконалення щодо використовуюваного математичного апарату, оскільки наразі ґрунтуються більше на практичному досвіді, ніж на інженерних розрахунках.

Переваги математичного моделювання процесів, що реалізуються в реабілітаційних інженерних виробах, очевидні і окреслюють перспективи їх удосконалення та оптимізації.

Мета статті

Метою роботи є розроблення комп'ютерної моделі ортопедичного супінатора в середовищі ANSYS для інженерного аналізу механічних явищ пружних деформацій в ньому при навантаженнях.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що з метою комплексної корекції різних форм деформацій стопи застосовуються вкладні ортопедичні устілки, супінатори різної форми і функціонального призначення. Основна функція устілок – механічне підняття внутрішнього зводу стопи і його підтримка під час руху і стояння. Показаннями до використання вкладних устілок-супінаторів є статичні деформації, плоскостоп'я, розпластаність передніх відділів стоп (поперечна плоскостопість). Застосування жорстких коректорів (металевих, пластмасових, коркових, суміш коркової крихти з нітролаком) протипоказано, тому що вони не мають еластичності і наносять шкоду деформованим стопам. Еластичні ж коректори, поряд з підтримуючою функцією, здійснюють постійний масаж, що зміцнює м'язово-зв'язувальний апарат стопи. З доступних матеріалів найбільш ефективним є спінений поліетилен, який добре піддається формуванню і має такі властивості, як пружність, гнучкість, гігроскопічність, незначна теплопровідність [1 – 3].

За структурою реальний реабілітаційний супінатор досить складний і має декілька різних елементів залежно від типу деформацій стопи пацієнта. Але ці елементи досить схожі між собою за їх краплеподібною формою і відрізняються розмірами, висотою підйому та розташуванням на площині стопи. Тому задачею початкового етапу комп'ютерного моделювання було сформульовано інженерний аналіз деформацій такого типового елемента краплеподібної форми. Слід зазначити, що у деяких випадках найпростіших деформацій стопи, наприклад, тільки подовжньої плоскостопості, такий елемент цілком відтворює функцію супінатора. В інших ситуаціях супінатор має декілька аналогічних елементів [4 – 6].

З інженерної точки зору зрозуміло, що найважливішою експлуатаційною характеристикою для пацієнта є ступінь прогину, тобто деформація елемента супінатора під час ходіння, оскільки саме цей параметр відповідальний за підтримку зводу стопи. Але також зрозуміло, виходячи зі складності форми виробу та оцінок величин деформацій, які не можна вважати малими, що класичні аналітичні засоби інженерного аналізу напружень та деформацій тут непридатні [7 – 11]. Тому перспективним виявляється застосування середовища комп'ютерного моделювання ANSYS [12 – 15].

Для створення комп'ютерної 3D-моделі супінатора авторами використовувались потужні можливості інструментарію моделювання Workbench ANSYS та лекала відповідних форм з джерел [1; 2].

Workbench ANSYS пропонує інструменти створення об'ємної моделі по ескізах її перетинів. В даному випадку спочатку сплайнами кривих відтворено ескізи двох перетинів супінатора: на внутрішній частині ноги за формою лекала з джерел [1; 2], та на зовнішній частині ноги у формі близькій до прямої лінії в основі підосшви, оскільки зовні ноги „горбик” елемента супінатора сходять на нуль.

Далі задано розміри на ескізі для усередненого пацієнта. 3D-модель краплеподібного елемента супінатора отримано технологією протягання по двох перетинах (Skin/Loft) [16 – 20]. Потім задано параметри матеріалу – пенополіетилену (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, питома густина та ін.). Після цього прикладено навантаження зверху у вигляді вертикального тиску, тобто сили тяжіння усередненого пацієнта на одиницю площі елемента супінатора. Також застосовано граничні умови у вигляді нерухомості нижньої поверхні моделі.

Наступним етапом побудови моделі для чисельного аналізу стало накладення сітки скінченних елементів (всі параметри сітки залишено за замовчуванням, тобто оптимальними з точки зору ANSYS).

Модель з накладеною сіткою наведено на рис. 1.

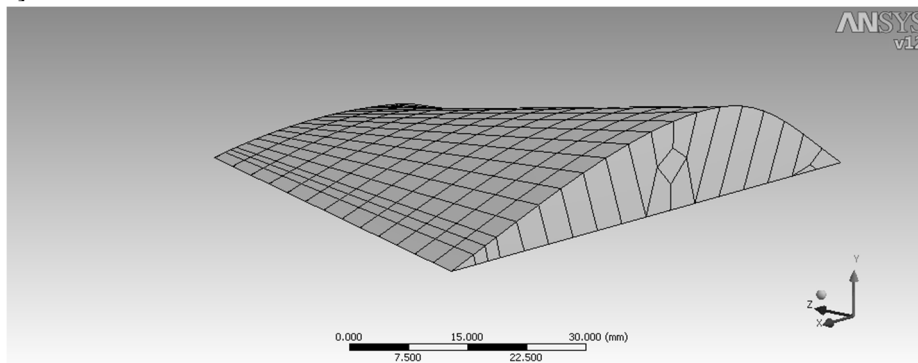


Рисунок 1 – 3D-модель елемента супінатора з накладеною сіткою скінченних елементів

Після запуску процесу розрахунку щодо створеної моделі командою Solution середовища ANSYS отримано результати відповідних напружень, деформацій та інших параметрів вузлів сітки моделі, які можна далі виводити у зручному для користувача вигляді. Це можуть бути відповідні таблиці, графіки, діаграми. Для обробки і представлення результатів обчислень в зручному вигляді в середовищі ANSYS є спеціальний потужний постпроцесорний модуль, що надає можливість додаткового оброблення результатів через введені користувачем формули та фрагменти коду або стандартні бібліотечні функції.

Результати та пояснення

Наприклад, один із варіантів представлення результатів розрахунків у вигляді діаграми розподілу деформацій по площині елемента супінатора наведено на рис. 2. Тут кольором або інтенсивністю сірого позначено величину деформації у відповідних точках площини елемента супінатора. Як видно, на діаграмі виділено значення максимальної деформації та позначено точку, де така деформація відбувається.

Ця величина може слугувати індикатором правильності проектування супінатора, оскільки очевидно, що при повному прогині „горбика” супінатора його підтримуюча функція буде знівельована.

Отже, зрозуміло, що деформація залежить від дуже багатьох факторів (площа та форма елемента супінатора, параметри матеріалу, вага пацієнта, розмір його стопи і таке інше).

Висновки та рекомендації

Використання середовища ANSYS перспективне для вирішення задач реабілітаційної інженерії, де поки що домінує практичний досвід фахівців, а не точний математичний розрахунок. В роботі показано можливість побудови моделі та інженерного аналізу функціонування досить складних за формою ортопедичних виробів.

Розроблена комп'ютерна модель ортопедичного супінатора може слугувати базою для досліджень механічних напружень і деформацій різних його частин, а отже, для удосконалення методів його проектування, оптимізації, налаштування параметрів для конкретних пацієнтів.

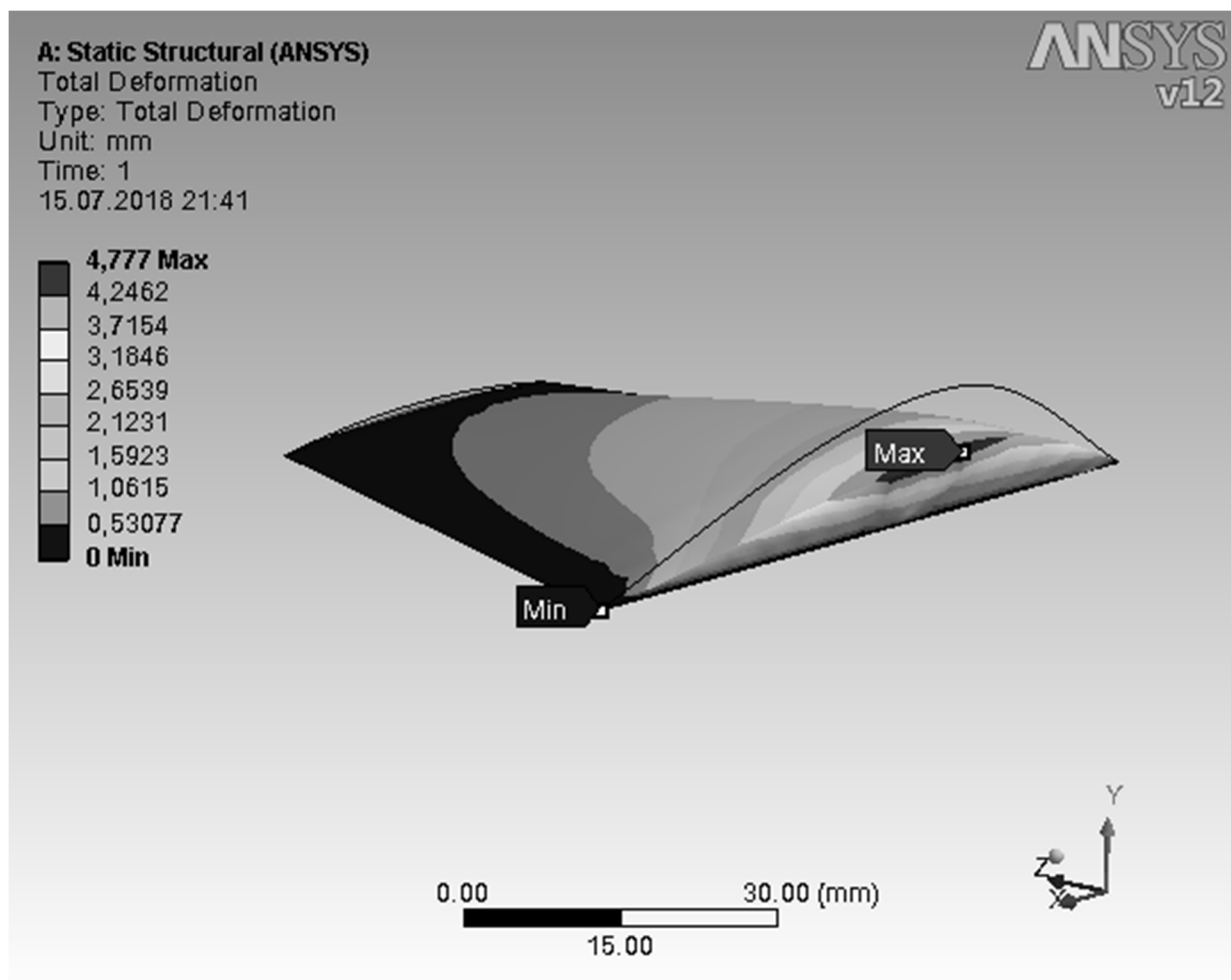


Рисунок 2 – Представлення результатів у вигляді діаграми розподілу деформацій елемента супінатора

Список літератури

1. Вихляев Ю.М. Корекція функціонального стану студентів технічними засобами: Монографія. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 308 с.
2. Вихляев Ю.М. Особливості фізіотерапевтичних впливів на відновлення стопи і голімки підлітків-спортсменів // Науковий часопис НПУ ім. М.П. Драгоманова. Серія №15. – К.: Вид-во НПУ ім. М.П. Драгоманова. – 2018. – Вип. 3к (97) 18. – С. 111 – 114.
3. Landorf K.B., Keenan A.M., Herbert R.D. Effectiveness of foot orthoses to treat plantar fasciitis: a randomized trial. *Arch Intern Med.* 2006. Vol. 166. pp. 1305 – 1309.
4. Pfeffer G., Bacchetti P., Deland J., Lewis A., Anderson R., Davis W. Comparison of custom and prefabricated orthoses in the initial treatment of proximal plantar fasciitis. *Foot Ankle Int.* 1999. Vol. 20(4). pp. 214 – 221.
5. Chia J., Suresh S., Kuah A., Ong J., Phua J., Seah A. Comparative trial of the foot pressure patterns between corrective orthotics, Formthotics, bone spur pads and flat insoles in patients with chronic plantar fasciitis. *Ann Acad Med Singapore.* 2009. Vol. 38(10). pp. 869 – 875.
6. Hsi W., Lai J., Yang P. In-shoe pressure measurements with a viscoelastic heel orthosis. *Arch Phys Med Rehabil.* 1999. Vol. 80. pp. 805 – 810.
7. Robert D. Cook. *Finite Element Modeling for Stress Analysis.* Wiley. 1995. 336 p.
8. Wriggers, VuVan, Stein. Finite element formulation of large deformation impact-contact problems with friction. *Computers and structures.* 1990. Vol. 37, pp. 319 – 331.
9. Arruda E.M., Boyce M.C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. *Journal of the mechanics and physics of solids.* 1993. Vol. 41 (2). pp. 389 – 412.
10. Bergstrom J.S., Boyce M.C. Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers. *Journal of the mechanics and physics of solids.* 1998. Vol. 45 (5). pp. 931 – 954.
11. Bonet J., Wood R.D. *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis.* Cambridge University Press. 1997.
12. Gyimesi M., Lavers D., Pawlak T., Ostergaard D. Application of the general potential formulation in the ANSYS Program. *IEEE Transactions on Magnetics.* 1993. Vol. 29, pp. 1345 – 1347.
13. Капдун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. Едиториал УРСС. – 2003. – 272 с.
14. Bryan J. Mac Donald. *Practical Stress Analysis with Finite Elements (2nd Edition).* Glasnevin Publishing, 2011, 402 p.
15. Tamma Kumar K., Namburu Raju R. Recent advances, trends and new perspectives via enthalpy-based finite element formulations for applications to solidification problems. *International journal for numerical methods in engineering,* 1990, Vol. 30. pp. 803 – 820.
16. Jack Zecher, Fereydoon Dadkhah. *ANSYS Workbench Tutorial with Multimedia CD Release 12.* Schroff Development Corporation. – 2009. – 256 p.
17. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Часть I: Учебное пособие. Самар. гос. техн. ун-т. – 2010. – 271 с.
18. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Часть II: Учебное пособие. Самар. гос. техн. ун-т. – 2013. – 149 с.
19. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. – Нижний Новгород. – 2006. – 115 с.
20. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. ДМК Пресс. – 2005. – 640 с.

Стаття надійшла до редколегії 17. 10. 2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.О. Плоский, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ.

Антонова-Рафи Юлия Валерьевна

Кандидат технических наук, доцент кафедры биобезопасности и здоровья человека, orcid.org/0000-0002-9518-4492

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев

Соломин Андрей Вячеславович

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры биобезопасности и здоровья человека,

orcid.org/0000-0002-5226-8813

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев

Гетун Галина Вячеславовна

Кандидат технических наук, профессор кафедры архитектурных конструкций, orcid.org/0000-0002-3317-3456

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Вихляев Юрий Николаевич

Доктор педагогических наук, профессор кафедры биобезопасности и здоровья человека, orcid.org/0000-0001-8446-8070

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев

Матвиенко Людмила Васильевна

Студентка кафедры биобезопасности и здоровья человека, специальность "Биомедицинская инженерия" (специализация "Реабилитационная инженерия")

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев

**КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОРТОПЕДИЧЕСКОГО СУПИНАТОРА
ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИОННОЙ ИНЖЕНЕРИИ В СРЕДЕ ANSYS**

Аннотация. В задачах реабилитационной инженерии, в частности при проектировании и изготовлении ортопедических супинаторов, есть необходимость компьютерного моделирования процессов механических деформаций при нагрузках в этих изделиях, поскольку степень деформации отражает их качество по выполнению реабилитационных функций, а пациенты существенно различаются по своим параметрам: весом, размером стоп, типу их деформаций. Сейчас проектирование супинаторов основывается больше на практическом опыте специалистов, чем на инженерных расчетах. В других инженерных областях, в частности в строительстве и машиностроении, сейчас достаточно эффективно используется программная среда ANSYS, где расчеты компьютерных моделей осуществляются с применением методов конечных элементов, и предлагаются современные средства создания таких 3D-моделей. После завершения расчетов результаты можно представлять в удобном для использования виде, можно достаточно просто изменить геометрию моделей, параметры нагрузок и материалов и быстро получить соответствующие результаты. В работе предложено использовать программную среду ANSYS для математического моделирования процессов функционирования изделий реабилитационной инженерии. Реализована компьютерная модель ортопедического супинатора в среде ANSYS, что закладывает основы инженерного подхода к проектированию таких реабилитационных средств. Продемонстрированы преимущества компьютерного моделирования, связанные с возможностью оптимизации конструкций и параметров изделий, прогнозированием особенностей их функционирования, удешевлением этапа разработок.

Ключевые слова: супинатор; реабилитационная инженерия; компьютерная модель; метод конечных элементов; ANSYS

Yuliya Antonova-Rafi

PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Biosafety and Human Health, orcid.org/0000-0002-9518-4492
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv

Andriy Solomin

Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Biosafety and Human Health, orcid.org/0000-0002-5226-8813

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv

Galyna Getun

PhD (Eng.), Professor, Department of Architectural Structures, orcid.org/0000-0002-3317-3456

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

Yurii Vykhliaiev

DSc (Pedagogy), Professor, Department of Biosafety and Human Health, orcid.org/0000-0001-8446-8070

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv

Liudmyla Matvienko

Student of the Department of Biosafety and Human Health, specialty «Biomedical Engineering» (specialization “Rehabilitation Engineering”)

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Kyiv

**COMPUTER MODEL OF ORTHOPAEDIC SUPINATOR
FOR REHABILITATION ENGINEERING IN WORKBENCH ANSYS**

Abstract. In the tasks of rehabilitation engineering, in particular, in the design and manufacture of orthopaedic supinators, there is an urgent need for computer simulation of the processes of mechanical deformations under loads in these wares, since the degree of deformation reflects their quality to the implementation of rehabilitation functions, and patients differ significantly in their parameters: weight, foot size, type of deformation. At present, the design of supinators is based more on the practical experience of specialists than on engineering calculations. In other engineering sectors, in particular in construction and engineering, the ANSYS software workbench is now used very efficiently, where calculations of computer models are carried out using finite element methods, and the contemporary tools for creating such 3D-models are offered. After completing the calculations, the results can be presented in a convenient for use form, you can easily change the geometric parameters of the models, the parameters of loads and materials and quickly receive the corresponding results. In this paper, it is proposed to use the ANSYS software workbench for mathematical modeling of the functioning of rehabilitation engineering wares. The computer model of the orthopedic supinator in the ANSYS workbench is implemented, which provides the basis for an engineering approach to the design of such rehabilitation wares. Advantages of computer modeling are demonstrated, connected with the possibility of optimizing design and product parameters, forecasting the special features of their operation, cost reduction of design.

Key words: supinator; rehabilitation engineering; computer model; finite element method; ANSYS

References

1. Vykhliayev, Y. (2006). *Correction of functional state of students by technical tools (in Ukrainian)*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 308.
2. Vykhliayev, Y. (2018). *Peculiarities of physiotherapeutic influences on rehabilitation of feet and legs of juniors-sportsmen. (in Ukrainian)*. *Scientific Journal of Dragomanov National Pedagogical University*, 3k (97), 18, 111-114.
3. Landorf, K.B., Keenan, A.M., Herbert, R.D. (2006). *Effectiveness of foot orthoses to treat plantar fasciitis: a randomized trial*. *Arch Intern Med.*, 166, 1305-1309.
4. Pfeffer, G., Bacchetti, P., Deland, J., Lewis, A., Anderson, R., Davis W. (1999). *Comparison of custom and prefabricated orthoses in the initial treatment of proximal plantar fasciitis*. *Foot Ankle Int.*, 20(4), 214-221.
5. Chia, J., Suresh, S., Kuh, A., Ong, J., Phua, J., Seah, A. (2009). *Comparative trial of the foot pressure patterns between corrective orthotics, Formthotics, bone spur pads and flat insoles in patients with chronic plantar fasciitis*. *Ann Acad Med Singapore*, 38(10), 869-875.
6. His, W., Lai, J., Yang, P. (1999). *In-shoe pressure measurements with a viscoelastic heel orthosis*. *Arch Phys Med Rehabil.*, 80, 805-810.
7. Cook, Robert D. (1995). *Finite Element Modeling for Stress Analysis*. Wiley, 336.
8. Wriggers, VuVan, Stein. (1990). *Finite element formulation of large deformation impact-contact problems with friction*. *Computers and structures*, 37, 319-331.
9. Arruda, E.M., Boyce, M.C. (1993). *A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials*. *Journal of the mechanics and physics of solids*, 41 (2), 389-412.
10. Bergstrom, J.S., Boyce, M.C. (1998). *Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomers*. *Journal of the mechanics and physics of solids*, 45 (5), 931-954.
11. Bonet, J., Wood, R.D. (1997). *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis*. Cambridge University Press.
12. Gyimesi, M., Lavers, D., Pawlak, T., Ostergaard, D. (1993). *Application of the general potential formulation in the ANSYS Program*. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29, 1345-1347.
13. Kaplun, A., Morozov, E., Olferieva, M. (2003). *ANSYS in the hands of an engineer. Practical guide. (in Russian)*. Editorial URSS, 272.
14. Mac Donald, Bryan J. (2011). *Practical Stress Analysis with Finite Elements (2nd Edition)*. Glasnevin Publishing, 402.
15. Tamma, Kumar K., Namburu, Raju R. (1990). *Recent advances, trends and new perspectives via enthalpy-based finite element formulations for applications to solidification problems*. *International journal for numerical methods in engineering*, 30, 803-820.
16. Zecher, Jack, Ddkhah, Fereydoon. (2009). *ANSYS Workbench Tutorial with Multimedia CD Release 12*. Schroff Development Corporation, 256.
17. Brujaka, V., Fokin, V., Soldusova, E., Glazunova, N., Adejanov, N. (2010). *Engineering analysis in ANSYS Workbench (in Russian). Part I: Tutorial*. Samara State University, 271.
18. Brujaka, V., Fokin, V., Kuraieva, Y. (2013). *Engineering analysis in ANSYS Workbench (in Russian). Part II: Tutorial*. Samara State University, 149.
19. Jidkov, A. (2006). *ANSYS system apply for problem solving and finite element solving. (in Russian)*. Nizhny Novgorod, 115.
20. Basov K. (2005). *ANSYS: User handbook (in Russian)*. DMK Press, 640.

Посилання на публікацію

- APA Antonova-Rafi, Yuliya, Solomin, Andriy, Getun, Galyna, Vykhliayev, Yurii & Matvienko, Liudmyla. (2018). *Computer model of orthopaedic supinator for reha-bilitation engineering in workbench ANSYS. Management of Development of Complex Systems*, 36, 136 – 141.
- ДСТУ Антонова-Рафі Ю.В. Комп'ютерна модель ортопедичного супінатора для реабілітаційної інженерії в середовищі ANSYS [Текст] / Ю.В. Антонова-Рафі, А.В. Соломін, Г.В. Гетун, Ю.М. Вихляєв, Л.В. Матвієнко // *Управління розвитком складних систем*. – 2018. – № 36. – С. 136 – 141.