

В.В. Рюмін, Ю.Ю. Солодовник

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧИСЛА ТВЕРДОСТІ СТАЛЕВОГО ЗРАЗКА ЗА РОКВЕЛЛОМ

Точне вимірювання твердості відіграє важливу роль у технічному діагностуванні промислового обладнання. В умовах дистанційного навчання студенти не можуть використовувати спеціалізоване лабораторне устаткування, і це обмежує можливість виконання деяких досліджень. У даній статті запропоновано моделювання процесу вимірювання твердості за методом Роквелла з використанням програмного забезпечення ANSYS, що включає різні моделі контакту та різні рівні навантаження.

Ключові слова: конструкційні матеріали, метод Роквелла, скінченноелементна модель, індентор, твердість.

Вступ

Визначення твердості матеріалу за методом Роквелла є одним із найпоширеніших способів контролю якості виробу в машинобудуванні [1]. Під час вивчення дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» передбачено цикл лабораторних занять, на яких майбутні інженери – механіки отримують навички вимірювання числа твердості відповідно до методики, що викладені у ДСТУ ISO 6508-1:2013 та ДСТУ EN ISO 6506-1:2019. В умовах віддаленої форми проведення практичних і лекційних занять, на думку авторів цієї статті, необхідно використовувати пакети скінченноелементного аналізу для чисельного моделювання процесів випробування матеріалів під час вивчення низки навчальних дисциплін. Автори робіт [2-12] також із успіхом застосовували методи скінченноелементного аналізу для визначення числа твердості зразків за методами Брінелля та Віккерса. Нині лідером серед пакетів скінченноелементного аналізу загального призначення є програмний комплекс ANSYS. Використання цього програмного продукту також доцільне для того, щоб дати студентам старт на початку їхньої професійної кар'єри.

Постановка проблеми

Твердість – механічна характеристика, яка показує стійкість матеріалу до локальної пластичної деформації, спричиненої механічним вдавненням. У техніці твердість здебільшого використовується для визначення властивостей різних матеріалів. У механіці суцільних середовищ дослідження твердості матеріалів зазвичай зводиться до вивчення металів та їхньої механічної поведінки. Для визначення твердості матеріалу можна використовувати кілька різних методів випробувань: Брінелля, Роквелла,

Віккерса. Усі ці випробування спираються на загальну термінологію та основні процедури. Наприклад, досліджуваний зразок матеріалу називається зразком, а випробувальний компонент, що відповідає за створення лунки на зразку, – індентором [1].

Випробування на твердість за Роквеллом у лабораторних умовах проводять у такий спосіб, за яким вимірювання виконують швидко, легко і з відмінною відтворюваністю [1]. Випробувальні машини типу ТК також зручні для користувача, оскільки число твердості можна зчитувати безпосередньо з циферблата.

З огляду на обмежений доступ до лабораторного обладнання проводити визначення числа твердості безпосередньо з використанням твердомірів типу ТК і на натурних зразках не є можливим. Внаслідок цього, актуальним є завдання моделювання процесу вимірювання числа твердості зразка з використанням пакетів скінченноелементного аналізу.

Мета дослідження

Чисельне моделювання процесу вимірювання числа твердості за методом Роквелла відповідно до вимог ДСТУ ISO 6508-1:2013.

Провести порівняння отриманих результатів з відомими даними вимірювань.

Методи дослідження

У даній статті розглядається чисельне моделювання процесу визначення твердості сталевго зразка, виготовленого з «м'якої» сталі типу Ст3пс (ДСТУ2651:2005). Відповідно до ДСТУ ISO 6508 – 1:2013 для визначення твердості зразків з «м'яких» сталей використовується шкала твердості «В» твердоміра Роквелла. Як індентор застосовується кулька з карбіду вольфраму діаметром 1,588 мм. Навантаження зразка відповідно до стандартної процедури

випробування здійснюється поетапно: попереднє зусилля випробування $F_0 = 98,07$ Н, основне зусилля випробування – 882,6 Н, загальне зусилля випробування – 980,7 Н.

Властивості матеріалів

Властивості сталі Ст3пс (ДСТУ2651:2005) задано з використанням моделі білінійної апроксимації пластичних властивостей. Характеристики механічних властивостей визначено експериментально під час випробування стандартних зразків на розтяг [2]. Числові значення білінійної моделі визначено з використанням трипараметричної моделі Рамберга – Озгуда. В остаточному вигляді діаграма роботи сталі Ст3пс у програмному комплексі ANSYS Workbench задана у вигляді графіка за обраної опції «Multilinear kinematic hardening» (рис.1).

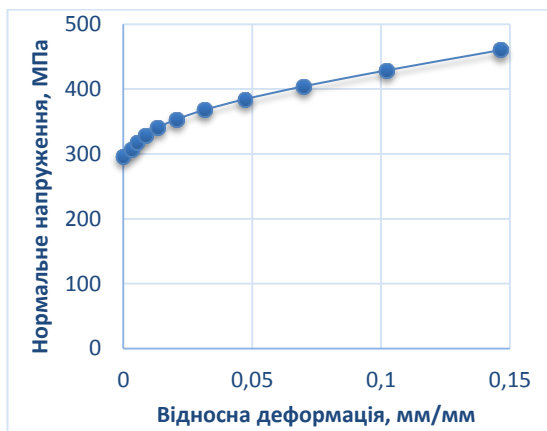
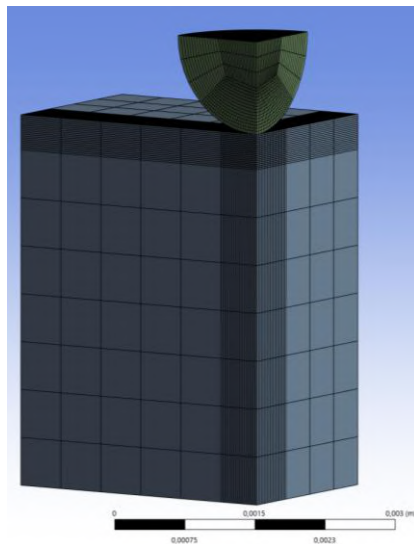


Рис. 1. Діаграма роботи сталі Ст3пс



а)

Властивості індентора з карбіду вольфраму прийнято лінійно пружними з такими характеристиками: модуль пружності $E = 6,33 \times 10^5$ Н/мм², коефіцієнт Пуассона 0,22 [3].

Геометрична модель

Геометрична модель досліджуваного зразка представлена на рисунку 2. Враховуючи симетрію моделі, було побудовано тільки 1/4 її частини.

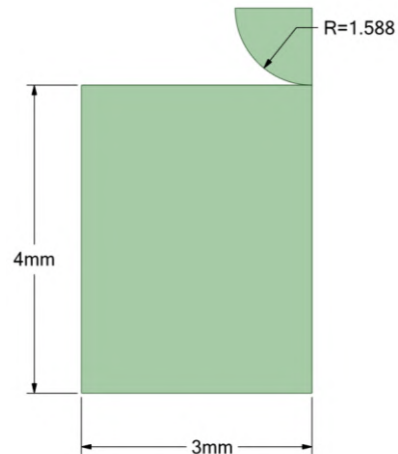
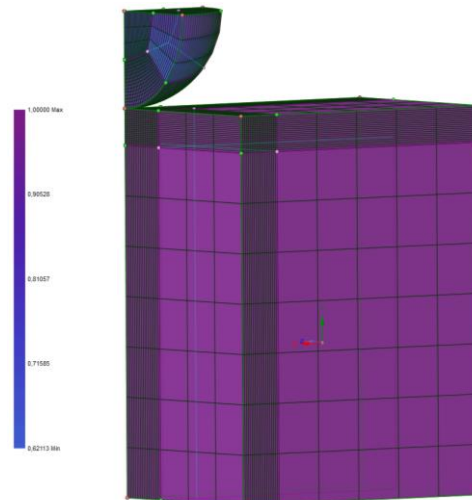


Рис. 2. Геометрична схема зразка індентора

Скінченноелементна модель

Загальний вигляд скінченноелементної моделі наведено на рисунку 3а, при цьому кольорографічна схема, що дає змогу оцінити якість сітки скінченних елементів, представлена на рисунку 3б.



б)

Рис. 3. Розроблена чисельна модель: а) – сітка скінченних елементів; б) – схема оцінювання якості розбиття

У місці контакту індентора з плоскою поверхнею зразка передбачено згущення сітки кінцевих елементів. Загальна кількість вузлів і елементів для створення сітки скінченних елементів склала відпо-

відно 126711 і 29025 одиниць.

На рисунку 4 показано граничні умови, що задані під час розробки чисельної моделі. Переміщення вузлів вертикальних граней зразка та індентора

(забарвлені в жовтий колір) заборонені за напрямками «X» і «Z» глобальної системи координат моделі. Переміщення вузлів нижньої горизонтальної

поверхні моделі заборонені в усіх напрямках глобальної системи координат.

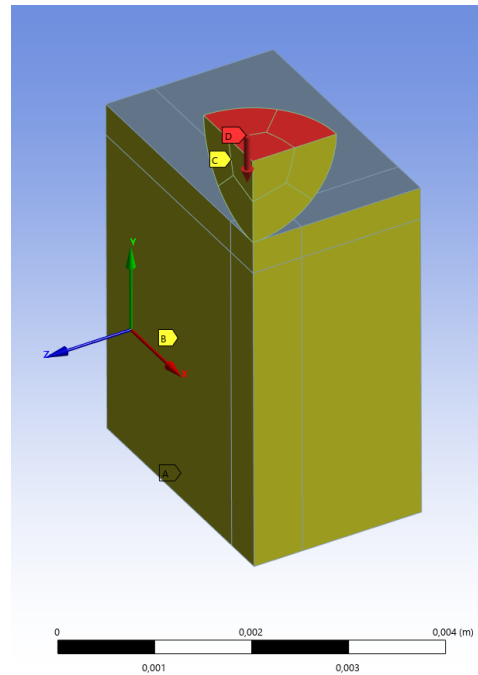
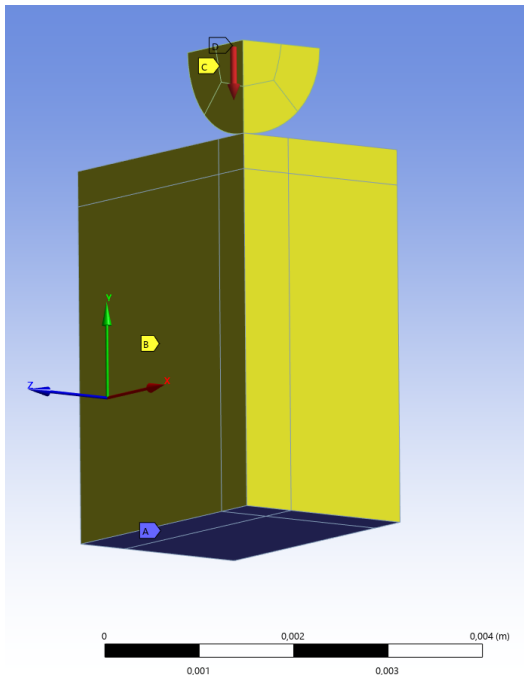


Рис. 4. Граничні умови та умови завантаження чисельної моделі

До моделі поетапно прикладали 1/8 значення стискаючої сили F від попереднього зусилля і 1/8 значення стискаючої сили F від загального зусилля випробувань. На рисунку 5 показано етапи прикладання зусилля при моделюванні випробування. На рисунку 4 стискаюча сила, що віднесена до поверхні індентора, пофарбована в червоний колір.

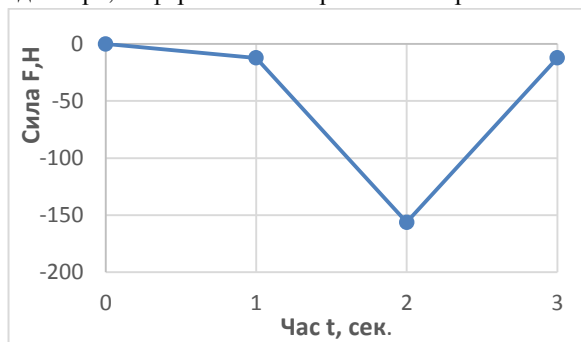


Рис. 5. Графік прикладання зусилля до чисельної моделі

Моделювання взаємодії поверхні індентора з поверхнею досліджуваного зразка здійснено з використанням опції контактної взаємодії типу «Frictional». За контактну поверхню прийнято поверхню зразка, за цільову поверхню прийнято поверхню індентора. Чисельне розв'язання в даній роботі отримано з використанням у програмному комплексі таких параметрів: коефіцієнт тертя $\mu = 0,1$, коефіцієнт нормальної контактної жорсткості $FKN = 0,1$, коефіцієнт для розрахунку допустимого проникнен-

ня $FTLON = 0,1$ [3, 8, 12].

Результати чисельного моделювання

На рисунках 6 – 8 показано вертикальні переміщення (уздовж глобальної осі «Y») елементів чисельної моделі, що отримані з використанням вирішувача «Static Structural», результати відображені для ізометричної та бічної проекції.

Оскільки використовувався кульовий індентор, профіль деформації моделі зразка набув форми вхідного індентора, спричинивши великі деформації в точці контакту та поступово менші деформації при віддаленні від точки контакту. Зважаючи на сферичну форму індентора, це справедливо для всіх радіальних напрямків, проте, напрямком прикладеного навантаження вниз значно збільшує вертикальні деформації.

Залежно від того, як зовнішнє зусилля продовжує вдавлювати кульовий індентор у поверхню сталевго зразка, площа контакту між ними поступово збільшується, унаслідок чого попереднє зусилля розподіляється на зростаючій поверхні контакту. Збільшення площі поверхні контакту призводить до зменшення інтенсивності еквівалентних напружень на його поверхні, які продовжують зменшуватися до тих пір, поки зусилля від попереднього навантаження не дорівнюватиме вертикальній опорній реакції зразка.

При досягненні статичної рівноваги індентор

перестає проникати в зразок. Згідно з отриманим рішенням, максимальне переміщення від впливу попереднього зусилля склало 0,00593 мм, як показано на рисунку 6.

Деформації чисельної моделі, спричинені осно-

вним зусиллям, які зображені на рисунку 7, сліду- ють за тими самими основними принципами, що й для попереднього зусилля. Максимальне перемі- щення від впливу основного зусилля випробування становило 0,0639 мм.

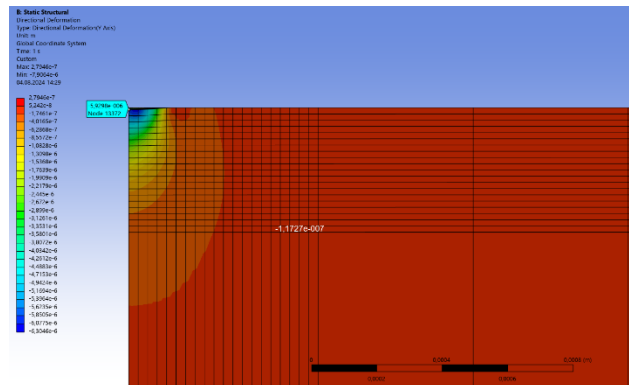
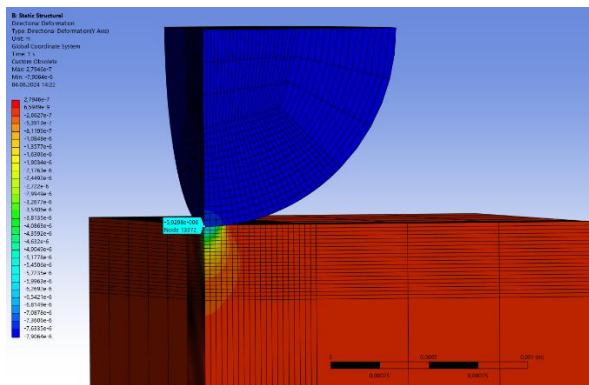


Рис. 6. Вертикальні переміщення елементів моделі $F = 98,07$ Н (попереднє зусилля)

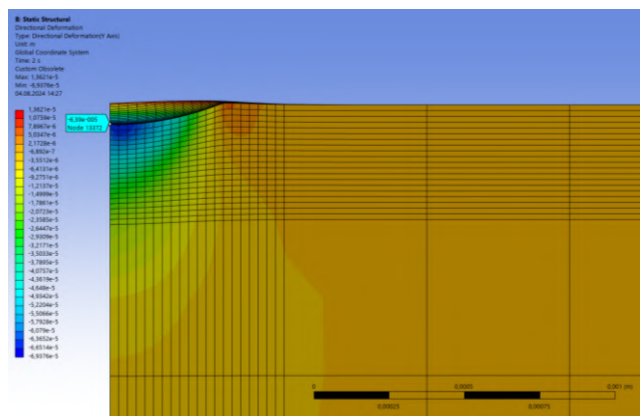
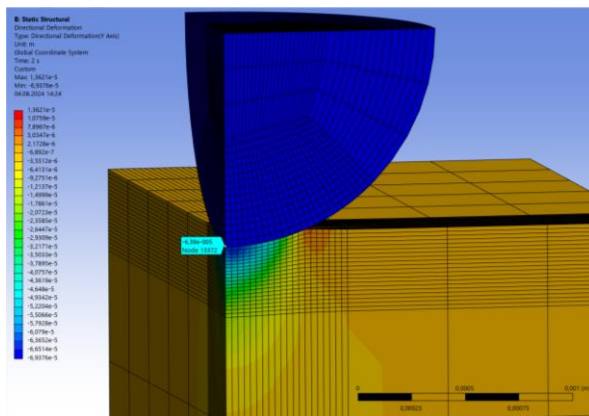


Рис. 7. Вертикальні переміщення елементів моделі $F = 980,7$ Н (загальне зусилля)

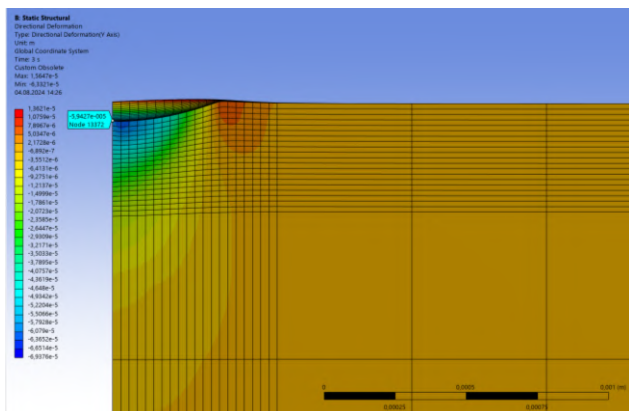
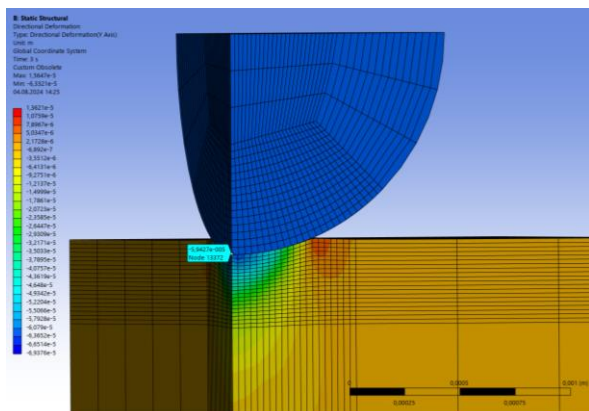


Рис. 8. Вертикальні переміщення елементів моделі $F = 98,7$ Н (після зняття основного зусилля)

На завершальному етапі випробування відбувається видалення основного навантаження, що призводить до часткового відновлення деформованої поверхні зразка за рахунок його пружних властивостей. Оскільки відбувається зняття лише основного

зусилля випробування, повного пружного відновлення зразка не відбувається. На підставі отриманого рішення максимальне переміщення після зняття основного зусилля становило 0,05943 мм (рис.8).

За отриманими значеннями вертикальних переміщень число твердості за Роквеллом (шкала В), може бути розраховане з використанням виразу (1):

$$HRB = 130 - 500 \cdot (H - h), \quad (1)$$

де різниця $(H - h)$ – представляє різницю гли-

Аналіз отриманих результатів

Чисельне рішення передбачило кінцеве значення числа твердості сталевого зразка, що відповідає значенню після процесу термічного зміцнення [1].

Оскільки під час моделювання FEA для визначення переміщень використовують чисельні методи, остаточне рішення завжди буде наближеним. На остаточний результат значний вплив має тип вирішувача, задіяний у чисельному моделюванні, а також окремі параметри моделі. До таких параметрів слід віднести налаштування контактної взаємодії, а також спосіб опису поведінки матеріалу моделі.

Висновки

В умовах обмеженого доступу до лабораторного обладнання чисельне моделювання процесу визначення числа твердості дає змогу продемонструвати студентам усі етапи проведення випробування на якісно новому рівні, а надалі, і порівняння з результатами натурних випробувань.

Література

1. Прокопович І.В. *Металознавство : навчальний посібник*. – Одеса: Екологія. – 2020. – 308 с.
2. Рюмін В.В. *Експериментально – чисельне дослідження роботи плоских сталевих зразків при розтягу* [Текст] / Рюмін В.В., Рюміна Є.А., Агєєнко С.Б., Ляшенко І.Ю. // *Науковий вісник будівництва*. – 2021. Т. 105, вип 3. – С. 99-105.
<https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/475/466>
3. L. Ma. *Simulation and prediction of hardness performance of Rockwell diamond indenters using finite-element analysis* [Текст] / L. Ma, S. Low, J. Zhou, J. Song, R deWit // *Journal of Testing and Evaluation* Vol. 30(4). – 2002. – P. 265-273.
4. Datcheva M. *Numerical simulation of nanoindentation tests - lessons learned* [Текст] / Datcheva M., Chalakova G., Iankov R., Stoychev D. // *International Conference NDT, Sozopol, Bulgaria. e-Journal of Nondestructive Testing*. – 2017. Vol. 22(11). <https://www.ndt.net/?id=21711>
5. L.A. Dobrzański. *Finite Element Method application for modelling of mechanical properties* [Текст] / L.A. Dobrzański, A. Śliwa, T. Tarski // *Computational materials science and surface engineering*. – 2009. Vol. 1. – P. 25-28.
6. Antunes J.M. *Three-dimensional numerical simulation of Vickers indentation tests* [Текст] / Antunes, J.M., Menezes, L.F., Fernandes, J.V. // *International Journal of Solids and Structures*. – 2006. Vol. 43. – P. 784-806.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.048>
7. Mihaela Simion. *Numerical simulation of Vickers micro-indentation test to estimate micro-hardness* [Текст] / Mihaela Simion, Mircea Cristian Dutescu, Radu Chiorean // *Acta technica napocensis Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*. – 2018. Vol. 61. – P. 593-602.
8. L. Wang. *Finite Element Simulation of Surface Micro-Indentation Behavior of Yttria Stabilized Zirconia*

бин занурення індентора після зняття основного навантаження і до його прикладання (за попереднього навантаження) у мм.

$$HRB = 130 - 500 \cdot (0,05943 - 0,00593) = 103,25$$

Thermal Barrier Coatings with Microstructural Characteristic of Columnar Grains and Sub-Grains Based on A Nonlinear Contact Model [Текст] / L. Wang, X.H. Zhong. // *International Journal of Computational Materials Science*. – 2014. – P. 244-256.

9. S.P.L. Madhumali. *Sensitivity Analysis of Brinell Hardness Number to Material Properties of Structural Steel* [Текст] / S.P.L. Madhumali, J.A.S.C. Jayasinghe, C.S. Bandara and A.J. Dammika // *A Numerical Study. Engineer: Journal of the institution of engineers, Sri Lanka*. – 2021. Vol. 54. – P. 75-85. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v54i4.7472>
10. A. Wagih. *Experimental and Finite Element Simulation of Nano-indentation on Metal Matrix Composites: Hardness Prediction* [Текст] / *International Journal of Engineering (IJE), TRANSACTIONS A: Basics*. – 2016. Vol. 29, No. 1. – P.78-86. DOI: [10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.11](https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.11)
11. P. Victor. *Finite Element Method for Simulating the Vickers Hardness Test* [Текст] / P. Victor, P. Catalin, V. Mihai, V. Ionelia, S. Elena-Manuela, P. Doru // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. Vol. 555. – P. 419-424. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.555.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.555.419)
12. W. Rule. *Finite element modeling of Brinell and Rockwell hardness testing of metals* [Текст] // *Problems Involving Thermal-Hydraulics, Liquid Sloshing, and Extreme Loads on Structures*. – 2008. – P. 191-196. DOI: [10.1115/PVP2004-3048](https://doi.org/10.1115/PVP2004-3048)

References

1. Prokopovych I.V. (2020). *Metallurgy: a textbook*, Odesa: Ecology, 308.
2. Riumin V.V., Riumina E.A., Aheyenko S.B., Liashenko I.Yu. (2021). Experimental and numerical study of the work of flat steel specimens in tension. *Scientific Bulletin of Construction*, Vol. 105(3), 99-105.
<https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/475/466>
3. L. Ma, S. Low, J. Zhou, J. Song, R deWit (2002). Simulation and prediction of hardness performance of Rockwell diamond indenters using finite-element analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 30(4), 265-273.
4. Datcheva, M., Chalakova, G., Iankov, R., & Stoychev, D. (2017). Numerical simulation of nanoindentation tests - lessons learned. International Conference NDT Days 2017, June 12-16, Sozopol, Bulgaria. *e-Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 22(11). <https://www.ndt.net/?id=21711>
5. L.A. Dobrzański, A. Śliwa, T. Tarski (2009). Finite Element Method application for modelling of mechanical properties. *Computational materials science and surface engineering*, Volume, 1 issue 1, 25-28.
6. Antunes, J.M., Menezes, L.F., Fernandes, J.V. (2006). Three-dimensional numerical simulation of Vickers indentation tests. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, 784-806.
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.048>
7. Mihaela Simion, Mircea Cristian Dutescu, Radu Chiorean (2018). Numerical simulation of Vickers micro-indentation test to estimate micro-hardness. *Acta technica napocensis Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, Vol. 61, Issue IV, November, 593-602.
8. L. Wang, X.H. Zhong (2014). Finite Element Simulation of Surface Micro-Indentation Behavior of Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings with Microstructural

Characteristic of Columnar Grains and Sub-Grains Based on A Nonlinear Contact Model. *International Journal of Computational Materials Science*, 244-256.

9. S.P.L. Madhumali, J.A.S.C. Jayasinghe, C.S. Bandara and A.J. Dammika (2021). Sensitivity Analysis of Brinell Hardness Number to Material Properties of Structural Steel: A Numerical Study. *Engineer: Journal of the institution of engineers*, Sri Lanka, Vol. 54, Issue: 4, 75-85. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v54i4.7472>

10. A. Wagih (2016). Experimental and Finite Element Simulation of Nano-indentation on Metal Matrix Composites: Hardness Prediction. *International Journal of Engineering*

(IJE), TRANSACTIONS A: Basics, Vol. 29, No. 1, (January), 78-86. DOI: [10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.11](https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.11)

11. P. Victor, P. Catalin, V. Mihai, V. Ionelia, S. Elena-Manuela, and P. Doru (2014). Finite Element Method for Simulating the Vickers Hardness Test. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 555, 419-424. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.555.419](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.555.419)

12. W. Rule. (2008). Finite Element Modeling of Brinell and Rockwell Hardness Testing of Metals. *Problems Involving Thermal-Hydraulics, Liquid Sloshing, and Extreme Loads on Structures*, 191-196. DOI: [10.1115/PVP2004-3048](https://doi.org/10.1115/PVP2004-3048)

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Яровий, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: РІУМІН Володимир Володимирович кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельного проектування Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – volodymyr.riumin@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8884-589X>

Автор: СОЛОДОВНИК Юлія Юріївна асистент кафедри будівельного проектування Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – yuliia.solodovnyk@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5243-9993>

NUMERICAL MODELING OF DETERMINING THE ROCKWELL HARDNESS NUMBER OF A STEEL SAMPLE

V. Riumin, Yu. Solodovnyk

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

In steel Hardness is a mechanical property that indicates the resistance of a material to local plastic deformation caused by mechanical indentation. In engineering, hardness is mainly used to determine the properties of various materials. In mechanical solids, the study of the hardness of materials is usually limited to the study of metals and their mechanical behavior. To understand the mechanism of hardness in metal structures, a basic understanding of materials science is necessary.

Accurate hardness measurement is of great practical importance in the technical diagnosis of potentially hazardous industrial equipment (pipelines, pressure vessels, metal structures). This is primarily due to the fact that this characteristic has a strong correlation with strength and yield strength, which largely determine the possibility of further operation of the equipment. At the same time, one of the main advantages of hardness measurement is the speed of its determination and the non-destructive nature of its control.

A finite element model was developed for the indentation process, and the contact radius and contact pressure were obtained. The Rockwell hardness measurement process was modelled in accordance with the test methodology of DSTU ISO 6508-1:2013. The indentation process was modelled using ANSYS software with different contact models and different loads.

The relevance of solving the problem of modelling the process of determining the surface hardness number using the FEM software ANSYS is determined by the high degree of automation of the solution process. During the modelling, it is assumed that the material of the sample into which the indenter of any shape is pressed is homogeneous isotropic and elastoplastic according to the kinematic plasticity model. This model corresponds to the behavior of steels. In addition, the indenter material is isotropic and linearly elastic. In the developed numerical model, the indenter is taken in the form of a tungsten carbide ball, which corresponds to the scheme for determining the hardness number on the "B" scale.

In conditions of limited access to laboratory equipment, numerical modelling of the process of determining the hardness number allows students to demonstrate all stages of the test at a qualitatively new level, and further, to compare with the results of full-scale tests.

Keywords: structural materials, Rockwell method, finite element model, indenter, hardness.