

doi.org/10.29295/2311-7257-2021-105-3-99-105

УДК 65.05; 628.23

**Рюмін В.В., Рюміна Є.А., Агєєнко С.Б., Ляшенко І.Ю.**

*Харківський національний університет будівництва та архітектури*

(вул. Сумська, 40, Харків 61002, Україна; e-mail: [luger09par@yahoo.com](mailto:luger09par@yahoo.com); [e.a.perepelica@gmail.com](mailto:e.a.perepelica@gmail.com); [sageenko@ukr.net](mailto:sageenko@ukr.net), [summery\\_irina@ukr.net](mailto:summery_irina@ukr.net); orcid.org/0000-0001-8884-589x, orcid.org/0000-0002-0574-0038, orcid.org/0000-0002-6093-0694, orcid.org/0000-0001-6444-8515)

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПЛОСКИХ СТАЛЕВИХ ЗРАЗКІВ ПРИ РОЗТЯГУ

Дослідження роботи сталевих конструкцій за межами пружності матеріалу є на сьогоднішній день актуальною задачею. Слід зазначити, що сучасні програмні комплекси скінчено-елементного аналізу дозволяють при розрахунках використовувати діаграми роботи матеріалу за даними, що отримані в результаті експериментальних досліджень. Якість розрахунків залежить від ступеню коректності характеристик матеріалу моделі. Проведений у роботі порівняльний аналіз результатів експериментальних і чисельних досліджень роботи плоского сталевих зразка при розтягу показав високий ступінь їх збіжності.

**Ключові слова:** плоский зразок, дійсні напруження, дійсні деформації.

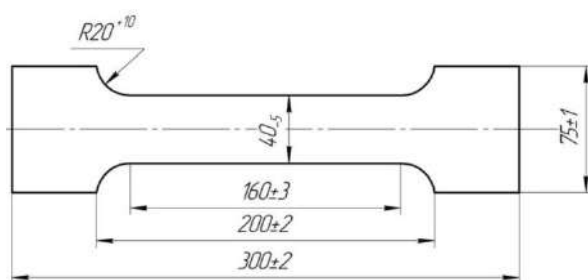
Застосування пакетів скінчено-елементного аналізу дозволяють моделювати поведінку досліджуваної конструкції з високим ступенем відповідності реальним умовам її роботи [1-3]. При цьому необхідно адекватно враховувати роботу матеріалу в конструкції. Вказана обставина є особливо важливою при дослідженні роботи сталевих конструкцій за межами пружної роботи матеріалу [4-7].

У відповідній літературі досить докладно описана стандартна процедура підготовки вихідних даних [8-14], однак підхід до опису властивостей матеріалу за результатами механічних випробувань наведений не в повній мірі.

У ході роботи були проведені механічні випробування сталевих зразків, проведена обробка отриманих даних, а також їх підготовка для використання в комплексах скінчено-елементного аналізу.

Випробування на розтяг плоских зразків виконане відповідно до ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент» і ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84) «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Випробування проводились для серії плоских зразків товщиною 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 мм. Розміри зразків і схема випробувань наведені на рис. 1.



Плоский зразок для випробування



Зразок під час випробувань

Рис. 1. Випробування плоских зразків на розтяг

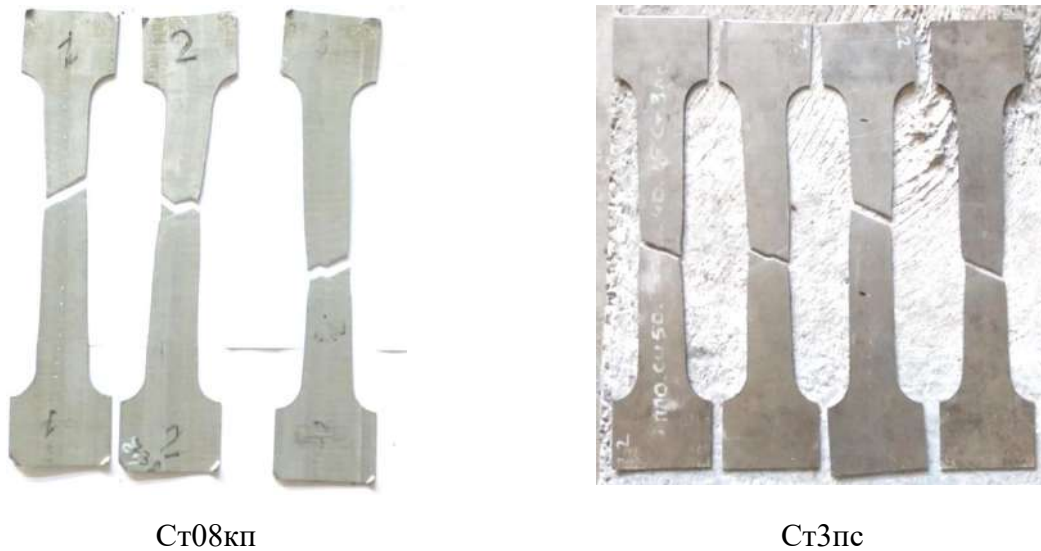


Рис. 2. Зразки після випробувань

Максимальне зусилля, що передуює руйнуванню зразка, визначене за допомогою випробувальної машини УИМ-50.

Для частини плоских зразків побудовані діаграми розтягу. Зусилля, що відповідають межі текучості, визначені графічно. Обробка результатів та визначення механічних характеристик сталі виконане відповідно до ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Встановлення характеристичних значень опорів сталі  $R_{ym}$  і  $R_{um}$  здійснено у відповідності до фактичних значень межі текучості  $\sigma_y$  і тимчасового опору  $\sigma_b$ .

Результати обробки експериментальних даних наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати випробувань зразків при розтягу

№ п/п	Марка сталі	Початкова ширина і товщина зразків $a_0, b_0$ , мм	Початкова площа поперечного перерізу зразка $F_0$ , $cm^2$	Максимальне зусилля $P_{max}$ , кгс	Зусилля за межею текучості $P_T, P_{0,2}$ , кгс	Тимчасовий опір $\sigma_b$ , кгс/ $cm^2$	Межа текучості $\sigma_T, \sigma_{0,2}$ , кгс/ $cm^2$	Відносне подовження $\delta$ , %
1.2/1	Ст08кп	38,5×1,2	0,4620	1620	1020	3506	2208	20
1.2/2	Ст08кп	38,8×1,2	0,4656	1730	1020	3716	2210	18
1.2/3	Ст08кп	39,0×1,2	0,4680	1720	1030	3675	2212	20
2.2/1	Ст3пс	38,5×1,5	0,5775	2290	1370	3965	2947	20

Для використання отриманих експериментальним шляхом характеристик міцності й пластичності сталі в чисельних розрахунках за межами пружної роботи матеріалу необхідно визначити їхні дійсні значення за виразами:

$$\varepsilon^{true} = \ln(1 + \varepsilon^{eng}), \quad (1)$$

$$\sigma^{true} = \sigma^{eng}(1 + \varepsilon^{eng}), \quad (2)$$

де  $\varepsilon^{eng}$  – інженерні деформації;  $\varepsilon^{true}$  – дійсні деформації;  $\sigma^{true}$  – дійсні напруження.

Діаграми роботи матеріалу зразків для інженерних і дійсних значень характеристик механічних властивостей наведені на рис. 3, 4.

Для завдання даних про роботу матеріалу в програмному комплексі необхідно вводити у вигляді характеристик: «дійсні напруження  $\sigma^{true}$  – дійсна пластична деформація  $\varepsilon_{pl}^{true}$ ».

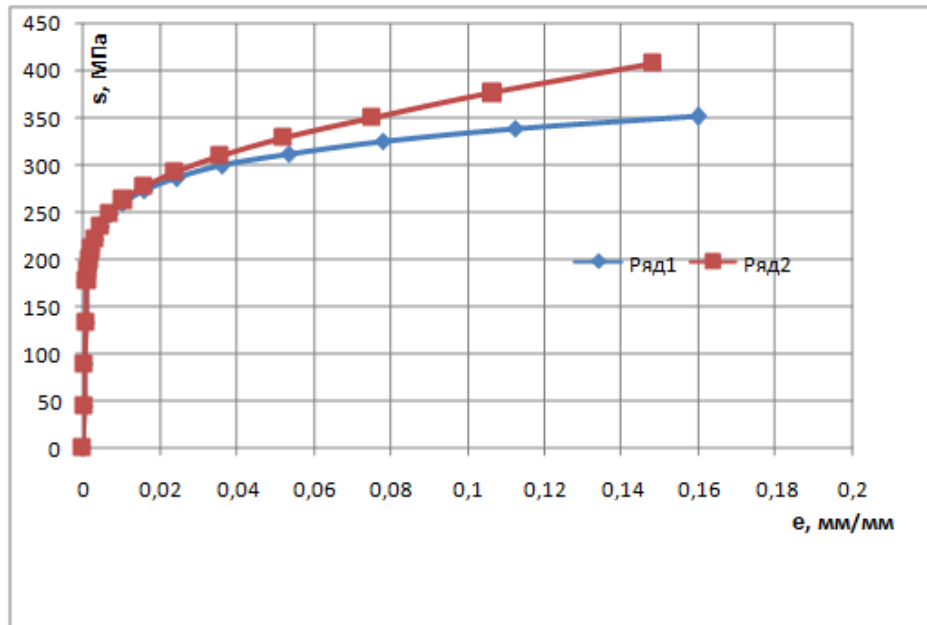


Рис. 3. Залежність «s – e» для зразка із St08kp (ряд1 – інженерні значення, ряд 2 – дійсні значення)

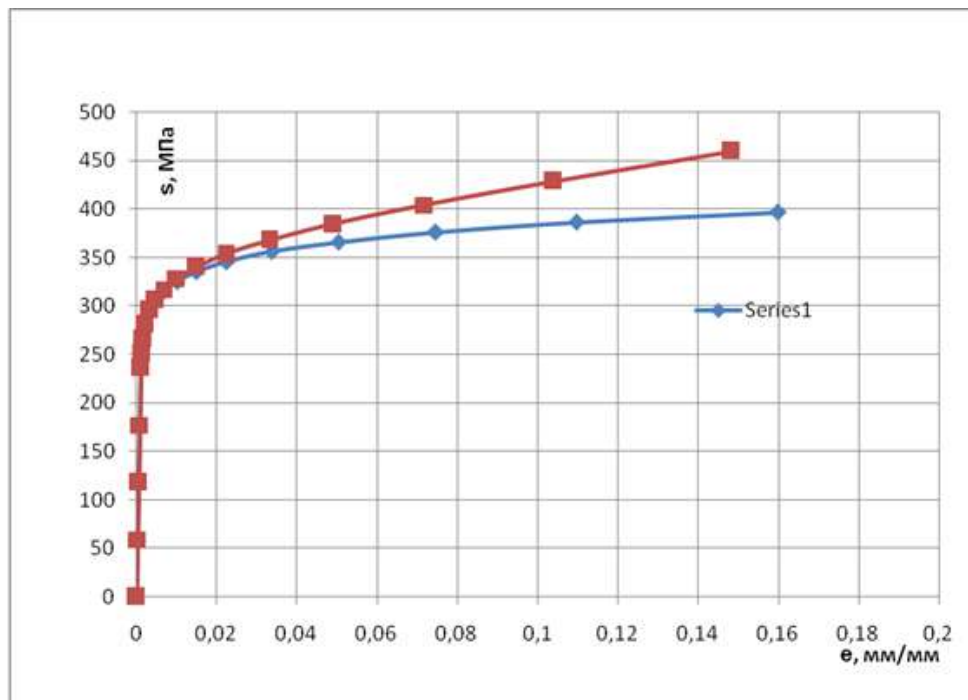


Рис. 4. Залежність «s – e» для зразка із St3ps (ряд1 – інженерні значення, ряд 2 – дійсні значення)

Значення дійсної пластичної деформації  $\varepsilon_{pl}^{true}$  визначається за виразом:

$$\varepsilon_{pl}^{true} = \varepsilon^{true} - \frac{\sigma^{true}}{E}, \quad (3)$$

де  $\varepsilon^{true}$  – дійсні загальні деформації, мм/мм;  $\sigma^{true}$  – дійсні нормальні напруження, МПа; E – модуль Юнга.

Графіки роботи матеріалу в координатах « $\sigma^{true} - \varepsilon_{pl}^{true}$ » наведені на рис. 5.

Аналіз скінченоелементних моделей плоских сталевих зразків здійснювався за допомогою комплексу ANSYS Workbench (рис. 6). Для розрахунків робота матеріалу прийнята у

відповідності до рис. 5. Результати, що отримані в ході чисельних розрахунків порівнювались із результатами натурних випробувань.

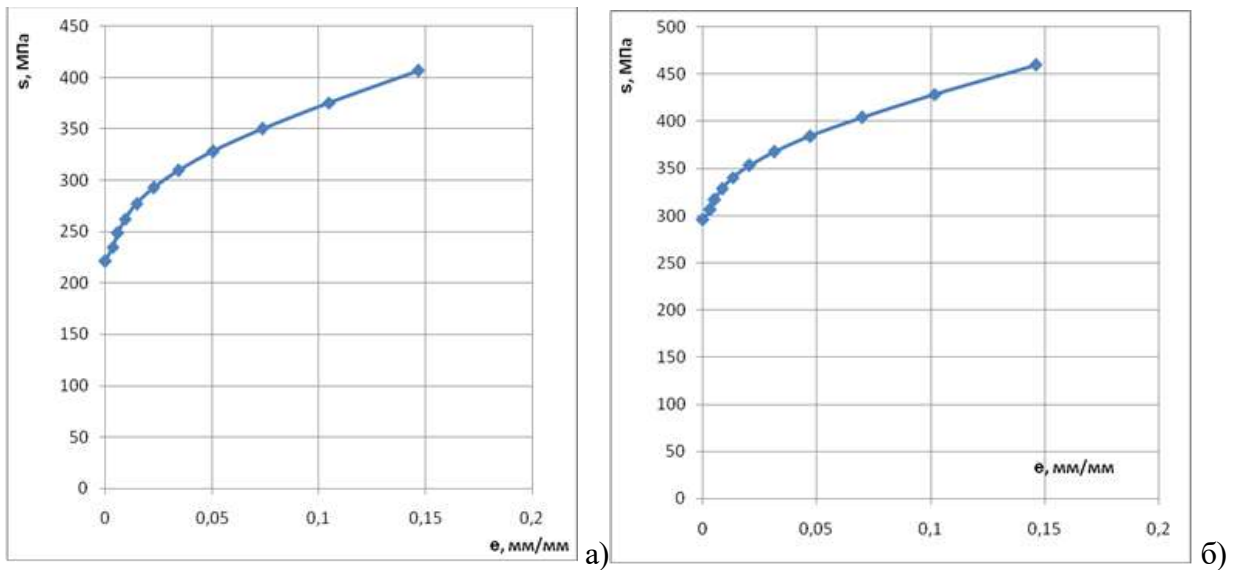


Рис. 5. Залежність « $\sigma^{true} - \epsilon_{pl}^{true}$ »: а – сталь 08кп; б – сталь 3сп

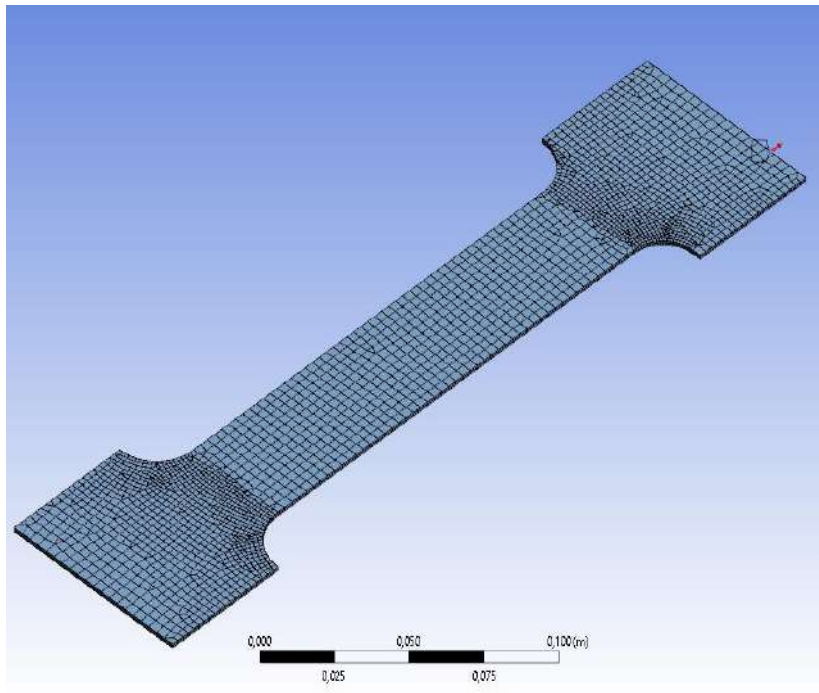


Рис. 6. Чисельна модель плоского зразка

**Аналіз отриманих результатів.** Прийнятий підхід дозволяє дослідити напружено деформований стан за межею зони пружної роботи матеріалу (рис. 7-10).

Як можна бачити із наведених на рис. 7, 8 графіків дані чисельних розрахунків співпадають зі значеннями отриманими під час експерименту в діапазоні значень відносної деформації 0 – 0.1 мм/мм.

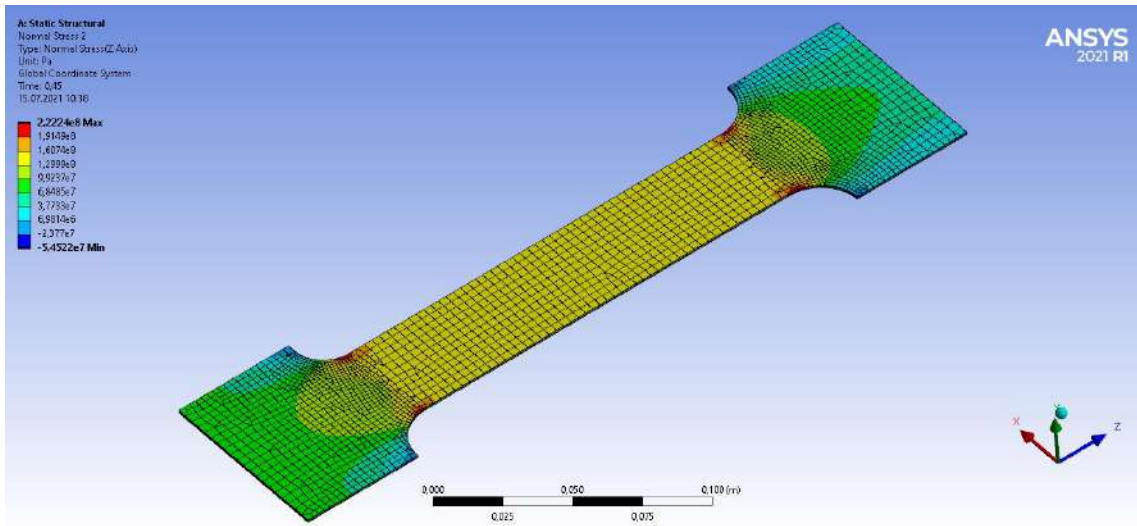


Рис. 7. Розподіл нормальних напружень ( $s_z$ , Па) на межі пружної роботи матеріалу моделі

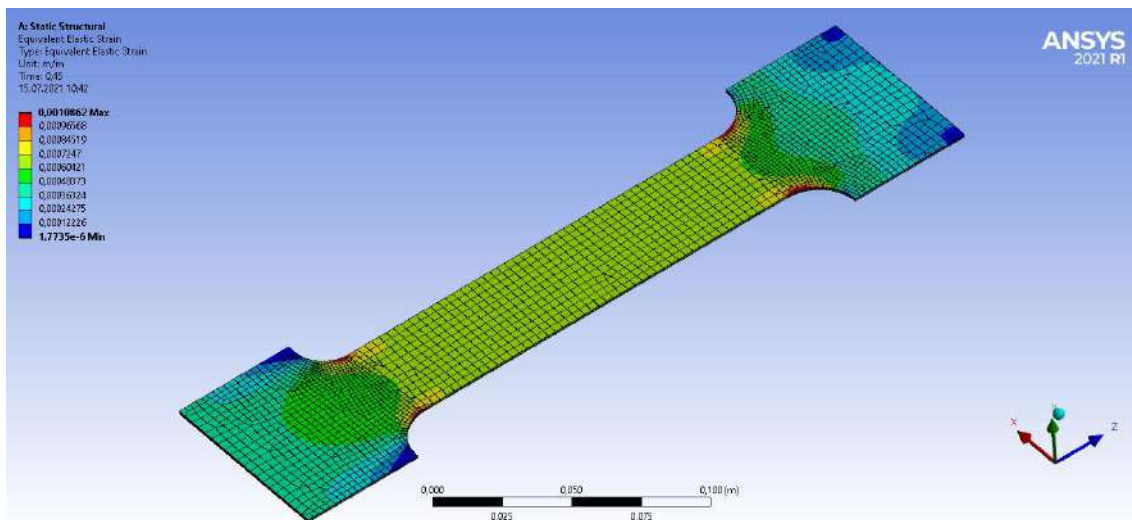


Рис. 8. Розподіл пружних деформацій на межі пружної роботи матеріалу

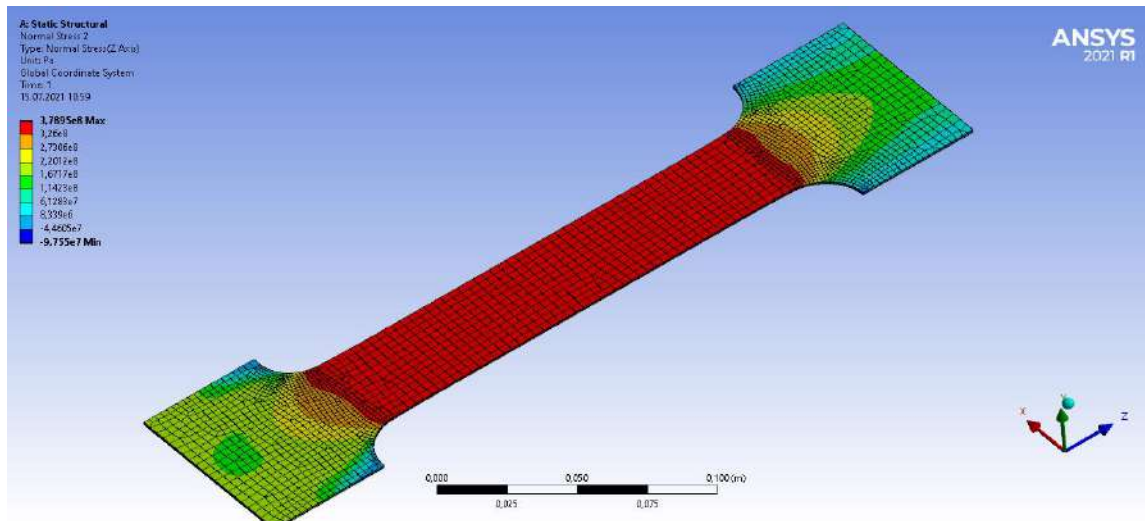


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень ( $s_z$ , Па) при максимальному значенні зусилля розтягу.



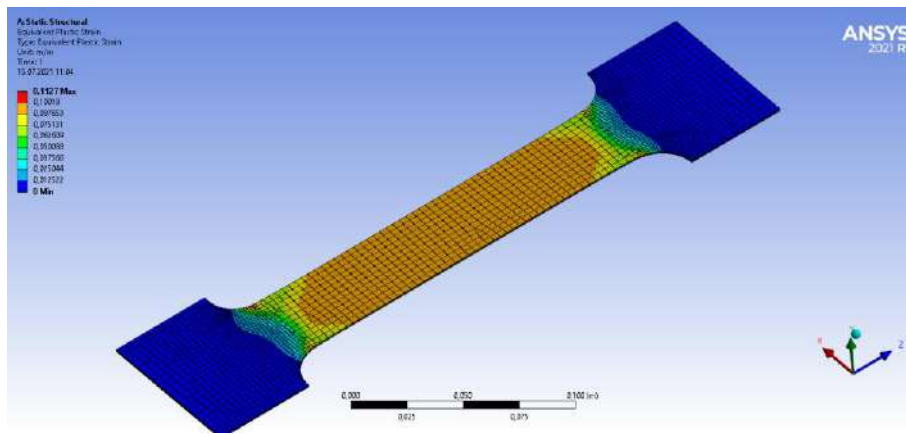


Рис. 10. Розподіл пластичних деформацій при максимальному значенні зусилля розтягу.

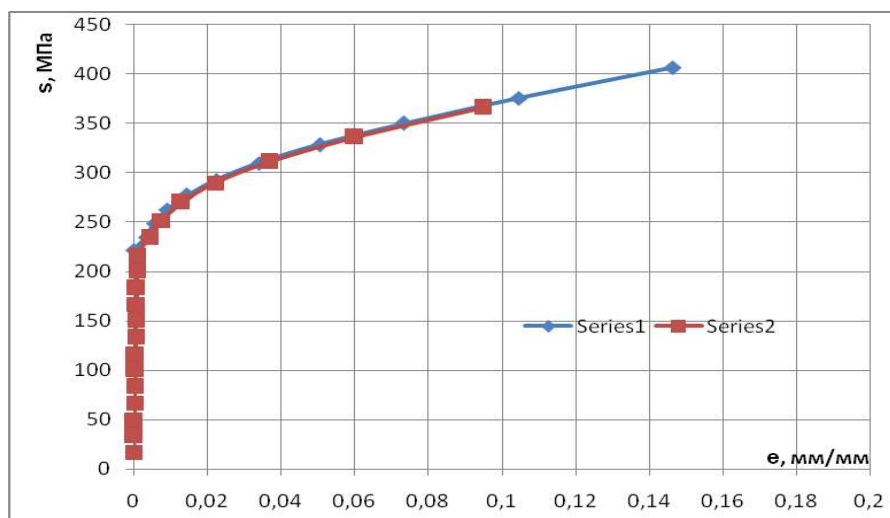


Рис. 11. Зразок із Ст08кп (ряд 1 –дані експерименту, ряд 2 – дані розрахунків).

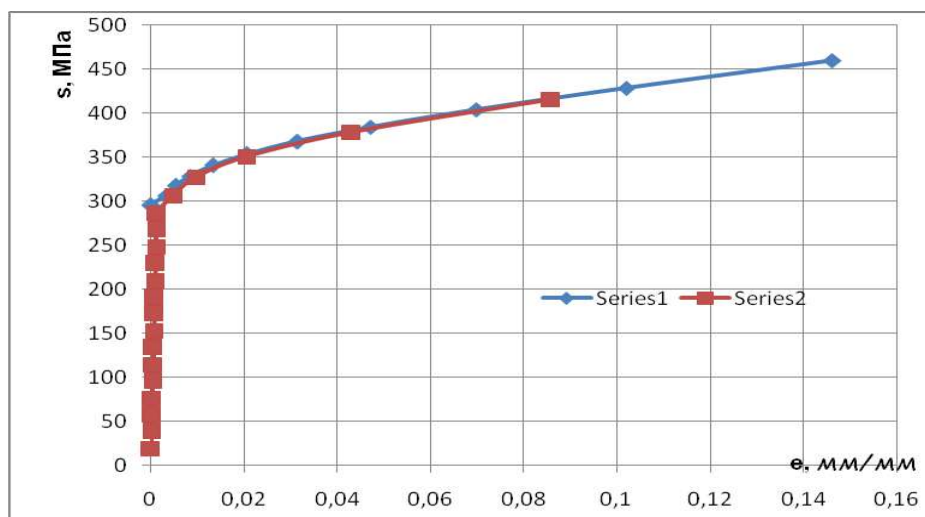


Рис. 12. Зразок із Ст3пс (ряд 1 –дані експерименту, ряд 2 – дані розрахунків).

**Висновки.** На прикладі використання пакету ANSYS Workbench наведено підхід до завдання властивостей матеріалу за результатами лабораторних випробувань. Під час роботи встановлена достатня ступінь відповідності результатів чисельних розрахунків з експериментальними даними. Наведений підхід може бути використаним при розрахунках сталевих конструкцій за межею зони пружних властивостей матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Chen X., Liu Y. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. CRC Press. 2015. 408 p.
2. Huei – Huang Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench 14. SDC Publications 2012. 619 p.
3. Zivkovic M., Vulovic S. Nonlinear static and dynamic structural analysis. Kragujevac, Serbia. 356 p.
4. Bruneau M., Chia-Ming Uang, Sabelli R. Ductile design of steel structures. McGraw Hill, 2011. 920 p.
5. Chen W.F., Han D.J. Plasticity for structural engineers. Springer Verlag. 310 p.
6. Van-Long Hoang, Hung Nguyen Dang. An overview of the plastic hinge analysis of 3D steel frames. Asia Pacific Journal on Computational Engineering. 2015. 2:4. p. 1-34. <https://doi.org.10.1186/s40540-015-0016-9>
7. Bill Wong M. Plastic Analysis and design of steel structures. Elsevier. 2009. 257 p.
8. Choung J.M., Cho S.R. Study on true stress correction from tensile tests. Journal of Mechanical science and technology. 2008. 22. pp. 1039-1051.
9. Yun Ling. Uniaxial true stress-strain after necking. AMP Journal of technology, 1996. Vol. 5. p37-48
10. Zentai B. and Veress A. Verification and validation of static structural and explicit dynamic simulations respectively for plastic products with special care for automotive application. Proceedings of 7th transport research area TRA 2018, Vienna, Austria. 2018.
11. Zhang K.S., Hauge M., Odegard J., Thaulow C. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross section. Int. J. Solids Struct. 1999. 36. 3497-3516.
12. Scheider I., Brocks W. and Cornec A. Procedure for determination of true stress-strain curves from tensile tests with rectangular cross-section specimens. J. Eng. Mater. Tech. 2004. 126. 70-76.
13. Dunne F., Petrinic N. Introduction to computational plasticity. Oxford University Press, 2005. 259 p.
14. Chen W.F., Sohal I. Plastic design and second-order analysis of steel frames. Springer Verlag, 1995. 519 p.

REFERENCES:

1. Chen X., Liu Y. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. CRC Press. 2015. 408 p.
2. Huei – Huang Lee. Finite element simulations with ANSYS Workbench 14. SDC Publications 2012. 619 p.
3. Zivkovic M., Vulovic S. Nonlinear static and dynamic structural analysis. Kragujevac, Serbia. 356 p.
4. Bruneau M., Chia-Ming Uang, Sabelli R. Ductile design of steel structures. McGraw Hill, 2011. 920 p.
5. Chen W.F., Han D.J. Plasticity for structural engineers. Springer Verlag. 310 p.
6. Van-Long Hoang, Hung Nguyen Dang. An overview of the plastic hinge analysis of 3D steel frames. Asia Pacific Journal on Computational Engineering. 2015. 2:4. p. 1-34. <https://doi.org.10.1186/s40540-015-0016-9>
7. Bill Wong M. Plastic Analysis and design of steel structures. Elsevier. 2009. 257 p.
8. Choung J.M., Cho S.R. Study on true stress correction from tensile tests. Journal of Mechanical science and technology. 2008. 22. pp. 1039-1051.
9. Yun Ling. Uniaxial true stress-strain after necking. AMP Journal of technology, 1996. Vol. 5. p37-48
10. Zentai B. and Veress A. Verification and validation of static structural and explicit dynamic simulations respectively for plastic products with special care for automotive application. Proceedings of 7th transport research area TRA 2018, Vienna, Austria. 2018.
11. Zhang K.S., Hauge M., Odegard J., Thaulow C. Determining material true stress-strain curve from tensile specimens with rectangular cross section. Int. J. Solids Struct. 1999. 36. 3497-3516.
12. Scheider I., Brocks W. and Cornec A. Procedure for determination of true stress-strain curves from tensile tests with rectangular cross-section specimens. J. Eng. Mater. Tech. 2004. 126. 70-76.
13. Dunne F., Petrinic N. Introduction to computational plasticity. Oxford University Press, 2005. 259 p.
14. Chen W.F., Sohal I. Plastic design and second-order analysis of steel frames. Springer Verlag, 1995. 519 p.

**Riumin V.V., Riulina E.A., Aheyenko S.B., Liashenko I.Yu. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF STEEL FLAT SPECIMENS UNDER TENSION.** An investigation action of steel constructions above limits of elastic zone is actual problem in modern engineering. It must be said that structural analysis and design programs allows usage of «stress – strain» material diagrams obtained on the experimental data. Design quality heavily depends upon correctness characteristic of model material.

Experimental and numerical analysis of steel specimen in tension carried out. Analysis of obtained results showed a high level of their correlation.

**Key words:** flat template, true stress, true strain.