

УДК 621.787:620.176.16

ВПЛИВ МОДИ ДЕФОРМАЦІЇ ТА НАВОДНЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ 40X З ПОВЕРХНЕВОЮ НАНОСТРУКТУРОЮ

В. І. КИРИЛІВ¹, О. В. МАКСИМІВ¹, І. В. ГУРЕЙ², Б. Р. ЦІЖ^{3,4},
В. І. ГУРЕЙ², Ю. О. КУЛИК⁵

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка";

³ Університет Казимира Великого в Бидгощі, Польща;

⁴ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького;

⁵ Львівський національний університет ім. Івана Франка

Вивчено вплив одно- та різнонапрявленої мод інтенсивної пластичної деформації, генерованої механоімпульсною обробкою, на формування поверхневої нанокристалічної структури сталі 40X та її фізико-механічні властивості без та після електролітичного наводнювання. Така обробка підвищує границю плинності отриманого матеріалу майже вдвічі, характеристики пластичності змінюються неоднозначно: відносне видовження знижується порівняно з вихідним станом, а відносне звуження за різнонапрявленої деформації збільшується. Взято до уваги зростання модуля пружності та формування рівновісної нанокристалічної структури, яка уможливорює перехід інтенсивної пластичної деформації на стадію розвинутої, коли пригнічуються пластичні зсуви і є тільки пластичні розвороти. Встановлено, що після наводнювання різнонапрявлена деформація загалом забезпечує зростання характеристик міцності та зберігає відносне звуження на рівні вихідного матеріалу.

Ключові слова: *поверхнева наноструктура, інтенсивна пластична деформація, фізико-механічні властивості, водень.*

The influence of the unidirectional and multidirectional mode of severe plastic deformation generated by mechano-pulse treatment, on the formation of tensile mechanical properties of the 40X steel with surface nanostructure with and without electrolytic hydrogen charging was studied. Due to such treatment the yield strength of the obtained material was improved in almost 2 times. However, the characteristics of plasticity changed ambiguously: the elongation decreased in comparison with as-received state and the reduction in area after the multidirectional deformation – increased. The increment of the modulus of elasticity and formation of the equiaxed nanocrystalline structure, which enables transition of the severe plastic deformation to the advanced stage when plastic shear is suppressed and only plastic rotation occurs, is considered. It was established that after hydrogen charging, the multidirectional deformation generally provided the increase of the strength characteristics and retained the reduction in area as in the as-received steel.

Keywords: *surface nanostructure, severe plastic deformation, physicomechanical properties, hydrogen.*

Вступ. Поверхневі нанокристалічні структури (НКС) є ефективним способом поліпшення фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів [1–9]. Найпоширенішим способом їх отримання вважають інтенсивну пластичну деформацію (ІПД) [1, 3, 6], яка реалізується, зокрема, механоімпульсною обробкою (МІО) [10]. Використовують енергію високошвидкісного тертя через взаємодію

зміцнювального інструмента з оброблюваною поверхнею в спеціальному технологічному середовищі [7]. В результаті МІО зносостійкість [10, 11], опір втомі та контактній втомі конструкційних сталей підвищуються навіть за дії корозивно-наводнювальних середовищ [12]. Порівнюючи зі звичайними мікроструктурами, НКС характеризуються суттєво вищою міцністю, однак, часто низькою пластичністю [13–17], що обумовлено розмірними обмеженнями генерування та руху дислокацій у нанокристалітах [18].

Одним із чинників впливу на ефективність МІО розглядають геометрію зміцнювального інструмента, від якої залежить мода ПІД [19]. Раніше розглянуто механізм [20, 21] та проаналізовано роль моди ПІД [19, 22] і показано, що мода простого зсуву забезпечує оптимальну схему пластичного структуроутворення. Водночас вплив різнонапрявленої деформації на механічні властивості та опір водневому окрихченню (ВО) поверхневих НКС, отриманих МІО, вивчені недостатньо.

Нижче досліджено структуру, фазовий склад, механічні властивості та схильність до ВО сталі 40Х з поверхневою НКС, отриманою МІО, з одно- та різнонапрявленою термопластичною деформацією.

Матеріал і методики. Досліджували фізико-механічні властивості сталі 40Х (0,45С–1Сr) з поверхневими НКС, отриманими МІО на зміцнених з обох боків плоских зразках. Вивчали структуру, мікротвердість, міцність та пластичність. Механічні властивості сталі за розтягу визначали на плоских зразках завтовшки 1,6 mm та робочою частиною 4×30 mm [10]. Бнали до уваги, що властивості поверхнево зміцнених зразків відображатимуть властивості композита (НКС + матричний матеріал + НКС).

Виконували МІО на плоскошліфувальному верстаті. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з додатком низькомолекулярного поліетилену [10]. Застосовували інструмент трьох робочих профілів, а саме: прямий [19, 23], з нахиленими різнонапрявленими пазами [19] та шевронний [23]. Інструменти двох останніх геометрій забезпечували різнонапрявлену зсувну деформацію. Режими МІО: лінійна швидкість інструмента 60 m/s, швидкість руху стола верстата 1 m/min, глибина врізання інструмента 0,35 mm, поперечна подача 0,5 mm на подвійний хід стола верстата. Схильність металу після МІО до ВО оцінювали на основі порівняльних оцінок характеристик пластичності зразків без та після їх попереднього електролітичного наводнювання (ПЕН), яке здійснювали за густини струму 0,1 mA/cm² впродовж 60 min у 1 N розчині H₂SO₄ + 2,5 g/l тіосечовини.

Фазовий склад поверхневих шарів сталі після зміцнювальної обробки визначали на дифрактометрі-дифрактографі ДРОН-3 в CuK_α-випромінюванні ($U = 30$ kV, $I = 20$ mA) з кроком 0,05° та експозицією у точці 4 s. Обробляли дифрактограми, використовуючи програмне забезпечення CSD [24]. Рентгенограми ідентифікували за картотекою JCPDS-ASTM [25]. Мікротвердість вимірювали на твердомірі ПМТ-3 за навантаження 100 g. Щоб вивчити рівновісність фрагментованих під час МІО зерен, визначали текстуру порівнянням інтенсивності у двох напрямках, а саме, у напрямі деформації вздовж вектора швидкості зміцнювального інструмента та перпендикулярно до нього. Вивчали залежність інтенсивності дифракційного максимуму (110) α-Fe від кута повороту площини зразка стосовно брегівського положення.

Результати та їх обговорення. Внаслідок МІО на поверхнях зразків, оброблених різними інструментами, отримували різну структуру: на зразках після МІО прямим та шевронним інструментами формується мартенситно-аустенітно-цементитна, а після інструмента з нахиленими різнонапрявленими пазами – фе-

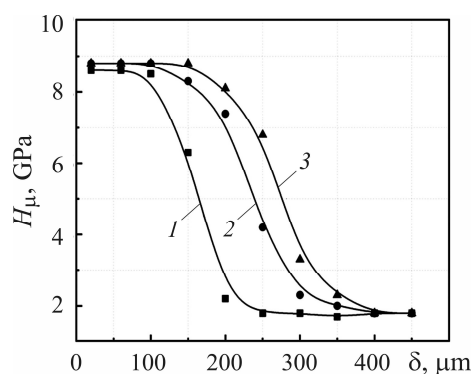
ритно-аустенітно-цементитна структури (табл. 1). Глибина зміцнення наноструктурованого поверхневого шару за використання інструмента з нахиленими різнонапрямленими пазами є найбільшою і сягає 350 μm (рис. 1). Оброблені зразки є композитами з вихідною феритно-перлітною структурою матриці та НКС на двох оброблених поверхнях. Основні мікроструктурні параметри поверхневого шару сталі після МІО наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1. Фазовий склад поверхневого НКС шару сталі 40Х, отриманого інструментами з різним профілем

Тип інструмента		Прямий	З нахиленими різнонапрямленими пазами	Шевронний
Фазовий склад, %	$\alpha\text{-Fe}$	93	88,3	73,0
	$\gamma\text{-Fe}$	2,4	6,4	5,5
	Fe_3C	4,6	5,3	4,6
	FeO	–	–	16,2

Рис. 1. Мікротвердість поверхневого шару сталі 40Х після МІО інструментами з різним профілем: 1 – прямий, 2 – шевронний, 3 – з нахиленими різнонапрямленими пазами.

Fig. 1. Microhardness of the surface layer of 40X steel after mechano-pulse treatment (MPT) by tools with different profiles: 1 – smooth, 2 – chevron, 3 – with multidirectional inclined grooves.



Як бачимо (табл. 2), розміри зерен основної α -фази за використання інструментів для різнонапрямленої деформації змінюються мало. Мікротвердість на поверхні всіх зразків майже однакова і становить 9,3...9,5 GPa.

Таблиця 2. Рентгенівські мікроструктурні параметри α -фази в зразках сталі 40Х, обробленій інструментами з різним профілем

Тип інструмента	$B_{(110)}$	$B_{(310)}$	L , nm	ϵ , %	ρ , $\times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	a , nm
Прямий	0,682	1,552	$10,7 \pm 0,8$	0,077	0,48	0,28654
З нахиленими різнонапрямленими пазами	0,873	1,807	$8,6 \pm 0,6$	0,086	0,65	0,28642
Шевронний	0,733	1,062	$12,9 \pm 1,0$	0,045	0,23	0,28665

Примітка: $B_{(110)}$, $B_{(310)}$ – фізичне розширення максимумів (110) та (310) α -фази, відповідно; L – середній розмір області когерентного розсіювання; ϵ – відносна деформація кристалічної ґратки; ρ – густина дислокацій; a – параметр кристалічної ґратки.

Механічні властивості композита (поверхнева НКС + матричний матеріал) без ПЕН (рис. 2, світлі стовпчики) порівняно із вихідним станом сталі 40Х змінюються так: границя міцності σ_B незначно зростає після МІО трьома інструментами (рис. 2а), тоді як його границя плинності $\sigma_{0,2}$ підвищується майже вдвічі (рис. 2б), тому запас пластичності (відношення $\sigma_{0,2}/\sigma_B$) зменшується. Це узгоджу-

ється зі зменшенням відносного видовження δ (рис. 2с) зразків із поверхневою НКС. Водночас відносне звуження ψ отриманого композита з НКС залишається на рівні необробленої сталі 40Х або навіть дещо підвищується (рис. 2д, стовпчик 4). Суттєве зростання границі плинності зразків з поверхневою НКС пояснюємо впливом двох чинників, які стримують деформування серединних шарів зразка: по-перше, вищою границею плинності бокових шарів (діє в умовах пластичної деформації незміцненого матеріалу), по-друге, зростанням модуля пружності наноструктури внаслідок ІПД [26, 27] (діє навіть в умовах пружної деформації зразка). Зменшення відносного видовження композита є характерним для наноструктур [28, 29].

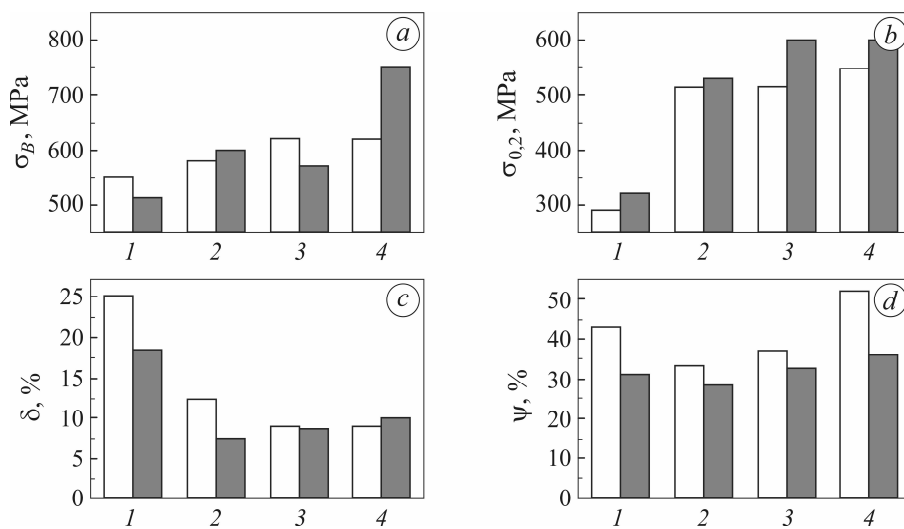


Рис. 2. Залежність механічних властивостей зразків зі сталі 40Х без (світлі стовпчики) та з ПЕН (темні) у вихідному стані (1) та з поверхневою НКС, отриманою МІО (2–4) інструментами з різним профілем: 2 – прямий; 3 – з нахиленими різнонапрямленими пазами; 4 – шевронний.

Fig. 2. Dependence of the mechanical properties of 40X steel specimens without (light columns) and with preliminary hydrogen charging (dark) in the as-received state (1) and with surface nanocrystalline structure obtained by MPT (2–4) using tools with different profiles: 2 – smooth; 3 – with multidirectional inclined grooves; 4 – chevron.

НКС властива висока густина дислокацій (табл. 2), заблокованих домішковими атомами, тому за розтягу композита лінійні переміщення утруднені, однак, можливі пластичні розвороти, які на електронограмах сформованої НКС проявляються у кутах розорієнтування між зернами [10]. Логічно припустити, що за механічного навантаження зразків пластична деформація реалізується за цим же механізмом, тобто через подальший розворот зерен, що, не впливаючи на відносне видовження, призводить до підвищення відносного звуження.

Для вивчення рівності фрагментованих зерен, які, згідно з працею [22], збільшують пластичність НКС, визначали рентгенівським методом зміну інтенсивності текстури кристалітів поверхневого НКС шару у двох напрямках після МІО сталі 40Х трьома типами інструментів (рис. 3). Виявили суттєві відмінності текстури в напрямі деформації поверхні та перпендикулярно до нього.

На рис. 3а наведена залежність нормованої інтенсивності від кута повороту для сталі, обробленої інструментом з прямим профілем. Крива 1 характеризується чітко вираженим максимумом в інтервалі кутів повороту $\alpha = 15...18^\circ$. В цьому розташуванні інтенсивність максимуму (110) суттєво перевищує її значення стосовно берегівського положення ($\alpha = 0^\circ$).

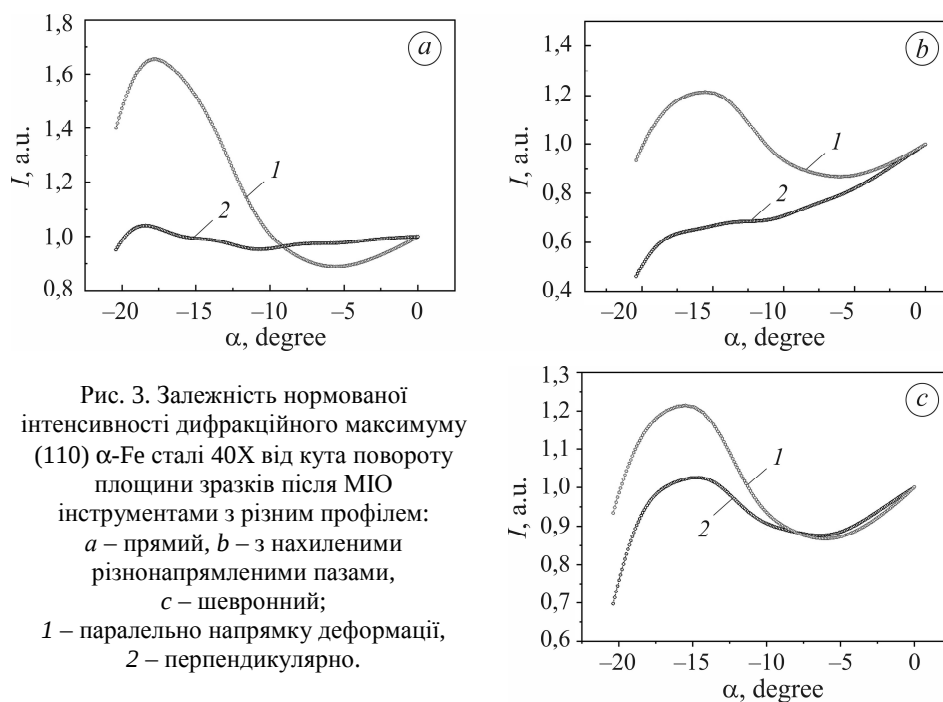


Рис. 3. Залежність нормованої інтенсивності дифракційного максимуму (110) α -Fe сталі 40X від кута повороту площини зразків після МІО інструментами з різним профілем: *a* – прямий, *b* – з нахиленими різнонапрямленими пазами, *c* – шевронний; 1 – паралельно напрямку деформації, 2 – перпендикулярно.

Fig. 3. Dependence of the normalized intensity of the diffraction maximum (110) α -Fe of 40X steel on the rotational angle of the specimens surface after MPT by tools with different profiles: *a* – smooth, *b* – with multidirectional inclined grooves, *c* – chevron; 1 – parallel to the deformation direction, 2 – perpendicular.

Тому можна вважати, що паралельно площині поверхні зразка орієнтуються кристалографічні площини, нормалі до яких утворюють кути приблизно $15...18^\circ$ з нормальми до площин $\{110\}$. Іншими словами, спостерігаємо переважаючу орієнтацію зерен (анізотропію) α -фази в певних кристалографічних напрямках. Водночас крива 2 практично не змінюється стосовно кутового положення зразка, що підтверджує нерівновісний розподіл зерен.

У зразку, обробленому інструментом з нахиленими пазами (рис. 3*b*), спостерігаємо характер залежностей інтенсивності подібний до прямого інструмента (рис. 3*a*). На кривій 1 спостерігаємо максимум на тих же кутах повороту зразка. Слід відзначити також певні зміни для перпендикулярної орієнтації зразка (крива 2), зокрема її поступове зближення з кривою 1, що може свідчити про наближення зерен α -фази до рівновісного характеру.

Криві 1 та 2 на рис. 3*c* вказують на однакову залежність від кута повороту зразка сталі 40X, обробленого інструментом з шевронним профілем, оскільки обидві відповідають взаємно перпендикулярним його орієнтаціям. Отже, можемо припустити, що тут розподіл зерен α -фази має рівновісний характер.

Щодо зміни механічних властивостей після ПЕН, необхідно відмітити, що границя плинності всіх зразків (рис. 2, темні стовпчики) підвищується, що з фізичного погляду свідчить про утруднення воднем пластичної деформації. Водночас не можна відкидати підвищення воднем модуля пружності сталі з поверхневою НКС, як і його зростання внаслідок наводнювання для зразків із полікристалічної сталі [30]. Відносне звуження ψ (рис. 2*d*) як вихідних зразків, так і зразків із поверхневою НКС після ПЕН знижується по-різному за використання інструментів різної геометрії, що вказує на різну чутливість зміцненого матеріалу до ВО. Водночас рівень пластичності за цим показником майже однаковий для всіх типів зміцнювального інструмента, що не надає особливої переваги якомусь ва-

ріанту МІО з огляду на ступінь ВО. Стосовно впливу водню на відносне видовження δ , можна виділити практично його відсутність при застосуванні інструмента з нахиленими різнонапрямленими пазами та шевронної геометрії.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що мода одно- та різнонапрямленої деформації під час формування поверхневої наноструктури механоімпульсною обробкою сталі 40Х з використанням різних зміцнювальних інструментів призводить до зростання границі плинності та відносного звуження матеріалу з поверхневою НКС. Різнонапрямлена деформація шевронним інструментом сталі 40Х виявилася найсприятливішою з погляду оцінювання механічних характеристик після наводнювання, забезпечивши зростання міцності та збереження відносного звуження на рівні вихідного матеріалу. Важливим чинником такої механічної поведінки отриманого композита є підвищення модуля пружності сформованої НКС та формування рівновісної текстури деформації. Попереднє електролітичне наводнювання окрихчує матеріал композита зі зміцненими МІО боковими НКС шарами.

1. Umemoto M. Nanocrystallization of steels by severe plastic deformation // *Materials Transactions*. – 2003. – **44**, № 10. – P. 1900–1911. <https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1900>
2. Lu K. and Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2004. – **375–377**. – P. 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
3. Microstructure evolution of the carbon steels during surface severe plastic deformation / M. O. Vasylyev, B. N. Mordyuk, S. M. Voloshko, and D. A. Lesyk // *Progress in Physics of Metals*. – 2021. – **22**, № 4. – P. 562–618. <https://doi.org/10.15407/ufm.22.04.562>
4. Головка В. В., Костін В. В., Жуков В. В. Вплив нандомодифікування на мікроструктуру металу зварних низьколегованих сталей // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – **59**, № 6. – С. 111–117.
5. Grosdidier T. and Noveli M. Recent developments in the application of surface mechanical attrition treatments for improved gradient structures: processing parameters and surface reactivity // *Materials Transactions*. – 2019. – **60**, № 7. – P. 1344–1355. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201929>
6. Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size / Q. Lin, H. Liu, C. Zhu, D. Chen, and S. Zhou // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – 398. – Article number 126054. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126054>
7. Nanostructured low carbon steels obtained from the martensitic state via severe plastic deformation, precipitation, recovery, and recrystallization / T. Muller, A. Bachmaier, A. Stark, N. Schell, and R. Pippan // *Adv. Eng. Mater.* – 2018. – **21**, № 1. – Article number 1800202. <https://doi.org/10.1002/adem.201800202>
8. Hybrid structure of white layer in high carbon steel – formation mechanism and its properties / R. Hossain, F. Pahlevani, E. Witteveen, A. Benerjee, B. Joe, B. Gangahara Prusty, R. Dippenaar, and V. Sahajavalla // *Scientific Reports*. – 2017. – **7**. – Article number 13288. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13749-7>
9. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances / K. Edalati, A. Bachmaier, V. Beloshenko, Y. Beygelzimer, V. Blank, W. Botta, K. Bryla, J. Cizek, S. Divinski, N. Enikeev, Y. Estrin, and G. Faraji // *Mater. Res. Lett.* – 2022. – **10**. – P. 163–256. <https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779>
10. Mechanical Fabrication Methods of Nanostructured Surfaces / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, and O. Zviko // *Handbook of modern coating technologies. Fabrication methods and functional properties*. – Amsterdam: Elsevier, 2021. – P. 25–67. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06047-4>
11. Wear resistance of the surface nanocrystalline structure under an action of diethylene glycol medium / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Kochubei, R. Boyko, and V. Dovhunyk // *Appl. Nanosci.* – 2019. – **9**, № 5. – P. 1085–1090. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0690-3>

12. *Serviceability of 60KH2M roll steel with surface nanostructure* / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikovs'kyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko, and P. Ya. Sydor // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 848–853. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0030-x>
13. *Ductility of nanostructured materials* / C. C. Koch, D. G. Morris, K. Lu, and A. Inoue // *MRS Bulletin*. – 1999. – **24**. – P. 54–58. <https://doi.org/10.1557/S0883769400051551>
14. *Overview of processing, microstructure and mechanical properties of ultrafine grained bcc steels* / R. Song, D. Ponge, D. Raabe, J.G. Speer, and D. K. Matlock // *Mater. Sci. and Eng. A*. – 2006. – **441**. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.095>
15. *Structure and mechanical behavior of bulk nanocrystalline materials* / J. R. Weertman, D. Farkas, K. Hemker, H. Kung, M. Mayo, R. Mitra, and H. Van Swygenhoven // *MRS Bulletin*. – 1999. – **24**. – P. 44–53. <https://doi.org/10.1557/S088376940005154X>
16. *Tensile properties of in situ consolidated nanocrystalline Cu* / S. Cheng, E. Ma, Y. M. Wang, L. J. Kecskes, K. M. Youssef, M. M. Koch, U. P. Trociewitz, and K. Han // *Acta Materialia*. – 2005. – **53**, № 5. – P. 1521–1533. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.12.005>
17. *Near-perfect elastoplasticity in pure nanocrystalline copper* / Y. Champion, C. Langlois, S. Guerin-Mailly, P. Langlois, J. L. Bonnetain, and M. J. Hytch // *Science*. – 2003. – **300**, № 5617. – P. 310–311. <https://doi.org/10.1126/science.1081042>
18. *Van Swygenhoven H., Derlet P. M., and Froseth A. G. Nucleation and propagation of dislocations in nanocrystalline fcc metals* // *Acta Materialia*. – **54**, № 7. – P. 1975–1983. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.12.026>
19. *The mode deformation effect on surface nanocrystalline structure formation and wear resistance of steel 41Cr4* / V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Gurey, I. Hurey, Y. Kyryliv, and O. Zvirko // *Coatings*. – 2023. – **12**, № 2. – Article number 249. <https://doi.org/10.3390/coatings13020249>
20. *Simultaneous enhancement of strength and ductility with nano dispersions in nano ultrafine grain metals a brief review* / Y. Hu, Z. Yu, G. Fan, Z. Tan, J. Zhou, H. Zhang, Z. Li, and D. Zhang // *Reviews of Adv. Mater. Sci.* – 2020. – **59**, № 1. – P. 352–360. <https://doi.org/10.1515/rams-2020-0028>
21. *Segal V. M. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear* // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2002. – **338**, № 1–2. – P. 331–344. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00066-7)
22. *Segal V. M. Deformation mode and plastic flow in ultra fine grained material* // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2005. – **406**, № 1–2. – P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.06.035>
23. *Influence of Hydrogen on Mechanical Properties of Steels with the Surface Nanostructure* / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, V. Kyryliv, and O. Maksymiv // *Nanoplasmonics, Nano-Optics, Nanocomposites, and Surface studies*. – Cham: Springer, 2015. – **167**. – P. 457–466. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18543-9_32
24. *Krous W. and Nolze G. Powder Cell – A Program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns* // *J. Appl. Cryst.* – 1996. – **29**. – P. 301–303. <https://doi.org/10.1107/S0021889895014920>
25. *Powder Diffraction File Search Manual: Alphabetical Listing and Search Section of Frequently Encountered Phases*. – Philadelphia: JCPDS, 1974. – 839 p.
26. *Kyryliv V. I., Zakiev V. I., and Maksymiv O. V. Change of the modulus of elasticity of the surface nanostructured layer on U8 steel* // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 795–800. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00732-z>
27. *Rawat K. and Goyal M. Young's modulus and vibrational frequency dependence on shape and size in nanomaterials* // *Mater. Today: Proceedings*. – 2021. – **42**, № 4. – P. 1633–1637. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.188>
28. *Segal V. M., Ferrasse S., and Alford F. Tensile testing of ultra fine grained metals* // *Mater. Sci. Eng. A*. – 2006. – **422**, № 1–2. – P. 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.016>
29. *Kurzydowski K. J. Microstructural refinement and properties and properties of metals processed by severe plastic deformation* // *Bul. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* – 2004. – **52**, № 4. – P. 301–311.
30. *Skalskyi V. R., Nazarchuk Z. T., and Hirnyi S. I. Effect of electrolytically absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steels* // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 4. – P. 491–499. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9529-y>

Одержано 02.03.2023