

УДК 669.14.018.262:621.771.23.016.2

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359810

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ХОЛОДНОКАТАНОГО ПРОКАТУ
З КИПЛЯЧИХ МАРОК СТАЛІ**

Пашинська О.Г. д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя; пров. наук. співробітник, Донецький фізико-технічний інститут імені О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7102-1544>, e-mail: e.g.pashinskaya@mipolytech.education

У роботі проведено комплексне дослідження нестабільності механічних властивостей холоднокатаних сталей марок 08кп та DC01, виготовлених в умовах мартенівського виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Проблема стабільності структури та властивостей металевих матеріалів протягом тривалого часу є однією з центральних у сучасній металургії та матеріалознавстві. Актуальність дослідження обумовлена високою чутливістю киплячих сталей до процесів деформаційного старіння через відсутність у їхньому складі алюмінію та наявність вільного азоту. Мартенівська сталь характеризується специфічним вмістом газів та неметалевих включень, що робить її більш чутливою до нестабільності властивостей у часі порівняно зі спокійними марками сталі. Об'єктом дослідження є механічні властивості низьковуглецевих сталей, які змінюються внаслідок старіння металу та обумовлюють основні якісні характеристики прокату. Дослідження проведені на відпаленому та потім проресурсованому з обтисненням 1% холоднокатаному прокаті. Зразки зберігалися при кімнатній температурі, а випробування на розрив проводилися щотижня протягом пів року. На основі отриманих даних за допомогою середовища Microsoft Excel були побудовані регресійні криві зміни механічних властивостей сталей у часі. Встановлено, що протягом шести місяців природного старіння найбільш суттєвих змін зазнає межа плинності, яка зростає в середньому на 10% (20–35 МПа). Значне зростання межі плинності спостерігається після 30 діб зберігання. Показники межі міцності та відносного подовження демонструють вищу стабільність і змінюються не суттєво. Фізична природа цього явища в досліджуваних сталях пов'язана з міграцією вільних атомів вуглецю та азоту до дислокацій з утворенням «атмосфер Коттрелла», які блокують рух дислокацій при початковій стадії пластичної деформації. Оскільки сталь мартенівської виплавки не містить алюмінію, який міг би зв'язати азот у стабільні нітриди, процеси старіння розвиваються інтенсивніше, ніж у спокійних конвертерних сталях. Виявлено, що додатковий розкид властивостей пов'язаний з природною ліквідацією хімічних елементів (C, Mn, S, P) по довжині та ширині рулону, про що свідчить низький коефіцієнт детермінації R^2 кривих старіння. Отримані результати дозволяють уточнити гарантійні терміни зберігання прокату та надати рекомендації споживачам щодо термінів його переробки для запобігання зниженню штампованості металу.

Ключові слова: кипляча сталь; регресійна модель; природне старіння; межа плинності; якість прокату; холоднокатаний прокат; хімічна неоднорідність.

Постановка проблеми

Проблема стабільності структури та властивостей металевих матеріалів протягом тривалого часу є однією з центральних у сучасній металургії та матеріалознавстві. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених сталям конвертерної виплавки, особливості старіння прокату з киплячих сталей мартенівської виплавки потребують додаткового уточнення. Мартенівська сталь характеризується специфічним вмістом газів та неметалевих включень, та відсутністю у її складі алюмінію, який запобігає процесам старіння. Крім того, наявність вільного азоту в киплячих марках (08кп) робить їх більш чутливими до нестабільності властивостей у часі порівняно зі спокійними марками сталі. Розуміння механізмів старіння саме для киплячих марок сталі мартенівської виплавки 08кп, DC01 дозволить точніше прогнозувати терміни зберігання прокату для пригнічення негативних ефектів старіння.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження процесів старіння охоплюють широкі матеріали: від алюмінієвих сплавів [1] та

наплавлених металів типу сормайт [2] до жароміцних корозійностійких сплавів [3]. Як показує досвід вивчення складних систем, термічна обробка та умови охолодження радикально впливають на подальшу фазову стабільність [1, 4, 5].

Для сталей, що використовуються у відповідальних конструкціях, таких як магістральні газопроводи або енергоблоки АЕС, процеси старіння та структурної деградації є критичними факторами безпеки [6-8]. Багаторічна експлуатація призводить до накопичення пошкоджень, що детально описано в роботах, присвячених деградації трубних сталей [9].

Старіння низьковуглецевих конструкційних сталей має свою специфіку, пов'язану з дифузією атомів впровадження. У сучасній закордонній літературі значна увага приділяється довготривалим ефектам деформаційного старіння [10, 11] та їх впливу на механічні властивості сталі за умов високих швидкостей навантаження [12].

Дослідники зазначають, що деформаційне старіння не лише змінює статичну міцність, а й впливає на втомну витривалість металу, що залежить від розміру зерна [13, 14]. Зокрема, для частково пошкодженої

структури сталі ефект старіння може виступати як фактор додаткового зміцнення, так і як чинник зниження пластичності [15].

Мета статті

Метою даної роботи є комплексне дослідження зміни механічних властивостей холоднокатаного прокату з киплячих сталей марок 08кп та DC01 мартенівської виплавки в процесі природного старіння. Щоб більш наглядно оцінити розбіг хімічного складу по ширині та довжині рулону (особливо по головному зміцнюючому елементу – вуглецю) дослідження зміни хімічного складу по ширині та довжині рулону провели на холоднокатаному рулоні сталі марки 3пс (яка відрізняється більшим вмістом вуглецю ніж сталі 08кп та DC01).

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є механічні властивості низьковуглецевих сталей, які змінюються внаслідок старіння металу та обумовлюють основні якісні характеристики прокату.

Дослідження проведені на відпаленому та потім продресированому (з обтисненням 1%) холоднокатаному прокаті мартенівської виплавки (з розливанням сталі у зливки) виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Від двох рулонів марок сталі 08кп та DC01 товщиною 1,5мм (ковшовий хімічний склад сталі наведений у таблиці 1) були відібрані карти металу, з яких виготовили по 26 зразків холоднокатаного металу для проведення випробувань на розрив. Зразки вирізали поперек напрямку вісі прокатки як це затверджено у нормативній документації.

Зразки зберігалися при кімнатній температурі. На випробувальній машині «AVERY» 7113DCJ/B/P-4908 кожен тиждень робили розривні випробування 1 зразка з фіксацією отриманого результату. Після випробувань всієї партії зразків за допомогою середовища Microsoft Excel були побудовані регресійні криві зміни механічних властивостей сталей у часі.

Хімічний аналіз, наведений у дослідженні, проводився за допомогою настільного спектрометру "SPECTROMAXx LMA10".

Таблиця 1

Хімічний склад плавки (за аналізом ковшової проби), на яких проводили дослідження.

Марка сталі	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
08кп	0,07	0,36	0,01	0,024	0,027
DC01	0,08	0,4	0,01	0,019	0,015
3пс	0,19	0,37	0,01	0,029	0,025

Для вивчення розподілу хімічних елементів у сталі в залежності від довжини та ширини прокату взяли також типову марку сталі 3пс, від якої відібрали проби на визначення хімсоставу від 5 горизонтів по ширині (крайка, 1/4 ширини, середина, 3/4 ширини та протилежна крайка) та 5 горизонтів по довжині рулону (початок смуги, 1/4 довжини смуги, середина по довжині смуги, 3/4 довжини смуги та кінець смуги). Ця марка сталі більш показова з точки зору розкиду значень хімічного складу по вуглецю, так як сталь 3пс відрізняється більшим вмістом вуглецю, ніж сталі 08кп та DC01.

Виклад основного матеріалу

Дослідження процесів старіння проведені на киплячих марках сталі мартенівського виробництва, у хімічному складі яких відсутній алюміній. Процеси старіння у таких марках розвиваються більш інтенсивно, ніж у спокійних конверторних сталях, в яких у хімічному складі присутній алюміній і хімічний состав яких наближений до нестаріючої марки сталі 08ю. Процес старіння досліджували на протязі пів року через те, що в середньому саме такий час холоднокатаний прокат знаходиться між виробництвом на комбінаті та виготовленням деталей з нього у споживача.

3 аналізу наведених на графіках рис. 1 та рис. 2 регресійних моделей можна зауважити:

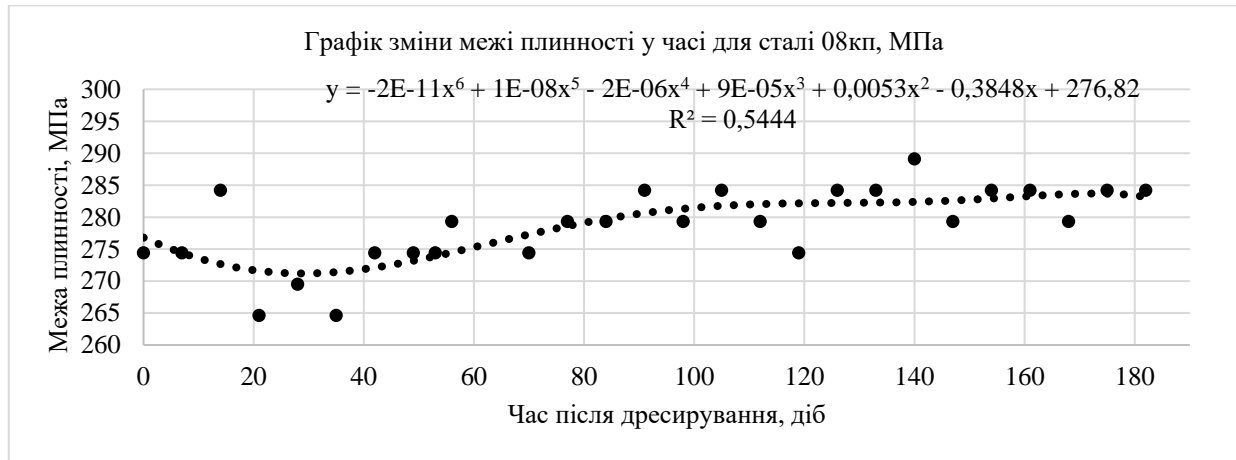
1. Процес старіння оказує найбільший вплив саме на межу плинності холоднокатаного прокату, збільшуючи її в середньому на ~ 20-35 МПа (або ~ 10%) на протязі півроку. Особливо великий ріст межі плинності спостерігається після 30 діб зберігання. Вплив старіння на межу міцності не такий значний та знаходиться десь на межі ~ 5-20 МПа (або ~ 3,5%) за півроку. Несуттєво впливає старіння на величину відносного подовження, воно, як показують графіки, змінюється незначно.

2. Спостережуване зростання межі плинності при відносно стабільній межі міцності є класичною ознакою деформаційного старіння, що розвивається в часі. Фізична природа цього явища в досліджуваних сталях 08кп та DC01 пов'язана з міграцією вільних атомів вуглецю та, переважно, азоту до дислокацій.

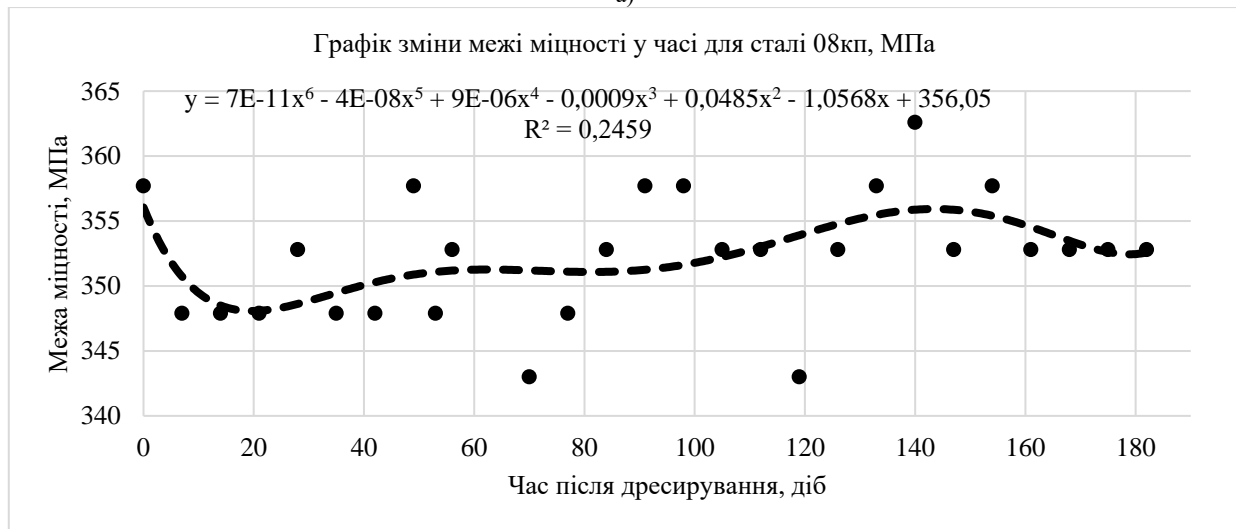
Оскільки сталь мартенівської виплавки не містить алюмінію, який міг би зв'язати азот у стабільні нітриди, вільний азот залишається в твердому розчині фериту. З плином часу ці атоми впровадження утворюють навколо дислокацій так звані «атмосфери Коттрелла», які блокують рух дислокацій при початковій стадії пластичної деформації. Це призводить до ефекту «закріплення» дислокацій, що на макрорівні проявляється як різке підвищення зусилля, необхідного для початку руху дислокацій металу.

Нижчий рівень стабільності властивостей киплячих сталей порівняно зі спокійними (наприклад, 08ю) пояснюється саме відсутністю бар'єрів для дифузії азоту. Отримані дані підтверджують, що після

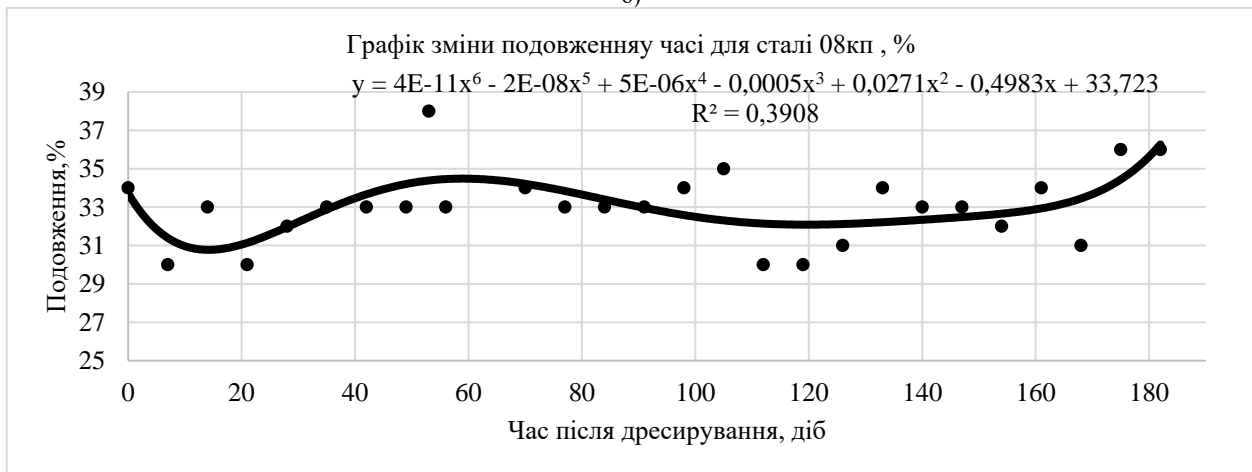
дресирування тимчасово усувається майданчик плинності. Але через 2–4 тижні процеси старіння відновлюються, що критично для споживачів, які використовують глибоку витяжку.



а)

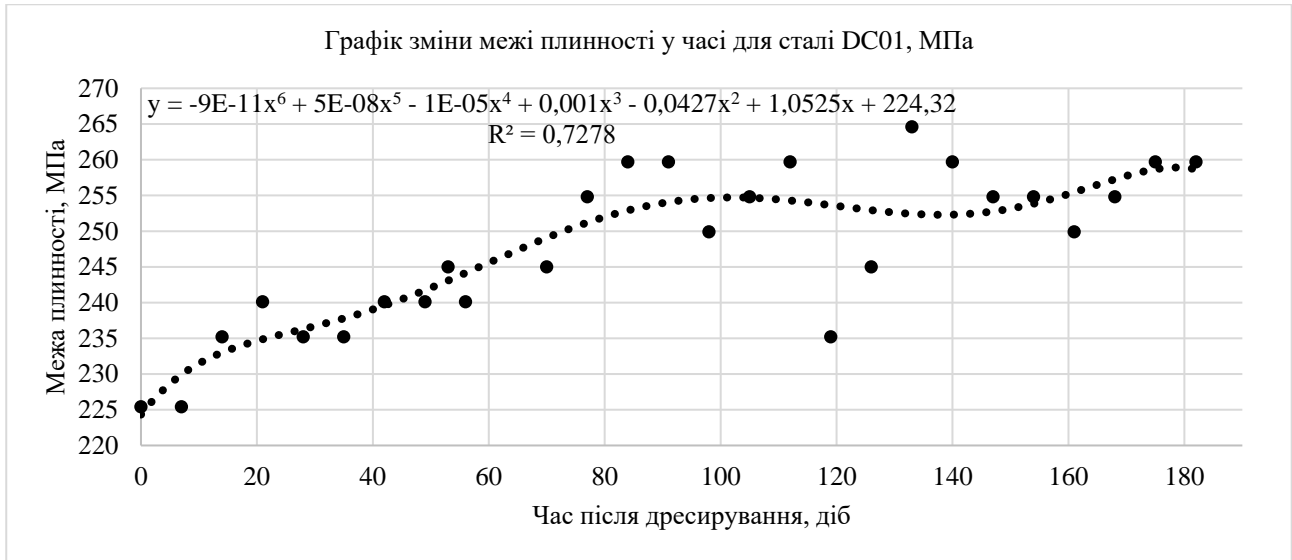


б)

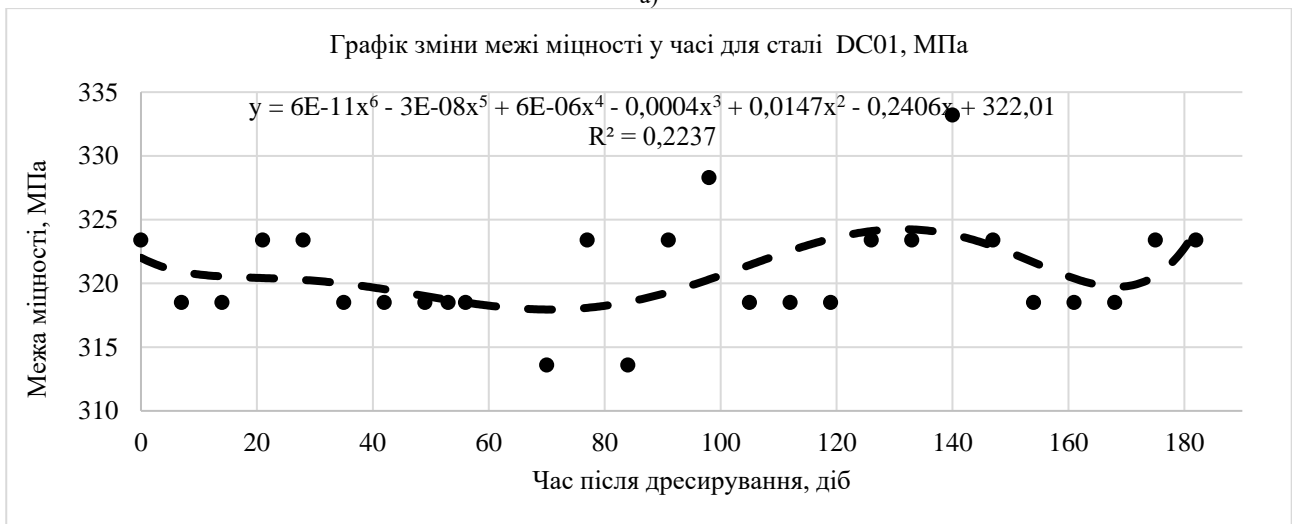


в)

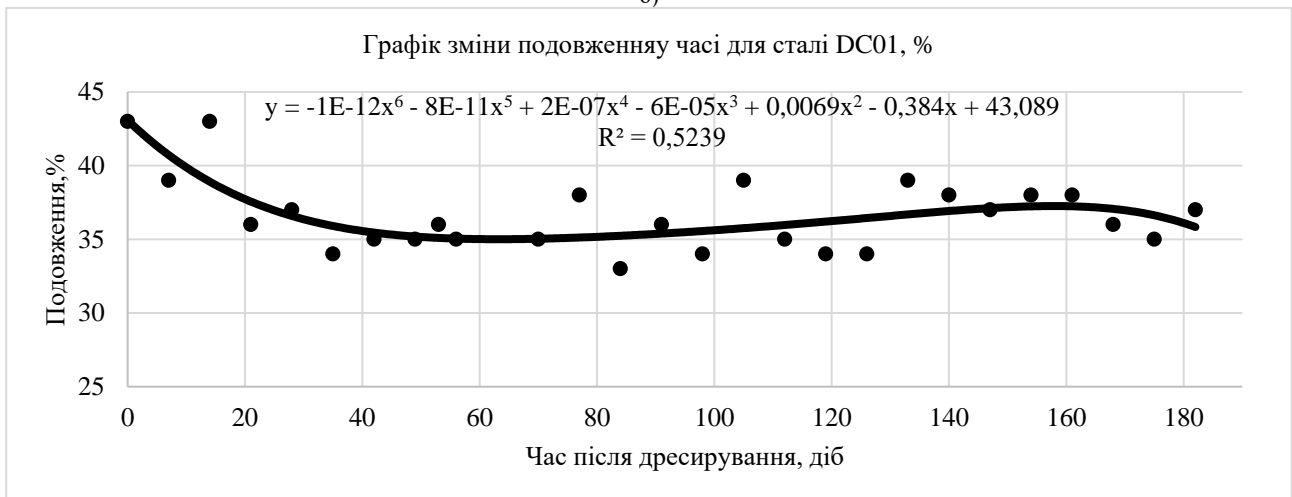
Рис. 1 – Графіки зміни механічних властивостей у часі сталі марки 08кп: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження



а)



б)



в)

Рис. 2 – Графіки зміни механічних властивостей у часі сталі марки DC01: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження

3. Наведені криві механічних властивостей мають досить низький коефіцієнт детермінації:

- криві межі плинності – $R^2 = 0,544-0,728$;
- для кривих межі міцності – $R^2 = 0,246-0,224$;
- для подовження – $R^2 = 0,391-0,524$.

Розкид значень (низький R^2), окрім похибок вимірювання, значною мірою може бути зумовлений мікронеоднорідністю структури, що характерно для великих зливок мартенівської сталі. Для підтвердження ідеї впливу цього чинника на розкид значень було проведено окреме додаткове дослідження на сталі марки Зпс.

Результати наведені на графіках, зображених на рис. 3 та рис. 4, та показують:

1. Максимальне коливання вуглецю по ширині штаби становить 0,05% або 26,6% по ширині штаби. Розкид значень по ширині та довжині смуги становив від 0,01 до 0,05%, при рівні (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,14–0,21%.

2. Максимальне коливання вмісту марганця по ширині штаби становить 0,03% або 8,2% по ширині штаби. Розкид значень від 0,01 до 0,03%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,35–0,38%.

3. Максимальне коливання вмісту фосфору по ширині штаби становить 0,004% або 16,8% по ширині штаби. Розкид значень від 0,001 до 0,004%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,021–0,026%.

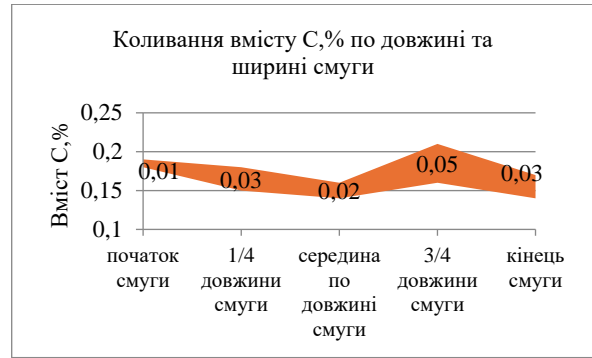
4. Максимальне коливання вмісту сірки по ширині штаби становить 0,007% або 23% по ширині штаби.

Розкид значень від 0,002 до 0,007%, за рівня (мінімум – максимум по всіх горизонтах) 0,021–0,033%. За іншими елементами розбіг значень становив 0%, які значення склали: Si-0,01%, Cr-0,03%, Ni-0,02%, Cu-0,02%.

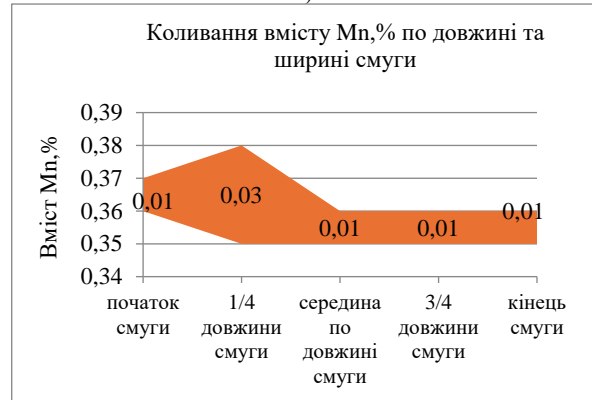
Як видно, коливання хімічного складу основних зміцнюючих елементів сталі по ширині однієї й тієї ж ділянки смуги складає 8,2–23%, що, відповідно, спричиняє коливання механічних властивостей цієї смуги (рис. 4):

- межі плинності – на 14,7 МПа або на 5,2%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\sigma_T = 269,5-308,7$ МПа;
- межі міцності – на 9,8 МПа або на 2,4%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\sigma_B = 396,9-436,1$ МПа;
- відносного подовження – 3% або на 10%, при цьому рівень цього показника (мінімум – максимум по всіх горизонтах) становив: $\delta_4 = 28-33\%$.

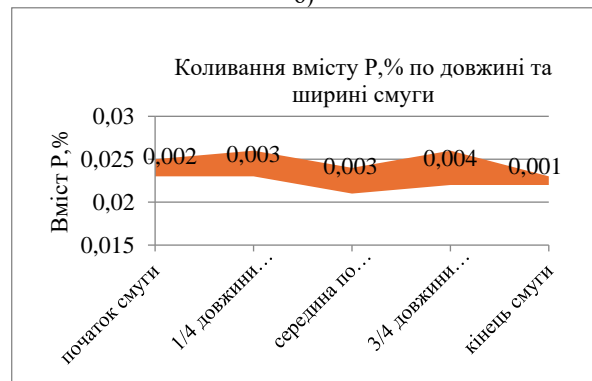
Проведені випробування зміни хімічного складу в межах одного холоднокатаного рулону сталі марки Зпс мартенівської виплавки з розливанням у зливки підтвердили значні коливання хімічних елементів по довжині та ширині рулону, зокрема по ширині ці коливання склали 8,2–23%. Встановлено, що саме цей фактор відповідно впливає й на розкид результатів механічних властивостей сталі.



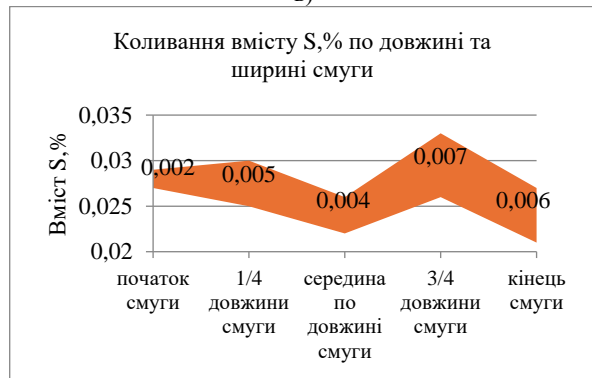
а)



б)

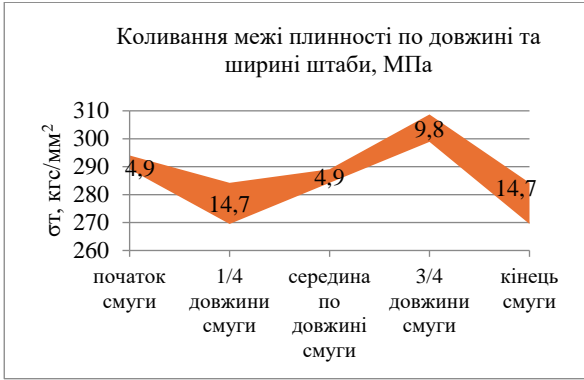


в)

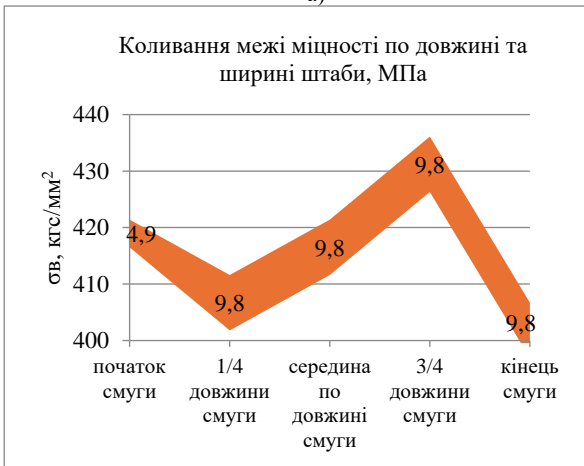


г)

Рис. 3 – Графік коливання основних хімічних елементів по ширині та довжині холоднокатаного рулону сталі марки Зпс: а) вуглецю; б) марганцю; в) фосфору; г) сірки



а)



б)



в)

Рис.4 – Графік коливання механічних властивостей сталі марки Зпс по довжині та ширині штаби: а) межа плинності; б) межа міцності; в) відносне подовження

Висновки

1. В ході проведеної роботи досліджено зміну механічних властивостей холоднокатаного відпаленого та потім продресированого прокату найбільш затребуваних низьковуглецевих марок сталі 08кп та DC01 на протязі півроку. Встановлено, що процес старіння

більш за все впливає на межу плинності, зміцнюючи метал на 20-35 МПа.

2. Показано, що процес природного старіння має обмежений вплив на межу міцності та відносьне подовження. Протягом півроку зміна межі міцності становить лише близько 3,5%, що є технічно малозначущим. Аналогічна тенденція спостерігається і для показників відносного подовження, які змінювалися незначно.

3. Для запобігання проблем росту межі плинності з часом низьковуглецевих марок сталі 08кп та DC01 можна рекомендувати споживачам металопродукату з мартенівської сталі проводити його переробку у стислі терміни (до 30 діб). Це особливо важливо, якщо метал виробляється за Євростандартом, де регламентується межа плинності цих сталей.

Перелік використаних джерел

- [1] Лабур Т. М., Яворська М. Р., Коваль В. А. Вплив термічної обробки на структуру і механічні властивості тонколистового алюмінієвого сплаву В1341 та його зварних з'єднань, виконаних тіг зварюванням. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 7. С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.03>.
- [2] Структура та властивості наплавленого металу сплаву типу Сормайт-1 після природного старіння / Ч. В. Пулька та ін. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 6. С. 18–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.06.03>.
- [3] Фазово-структурна стабільність жароміцного корозійностійкого сплаву для литих робочих лопаток ГТУ / А. М. Верховлюк та ін. *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 3. С. 3-9.
- [4] Скрябінський В.В., Нестеренков В.М., Русиник М.О. Вплив термічної обробки на механічні властивості з'єднань при електронно-променевому зварюванні сплаву 2219. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 12. С. 48-52. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.12.07>.
- [5] Грабовський В. Я., Шило Д. О. Ефективність сходинкового старіння сплаву з інтерметалідно-карбідним зміцненням для інструментів гарячого деформування металів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 2. С. 14–18.
- [6] Деградація властивостей сталей магістральних газопроводів упродовж їх сорокарічної експлуатації / Г. М. Никифорчина та ін. *Проблеми прочності*. 2009. № 5. С. 66-72.
- [7] Черноусенко О. Ю., Нікуленкова Т. В., Нікуленков А. Г. Етапи реалізації управління старінням елементів енергоблоків АЕС. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 9(1181). С. 85-89. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.09.12>.

- [8] Мандрюк О. М. Аналіз причин аварійних ситуацій та руйнувань магістральних газопроводів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Том 25, № 1. С. 155-162.
- [9] Миндюк В.Д. Дослідження особливостей структурної деградації тривало експлуатованих трубних сталей. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2015. № 2(39). С. 101-110.
- [10] Long-term strain ageing effects on low-carbon structural steels / F. Xu et al. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025. Vol. 231. Article 109579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109579>.
- [11] Loporcario G., Pampanin S., Kral M. V. Long-term strain-ageing effects on low-carbon steel reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. Article 116606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.332>.
- [12] Strain ageing effect on the temperature dependent mechanical properties of partially damaged structural mild-steel induced by high strain rate loading / Hosseini S., Heidarpour A., Collins F., Hutchinson C. R. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 123. Pp. 454–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.001>.
- [13] Chong C. J. The effects of strain ageing and grain size on fatigue in low carbon steels : Dissertation Doctor of Philosophy. Christchurch : University of Canterbury, 1980. 261 p.
- [14] Sarnet J. Some measurements of the ageing of a carbon steel. 2024. 51 p.
- [15] Effect of strain ageing on the mechanical properties of partially damaged structural mild steel / Hosseini S., Heidarpour A., Collins F., Hutchinson C. R. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 77. Pp. 83-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.021>.

RESEARCH INTO THE AGEING PROCESSES OF COLD-ROLLED PRODUCTS MADE FROM BOILING STEEL GRADES

Pashynska O.

D.Sc. (Engineering), senior research fellow, «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC» LLC, Zaporizhzhia; leading researcher, Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O. O. Galkin of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7102-1544>, e-mail: e.g.pashinskaya@mipolytech.education

The paper presents a comprehensive study of the instability of the mechanical properties of cold-rolled steels of grades 08kp and DC01 manufactured in the open-hearth production facilities of PJSC Zaporizhstal. The problem of the stability of the structure and properties of metallic materials over a long period of time is one of the central issues in modern metallurgy and materials science. The relevance of the study is due to the high sensitivity of boiling steels to deformation ageing processes due to the absence of aluminium in their composition and the presence of free nitrogen. Open-hearth steel is characterised by a specific content of gases and non-metallic inclusions, which makes it more sensitive to instability of properties over time compared to calm steel grades. The object of the study is the mechanical properties of low-carbon steels, which change as a result of metal ageing and determine the main quality characteristics of rolled products. The research was conducted on annealed and then pre-stretched cold-rolled steel with 1% compression. The samples were stored at room temperature, and tensile tests were conducted weekly for six months. Based on the data obtained, regression curves of changes in the mechanical properties of steels over time were constructed using Microsoft Excel. It was found that during six months of natural ageing, the most significant changes occur in the yield strength, which increases by an average of 10% (20–35 MPa). A significant increase in yield strength is observed after 30 days of storage. The tensile strength and relative elongation values demonstrate higher stability and do not change significantly. The physical nature of this phenomenon in the steels studied is associated with the migration of free carbon and nitrogen atoms to dislocations with the formation of ‘Cottrell atmospheres,’ which block the movement of dislocations at the initial stage of plastic deformation. Since open-hearth steel does not contain aluminium, which could bind nitrogen into stable nitrides, ageing processes develop more intensively than in calm converter steels. It has been found that the additional spread of properties is associated with the natural segregation of chemical elements (C, Mn, S, P) along the length and width of the coil, as evidenced by the low coefficient of determination R² of the ageing curves. The results obtained allow us to refine the warranty terms for rolled products and provide recommendations to consumers regarding the terms of its processing to prevent a decrease in the stampability of the metal.

Keywords: boiling steel; regression model; natural ageing; yield strength; rolled product quality; cold-rolled products; chemical heterogeneity.

References

- [1] T. M. Labur, M. R. Yavorska, and V. A. Koval, “Vplyv termichnoi obrobky na strukturu i mekhanichni vlastyivosti tonkolystovoho aliuminiieвого сплаву V1341 ta yoho zvarnykh ziednan, vykonanykh tig zvariuvanniam” [“Effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of thin-sheet aluminum alloy V1341 and its welded joints made by TIG welding”], *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic Welding*, no. 7, pp. 25–31, 2020. doi: 10.37434/as2020.07.03.
- [2] Ch. V. Pulka, V. S. Senchyshyn, I. B. Okipnyi, Vit. S. Senchyshyn, and R. T. Bishchak, “Struktura ta vlastyivosti naplavlenoho metalu сплаву типу Sormait-1 pislia pryrodnoho starinnia” [“Structure and properties of the deposited metal of the Sormait-1 type alloy after natural aging”], *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic Welding*, no. 6, pp. 18–20, 2023. doi: 10.37434/as2023.06.03.
- [3] A. M. Verkhovliuk, I. I. Maksyiuta, Yu. H. Kvasnytska, H. P. Mialnitsa, and O. V. Mykhnian, “Fazovostrukturna stabilnist zharomicnoho koroziiinostiikoho сплаву dlia lytykh robochykh lopatok HTU” [“Phase-structural stability of heat-resistant corrosion-resistant alloy for cast working blades of GTU”], *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal Science and Treatment of Metals*, no. 3, pp. 3–9, 2016.
- [4] V. V. Skriabynskyi, V. M. Nesterenkov, and M. O. Rusynuk, “Vplyv termichnoi obrobky na mekhanichni vlastyivosti ziednan pry elektronno-promenevomu zvariuvanni сплаву 2219” [“Effect of heat treatment on the mechanical properties of joints in electron-beam welding of 2219 alloy”], *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic Welding*, no. 12, pp. 48–52, 2023. doi: 10.37434/as2023.12.07.
- [5] V. Ya. Hrabovskiy, and D. O. Shylo, “Efektyvnysh skhidynchastoho starinnia сплаву z intermetalidno-karbidnym zmitsnenniam dlia instrumentiv hariachoho deformuvannia metaliv” [“Efficiency of step aging of an alloy with intermetallic-carbide strengthening for tools of hot metal deformation”], *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, no. 2, pp. 14–18, 2019.
- [6] H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyryllyuk, D. Yu. Petryna, and M. I. Hredil, “Dehradatsiia vlastyivostei stalei mahistralnykh hazoprovodiv uprodovzh yikh sorokarichnoi ekspluatatsii” [“Degradation of the properties of main gas pipeline steels during their forty-year operation”], *Problemy prochnosti – Problems of Strength*, no. 5, pp. 66–72, 2009.
- [7] O. Yu. Chernousenko, T. V. Nikulenkova, and A. H. Nikulenkova, “Etapy realizatsii upravlinnia starinniam elementiv enerhoblokv AES” [“Stages of implementation of aging management of NPP power unit elements”], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seria: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia – Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Power and Thermal Engineering Processes and Equipment*, no. 9(1181), pp. 85–89, 2016. doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.12.
- [8] O. M. Mandryk, “Analiz prychny avariinykh sytuatsii ta ruinuvan mahistralnykh hazoprovodiv” [“Analysis of causes of emergency situations and destruction of main gas pipelines”], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific Bulletin of UNFU*, vol. 25, № 1, pp. 155–162, 2015.
- [9] V. D. Myndiuk, “Doslidzhennia osoblyvostei strukturnoi dehradatsii tryvalo ekspluatovanykh trubnykh stalei” [“Study of features of structural degradation of long-operated pipe steels”], *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu – Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, no. 2(39), pp. 101–110, 2015.
- [10] F. Xu, J. Zhao, X. Zhou, X. Yun, J. Z. Liu, and T. Okazaki, “Long-term strain ageing effects on low-carbon structural steels,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 231, article 109579, 2025. doi: 10.1016/j.jcsr.2025.109579.
- [11] G. Loporcaro, S. Pampanin, and M. V. Kral, “Long-term strain-ageing effects on low-carbon steel reinforcement,” *Construction and Building Materials*, vol. 228, article 116606, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.332.
- [12] S. Hosseini, A. Heidarpour, F. Collins, and C. R. Hutchinson, “Strain ageing effect on the temperature dependent mechanical properties of partially damaged structural mild-steel induced by high strain rate loading,” *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 454–463, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.001.
- [13] C. J. Chong, “The effects of strain ageing and grain size on fatigue in low carbon steels,” Ph.D. dissertation, Univ. of Canterbury, 1980.
- [14] J. Sarnet, *Some measurements of the ageing of a carbon steel*. 2024.
- [15] S. Hosseini, A. Heidarpour, F. Collins, and C. R. Hutchinson, “Effect of strain ageing on the mechanical properties of partially damaged structural mild steel,” *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 83–93, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.021.

Стаття надійшла 24.02.2026

Стаття прийнята 13.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Пашинська О. Г. Дослідження процесів старіння холоднокатаного прокату з киплячих марок сталі. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 214–221. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359810>.