

О.І. Бабаченко, Д.М. Тогобицька, Т.В. Балаханова, Г.А. Кононенко

**КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРИМІСНИХ ТА ЛЕГУВАЛЬНИХ
ЕЛЕМЕНТІВ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ СТАЛЕЙ
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ**

Анотація: В роботі приведено та узагальнено результати статистичного аналізу промислових даних хімічного складу та механічних властивостей понад 1500 зразків, відібраних від чорнових залізничних осей зі сталі марок ОС та EA1N. Із застосуванням методів прикладної статистики визначена відмінність впливу хімічного складу сталі для залізничних осей на рівень ударної в'язкості, зокрема марганцю та сірки. Показана необхідність застосування більшого ступеню деформації вихідних безперервнолитих заготовок зі сталі марки EA1N та реалізація заходів, які позитивно впливатимуть на зменшення дендритної ліквації. Підкреслено вагомий вплив технології виготовлення сталі для залізничних осей близького хімічного складу.

Ключові слова: залізничні осі, механічні властивості, ударна в'язкість, хімічний склад, ліквація марганцю, t-критерій Стьюдента

Необхідний комплекс властивостей як правило базується на основі формування оптимального структурного стану, що визначається фазовим складом сталі, розмірними характеристиками фазових і структурних складових, а також їх рівномірністю розподілення. Однією з найважливіших властивостей сталі є ударна в'язкість. Це складна комплексна характеристика, яка залежить від сукупності міцнісних і пластичних властивостей металу та характеризує сумарний опір зразка пластичному деформуванню та руйнуванню [1]. Оскільки ударна в'язкість є структурно-чутливою величиною, на зміну її значень впливає безліч факторів – неоднорідний розмір зерна і нерівномірність його розподілу, частка тієї чи іншої фази, а також рівномірність розподілу їх в обсязі металу, наявність неметалевих включень тощо. Досягнення однорідного структурного фону можливе не лише за рахунок коригування технологічних параметрів виробництва сталі та її подальшого деформаційно-термічного оброблення, а й хімічного складу сталі.

Значним резервом з поліпшення структури і властивостей осьової сталі є коригування хімічного складу навіть в межах марочного складу, що дозволить

мінімізувати витрати на додаткову термічну обробку сталі при виготовленні залізничних осей. Авторами [2, 3] показано, що на механічні властивості пластин істотний вплив чинить зміна вмісту С, Mn і Si. Однак характер впливу хімічних елементів на властивості сталей різного хімічного складу не є постійним.

Основним завданням при вирішенні цієї задачі є встановлення критичних точок і концентраційних інтервалів, які з високою достовірністю дозволять математично визначити якісний і кількісний вплив кожного легувального і примісного елементів на показники ударної в'язкості залізничних осей.

Метою роботи було визначення залежності природи матеріалу, особливостей впливу його хімічного складу на ударну в'язкість залізничних осей та зниження витрат на проведення дороговартісних лабораторних експериментів та аналізу. Для цього був проведений комплексний статистичний аналіз промислових результатів випробувань зразків чорнових осей, виготовлених зі сталей марки ОС (632 плавки) та марки EA1N (124 плавки). Їхній хімічний склад наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджених плавок та вимоги до нього нормативної документації, чисельник – мінімальне та максимальне значення у вибірці, знаменник – середнє

Марка сталі, та відповідна нормативна документація	Вміст хімічних елементів				
	C	Mn	Si	P	S
				Не більше	
ОС	<u>0,42-0,5</u> 0,448	<u>0,61-0,85</u> 0,716	<u>0,15-0,30</u> 0,224	<u>0,009-0,036</u> 0,024	<u>0,002-0,038</u> 0,0215
ДСТУ ГОСТ 4728:2014	0,42-0,50	0,60-0,90	0,15-0,35	0,035	0,035
EA1N	<u>0,34-0,38</u> 0,3516	<u>0,82-0,89</u> 0,864	<u>0,18-0,26</u> 0,209	<u>0,007-0,016</u> 0,0107	<u>0,002-0,007</u> 0,0034
EN 13261:2009 (не більше)	0,40	1,2	0,5	0,02	0,02

Марка сталі, та відповідна но- рмативна до- кументація	Вміст хімічних елементів				
	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
	Не більше				
ОС	<u>0,01-0,08</u> 0,0245	<u>0,01-0,07</u> 0,017	<u>0,01-0,08</u> 0,0225	<u>0,012-0,055</u> 0,028	–
ДСТУ ГОСТ 4728:2014	0,30	0,30	0,25	0,035	–
EA1N	<u>0,05-0,13</u> 0,089	<u>0,08-0,14</u> 0,907	<u>0,14-0,22</u> 0,174	<u>0,015-0,028</u> 0,0199	<u>0,008-0,039</u> 0,0135
EN 13261:2009 (не більше)	0,3	0,3	0,3	–	0,08

За хімічним складом обидва масиви даних суттєво відрізняються. Різниця є не тільки у наведених даних, а в технології виготовлення та обробки рідкої сталі. Так сталь марки ОС є сталлю конвертерного способу виготовлення без проходження операції вакуумування. Сталь марки EA1N виплавлена в електропечі з проходженням процесу дегазації у вакууматорі і також містить менше кисню [4].

З кожної плавки було виготовлено кілька партій залізничних осей, і від кожної партії були відібрані зразки для проведення досліджень механічних властивостей. Усього проаналізовано 1264 зразки осей зі сталі марки ОС і 264 зразки зі сталі марки EA1N. В таблиці 2 вказано дані, що отримані в результаті випробувань зразків, вирізаних на $\frac{1}{2}$ R чорнової осі після гарячого деформування та термічної обробки (нормалізації).

Норми також вказані для цих місць відбору. Окремо треба зауважити різницю у ступені проробки. На нашу думку цей фактор є одним з найвпливовіших на формування комплексу механічних та експлуатаційних властивостей залізничних осей.

Значення ударної в'язкості вибірки чорнових осей були відсортовані по мірі їх зниження та виділено 2 масиви, які мали понижені та підвищенні значення ударної в'язкості (рис.1).

Механічні властивості досліджених зразків та вимоги до них наявної нормативної документації, чисельник – мінімальне та максимальне значення у вибірці, знаменник – середнє

Марка сталі, та відповідна нормативна документація	Границя міцності, МПа	Границя плинності, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість середня поздовжнього орієнтування, Дж/см ²	Ударна в'язкість середня поперечного орієнтування, Дж/см ²
ОС (Ø 150 мм, ступінь укову 5,95)	$\frac{560-745}{646,92}$	$\frac{300-445}{356,92}$	$\frac{18-32}{24,42}$	$\frac{34-127,5}{61,31}$	–
ДСТУ ГОСТ 4728:2014	580-650	≥300-325	≥18-20	≥34-49	–
EA1N (Ø 225 мм, ступінь укову 3,16)	$\frac{566,4-616,3}{589,5}$	$\frac{287,7-406,1}{350,26}$	$\frac{18-30}{25,72}$	$\frac{30-52}{41}$	$\frac{30,2-42,6}{36,235}$
EN 13261:2009	Не більше 550-650	≥320	≥22	≥30	≥20

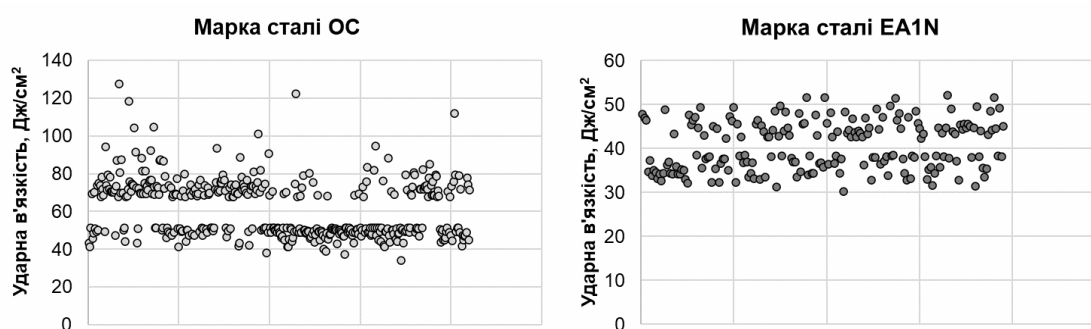


Рисунок 1 – Масиви даних досліджених зразків чорнових осей, що мають підвищенні та пониженні значення

Аналіз проводили за допомогою параметричного t-критерію Стюдента [5]. Критерій Стюдента дозволяє оцінити статистичну значущість відмінно-

стей між величинами, що порівнюються, а саме чим більше значення t-критерія, тим більше статистично значимі відмінності порівнюваних величин. Значення t-критерію оцінювались з вірогідністю 0,95. Найбільш вагомим значенням коефіцієнта Стюдента представлені на рисунку 2.

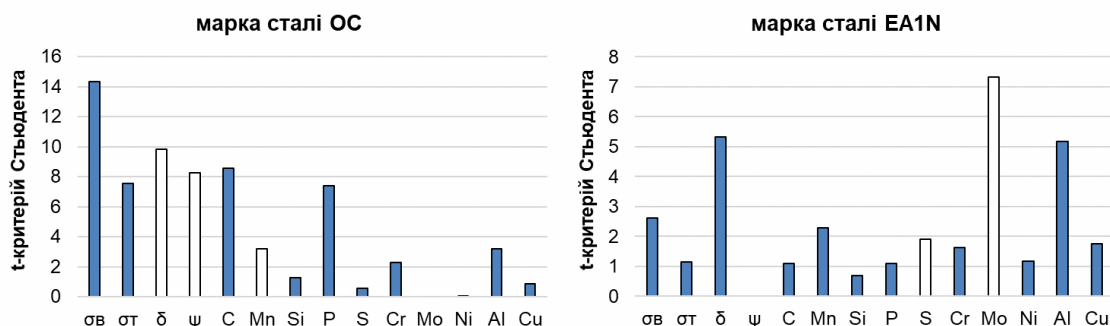


Рисунок 2 – Статистичний аналіз впливу параметрів на значення ударної в'язкості: □ – параметри з прямопропорційним впливом на показники ударної в'язкості, ■ – параметри зі зворотньопропорційним впливом на показники ударної в'язкості

Більшість факторів мають однаковий характер взаємозв'язку на показники ударної в'язкості для масивів обох марок сталі. Зі збільшенням міцнісних характеристик значення ударної в'язкості збільшується. Це пов'язано зі зростанням напруження течії металу та збільшенням частки крихкої складової. Є логічним і зростання показників ударної в'язкості зі збільшенням пластичних характеристик. Це повністю збігається з класичними уявленнями про показник ударної в'язкості. Наведені дані для сталі EA1N показують зворотній зв'язок цих характеристик. При збільшенні пластичності ударна в'язкість суттєво знижується, при цьому вплив міцнісних характеристик набагато нижчий і майже не впливає на загальну картину.

Алюміній, фосфор, хром та мідь негативно впливають на ударну в'язкість, оскільки сприяють збільшенню крихкої складової сталі та сприяють її руйнуванню. Алюміній знижує властивості сталі, оскільки через високу спорідненість до кисню, утворює недеформовані оксидні включення, які є концентраторами напружень у сталі та сприяють її руйнуванню. Слід зазначити, що у сталі EA1N у наявній малій концентрації фосфор не чинить суттєвого впливу. Те ж саме стосується і вуглецю, який є основним зміцнювальним компонентом сталей для виготовлення залізничних осей. Підвищення залежності ударної в'язкості від кількості міді, пояснюється більшим її вмістом у складі сталі EA1N, оскільки

ки мідь не можна видалити в процесі металургійного рециклінгу, що погіршує якість сталі виплавленої з брухту [6].

Звертає на себе відмінність впливу на показник ударної в'язкості вмісту сірки та марганцю.

Марганець, хоч і є зміцнювальним елементом, сприяє зростанню зерна аустеніту. Це вплинуло на підвищення пластичності сталі, що співпадає з позитивним впливом марганцю на властивості сталі ОС. В той же час слід відмітити, що марганець посилює ліквацію вуглецю, що зумовлює нерівномірний розподіл структурних складових фериту та перліту, особливо за умов збільшення його кількості та недостатнього деформаційного пророблення. На основі попередньо проведених досліджень [7, 8] можна припустити, що у зразках чорнових осей зі сталі марки EA1N спостерігається значна структурна неоднорідність розподілу фериту та перліту. У лікваційних ділянках зосереджені переважно зерна перліту, а в ділянках без ліквації переважно ферит. Цей факт пояснює і позитивний вплив сірки на показник ударної в'язкості. Хоч сірка і є елементом, що суттєво знижує властивості сталі, але в цьому випадку її вміст ймовірно сприяв зменшенню ліквації марганцю. При зниженні температури в аустенітній області, Mn концентрується більшою мірою в неметалевому включенні MnS, тим самим знижуючи його концентрацію довокола включення. Таким чином безпосередньо навколо сульфідних включень відбувається зародження фериту [9], який у міру свого зростання відтісняє вуглець до протилежної зони, в результаті чого перліт з'являється в суміжній області. Крім цього, згідно з літературними даними [10], концентрація Mn у включеннях (MnFe)S зростає при гарячій деформації і охолодженні, що, в свою чергу, призводить до збільшення зони збідненого Mn навколо утворених частинок дрібних сульфідів марганцю. В той же час за умов високого ступеню розкиснення сталі, утворюються найдрібніші частинки, які не чинять негативний вплив на її властивості, а навпаки сприяють однорідності кінцевої ферито-перлітної структури.

Визначено суттєвий вплив Mo на формування високих значень ударної в'язкості сталі марки EA1N. Цей вплив можна пояснити зниженням чутливості до розвитку крихкості при повільному охолодженні сталей, що містять молібден.

Таким чином збільшення пластичності зразків на фоні збереження міцнісних властивостей та падіння показників ударної в'язкості зумовлює необхідність застосування більшого ступеню деформації вихідних безперервнолитих

заготовок зі сталі марки EA1N та реалізація заходів, які позитивно впливатимуть на зменшення дендритної ліквідації.

Вперше показана відмінність впливу хімічного складу сталі для залізничних осей на рівень ударної в'язкості. Визначено, що сталь навіть близького хімічного складу може мати зовсім іншу природу структуроутворення [11, 12]. При виборі оптимального хімічного складу сталі для виготовлення відповідальних деталей залізничного призначення, необхідно брати до уваги спосіб виробництва сталі, вихідні матеріали та технологічні особливості металургійного підприємства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов [Учебник для вузов. 2-е изд.] / В. С. Золотаревский. – М : Металлургия, 1983.
2. Konovalov Y.V. Optimizing the chemical composition of rolled plate / Y.V. Konovalov Y.V. Furman, A. E. Rudnev et al. // Metallurgist – 1986 – № 30. – С. 364–365. – <https://doi.org/10.1007/BF00741406>
3. Semenovskiy O. Ye. Optimization of chemical composition of steel for gearwheels of agricultural industry engineering / O. Ye. Semenovskiy, L. L. Titova // Machinery & Energetics. – 2020. – № 11(4). – p. 123-129. – <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.04.123>
4. Панченко А. И. Современные технологии выплавки и разливки стали EA1N для производства железнодорожных осей / А. И. Панченко, С. Г Кийко, М. И. Гасик [та ін.] Современная электрометаллургия. – 2019. –№2. –С. 35–42. – <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.06>
5. Турчин В. Н. Теория вероятностей и математическая статистика [учебник для студентов вузов] / В. Н. Турчин. – Днепропетровск: Изд-во ДНУ. – 2008. – 656 с.
6. Björkman Bo Chapter 6 – Recycling of Steel, Editor(s): Ernst Worrell, Markus A. Reuter, (Handbook of Recycling). – Elsevier. – 2014. – Pages 65-83. – <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00006-4>
7. Балаханова Т. В., Левченко Г. В. Особливості формування неоднорідних структур у вуглецевих сталях / Металознавство та обробка металів – (в редакції).
8. Бабаченко О. І., Балаханова Т. В., Сафронова О.А. та ін. Аналіз особливостей формування структурної неоднорідності вуглецевої сталі (огляд літератури) / Металознавство та термічна обробка металів. – 2021. – № 4. – С. 18-32.

9. Xing L. et al. The Formation Mechanism of Proeutectoid Ferrite on Medium-Carbon Sulfur-Containing Bloom //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Т. 52. – №. 5. – С. 3208-3219.

<https://doi.org/10.1007/s11663-021-02248-w>

10. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications / Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – V. 8. – Issue 2. – P. 2408-2422. – <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>

11. Сергеев Н. Н. и др. О значении математических вычислений в исследовании характеристик структуры и физико-механических свойств стали 30ХГСА, выплавленной на различной шихте //Чебышевский сборник. – 2021. – Т. 22. – №. 2 (78). – С. 449-471. – doi 10.22405/2226-8383-2021-22-2-449-471

12. Майсурадзе В. М. Влияние технологии производства на фазовые и структурные превращения кремнийсодержащей стали / М. В. Майсурадзе, М. А. Рыжков, А. А. Кукулина, О. А. Сурнаева // Сталь. – 2017. – № 1. – С. 52-58.

REFERENCES

1. Zolotarevskiy V. S. (1983) *Mehanicheskie svoystva metallov* [Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd] / М : Metallurgiya [in Russian]

2. Konovalov, Y. V., Furman, Y. V., Rudnev, A. E., Nosov, V. G., Fishev, V. N., Shcherbak, V. M. & Popov, N. N. (1986). Optimizing the chemical composition of rolled plate, *Metallurgist*, 30(10), 364-365 [in English]

<https://doi.org/10.1007/BF00741406>

3. Semenovskiy, O. Y., & Titova, L. L. (2020) Optimization of chemical composition of steel for gearwheels of agricultural industry engineering. *Техніка та енергетика, Machinery & Energetics*, (11 (4)), 123-129, [in English]

<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2020.04.123>

4. Panchenko, A.I., Kijko, S.G., Gasik, M.I., Sal'nikov A.S., Levchenko, G.V., Gorobec A.P. & Klimchik, YU.V. (2019). *Sovremennye tekhnologii vyplavki i razlivki stali EA1N dlya proizvodstva zheleznodorozhnyh osey. Sovremennaya elektrometallurgiya*, 2, 35–42. doi: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.02.06> [in Russian]

5. Turchin V. N. (2008) *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika, uchebnik dlya studentov vuzov*, Dnepropetrovsk : Izd-vo DNU, 656 p. [in Russian]

6. Balakhanova T. V., Levchenko G. V. Peculiarities of the formation of heterogeneous structures in carbon steels, Metal Science and Treatment of Metals (Metaloznavstvo ta obrobka metaliv) [in Ukrainian]
7. Babachenko O.I., Balakhanova T.V., Safronova O.A., Shpak O.A., Klynova O.P. (2021) Analysis of specific features of the formation of structural inhomogeneity of carbon steel (review), Metal Science and Heat Treatment of Metals, 4(95), 18-32 [in Ukrainian]
8. Björkman, B., Samuelsson, C. (2014). Recycling of steel. In Handbook of recycling Elsevier. (pp. 65-83), [in English] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00006-4>
9. Xing, L., Fan, X., Wang, M., Zhao, L., & Bao, Y. (2021). The Formation Mechanism of Proeutectoid Ferrite on Medium-Carbon Sulfur-Containing Bloom, Metallurgical and Materials Transactions B, 52(5), 3208-3219 [in English] <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02248-w>
10. Vasconcellos da Costa e Silva, A. L. (2019). The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications, Journal of Materials Research and Technology-JMR&T, 8(2), 2408-2422[in English] <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>
11. Sergeev, N. N., Sergeev, A. N., Kutepov, S. N., Kuzovleva, O. V., Gvozdev, A. E., & Klementev, D. S. (2021) O znachenii matematicheskikh vyichisleniy v issledovanii harakteristik strukturyi i fiziko-mehanicheskikh svoystv stali 30HGSA, vyiplavlennoy na razlichnoy shihte, Chebyishevskiy sbornik, 22 (2 (78), 449-471. [in Russian], doi 10.22405/2226-8383-2021-22-2-449-471
12. Maisuradze M., Ryzhkov M., Kuklina A.A., Surnaeva O.A. (2017) Vlianie tehnologii proizvodstva na fazovye i strukturnye prevrasenia kremnijsoderzasej stali. Steel, (1), 52. [in Russian]

Received 07.02.2022.

Accepted 10.02.2022.

***Complex analysis of the influence of substances
and alloy elements on the impact viscosity of steels***

The paper presents and summarizes the results of statistical analysis of industrial data on chemical composition and mechanical properties of more than 1,500 samples taken from rough railway axles made of steel grades 08 and EA1N with different degrees of deformation. The analysis was performed using the parametric Student's t-test, which allows to assess the statistical significance of differences between the compared values, namely, the greater the

value of the t-test, the more statistically significant differences between the compared values. A significant reserve for improving the structure and properties of axial steel is the adjustment of the chemical composition, even within the vintage composition, which will minimize the cost of additional heat treatment of steel in the manufacture of railway axles. The difference between the chemical composition of steel for railway axles and the level of impact strength, in particular manganese and sulfur, has been determined. Manganese, although a strengthening element, promotes the growth of austenite grains and enhances carbon sequestration, which leads to uneven distribution of structural components of ferrite and perlite, especially with increasing its amount and insufficient deformation. This is due to the positive effect of sulfur on toughness. Although sulfur is an element that significantly reduces the properties of steel, but in this case, its content is likely to reduce the liquation of manganese. As the temperature in the austenitic region decreases, Mn is concentrated more in the nonmetallic MnS inclusion, thereby reducing its concentration around the inclusion. The necessity of applying a greater degree of deformation of the original continuously cast steel billets of EA1N grade and the implementation of measures that will have a positive effect on the reduction of dendritic segregation is shown. The significant influence of steel production technology for railway axles of close chemical composition is emphasized.

Бабаченко Олександр Іванович - Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, директор.

Тогобицька Дар'я Миколаївна - Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, завідуючий відділом.

Балаханова Тетяна Валеріївна - Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, старший науковий співробітник.

Кононенко Ганна Андріївна - Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, вчений секретар.

Babachenko Olexander Ivanovich - Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Director.

Togobytska Darya Mykolayivna - Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Head of department.

Balakhanova Tatiana Valerievna - Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Senior Research Fellow.

Kononenko Ganna Andreevna - Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Scientific Secretary.