

УДК 624.21

ВІДМІННОСТІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ БАЛКИ МОСТОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Г. В. КРЕЧКОВСЬКА^{1,2}, А. А. ВОЙТОВИЧ², А. Р. ДЗЮБИК²,
Б. І. КІНДРАЦЬКИЙ², О. С. ЛАМПІЦЬКИЙ², Л. І. БОГУН²

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

² Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано механічні властивості сталі 15ХСНД балки мостової конструкції. Встановлено, що характеристики міцності та пластичності, а також опір крихкому руйнуванню сталі її стінки відповідають регламентованим значенням. Міцність і пластичність сталі полицки не виходить за нормовані межі, але низькі показники її ударної в'язкості та крихкі відколи на макрозламах зразків свідчать про схильність до крихкого руйнування. Виявлено, що на повздовжніх зразках опір крихкому руйнуванню металу з полицки балки знизився втричі, а на поперечних – вдвічі проти властивому сталі зі стінки балки.

Ключові слова: *сталь, балки, мостові конструкції, механічні властивості, ударна в'язкість.*

Mechanical properties of the 15XCHD steel of the beam of the bridge structure were analyzed. It was established that the characteristics of strength and plasticity, as well as the resistance to brittle fracture of the steel of its wall correspond to the regulated values. The values of strength and plasticity of the steel shelf do not exceed the normalized limits, but the low values of its impact strength and brittle cleavages on the macrofractures of the samples indicate a tendency to brittle failure. It was found that the resistance to brittle fracture of the metal from the beam shelf decreased in three times on the longitudinal samples, and in two times on the transverse ones to compare to the inherent brittle fracture resistance of steel from the beam wall.

Keywords: *steel, beam, bridge structures, mechanical properties, impact toughness.*

Вступ. Мостові конструкції експлуатують у режимі циклічного навантаження, що зумовлює втрату вихідних механічних властивостей сталей, зокрема пластичності, міцності та опору крихкому руйнуванню. На такі конструкції впливають також статичні та динамічні навантаження [1]. Під час експлуатації мостів в елементах балки виникають різні напруження (переважну більшість згинальних моментів сприймають полицки, тоді як на стінку припадає лише 20% від них). Тому слід очікувати, що деградація металу залежатиме від розташування їх в балках. Відомо [2–5], що характеристики опору крихкому руйнуванню (ударна в'язкість і тріщиностійкість) найчутливіші до зміни стану матеріалу через експлуатацію. Оскільки технологія виготовлення двотаврових балок зберігає текстуру вальцювання сталі, то важливо враховувати орієнтацію зразків за механічних випробувань. На сьогодні відомі відмінності властивостей металу залежно від напрямку вальцювання, що особливо важливо для оцінювання його деградації [6–14].

Нижче оцінено особливості зміни характеристик міцності, пластичності та ударної в'язкості сталі 15ХСНД з різних частин двотаврової балки мостової конструкції (полицки та стінки), визначені на зразках різної орієнтації.

Об'єкт та методи випроб. Досліджували механічні властивості сталі зі стінки ($h = 980 \text{ mm}$, $t = 12 \text{ mm}$) та полицьки ($b = 450 \text{ mm}$, $t = 30 \text{ mm}$) двотаврової балки мостової конструкції. Для випробувань на розтяг та удар вирізали повздовжні та поперечні до її осі зразки (рис. 1).

Технічний стан металу оцінювали за характеристиками міцності (границями міцності σ_{UTS} та плинності σ_{YS}) і пластичності (відносними видовженням δ та звуженням ψ). Циліндричні зразки $\varnothing 5 \text{ mm}$ та довжиною робочої частини 25 mm випробовували на розривній машині УМЕ-10Т за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ [15]. Ударну в'язкість визначали на зразках Шарпі (з V-подібним концентратором радіусом $0,25 \text{ mm}$) розміром $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$. Концентратор на повздовжніх і поперечних зразках орієнтували по товщині полицьки та стінки балки (рис. 1). Використовували маятниковий копер типу ІО-5003. Усі значення усереднювали за результатами трьох–п'яти випробувань; відносна похибка не перевищувала 7%. Хімічний склад сталі оцінювали як середнє значення трьох замірів на оптичному іскровому атомно-емісійному спектрометрі SPECTROMAX LMF 0,5. Для металографічних досліджень застосовували оптичний мікроскоп ВН200М-Т.

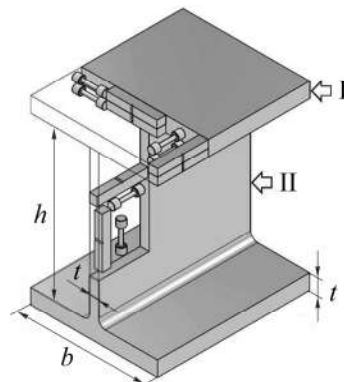


Рис. 1. Схема розташування зразків для механічних випробувань з полицьки (I) та стінки (II) балки.

Fig. 1. Scheme of the arrangement of specimens for mechanical tests from the shelf (I) and wall (II) of the beam.

Результати досліджень. Вивчали сталь 15ХСНД балки мостової конструкції такого хімічного складу (mass%): 0,18 C; 0,66 Si; 0,789 Mn; 0,031 S; 0,012 P; 0,399 Ni; 0,898 Cr; 0,272 Cu. Вміст усіх елементів практично відповідав нормативним вимогам [16]. Дещо завищений вміст марганцю та нікелю не повинен погіршувати її механічні властивості за експлуатації в кліматичних умовах, а навпаки, лише поліпшувати.

Типові діаграми навантаження зразків, отримані за результатами їх випробувань активним розтягом, наведені на рис. 2. Попри незначну відмінність у міцності зразків обох орієнтацій, на діаграмах виявили довгі ділянки зміцнення, які змінювались на платоподібні, максимум на яких відповідав міцності сталі. Ці ділянки були довшими на зразках із металу стінки балки, що свідчило про їх більший запас пластичності. Спадні ділянки діаграм виявились довшими на повздовжніх зразках (рис. 2a) проти поперечних (рис. 2b). Крім того, на завершальному етапі руйнування сталь стінки балки проявила більшу здатність витримувати напруження, ніж сталь із полицьки. Характерною її ознакою є площадка течіння на діаграмах навантаження. Цю особливість спостерігали незалежно від орієнтації зразків. Найчастіше її пов'язують з розблокуванням руху дислокацій, що уможливило деформацію зразка за незмінного навантаження.

За механічними характеристиками, визначеними на поперечних і повздовжніх зразках, сталь полицьки та стінки балки задовольняла вимоги чинних регламентів (табл. 1). Характеристики міцності практично не залежали від орієнтації зразків, тоді як пластичності були вищими для повздовжніх.

Аналізом макрозламів повздовжніх зразків з обох ділянок балки після випроб розтягом виявили типові в'язкі злами типу “чашка–конус” з нормально орієнтованою центральною частиною та конусною, що прилягала до їх зовнішньої

поверхні. На поперечних злами були здебільшого нормально орієнтовані до прикладених напружень.

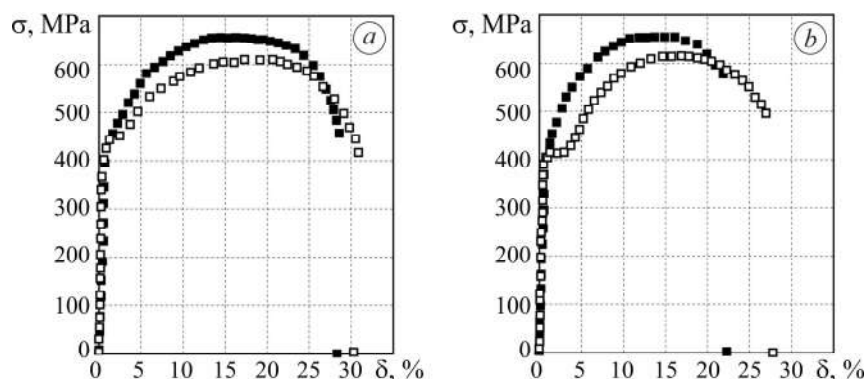


Рис. 2. Типові діаграми навантаження розтягом повздовжніх (а) та поперечних (б) зразків зі сталі 15XCHД, виготовлених з полочки (■) та стінки (□) балки.

Fig. 2. Typical loading diagrams for tensile tests of longitudinal (a) and transverse (b) 15XCHD steel specimens from the shelf (■) and wall (□) of the beam.

Таблиця 1. Усереднені значення механічних характеристик сталі 15XCHД

Елемент балки	Орієнтація зразків	σ_{UTS}	σ_{YS}	δ	ψ
		МПа		%	
Полічка	Повздовжня	657	461	28,3	71,0
	Поперечна	657	463	22,2	50,8
Стінка	Повздовжня	610	446	30,3	70,5
	Поперечна	614	416	27,8	55,2
Вимоги ГОСТ 19281-2014		> 480	> 345	> 21	–

Проаналізували ударну в'язкість KCV сталі з обох елементів балки. Середні значення для металу з полочки, отримані на повздовжніх та поперечних зразках, становили 0,35 та 0,25 MJ/m², відповідно, і згідно з вимогами були нижчими за регламентовані. Тоді як ударна в'язкість сталі зі стінки балки суттєво перевищила значення нормативних документів (табл. 2).

Таблиця 2. Значення ударної в'язкості KCV сталі 15XCHД

Елемент балки	Полічка		Стінка	
Орієнтація зразків	повздовжня	поперечна	повздовжня	поперечна
KCV, MJ/m ²	0,35	0,25	1,14	0,5
ГОСТ 19281-2014: KCV > 0,39 MJ/m ² при 0 та –20°C (клас міцності 345)				

Аналіз макрозламів підтвердив схильність до крихкого руйнування металу з полочки балки. На зламах зразків обох орієнтацій зафіксували фасетки крихкого відколу з характерним яскравим блиском (рис. 3а, б). Губи витягування чіткіше проявилися на зламах повздовжніх зразків, що узгоджується з їх вищою ударною в'язкістю. Стінка балки обох типів зразків руйнувалася за в'язким механізмом. Особливість макрозламу повздовжнього зразка – текстурованість з незначною кількістю доволі глибоких макророзшарувань, які фрагментували переріз зразка

на тонші прошарки, перетинки між якими витягувались поперек напрямку вальцювання балки. На макрозламі поперечного зразка, напрямом руйнування якого збігався з напрямом вальцювання, виявили велику кількість дрібних повздовжніх розшарувань (рис. 3с, d).

Рис. 3. Злами повздовжніх (а, с) та поперечних (b, d) зразків полицки (а, b) та стінки (с, d) балки після випробувань на удар.

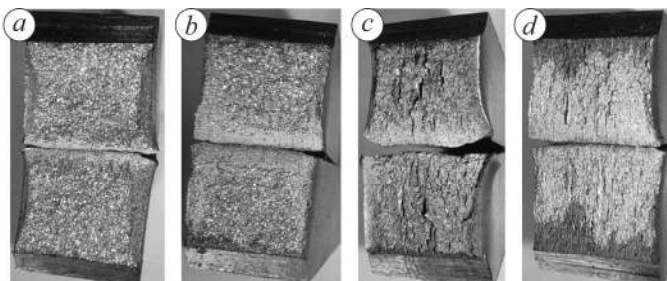


Fig. 3. Fractures of the surface of longitudinal (a, c) and transverse (b, d) specimens of the shelf (a, b) and wall (c, d) of the beam after impact tests.

Отримані результати узагальнили на рис. 4. Виявили, що міцність сталі обох елементів балки практично не залежить від напрямку вирізання зразків (рис. 2; табл. 1). Відносні видовження та звуження були нижчими на поперечних зразках проти повздовжніх (рис. 4а). Крім того, характеристики пластичності стінки балки істотно перевищили властиві полиці (відносні видовження та звуження поперечних зразків з полицки були, відповідно, на 21,5 та 28,4%, а стінки на 8 та 21,7% нижчі, ніж повздовжніх). Опір крихкому руйнуванню поперечних зразків з полицки балки знижувався на 28,6, а зі стінки – на 56% порівняно з повздовжніми (рис. 4b). Отже, для оцінювання поточного стану металу балок мостових конструкцій рекомендовано використовувати зразки поперечної орієнтації, оскільки вони забезпечать надійну експлуатацію елементів мостових конструкцій за непередбачуваних динамічних перевантажень.

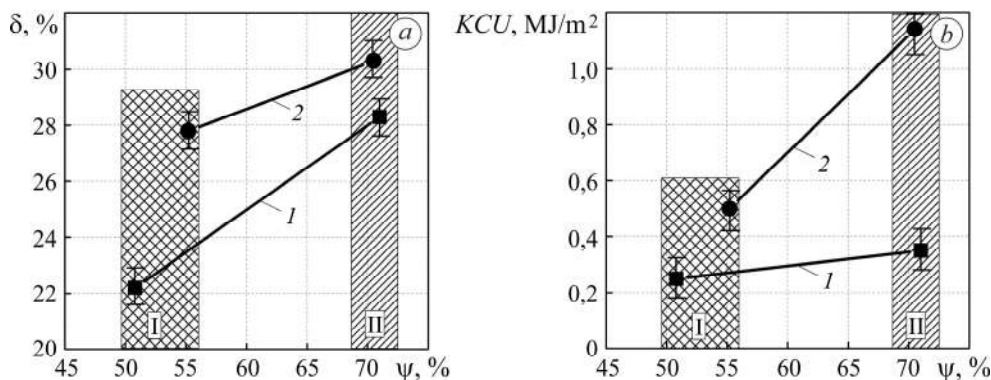


Рис. 4. Зв'язок характеристик пластичності (δ та ψ) (а), ударної в'язкості та відносного звуження (b), отриманих на поперечних (I) та повздовжніх (II) зразках з полицки (1) та стінки (2) балки.

Fig. 4. Relationships of the characteristics of plasticity (δ та ψ) (a), impact toughness and reduction in area (b) obtained on transverse (I) and longitudinal (II) specimens from the shelf (1) and wall (2) of the beam.

Звісно, що отримані закономірності зміни механічних властивостей за розтягу та удару залежно від орієнтації зразків важливі для розрахунків міцності конструкцій, але водночас прогнозовані. Проте залишається відкритим питання про

невідповідність характеристик зразків з різних елементів балки, що пов'язали зі структурними особливостями сталі.

Попри однакову феритно-перлітну структуру сталі обох елементів балки, розмір зерен у сталі полицки суттєво більший, ніж у її стінці (рис. 5), що вплинуло на здатність металу чинити опір ударним навантаженням. Адже відомо, що менший розмір зерна, то вища ударна в'язкість сталі [17, 18]. Тому для отримання необхідного для відповідальних мостових конструкцій її рівня слід використовувати балки після термічного оброблення, що забезпечить подрібнення розміру зерен у структурі полицок.

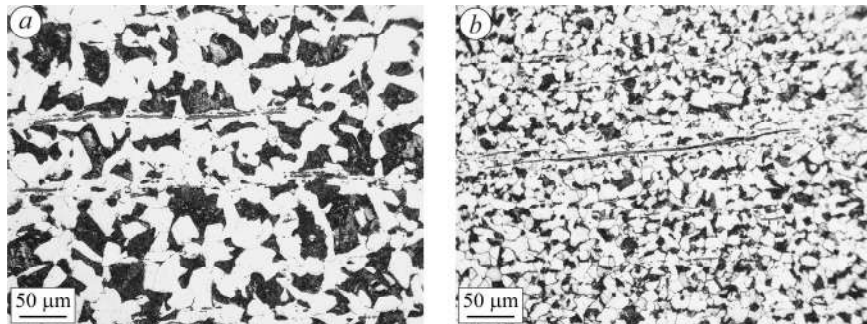


Рис. 5. Структура сталі 15XCHД полицки (a) та стінки (b) балки.

Fig. 5. Microstructure of 15XCHD steel of the beam shelf (a) and wall (b).

Зрозуміло, що отримані невідповідності властивостей сталі, зокрема міцності, пластичності та опору крихкому руйнуванню, з полицки та стінки балки слід брати до уваги під час їх розрахунків на міцність.

ВИСНОВКИ

Характеристики міцності, пластичності і опору крихкому руйнуванню сталі 15XCHГ зі стінки балки свідчать про її придатність до подальшого використання. Попри відповідність регламентованим значенням характеристик міцності і пластичності полицки, сталь виявилась схильною до крихкого руйнування, що підтверджено низькими значеннями ударної в'язкості (0,35 та 0,25 MJ/m² повздовжніх та поперечних зразків, відповідно) проти регламентованого (0,39 MJ/m²). Крихкі елементи відколу на макрозламах зразків додатково підтвердили слабкий опір крихкому руйнуванню. Попри практичну незмінність характеристик міцності сталі (незалежно від орієнтації зразків та їх розташування в елементах балки), пластичність, а також опір крихкому руйнуванню виявилися чутливими до зміни орієнтації зразків (властивості поперечних зразків гірші, ніж повздовжніх). Зокрема, ударна в'язкість сталі полицки на 69 та 50% (на повздовжньому і поперечному зразках, відповідно) нижча, ніж стінки, що зумовлено різним розміром зерен у структурі полицки та стінки балки. Її слід враховувати, оцінюючи поточний стан сталей з елементів конструкцій, та в інженерних розрахунках їх міцності, щоб забезпечити надійність функціонування мостових конструкцій.

1. *Evaluation of the technical state of reinforcement of the concrete-beam span of a bridge constructed at the end of the last century* / A. R. Dziubyk, A. A. Voitovych, O. Z. Student, L. V. Dziubyk, and I. B. Khomych // *Material Science*. – 2022. – 57, № 4. – P. 466–474. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00567-0>
2. *Role of in-service conditions in operational degradation of mechanical properties of portal cranes steel* / O. Nemchuk, M. Hredil, V. Pustovoy, and O. Nesterov // *Proc. Struct. Int.* – 2012. – 16. – P. 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.048>

3. *Degradation of steel used in gas main pipelines during their 40-year operation* / H. M. Nykyforchyn, O. T. Tsyrl'nyk, D. Yu. Petryna, and M. I. Hredil' // *Strength of Mater.* – 2009. – **41**, № 5. – P. 501–505.
4. *Polishchuk L. K., Kharchenko H. V., and Zvirko O. I.* Corrosion-fatigue crack-growth resistance of steel of the boom of a clamp-forming machine // *Material Science.* – 2015. – **51**, № 2. – P. 229–234.
5. *Analysis of operational factors affecting the serviceability of seaport hoisting and transporting equipment* / H. Nykyforchyn, V. Pustovyi, O. Zvirko, P. Semenov, M. Hredil, O. Nemchuk, O. Oliynyk, and O. Tsyrl'nyk // *Proc. Struct. Int.* – 2022. – **41**. – P. 326–332.
6. *Gredil M. I.* Operating degradation of gas-main pipeline steels // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2008. – **30** (Spec. Iss.). – P. 397–406.
7. *Nemchuk O. O. and Krechkovska H. V.* Fractographic substantiation of the loss of resistance to brittle fracture of steel after operation in the marine gantry crane elements // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2019. – **41**, № 6. – P. 825–836.
8. *Krechkovs'ka H. V. and Student O. Z.* Determination of the degree of degradation of steels of steam pipelines according to their impact toughness on specimens with different geometries of notches // *Materials Science.* – 2017. – **52**, № 4. – P. 566–571.
DOI: 10.1007/s11003-017-9991-z
9. *Specific features of the fatigue fracture of welded joints of 34KhN2MA steel formed by electrodes with different phase compositions* / A. R. Dzyubyk, A. A. Voitovych, L. V. Dzyubyk, and L. O. Babii // *Material Science.* – 2018. – **54**, № 2. – P. 215–222.
<https://doi.org/10.1007/s11003-018-0176-1>
10. *Krasowsky A. Y., Dolgiy A. A., and Torop V. M.* Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation // *Proc. "Charpy Centary Conference", Poitiers.* – 2001. – **1**. – P. 489–495.
11. *Brittle-fracture resistance of the metal of hyperboloid gridshell shukhov tower* / H. V. Krechkovs'ka, O. Z. Student, A. I. Kutnyi, H. M. Nykyforchyn, and P. Ya. Sydor // *Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 578–584. DOI: 10.1007/s11003-015-9756-5
12. *Analysis of operational factors affecting the serviceability of seaport hoisting and transporting equipment* / H. Nykyforchyn, V. Pustovyi, O. Zvirko, P. Semenov, M. Hredil, O. Nemchuk, O. Oliynyk, and O. Tsyrl'nyk // *Proc. Struct. Int.* – 2022. – **41**. – P. 326–332.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.038>
13. *Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life* / V. M. Pustovyi, P. O. Semenov, O. O. Nemchuk, M. I. Hredil, O. A. Nesterov, and V. V. Strelbitskyi // *Materials Science.* – 2022. – **57**, № 5. – P. 640–648.
<https://doi.org/10.1007/s11003-022-00590-1>
14. *Деградація залізобетонних конструкцій мостових споруд: корозійний аспект* / Т. Ненастіна, К. Бережна, М. Сахненко, С. Бугаєвський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2023. – **59**, № 5. – С. 24–31.
15. *ДСТУ ISO 6892-1:2019. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури (ISO 6892-1:2016, IDT).*
16. *ДСТУ 8541:2018. Прокат конструкційний з нелегованої та легованої сталі для містобудування. Технічні вимоги.* – 2019. – 10 с.
17. *Rosenberg S. J. and Gagon D. H.* Effect of grain size and heat treatment upon impact toughness at low temperatures of medium carbon forging steel // *Part of J. of Res. of the National Bureau of Standards.* – 1941. – **27**. – P. 159–169.
18. *Effective grain size and charpy impact properties of high-toughness X70 pipeline steels* / B. Hwang, Y. G. Kim, S. Lee, Y. M. Kim, N. J. Kim, and Y. Yoo // *Metallurg. Mater. Trans. A.* – 2005. – *Effective grain size and charpy impact properties of high-toughness X70 pipeline steels.* – P. 2107–2114. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0331-9>

Одержано 10.11.2023