

© Д.В. Лаухін¹, К.А. Зіборов¹, І.Ю. Соловійов¹, В.В. Філатов¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ, ВИСОКОВ'ЯЗКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

© D. Laukhin¹, K. Ziborov¹, I. Soloviov¹, V. Filatov¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

MATERIAL SCIENTIFIC FUNDAMENTALS OF THE APPLICATION OF HIGH-TENSION, HIGH-VISCUS STEELS FOR SPECIAL-PURPOSE STRUCTURES

Мета. Сформувати у товстолистовому металопрокаті з економічної мікролегованої сталі структурний і субструктурний стан, який забезпечить необхідний високий комплекс властивостей для сучасних зварних металевих конструкцій відповідального призначення.

Методика. Для досягнення мети використано методи металографічного аналізу структури матеріалів, аналіз хімічного складу та механічних властивостей у тому числі схильність до крихкого руйнування при зниженні температури випробування.

Результати. Проведено аналіз виробництва низьковуглецевих сталей для сучасних споруд спеціального призначення. Сучасні сталі, які використовуються, не повністю відповідають вимогам для каркасів споруд відповідального призначення. Товстолистовий металопрокат вітчизняного виробництва демонструє значні коливання міцнісних і пластичних властивостей у різних напрямках об'єму матеріалу. Зокрема, характеристики міцності вздовж напрямку прокатки можуть бути в 1,5–2,85 рази вищими, ніж у Z-напрямку. Причиною цієї анізотропії є виражена феритно-перлітна смугастість, характерна для структури товстого гарячекатаного листа. Такі структурні неоднорідності, у поєднанні з утворенням зон осьової ліквідації, підвищують ризик розшарування та зменшують надійність конструкцій. Крім того, сталі з розвинутою феритно-перлітною смугастістю обмежено придатні для будівництва через зниження ударної в'язкості із збільшенням товщини прокату.

Наукова новизна. Отримані результати надають подальшого розвитку використання сталей з карбонітрідним зміцнюванням з урахуванням коефіцієнту охрупчення. В комплексі з твердорозчинним, дислокаційним та субзерновим зміцненнями забезпечує в сучасних зварних металевих конструкціях відповідального призначення високий комплекс властивостей вздовж, поперек та в Z-напрямах.

Практична значимість. Застосування високоміцних високов'язких низьковуглецевих мікролегованих сталей, відкриває можливість будувати споруди більш високої поверховості та великопрольотні мостові конструкції.

Ключові слова: *низьколеговані сталі, контрольована прокатка, субструктурний стан.*

Вступ. Сучасний розвиток будівництва вимагає від виробників металопрокату України виготовлення добре зварюваних високоміцних сталей для створення металевих конструкцій, у тому числі, й для відповідальних споруд.

Економічно доцільно використовувати високоміцні низьковуглецеві мікролеговані сталі. Їх застосування дає змогу вести монтаж великими блоками, що скорочує загальний термін зведення споруди.

Необхідно зазначити, що сталі, які наразі використовуються, не повністю відповідають вимогам до матеріалів для сучасних каркасів споруд відповідального призначення. Вітчизняний товстолистовий металопрокат має значний розкид міцнісних і пластичних властивостей за всіма напрямками об'єму матеріалу. Значення міцнісних характеристик уздовж прокатки порівняно з Z-напрямом можуть відрізнятися в 1,5–2,85 рази. Анізотропія міцнісних і пластичних характеристик є наслідком грубої феритно-перлітної смугастості в структурі товстого гарячекатаного листа. Така структурна неоднорідність, разом із формуванням зони осьової ліквіації, підвищує загрозу руйнування конструкції через розшарування. Використання в будівництві сталей із розвинутою феритно-перлітною смугастістю також обмежується через зниження значень ударної в'язкості зі збільшенням товщини прокату.

Отже, застосування конкурентоспроможного вітчизняного високоміцного металу на внутрішньому ринку матеріалів є економічно вигідним і, крім того, знижує залежність металургійних комбінатів України від експорту товстого листа. Таким чином, отримання та використання високоміцного конкурентоспроможного металопрокату, що відповідає сучасним вимогам не тільки внутрішньому ринку, а і закордонних користувачів є актуальним завданням.

Основна частина. Основними частинами сталевого каркаса є: колони, балки, міжповерхові перекриття та зв'язки. Елементами сталевого каркаса слугують типові прокатні, гнуті, перфоровані та профільовані профілі. Відповідальні елементи, що сприймають значні навантаження, виготовляються з профілів, зварених з окремих листів. Усі елементи сталевого каркаса повинні мати мінімальну масу, добре поєднуватися між собою, з перекриттями поверхів, зовнішніми та внутрішніми стінами, засобами вертикального транспорту та різними інженерними комунікаціями [1, 2]. При формуванні сталевого каркаса необхідно попередньо підібрати типи сталей, найбільш придатні для сильно навантажених та масивних елементів проекрованої споруди [3].

Аналіз даних та вимог чинної документації показує, що для будівель відповідального призначення під впливом характерних для таких споруд навантажень найбільш доцільно використовувати зварювані вуглецеві сталі класів міцності С245 – С285 (сталі Ст3пс, Ст3Гпс), хоча для найбільш навантажених елементів, таких як колони, можна застосовувати сталі вищої міцності: С345 (марки 09Г2, 14Г2, 15ХСНД, 12Г2С1 та ін.) [4]. У каркасах будівель підвищеної поверховості та для перекриття значних прольотів доцільне використання низьколегованих сталей високої міцності класів С375 і С390 (наприклад, марки 14Г2, 10Г2С1, 15ХСНД, 10ХСНД та ін.). У сучасних будівлях може бути обґрунтоване застосування сталей високої міцності С440 та вище (наприклад, 16Г2АФ, 18Г2АФпс, 12Г2СМР, 14Х2ГМР та ін.) [2, 5].

Підвищення міцності сталей лише за рахунок легування різко підвищує їхню собівартість, а також ускладнює можливість їх з'єднання між собою та

іншими елементами каркаса. Тому раціональне підвищення границі плинності сталей до 500...900 МПа має забезпечуватися не тільки спеціальним легуванням (наприклад, сталей із, так званим, карбонітридним зміцненням), але й застосуванням різних способів термічної та термомеханічної обробки. Разом з тим, усі високоміцні сталі також повинні мати достатню стійкість проти крихкого руйнування, пластичність, низький поріг холодноламкості [5–7].

У наведеному переліку відсутні високоміцні сталі ферито-перлітного класу після контрольованої прокатки, що мають високий комплекс механічних властивостей [6]. Ці сталі мають такі нормативні характеристики: σ_T – не нижче 500 МПа, σ_B – не нижче 590 МПа і δ_5 – не менше 20 %, що дозволяє віднести їх до класу С550.

Основним показником при розробці сталей вважалася границя міцності, а показникам границі плинності, в'язкості або зварюваності приділялася мала увага, оскільки найпоширенішим і найнадійнішим способом з'єднання елементів конструкцій було клепання. Основним способом зміцнення конструкційних сталей, вироблених методом гарячої прокатки, було легування вуглецем [7, 8].

Зварювання, яке замінило клепку та болтові з'єднання, вимагало зниження вмісту вуглецю в сталі, оскільки за підвищеного вмісту вуглецю зварювання необхідно виконувати або в середовищі захисного газу, або під шаром флюсу, що значно здорожує будівництво та знижує технологічність. Тому міцність сталі забезпечувалась за рахунок підвищеного вмісту марганцю, причому супутнє цьому покращення в'язкості ще не було виявлене [9].

Крихке руйнування сталевих конструкцій [10] призвело до визнання того, що в'язкість руйнування є важливою характеристикою. Стало очевидним, що необхідно забезпечити низький температурний поріг крихкості сталі. Також було визнано, що більш високе значення границі плинності важливіше за границю міцності. Це призвело до подальшого зниження вмісту вуглецю та значного підвищення вмісту марганцю в сталі. Було встановлено переваги високих значень відношення вмісту марганцю до вмісту вуглецю для забезпечення необхідних значень ударної в'язкості, а також було виявлено значну роль розміру зерна [11].

Вплив структурних факторів на міцнісні властивості сталі можна представити у вигляді модифікованого рівняння Печа–Холла (1):

$$\sigma_T = \sigma_0 + \sigma_\phi + \sigma_{mp} + \sigma_{dm} + \sigma_d + \sigma_c + k_y D_\phi^{-1/2}, \quad (1)$$

де σ_T – границя плинності, σ_0 – напруга від опору руху дислокацій кристалічної решітки (границя плинності монокристала фериту), σ_ϕ , σ_{mp} , σ_{dm} , σ_d , σ_c – зміцнення за рахунок присутності другої фази (перліт, бейніт), твердого розчину, дисперсних частинок, дислокацій та субструктури відповідно; D_ϕ – діаметр зерна фериту, k_y – коефіцієнт, що виражає напругу, необхідну для активації руху дислокацій.

Лише механізми, пов'язані з подрібненням зерна (σ_c і $k_y D_\phi^{-1/2}$) одночасно підвищують і міцнісні властивості, і холодостійкість металу [11]. Температура в'язкокрихкого переходу (T_{nep}) для фериту може бути виражена такою залежністю (2):

$$T_{nep} = \ln \beta - \ln c - \ln D_F^{-1/2}, \quad (2)$$

де D_F – діаметр зерна фериту, β і c – постійні.

В спрощеному вигляді це рівняння можна представити так (3):

$$T_{nep} = a + m \cdot D_{\phi}^{-1/2}, \quad (3)$$

де a і m – коефіцієнти, які вибирають в залежності від хімічного складу матеріала та його структурного стану; m – для конструкційних сталей приймають рівним $12^{\circ}\text{C}/\text{мм}^{-1/2}$.

Механізми зміцнення розглядаються також з точки зору їх впливу на охрупчення. Для цього розглядаючи питому (віднесену до одиниці об'єму) механічну енергію, що витрачається на деформування та подальше руйнування зразків, можна виявити, що для кожного матеріалу характерна не тільки загальна кількість цієї енергії, а й співвідношення складових її частин, а саме: енергії, що витрачається на пружне деформування (потенційна енергія), і енергії, що розсіюється (безповоротно що втрачається) при деформуванні. Відповідно до цього було запропоновано характеристику механічного поведінки малодеформованих матеріалів, рівна відношенню питомої пружної енергії, що накопичується в матеріалі до моменту його руйнування, до всієї питомої енергії, що витрачається на його деформування до цього ж моменту. Авторами зроблено спробу встановити коефіцієнт охрупчення з використанням наступної формули (4):

$$k = \Delta T_{nep} / \Delta \sigma_T \quad (4)$$

Отримано деякі значення цього коефіцієнта: наприклад, при підвищенні σ_T за рахунок дисперсійного тверднення на кожні 10 МПа зміцнення T_{nep} підвищується на $3,5^{\circ}\text{C}$; при подрібненні зерна $k = -6^{\circ}\text{C} / 10 \text{ МПа}$; при зміцненні за рахунок твердого розчину $k = + 3,5^{\circ}\text{C} / 10 \text{ МПа}$. Перехідна температура сталі не підвищується, якщо зміцнення за рахунок подрібнення зерна становить не менше 40 %. Субструктура впливає в тому ж напрямку [11, 12].

Застосування цього механізму в комплексі з іншими відомими механізмами зміцнення, такими як твердорозчинне зміцнення, зміцнення за рахунок текстури, зміцнення дислокаціями, дисперсійне зміцнення та субзернове зміцнення, дозволяє при економному легуванні отримувати технологічні, добре зварювані матеріали, що відповідають підвищеним вимогам споживачів як за міцністю, так і за в'язкістю [11, 12].

Висновки. На основі проведеного аналізу літературних джерел показано, що вітчизняний товстолистовий металопрокат має значний розкид міцнісних і пластичних властивостей за всіма напрямками об'єму матеріалу. Анізотропія міцнісних і пластичних характеристик є наслідком грубої феритно-перлітної смугастості в структурі товстого гарячекатаного листа. Така структурна неоднорідність, разом із формуванням зони осьової ліквідації, підвищує загрозу руйнування конструкції через розшарування. Використання в будівництві сталей із розвинутою феритно-перлітною смугастістю також обмежується через зниження значень ударної в'язкості зі збільшенням товщини прокату. В роботі показано, що найбільш перспективним матеріалом для каркасів сучасних конструкцій спеціального призначення є товстолистовий металопрокат із низьковуглецевих мікролегованих сталей.

В роботі була сформульована наукова задача: сформувати у товстолистовому металопрокаті з економічної мікролегованої сталі необхідний структурний і субструктурний стан, який забезпечить високий комплекс властивостей вздовж, поперек та в Z-напрямах прокатки, при цьому стабілізувати ударну в'язкість з підвищенням товщини листа для сучасних зварних металевих конструкцій відповідального призначення.

Перелік посилань

1. Мущанов, В. (2022). До аналізу основних положень нормативних документів з попередження лавиноподібного обвалення конструкцій будівель (Частина 1). *Металеві конструкції*, 28(2), 63–78.
2. EN 1990:2002+A1. (2005). Eurocode. Basis of structural design. Supersedes ENV 1991:1994. This European Standard was approved by CEN on 29 November 2001. Brussels. CEN.
3. Orzhekhovskii, A. (2017). *Features of the stress-strain state and reliability of designed and operated frame cantilever coatings over the stands of stadiums*. (Thesis of Ph. D. in Engineering) DNACE. Makeevka.
4. DBN V.2.2242009. Design of highrise residential and public buildings. Buildings and structures: Appendix E. Methodology for calculating a high rise building for resistance to progressive collapse. Kyiv.
5. Babachenko, O., Kononenko, G., & Podolskiy, R. (2022). Analysis of Structure of Samples of Rail Steels of the New Generation with Improved Operational Properties. *МФМАИТ*, 44(12), 137–156
6. Hulka, K., Bordignon, P., & Malcolm, G. (2023). *Experience with low carbon HSLA steel containing 0.06 to 0.10 percent niobium*. Niobium techn. Report/Summary of intern. Araxa, P. 27–49.
7. Kojima, S., Sampaio, M., & Bott, I. (2003). The development of API 5L X80 steel for pipe production by TMCR process, *T&B*, 1–5.
8. Verlinden, B., & Driver, J. (2007) *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials (1st Edition)*. <https://shop.elsevier.com/books/thermo-mechanical-processing-of-metallic-materials/verlinden/978-0-08-044497-0>
9. Abe T., Tsukada K., Kozasu I. et al. (1986). *HSLA Steels: Metallurgy and Application*. Metals Park: ASM-International, 103–111.
10. Anderson, P., Hirth, J., & Lothe, J. (2017). Theory of Dislocations. <https://www.cambridge.org/ua/universitypress/subjects/engineering/materials-science/theory-dislocations-3rd-edition?format=HB&isbn=9780521864367>
11. Лаухін, Д., Бекетов, О., & Зіборов, К. (2024). *Матеріалознавчі основи полігонізації аустеніту при контрольованій прокатці*. Дніпро : НТУ «ДП».
12. Гезенцевей, Ю., Зіборов, К., & Лаухін, Д. (2024). *Технологічність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей*. Дніпро. НТУ«ДП».

ABSTRACT

Purpose. To develop a structural and substructural state in thick-plate rolled products made of economically microalloyed steel that ensures the required high-performance properties for modern welded metal structures of critical importance.

The methods. To achieve this purpose, methods of metallographic analysis of material structures, chemical composition analysis, and evaluation of mechanical properties were utilized, including the assessment of brittleness and susceptibility to brittle fracture at reduced testing temperatures.

Results: An analysis of the production of low-carbon steels for modern special-purpose structures was conducted. Current steels in use do not fully meet the requirements for frameworks of critical-purpose structures. Domestic thick-plate steel demonstrates significant variability in strength and plastic properties across different directions of the material's volume. For instance, strength characteristics along the rolling direction can be 1.5–2.85 times higher than those in the Z-direction. This anisotropy arises due to pronounced ferrite-pearlite banding typical of thick hot-rolled plate structures. Such structural inhomogeneities, combined with the formation of axial segregation zones, increase the risk of delamination and reduce structural reliability. Moreover, the application of steels with pronounced ferrite-pearlite banding in construction is limited due to reduced impact toughness as plate thickness increases.

The originality. The obtained results further develop the application of steels with carbonitride strengthening, considering the embrittlement coefficient. In combination with solid-solution, dislocation, and subgrain strengthening, this approach ensures a high set of properties in modern welded metal structures of critical importance along the longitudinal, transverse, and Z-directions.

Practical implementation. The application of high-strength, high-toughness, low-carbon microalloyed steels opens the possibility for constructing taller buildings and large-span bridge structures.

Keywords: *low-alloy steels, controlled rolling, substructural state.*