

В. І. Козечко¹, Ph. D., ORCID 0000-0003-2370-1603**Д. В. Лаухін**¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-9842-499X**О. В. Бекетов**^{2,*}, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-0664-0327**Т. Є. Романенко**², ORCID 0000-0003-3590-837X**С. В. Кузнецов**², ORCID 0009-0006-4769-0725**Д. І. Мамчур**², ORCID 0009-0000-1385-8442¹ *Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*² *Український державний університет науки і технологій** *Автор для листування: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua*

КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ МЕТАЛОПРОКАТУ ТА КОМПЛЕКСОМ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 10Г2ФБ

Анотація. Основною інженерною задачею при проектуванні зварювальних будівельних конструкцій, в тому числі відповідального призначення, є розрахунок взаємозв'язку між напружено-деформованим станом який виникає під впливом зовнішнього навантаження та кінетику зародження та розповсюдження руйнування. В діючий на теперішній час нормативно-проектній документації не враховується структурний стан матеріалу, який має безпосередній вплив як на формування напружено-деформованого стану (комплекс механічних властивостей) і, як наслідок, на процеси зародження руйнування. Данна робота присвячена дослідженню кількісного взаємозв'язку між комплексом механічних властивостей сталі 10Г2ФБ та відповідним структурним станом з урахуванням товщини металопрокату. В роботі проаналізовано взаємозв'язок між структурним станом, який формується в низьковуглецевій низьколегованій сталі 10Г2ФБ та показниками механічних властивостей, а саме: границі плинності, границі міцності, відносного видовження, відносного подовження. Виконаний комплекс металографічних досліджень показав, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний конгломерат. З застосуванням математичного апарату одномірного регресійного аналізу побудовано відповідні математичні моделі, адекватність яких доведено шляхом використання квазіньютонівського методу залишків. Аналіз отриманих даних показав, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зниження границі плинності с одночасним зростанням границі міцності. Цей факт пояснюється змінами в структурному стані матеріалу, а саме зростанням відсоткового вмісту та розмірів перлітної складової. Залежність пластичних властивостей (відносне

© В. І. Козечко, Д. В. Лаухін, О. В. Бекетов, Т. Є. Романенко, С. В. Кузнецов,
Д. І. Мамчур, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

видовження, відносно подовження) від товщини металопрокату також пояснюється одночасним збільшенням відсоткового вмісту перліту при зменшенні кількості феритної складової.

Ключові слова: низьковуглецева низьколегована сталь, структурний стан матеріалу, математичне моделювання, товщина металопрокату, комплекс механічних властивостей.

Посилання для цитування: Кількісний аналіз взаємозв'язку між товщиною металопрокату та комплексом механічних властивостей сталі 10Г2ФБ / В. І. Козечко, Д. В. Лаухін, О. В. Бекетов, Т. Є. Романенко, С. В. Кузнецов, Д. І. Мамчур // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 110-121. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-007>

Вступ

Головними вимогами, що висуваються до сучасних сталевих будівельних конструкцій разом з економічною ефективністю, є їх висока надійність в експлуатації при відносно малій масі й перетині окремих елементів. Надійність при експлуатації конструкцій з високоміцних сталей повинна забезпечуватися наступними показниками механічних властивостей прокату: високою міцністю, пластичністю й ударної в'язкістю вздовж, упоперек і по товщині продукції. При цьому, зазначені показники визначаються структурою матеріалу, а саме морфологічними особливостями тонкої будови: розміром структурних складових, їх дисперсністю тощо. Одним з прогресивних (і до теперішнього часу недостатньо досліджених) шляхів вдосконалення властивостей будівельних сталей є теоретичне проектування структурного стану на різних розмірних рівнях, що неможливе без застосування відповідних фізико-математичних моделей. Саме тому, комплекс досліджень який направлено на встановлення взаємозв'язку між структурним станом та комплексом фізико-механічних властивостей високоміцного прокату з низьковуглецевих сталей є доцільним як з наукової так і з економічної та загальнодержавної точок зору.

Аналіз публікацій

Найбільшою гарантією надійності, стійкості і міцності конструкції є рівномірний розподіл механічних властивостей по всій товщі прокату. Особливо такі вимоги пред'являються до елементів конструкцій, які працюють під значним довготривалим навантаженням: колон, ферм, балок. Загальною рисою для усіх перелічених конструкцій є використання для їх виробництва, у більшості випадків, товстолистового металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей [1]. Колони, ферми та балки найчастіше мають переріз у формі двотавра та виготовляються з

використанням зварювання (при їх роботі під навантаженням понад 5000 кН). Товщина стінок, при цьому, варіюється від 8 до 80 мм. Зварні балки двотаврового перетину мають ряд переваг порівняно з прокатними, основними з яких є можливість виготовлення бісталевої балки звареної із металопрокату з неоднаковим рівнем механічних властивостей [2] та можливість отримання балки змінного перерізу [3]. Для прикладу на рис. 1 наведено приклад розподілу зусиль при передачі зосередженого навантаження на стінку балки.

Аналіз наведених на рис. 1 даних показує, що в балках втрачати стійкість можуть: стиснутий пояс під дією нормальних напружень та стінка під дією дотичних та нормальних напружень. Разом з цим, використання при виробництві балки металопрокату різної товщини може призвести до так званого «краєвого» ефекту. Так, в роботі [4] показано, що в сполученнях різних оболонок при зміні товщини листів виникають місцеві напруження краєвого ефекту, швидкозгасаючі при віддаленні від краю (тому такий напружений стан і називається краєвим ефектом).

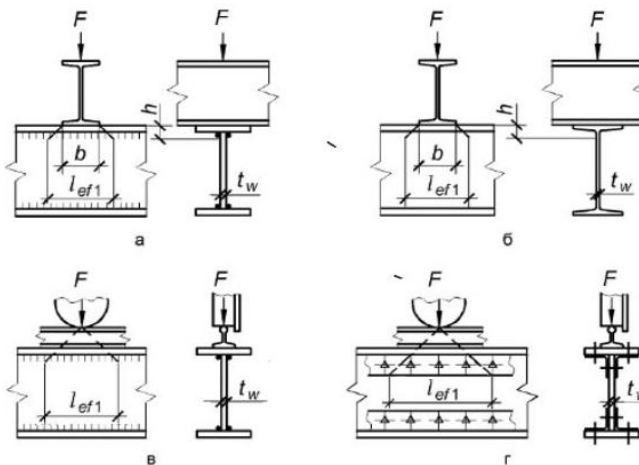


Рисунок 1 – Схема передачі зосередженого навантаження на стінку балки [1]: а – зварної; б – прокатної; в – зварної або прокатної від колеса крану; г – з болтовими фрикційними поясними з'єднаннями від колеса крану

Наявність нерівномірності механічних властивостей може призвести до втрати місцевої стійкості, через дію нормальних та дотичних напружень, які послаблюють елемент, та роблять частину перетину несиметричною, що в подальшому призводить до виходу елемента з роботи. Таким чином, основною інженерною задачею, яка

виникає при відповідних розрахунках, є аналіз впливу напружено-деформованого стану який виникає під впливом зовнішнього навантаження на кінетику зародження та розповсюдження руйнування [5]. При цьому, в розрахунках жодним чином не враховується структурний стан матеріалу, який має безпосередній вплив як на формування напружено-деформованого стану (комплекс механічних властивостей) так і на процеси зародження руйнування (дивись наприклад результати роботи [6]). Саме тому метою даної роботи є дослідження кількісного взаємозв'язку між комплексом механічних властивостей сталі 10Г2ФБ та відповідним структурним станом з урахуванням товщини металопрокату.

Методика досліджень

У якості матеріалу для дослідження було обрано низьковуглецеву низьколеговану сталь 10Г2ФБ товщиною: 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм. Відповідний для кожної товщини хімічний склад (усереднений) наведено в табл. 1.

Згідно поставленої мети, в роботі досліджувалися властивості, які б характеризували взаємозв'язок між параметрами напружено-деформованого та структурного станів. Для визначення макрохарактеристик (границя плинності; границя міцності; відносне подовження; відносне звуження) напружено-деформованого стангу було застосовано статичні механічні випробування (випробування на розтяг) [7].

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі 10Г2ФБдосліджуваних сталей

| Товщина, мм | Елемент, % | | | | | | | | | |
|----------------|------------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Mn | Si | S | Cr | Ni | Ti | Mo | V | Nb |
| 16 | 0,15 | 1,29 | 0,25 | 0,004 | 0,02 | 0,01 | 0,016 | 0,002 | 0,062 | 0,04 |
| 20 | 0,16 | 1,28 | 0,24 | 0,004 | 0,02 | 0,01 | 0,015 | 0,001 | 0,061 | 0,038 |
| 30 | 0,16 | 1,26 | 0,23 | 0,004 | 0,02 | 0,01 | 0,015 | 0,002 | 0,062 | 0,038 |
| 40 | 0,16 | 1,27 | 0,26 | 0,003 | 0,02 | 0,01 | 0,016 | 0,002 | 0,059 | 0,042 |
| 50 | 0,17 | 1,37 | 0,21 | 0,004 | 0,03 | 0,02 | 0,014 | 0,006 | 0,046 | 0,037 |
| 70 | 0,17 | 1,43 | 0,19 | 0,004 | 0,08 | 0,02 | 0,015 | 0,009 | 0,036 | 0,016 |
| 100 | 0,18 | 1,43 | 0,34 | 0,003 | 0,04 | 0,02 | 0,014 | 0,002 | 0,036 | 0,024 |

При аналізі структурного стану матеріалу використовувалися результати, отримані в роботах [8, 9]. На підставі проведених досліджень було отримано комплекс математичних моделей з використанням математичного апарату одномірного регресійного аналізу. Комплекс обчислювальних операцій здійснювали на ПЕОМ з застосуванням пакету прикладних програм для статистичної обробки Statistica [10].

Вихідні дані та результати дослідження

Для аналізу залежності механічних властивостей від товщини листа, був проведений комплекс іспитів, результати якого наведено у табл. 2.

Таблиця 2 - Комплекс механічних характеристик сталі 10Г2ФБ

| Товщина, мм | σ_t , МПа | σ_b , МПа | δ , % | Ψ , % |
|-------------|------------------|------------------|--------------|------------|
| 16 | 415 | 525 | 31 | 59 |
| 20 | 445 | 545 | 30 | 64 |
| 30 | 415 | 525 | 29 | 70 |
| 40 | 380 | 500 | 32 | 71 |
| 50 | 375 | 540 | 29 | 60 |
| 70 | 375 | 545 | 32 | 56 |
| 100 | 360 | 565 | 30 | 49 |

За результатами іспитів було побудовано математичні моделі взаємозв'язку між механічними характеристиками та товщиною металопрокату. Загальний вид рівнянь та відповідні коефіцієнти наведені у табл. 3.

Таблиця 3 - Загальні характеристики отриманих моделей

| Функція відгуку | Рівняння | Коефіцієнти моделі | | |
|---------------------|--|--------------------|--------|--------|
| | | b_0 | b_1 | b_2 |
| Границя плинності | $\sigma_m = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$ | 463,669 | -2,258 | 0,013 |
| Границя міцності | $\sigma_e = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$ | 533,282 | -0,224 | 0,006 |
| Відносне видовження | $\delta = b_0 + b_1 \cdot d + b_2 \cdot d^2$ | 29,715 | 0,031 | -0,001 |
| Відносне звуження | $\psi = b_0 \cdot \exp(b_1 \cdot d)$ | 70.160 | -0,003 | |

Для оцінки адекватності отриманих моделей застосовується квазіньютонівський метод залишків, графічна інтерпретація якого (графік розподілу залишків) наведено на рис. 2 а-г. Аналіз наведених залежностей показує, що, для всіх моделей, залишки з високим ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу. Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. При цьому, для всіх моделей спостерігається хаотичне розташування залишків на площині (дивись рис. 2. д-з). Це дозволяє дійти висновку, що отримані регресійні моделі з достатнім ступенем адекватності (85%) описує досліджувані залежності.

Результати металографічного аналізу зразків представлено на рис. 3. Аналіз наведених даних показує, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний конгломерат. Феритні зерна мають поліедричну форму. Перліт являє собою колонії квазіевтектоїду. Детальний аналіз залежності структурного стану від товщини металопрокату представлено в роботі [8].

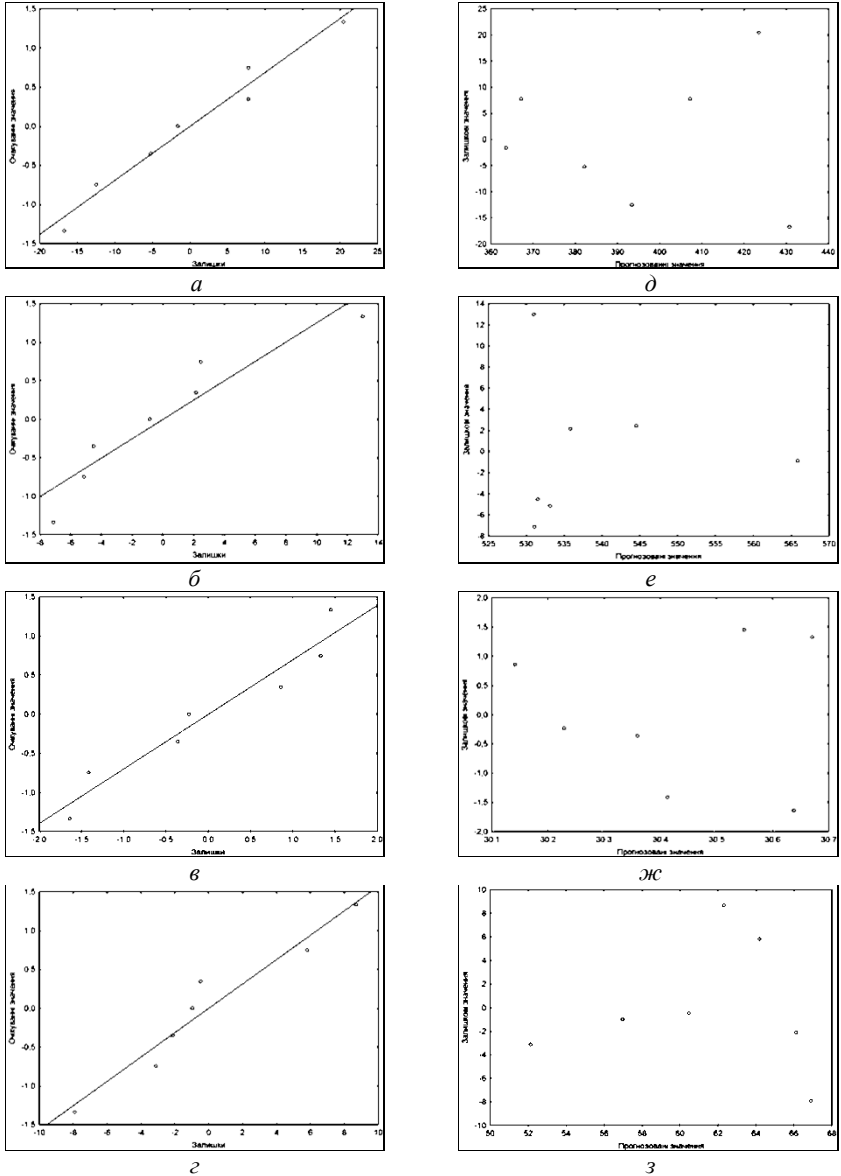


Рисунок 2 – Аналіз адекватності отриманих моделей за квазібритюновським методом залишків: *a, б, в, г* - розподілу залишків на нормальному ймовірнісному папері; *д, е, ж, з* - розподіл залишків; *a, д* - границя плинності; *б, е* - границя міцності; *в, ж* - відносне подовження; *г, з* - відносне видовження

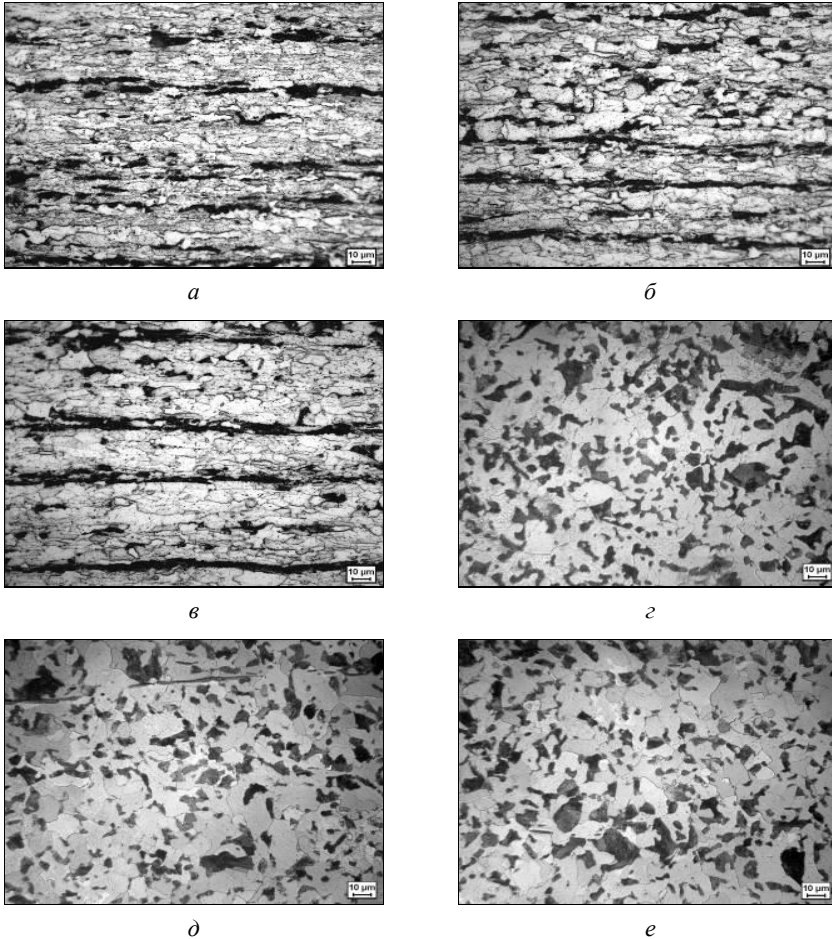


Рисунок 3 – Структура сталі 10Г2ФБ товщиною: *a* – 16 мм; *б* – 20 мм; *в* – 30 мм; *z* – 50 мм; *д* – 70 мм; *e* – 100 мм

Графічна інтерпретація отриманих залежностей представлена на рис. 4 *a-z*. На даному рисунку також наведено результати графічної інтерпретації результатів математичного моделювання взаємозв'язку між товщиною металопрокату та параметрами структурного стану низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ (рис. 4 *д-z*) які було отримано в роботі [9].

Сумісний аналіз наведених даних показує, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зниження границі плинності с одночасним зростанням границі міцності.

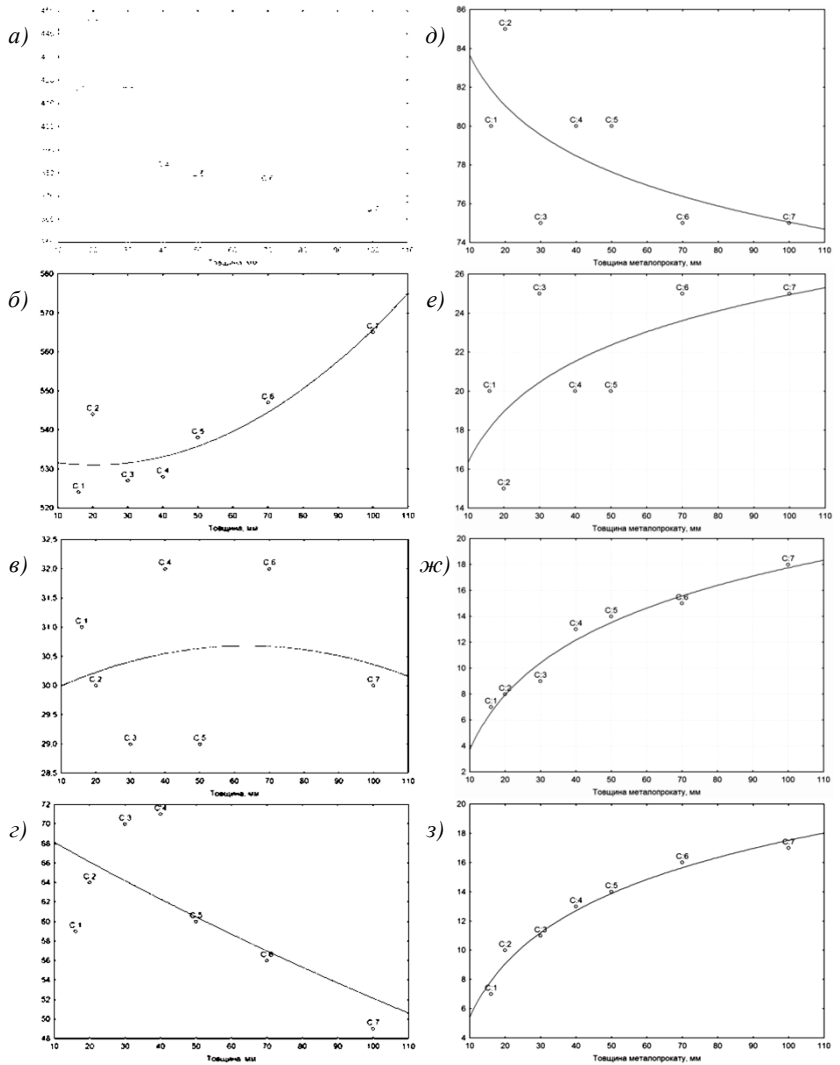


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація математичних моделей: *a* – границя плинності; *б* – границя міцності; *в* – відносне подовження; *г* – відносне видовження; *д* – відсотковий вміст феритної складової; *е* – відсотковий вміст перлітної складової; *ж* – середній розмір зерен фериту; *з* – середній розмір колоній перліту (*д-з* отримано в роботі [9])

Виходячи з даних щодо аналізу параметрів структурного стану (залежності, які представлено на рис. 4 *д-з*) можливо припустити, що

така поведінка пояснюється зростанням відсоткового вмісту та розмірів перлітної фази. Як було показано в роботі [11], саме перлітна складова чинить опір пластичній деформації, яке виникає внаслідок дії зовнішнього навантаження. Відповідно, при проведенні випробувань на розтяг, в структурному стані маємо перлітну фазу, яка чинить опір пластичній деформації та феритну складову, яка буде ефективно накопичувати залишкові деформації (при досягненні рівня зовнішнього навантаження, яке відповідає границі плинності).

Таким чином, зменшення феритної фази зі збільшенням її геометричних розмірів (при одночасному зростанні відсоткового вмісту та геометричних розмірів перліту) може призвести до зниження значень границі плинності (рис. 4 а).

Отриманий загальний вид залежностей пластичних властивостей (відносне видовження, відносне подовження) від товщини металопрокату пояснюється також одночасним збільшенням відсоткового вмісту перліту при зменшенні кількості феритної складової.

Враховуючи, що відносне видовження та відносне подовження є характеристиками спроможності матеріалу до деформування, то можливо припустити, що зменшення в структурному стані металопрокату кількості фази яка сприяє деформації (фериту) призведе до зниження загальної спроможності металопрокату до деформування. Саме така картина спостерігається на рис. рис. 4 в-г.

Висновки

Досліджено кількісний взаємозв'язок між комплексом механічних властивостей низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ та відповідним структурним станом з урахуванням товщини металопрокату.

Отримано математичні моделі взаємозв'язку між механічними характеристиками та товщиною металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ. Адекватність отриманих моделей доведена шляхом використання квазіньютонівського методу залишків.

Аналіз результатів металографічного аналізу показав, що для всіх досліджуваних товщин структура сталі являє собою ферито-перлітний конгломерат.

В роботі показано, що зі збільшенням товщини металопрокату спостерігається зниження границі плинності с одночасним зростанням границі міцності. Цей факт пояснюється змінами в структурному стані матеріалу, а саме зростанням відсоткового вмісту та розмірів перлітної складової. Залежність пластичних властивостей (відносне видовження, відносне подовження) від товщини металопрокату також пояснюється

одночасним збільшенням відсоткового вмісту перліту при зменшенні кількості феритної складової.

Перелік посилань

1. ДБН В.2.6-198:2014. Видання. Сталеві конструкції. Норми проєктування. [Чинний від 2015-01-01] Вид. офіц. Київ, 2014. 290 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинний від 2022-09-01] Вид. офіц. Київ, 2018. 36 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проєктування. [Чинний від 2007-10-01] Вид. офіц. Київ, 2006. 70 с.
4. Остап О. П. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Львів: СПОЛОМ. В 15 т. Т. 15: Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. 2015. 312 с.
5. Цурпал І.А. Механіка матеріалів і конструкцій. Монографія. К.: Вища освіта, 2005. 367с.
6. Laukhin D. V., Beketov O. V., Rott N. O., Tyuterev I. A., Ivantsov S.V., Laukhin V. D. The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallophysics and advanced technologies*. 2017. Т. 39, № 10. С. 1335–1343. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.10.1335>
7. ДСТУ ISO 6892-1:2018. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури. [Чинний від 2020-07-01] Вид. офіц. Київ, 2018. 39 с.
8. Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Дадіверіна Л. М., Козечко В. І., Тараненко А. О. Дослідження взаємозв'язку між товщиною та структурним станом металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 2 (020). С. 26-33. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.26.1039>
9. Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Ракаєв О. М., Тиквенко П. А., Кузнєцов С. В. Застосування математичного моделювання для аналізу взаємозв'язку між товщиною металопрокату та параметрами структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 5 (029). С. 17-25. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.051125.16.1187>
10. Програмний комплекс StatSoftStatistika: <https://statsoft.com>
11. Laukhin D., Beketov O., Rott N., Tsybal B. Study of the Kinetics of Plastic Deformation Propagation in a Welded Joint of 10G2FB Steel after Submerged Arc Welding. *Building materials, Steel and Alloys: Properties and Processing*. 2025. Vol. 1163. P. 19-30. <https://doi.org/10.4028/p-6hjd5>

References

1. DBN V.2.6-198:2014. Vydannia. Stalevi konstruktssii. Normy proektuvannia. [Chynnyi vid 2015-01-01] Vyd. ofits. Kyiv, 2014
2. DBN V.1.2-14:2018. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstruktssii ta osnov. [Chynnyi vid 2022-09-01] Vyd. ofits. Kyiv, 2018

3. DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. [Chynnyi vid 2007-10-01] Vyd. ofits. Kyiv, 2006
4. Ostash, O. P. (2015) *Mekhanika ruinuvannia i mitsnist materialiv*. Vol. 15. Lviv: SPOLOM.
5. Tsurpal, I. A. (2005) *Mekhanika materialiv i konstruktzii. Monohrafiia*. K.: Vyscha osvita
6. Laukhin, D. V., Beketov, O. V., Rott, N. O., Tyuterev, I. A., Ivantsov, S. V., & Laukhin, V. D. (2017). The Analysis of Interrelation between Kinetics of Propagation of Plastic Deformation and Initiation of Ductile Fracture. *Metallophysics and advanced technologies*, 39(10). <https://doi.org/10.15407/mfint.39.10.1335>
7. DSTU ISO 6892-1:2018. Materialy metalevi. Vyprovuvannia na rozttiah. Chastyna 1. Metod vyprovuvannia za kimnatnoi temperatury. [Chynnyi vid 2020-07-01] Vyd. ofits. Kyiv, 2018
8. Beketov, O. V., Laukhin, D. V., Dadiverina, L. M., Kozechko, V. I., & Taranenko, A. O. (2024). Research on the relationship between the thickness and the structural condition of rolled metal from low-carbon low-alloy steel 10G2FB. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (2 (020)), 26–33. <https://doi.org/10.30838/j.bpsacea.2312.260324.26.1039>
9. Beketov, O. V., Laukhin, D. V., Rakaiev, O. M., Tykvenko, P. A., & Kuznietsov, S. V. (2025). Application of mathematical modeling to analyze the interrelationship between rolled metal thickness and structural state parameters of low-carbon low-alloy steels. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (5 (029)), 16–24. <https://doi.org/10.30838/ujcea.2312.051125.16.1187>
10. Prohramnyi kompleks StatSoftStatistika: <https://statsoft.com>
11. Laukhin, D., Beketov, O., Rott, N., & Tsymbal, B. (2025). Study of the Kinetics of Plastic Deformation Propagation in a Welded Joint of 10G2FB Steel after Submerged Arc Welding. *Materials Science Forum*, 1163, 19–30. <https://doi.org/10.4028/p-6hjdf5>

V. I. Kozechko¹, Ph. D., ORCID 0000-0003-2370-1603

D. V. Laukhin¹, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-9842-499X

O. V. Beketov^{2,*}, D. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-0664-0327

T. Ie. Romanenko², ORCID 0000-0003-3590-837X

S. V. Kuznetsov², ORCID 0009-0006-4769-0725

D. I. Mamchur², ORCID 0009-0000-1385-8442

¹ Dnipro University of Technology

² Ukrainian State University of Science and Technologies

* Corresponding author: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN THE THICKNESS OF ROLLED METAL PRODUCTS AND THE COMPLEX OF MECHANICAL PROPERTIES OF 10G2FB STEEL

Abstract. The main engineering task in the design of welded building structures, including those of critical purpose, is to calculate the relationship between the stress-

strain state that arises under the influence of external loading and the kinetics of fracture initiation and propagation. The current regulatory design documentation does not take into account the structural state of the material, which has a direct impact on both the formation of the stress-strain state (a complex of mechanical properties) and, as a result, on the processes of fracture initiation. This work is devoted to the study of the quantitative relationship between the complex of mechanical properties of 10G2FB steel and the corresponding structural state, taking into account the thickness of the rolled metal. The work analyzes the relationship between the structural state that is formed in low-carbon low-alloy steel 10G2FB and the indicators of mechanical properties, namely: yield strength, tensile strength, relative elongation, relative elongation. The performed complex of metallographic studies showed that for all studied thicknesses the structure of the steel is a ferrite-pearlite conglomerate. Using the mathematical apparatus of one-dimensional regression analysis, the corresponding mathematical models were constructed, the adequacy of which was proven by using the quasi-Newton method of residues. Analysis of the obtained data showed that with an increase in the thickness of the rolled metal, a decrease in the yield strength is observed with a simultaneous increase in the strength limit. This fact is explained by changes in the structural state of the material, namely, an increase in the percentage content and size of the pearlite component. The dependence of the plastic properties (relative elongation, relative elongation) on the thickness of the rolled metal is also explained by a simultaneous increase in the percentage content of pearlite with a decrease in the amount of the ferrite component.

Key words: low-carbon low-alloy steel, structural state of the material, mathematical modeling, thickness of rolled metal, complex of mechanical properties.

For citation: Kozechko, V. I., Laukhin, D. V., Beketov, O. V., Romanenko, T. Ie., Kuznetsov, S. V., & Mamchur, D. I. (2026). Quantitative analysis of the interrelationship between the thickness of rolled metal products and the complex of mechanical properties of 10G2FB steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40. 110-121. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-007>

Рукопис надійшов до редакції / Received 06.03.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026