

importance of controlling and regulating the ratio of metal and slag levels and the influence of these parameters on the quality of the output product are analyzed.

The model proposed in the article is based on the use of an induction sensor mounted in the bailer lining for continuous measurement of metal and slag levels by analyzing the electrical parameters of the measuring circuit. The current and inductance of the sensor circuit vary depending on the level of metal and slag, which allows for accurate determination of their ratio.

To calculate the mass of metal and slag, the model uses the dependence of their volumes on the height of the bailer filling, taking into account the temperature of the melt and changes in the density of metal and slag depending on the temperature, which allows for a high level of calculation accuracy.

The developed mathematical model is an effective tool for automatic control of the casting process at the continuous casting machine. Its use in the automated steel casting control system will allow for more accurate separation of the metal and slag phases, which in turn will reduce the risk of slag entering the mold and improve the quality of ingots and their mechanical properties. Maintaining a stable metal level in the intermediate bailer ensures a stable melt supply and guarantees uniform filling of the mold, which is important for uniform cooling and crystallization of the ingot. In addition, the model allows for increasing the efficiency of the continuous casting machine operation, preventing metal losses due to premature completion of casting. Thus, the use of the model will allow optimizing the technological process, reducing the number of defects in the blanks, improving product quality and reducing the risk of emergency situations associated with metal overflow.

**Keywords:** Continuous casting machine, intermediate bailer, metal level, slag level, measurement, induction sensor, computer simulation, automatic control system.

Стаття надійшла 10.10.2025р.

УДК 621.771

[doi.org/10.31498/2522-9990302025347110](https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347110)

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

### РОЗВИНЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ГНУТИХ ПРОФІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ З ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Технологія виробництва металічних профілів має два напрямки: гаряча прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки на сортових станах; холодне пластичне згинання смуги на безперервних станах або листа на пресах.

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гарячекатаних профілів зазвичай не мають високої міцності. Питання з підвищенням показників міцності метала профілів мають високу актуальність.

Гнуті профілі виготовляють з низьковуглецевих сталей з границями міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup> регламентованим за ДСТУ 2834-94.

У виробництві гнутих профілів виконують холодне пластичне деформування в місцях, наприклад для швелера, між полкою та стійками.

Холодногнуті профілі поступаються жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними.

Для гнутих профілів використовують сталі, які можливо зварювати.

## Металургія

*В сучасному світі постійно ведеться робота по зниженню витрат на виробництво прокату. При цьому вимоги к якісним характеристикам метала постійно підвищуються. Застосування сталей з термомеханічної прокатки приводять до підвищення границі міцності металу, зниження погонної маси метра профілів та маси конструкцій з них.*

*В роботі запропонована розвинена технологія виготовлення холодногнутих профілів з підвищеною міцністю на основі застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей, що застосовують для виробництва зварних труб великих діаметрів.*

*У виробництві гнутих профілей пропонується, наприклад, використовувати низьковуглецевий прокат за стандартами API Spec 5L зі сталі X60 L415, де границя міцності досягає 760 Н/мм<sup>2</sup>. При цьому досягається значне зменшення маси погонного метра профіля по зрівнянню з тими, що зараз виробляють. Це приводить до зниження ваги конструкцій. Важливо те, що швелери із таких сталей можливо зварювати.*

**Ключові слова.** Профілі холодногнуті, зварюваність металу, сталі термомеханічно оброблені, підвищення міцності, зменшення маси сталевих конструкцій.

**Постановка проблеми.** Профілі це важливий вид металургійної продукції. Їх використовують для надання міцності та жорсткості конструкцій. Її особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин і сприймає поздовжні навантаження. Така форма збільшує міцність і зменшує масу металоконструкції.

Даний вид продукції буває двох типів: гарячекатаний та гнутий, які відрізняються за своїм способом виробництва, а також мають відмінність у механічних властивостях.

Сучасне виробництво гарячекатаних швелерів є досить енергоємним. Технологія має достатньо складний технологічний ланцюг. Складною є розробка системи калібрів. Значні витрати йдуть також на виготовлення та ремонт калібрів (переточки).

Гарячекатані профілі виробляють по технологіям гарячої прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки.

Для швелерів застосовують сталі, що окрім міцності повинні мати можливість зварювання. Низьковуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів дають можливість зварювання, але не мають високої міцності.

Гнуті профілі виробляють методом холодного згинання полос листового металу на профілезгинальних безперервних станах або на механічних пресах (рис. 1).



Рисунок 1 – Виробництво гнутих профілей

Наприклад, гнутий швелер відрізняється різноманітністю форм та розмірів, та регламентується ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови».

Візуально, від гарячекатаного швелера холодногнутий швелер відрізняється плавними округленими кутами вигину, однаковою товщиною всіх сторін, гладкою поверхнею (рис.2).

Така округленість кутів значно знижує жорсткість швелера.

## Металургія



Рисунок 2 – Округленість між полкою та стійками в холодногнутому швелері

Встає проблема підвищення жорсткості гнутих профілів.

У виробництві зварних труб застосовують низьковуглецеві сталі з низьким легуванням. Також застосовують низьковуглецеві нелеговані сталі після так званої контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термомеханічна обробка, яка збільшує показники міцності сталі. Виробництво гнутих профілів також дозволяє застосовувати такі сталі, наприклад:

EN 1002 5-2 (Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Технічні умови постачання нелегованих конструкційних сталей);

EN 10025-3 (Гарячекатані вироби з конструкційних сталей. Технічні умови постачання нормалізованого прокату зварюваних дрібнозернистих конструкційних сталей);

EN 10025-4 (Гарячекатані вироби з конструкційних сталей. Технічні умови постачання для термомеханічного прокату зварюваних дрібнозернистих конструкційних сталей);

EN 10028-2 (Вироби площинні сталеві для використання під тиском. Нелеговані та леговані сталі з точно визначеними властивостями за підвищених температур);

EN 10028-3 (Вироби площинні сталеві для використання під тиском. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі);

EN 10028-5 (Вироби площинні сталеві для використання під тиском.)

Постає питання з використання для виробництва гнутих профілів низьковуглецевих нелегованих сталей після так званої контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термомеханічна обробка. Це дає можливість випуску високоміцних гнутих профілів, які можливо зварювати.

Застосування таких профілів в виробництві зварних конструкцій сприятиме рішення проблеми зниження маси сталевих конструкцій. І це також підкреслює актуальність досліджень з цієї проблеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологія виробництва гарячекатаних фасонних профілів представлена в роботі [1].

Для виробництва швелерів, що відповідають перспективним та сучасним критеріям якості, конкурентоспроможності, експлуатаційної надійності в Україні за останній час введені такі стандарти:

- ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» [2];

- ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» [3];

- ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент». [4];

- ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови [5].

Гнуті профілі значно менше потребують енерговитрат.

Гнутий профіль завдяки округленим кутам має меншу жорсткість в порівнянні із гарячекатаним. Тому постає питання щодо підвищення жорсткості швелерів виготовлених методом згинання.

Для усунення округлення кутів пропонується холодногнутий швелер в останніх проходах на профілегібочних безперервних станах попередньо нагрівати локально в зонах кутів між полкою до температури 1250 та осаджувати полку в сторону кута і заповнювати кут в 90 градусів між полкою та стійкою металом полки [6, 7, 8]. При цьому, при рівній з

## Металургія

гарячекатаними профілями жорсткості значно збільшаться об'єми застосування холодногнутих профілів.

Виробництво гнутих профілей значно простіше і в порівнянні з гарячекатаним процесом не потребує значних енергетичних витрат на нагрів.

В роботі [9] відмічено, що :

- боротьба за собівартість продукції прокату, потрібність в високих вимогах її по якості є основним чинником в конкуренції на ринку збуту;

- термомеханічний спосіб виробництва прокату (ТМСР - Thermomechanical Controlled Process має пріоритети для задоволення потреб ринку:

- методом ТМСР виробляють дрібнозернисту сталь і це досягається сокупністю хімічного складу та режимів прокатки і термообробки.

В роботі [9] також відмічаються наступні переваги методу ТМСР.

- нормальна зварюваність,;

- висока міцність у поєднанні з високою пластичністю;

- енергозбереження;

- більш високі споживчі властивості продукції:

Слід відмітити основні проблеми при холодному згинанні ТМСР - сталей .

1. Висока пружинна віддача. Це найхарактерніша проблема. ТМСР-сталі мають дуже високу межу плинності. Ця призводить до великого накопичення пружної енергії в матеріалі. Після зняття навантаження метал прагне прийняти вихідне положення.

Фактичний кут вигину виходить більше необхідного (менш гострим). Потребується значне перегинання (компенсація) і точний розрахунок вигинання для компенсації пружинної віддачі.

2. Підвищене сили вигинання. Висока міцність цих сталей вимагає набагато більшого зусилля від обладнання порівняно із звичайними сталями.

Необхідно використовувати більш потужне згинальне обладнання і більш міцний інструмент. Інструмент більш зношується, а це підвищує ризик пошкодження менш міцних деталей обладнання.

3. Ризик розтріскування та зниження пластичності. ТМСР-сталей мають хорошу загальну пластичність, але при холодному формуванні вони більш чутливі до концентраторів напруги.

При надто малому радіусі згинання на зовнішній (розтягнутій) поверхні виробу є можливість виникнення мікротріщин або повного руйнування матеріалу. Потребується точне дотримання мінімально допустимого радіуса гнута, який зазвичай більше для ТМСР-сталей, ніж для звичайних.

4. Пошкодження поверхні. Високий тиск і сила тертя між інструментом та заготовлюю часто приводить до дефектів поверхні виробу.

На поверхні можуть утворюватися подряпини або вм'ятини (сліди від інструменту). Ризик такого пошкодження збільшується при роботі з високоміцними сталями.

5. Складки та зморшки при згинанні металів – це дефекти, які проявляються у вигляді нерівних, хвилеподібних або зім'ятих ділянок матеріалу.

Вони найчастіше виявляються на внутрішній стороні вигину. Таке пошкодження є при роботі з сталями з зниженими показниками відносного подовження.

**Мета дослідження.** Метою статті є представлення розвинутої технології виробництва гнутих профілів з низьколегованих сталей термомеханічно оброблених з підвищеною міцністю.

**Основний матеріал дослідження.** Низьковуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гнутих профілів не мають високої міцності .

## Металургія

Є сенс застосування марок сталей листового прокату, що виробляють для зварних труб великих діаметрів.

Марки сталей листового прокату, які використовують для труб вітчизняних та закордонних стандартів, поставляють за:

- EN 10025-2 (конструкційна),
- EN 10025-3 (нормалізована),
- EN 10025-4 (термомеханічна прокатка),
- EN 10028-2 (підвищені температури),
- EN 10028-3 (нормалізована);
- EN 10028-5 (термомеханічна прокатка);
- API Spec 5L.

Високі якісні показники сталей обумовлені термомеханічною обробкою.

При стандартних методах гарячої прокатки кутиків та швелерів важко провести таку термічну обробку. Це обумовлено різною товщиною профілів по перетину, що веде за собою нерівномірність охолодження і різницю якісних показників. Також складна форма форсунок для обробки ускладнює використання таких методів підвищення якості метала.

При згинанні термомеханічно оброблених сталей, особливо високоміцних марок (наприклад, X60 L415), виникають специфічні проблеми, пов'язані з їх високою міцністю та особливим мікроструктурним станом.

Термомеханічна обробка створює унікальну дрібнозернисту мікроструктуру, що забезпечує високу міцність.

Пропонується наступна технологія виробництва холодногнутого профіля (рис. 2).

Наприклад, сталь X60 L415 - це сталь для трубопроводів яка складається із заліза 97-98%, марганцю до 1,2% і вуглецю до 0,26% з меншою кількістю кремнію, фосфору та сірки. Сталь X60 L415 має чудову в'язкість і високу міцність на стиск, границя міцності досягає 760 Н/мм<sup>2</sup>.

Сталь X60 L415 також має гарну зварюваність і високу стійкість до корозії та розтріскування, використовується в основному при транспортуванні нафти та газу і яка використовуються при виробництві труб згідно стандартів США та Єврозони.

Є сенс в застосування марок сталей листового прокату, що створені для зварних труб великих діаметрів, що отримують методами пластичного вигинання в виробництві гнутих профілів, що також отримують пластичним вигинанням.

Зараз, наприклад, гнуті профілі виготовлені з низьковуглецевих сталей (сталь 20, Ст3сп), що мають границі міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup> регламентованими за ДСТУ 7809, ДСТУ 9218.

Приведемо застосування сталі для зварних труб великих діаметрів S355. У сталі S355 границя міцності досягає 470 Н/мм<sup>2</sup> по EN 10025-2:2022. Границя міцність цієї сталі на майже на 20 % біль ніж для сталі 20 чи Ст3сп.

А при використанні низьколегованого прокату за іноземними стандартами API Spec 5L сталей X60 L415 границя міцності досягає 760 Н/мм<sup>2</sup>. І вона майже вдвічі більша ніж для сталі 20 чи Ст3сп.

Це відкриває можливість значного зменшення ваги погонного метра профіля при технічних вимогах по міцності та відповідно по супротиву вигину. І при виготовленні сталевих конструкцій дає змогу значно зменшити кінцеву масу всієї конструкції.

## ВИСНОВКИ

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гнутих профілів не мають високої міцності через те, що потрібно забезпечувати можливість якісного зварювання.

В роботі запропонована розвинута технологія виготовлення холодногнутих профілів з підвищеною міцністю на основі застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей, що застосовують для виробництва зварних труб великих діаметрів.

Зараз, наприклад, гнуті профілі виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, Ст3сп,) з границями міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup> регламентованим за ДСТУ 2834-94.



Виробництві гнутого профіля, наприклад, із сталі X60 L415, що використовується для виробництва зварних туб великих діаметрів має границю міцності 760 Н/мм<sup>2</sup> за API Spec 5L. При застосуванні сталі X60 L415 замість СтЗсп досягається значне зменшення маси погонного метра холодногнутого швелера. При виготовленні сталевих конструкцій це дає змогу значно зменшити кінцеву масу всієї конструкції.

### Список використаних джерел

1. О. П. Максименко, М. М. Штода, О. В. Нікулін. Основи калібровки прокатних валків: Навчальний посібник. – Кам'янське: ДДТУ, 2023. – 156 с. <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/570>.
2. ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?d\\_doc=78666](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?d_doc=78666).
3. ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63430](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430).
4. ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент». [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63430](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430).
5. ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови» <https://uscc.ua/dstu-88082018-profil-stalevi-gnuti-tehnicni-umovi>
6. Григоренко В.У., Заболотній О.М. (2024). Складові розвитку методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування». Вісник приазовського державного технічного університету вип. 48. 2024 р. с. 73-82 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>
7. Григоренко В.У., Заболотній О.М. (2024). Стосовно підвищення експлуатаційних властивостей швелерів вироблених способом згинання із смуги або штрипса. Проблеми і перспективи розвитку сучасних технологій в контексті відбудови і сталого розвитку України - 2024 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 28-29 листопада 2024 р) : Навчально-науковий інститут сучасних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ«ПДТУ», 2024. – 99 с., с.39-40. [https://drive.google.com/file/d/1\\_4lmPQFFj6Y2G93905EL60NMdiCCVEv/view](https://drive.google.com/file/d/1_4lmPQFFj6Y2G93905EL60NMdiCCVEv/view).
8. Григоренко В.У., Заболотній О.М. (2025). Підвищення жорсткості та міцності і забезпечення зварюваності холодногнутих швелерів Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво №29, 2025. ПДТУ. С. 83-90. <https://doi.org/10.31498/2522-9990292025>
9. Курпе В.Г. Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей (2020). ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет. Докторська дисертаційна робота. 534 С. <http://www.dgma.donetsk.ua/docs/nauka/kurpe/Дисертація Курпе О.Г..pdf>.

**Grigorenko V.U., Zabolotniy O.M.**

### **DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BENT PROFILES USING LOW-CARBON STEELS INCREASED STRENGTH FROM THERMO-MECHANICAL TREATMENT IN THE PRODUCTION OF COLD-DIE PROFILES**

*The technology of production of metal profiles has two directions: hot rolling from a square or rectangular billet on section mills; cold plastic bending of a strip on continuous mills or a sheet on presses.*

*Low-carbon steels used in the production of hot-rolled profiles usually do not have high strength. Issues of increasing the strength of the metal of profiles are highly relevant.*

*Bent profiles are made of low-carbon steels with tensile strengths of 370-410 N/mm<sup>2</sup> regulated by DSTU 2834-94.*

## Металургія

*In the production of bent profiles, cold plastic deformation is performed in places, for example, for a channel, between the shelf and the racks.*

*Cold-bent profiles are inferior in rigidity to hot-rolled ones.*

*For bent profiles, steels that can be welded are used.*

*In the modern world, work is constantly being done to reduce the cost of rolling production. At the same time, the requirements for the quality characteristics of the metal are constantly increasing. The use of steels from thermomechanical rolling leads to an increase in the tensile strength of the metal, a decrease in the linear mass of the meter of profiles and the mass of structures made of them.*

*The work proposes a developed technology for manufacturing cold-bent profiles with increased strength based on the use of low-carbon thermomechanically treated steels used for the production of welded pipes of large diameters.*

*In the production of bent profiles, it is proposed, for example, to use low-carbon rolled products according to API Spec 5L standards from steel X60 L415, where the tensile strength reaches 760 N/mm<sup>2</sup>. This achieves a significant reduction in the mass of a linear meter of the profile compared to those currently produced. This leads to a reduction in the weight of structures. It is important that channels made of such steels can be welded.*

**Keywords:** *Cold-bent profiles, weldability of metal, thermomechanically treated steels, increased strength, reduced mass of steel structures.*

*Стаття надійшла 27.11.2025р.*

УДК 669.1:681.5

[doi.org/10.31498/2522-9990302025347111](https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347111)

Щербаков С. В.

### ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В СИСТЕМАХ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ

*В умовах сучасного виробництва ефективне управління процесами та контроль технологічних параметрів набувають важливого значення для отримання якісного продукту. Впровадження інноваційних рішень є прямим шляхом до суттєвого підвищення якості виробництва, збільшення загальної ефективності, підвищення рівня промислової безпеки та оптимізації поточних витрат. З огляду на великий обсяг технологічних параметрів і необхідність швидкого прийняття рішень, якісне управління стає ключовим інструментом для досягнення даних цілей.*

*Процеси подрібнення і класифікації є критично важливими на початковому етапі технології збагачення руд. Рудний матеріал доводять до необхідної крупності, яка залежить від специфіки подальшої обробки. Оскільки перша стадія подрібнення визначає якісні показники кінцевого продукту, підвищення ефективності керування та модернізація обладнання (млинів, живильників, трубопроводів) є пріоритетним завданням. Це дозволяє гарантувати необхідну якість концентрату при одночасному зниженні його собівартості.*

*Наукові дослідження присвячені аналізу методів адаптивного керування замкнутим циклом подрібнення технологічних різновидів залізородної сировини. Виконано огляд наукової та технічної літератури. Проведено критичний аналіз існуючих автоматичних систем керування процесом подрібнення та способів їх практичної реалізації. Розглянуто адаптивні системи керування та надано їх класифікацію. На основі проведеного аналізу сформульовано задачі та мету подальшого дослідження.*