

СКЛАДОВІ ДО СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ХОЛОДНОГНУТИХ ШВЕЛЕРІВ З СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ, ЩО ЗВАРЮЮТЬСЯ

Є два типи технології з виробництва швелерів: технологія гарячої сортової прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки; технологія холодного згинання смуги або листа.

При гарячій сортовій прокатці в основному застосовують низьковуглецеві сталі які можливо зварювати. Такі сталі не мають великої міцності.

Зниження металоємкості конструкцій з швелерів є важливою задачею. Питання з підвищенням показників міцності метала швелерів мають високу актуальність при сучасних вимогах до металоконструкцій.

Швелери сталеві гнуті згинають в місцях між полкою та стінкою. Такий профіль має меншу жорсткість по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногогнутих профілів. Перша складова це застосування сталей листового прокату з низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей (з контрольованої прокатки), де виконується інтенсивна термічна і механічна обробка, яка дозволяє збільшити показники міцності сталі. При цьому залишається можливість якісної зварки таких сталей.

Наприклад, гнуті швелери виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентовані за ДСТУ 2834-94, а можливо використовувати лист за API Spec 5L сталь X60 L415, границя міцності якої досягає 760 Н/мм².

Друга складова – для підвищеного жорсткості гнутого профілю запропоновано метал нагрівати безпосередньо в зонах деформації кутів та осаджувати полку, заповнюючи кут в 90 градусів між полкою та стінкою. Використання такого способу дозволяє наблизити і жорсткість холодногогнутого швелера до жорсткості гарячекатаного.

Запропонована технологія дозволяє виробляти гнутий швелер з зварних сталей, що мають підвищену міцність. Це дозволить зменшити металоємність конструкцій з швелерів.

Ключові слова: швелери гарячекатані та холодногогнуті, міцність, жорсткість, зварюваність, сталі з контрольованої прокатки, локальний нагрів, локальна деформація, зменшення маси погонного метра швелера, термомеханічно оброблена сталь,.

Постановка проблеми. Швелер це один з видів металургійної продукції, що застосовується в різноманітних конструкціях. Його особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин.

Промисловість випускає два види швелерів гарячекатаний та гнутий, які відрізняються за своїм способом виробництва, а також мають відмінність у механічних властивостях.

Виробництво гарячекатаних швелерів є енергоємним зі складним технологічним ланцюгом. Складною є системи калібрів. Потрібно мати великий парк станів та інструменту для них [1],[2], [3].

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

Виробництво швелерів по технології холодного згинання смуги чи листа простіше і, на відмінність від гарячекатаних процесів, не потребує значних енергетичних витрат на нагрів. Їх виробляють методом холодного згинання листового металу або полос на профілезгинальних безперервних станах або на механічних пресах. Але такий профіль поступається жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

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

Відомо, що для виробництва зварних труб великих діаметрів для нафтогазопроводів застосовують низьковуглецеві сталі з низьким легуванням. Також застосовують низьковуглецеві сталі після так званої контрольованої прокатки, де виконується інтенсивна термічна обробка, яка дозволяє збільшувати основні показники міцності сталі.

Є сенс у виробництві гнутих швелерів застосовувати сталі вироблені за технологіями контрольованої прокатки, так як вони є менш коштовними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Візуально, від гарячекатаного швелера холодногнутий швелер відрізняється плавними округленими кутами вигину, однаковою товщиною всіх сторін, гладкою поверхнею (рис.1).

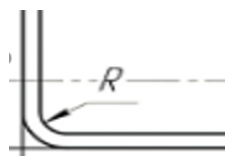


Рисунок 1 – Закруглення між полкою та стінкою у холодногнутому швелері

Різниця між гарячекатаним швелером (з гострими зовнішніми кутами) і гнутим швелером (із округленими кутами) полягає у розподілі металу, що безпосередньо впливає на жорсткість та міцність конструкції.

Основні причини, чому гарячекатаний профіль вважається більш жорстким:

1. Концентрація маси у критичних зонах. У гарячекатаному швелері перехід від стінки до полиці має масивне посилення (внутрішній радіус закруглення при гострих зовнішніх кутах). Це створює жорсткий вузол, який чинить опір деформації. Гарячекатаний має змінну товщину полиці (вона потовщується до основи), що дає додатковий момент інерції. Гнутий має однакову товщину по всьому перерізу. У місці вигину метал навіть трохи розтягується та стоншується.

2. Геометричний момент інерції балки на вигин визначається моментом інерції I . Чим далі маса металу розподілена від центральної осі перерізу, тим вища міцність. У гарячекатаного швелера «зайвий» метал у кутах максимально віддалений від нейтральної осі. Гострий зовнішній кут дозволяє полиці працювати всією своєю площею, в той час як закруглення гнутого профілю «зрізає» частину корисного перерізу в найважливішому місці.

3. Відсутність початкових напруг. Гнутий профіль виготовляється методом холодного згинання. У кутах виникають значні внутрішні напруження, і структура металу там вже «зіпсована» деформацією. Це знижує опір піковим навантаженням. Гарячекатаний профіль формується при високих температурах, що знімає структурну напругу. Метал виходить більш однорідним та стабільним.

У виробництво зварних труб та конструкцій по закордонним стандартам застосовують наступні сталі [4]:

EN 10025-2 (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 плоскі сталеві для використання під тиском. Нелеговані та леговані сталі з точно визначеними властивостями за підвищених температур);

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

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

Порівняння механічні властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі X42 L245, S355 та з сталями K48, K50, K52 які використовують для виробництва зварних труб великих діаметрів , що представлені в таблиці 1 і у таблиці 2 показують на можливість значно збільшити міцність металу холодногнутих швелерів у випадку застосування сталей, наприклад, K48, K50, K52.

Таблиця 1 – Порівняння механічні властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі (за закордонною документацією) S235, S355 X42 L245 [4].

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості, не менше				
		границя плинності, σ_T , Н/мм ² (кгс/мм ²)	границя міцності, σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	відносне видовження, δ_5 , %	ударна в'язкість	
					KV, J	KCU Дж/см ²
ДСТУ 9218	СтЗсп	245 (25)	372 (38)	20	-	29
ДСТУ 7809	20	245 (25)	410 (42)	25	-	-
ДСТУ 8943	20	216 (22)	353 (36)	15	-	39,2
ДСТУ EN 10025-2:2022	S235	235	360	26 24	27	-
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355	355	470	22 20	27	-
API Spec 5L	X42 L245	245	415	-	27	-

Таблиця 2 – Порівняння механічних властивостей низьколегованого прокату за вітчизняною та закордонною документацією [4].

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості для товщини прокату від 3 мм до 16 мм включно, не менш			
		границя плинності, σ_T , Н/мм ²	границя міцності, σ_B , Н/мм ²	відносне видовження, δ_5 , %	KCV _{-50°C} , Дж/см ² KV _{-20°C} , J
ДСТУ 9219:2023	K48	295	471	20	29,4
ДСТУ 9219:2023	K50	343	485	20	29,4
ДСТУ 9219:2023	K52	353	510	20	29,4
ДСТУ EN 10028-2:2018	P355GH	355	510-650	20	27
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355JR0 S355J0 S355J2	355	470-630	22 20	27
ДСТУ EN 10025-3:2022	S355N, S355NL	355	470-630	22	40
API Spec 5L	X56 L390	390-545	490-760	$A_f = C \frac{A_{XC}^{0,2}}{U^{0,9}}$	27, 40
API Spec 5L	X60 L415	415-564	520-760		27, 40

Ідея підвищення жорсткості холодногнутого швелера, за рахунок локального нагріву металу в зонах кутів між полкою та стінкою до температури гарячого пластичного деформування і заповнення кута в 90 градусів між полкою та стінкою шляхом осадки полок представлена в роботах [5], [6] (рис.2).

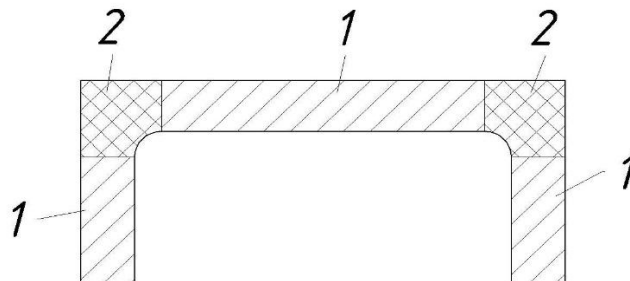


Рисунок 2 – Місце локального нагріву та локальної пластичної деформації швелера: 1 - зона, що не підлягала нагріву і деформації; 2 – зона локального нагріву та деформації.

Механічні властивості металу ділянок, які не були підтвержені нагріву та деформації залишаються незмінні.

Мета дослідження. Метою статті є аналіз основних складових пропонованої технології виробництва холодногнутих швелерів з металу, що має достатню зварюваність та підвищену міцність по зрівнянню з гарячекатаним швелером.

Основний матеріал дослідження. Сталі листового прокату 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).

Якісні показники сталей досягають термомеханічною обробкою.

При виробництві кутиків та швелерів важко провести таку обробку. Це обумовлено нерівномірністю охолодження по перетину, складною формою форсунок і питаннями якісної правки профілів.

При вигинанні листа з термомеханічно оброблених сталей виникають проблеми, що пов'язані з їх високою міцністю на напруженім станом:

1. Висока пружинна віддача. Після зняття навантаження метал повертається у вихідне положення. Тож треба значне перегинання і більш точний розрахунок зусилля, та компенсації пружинної віддачі.

2. Підвищене зусилля згинання. Завдяки високій міцності цих сталей потребується більша сила від обладнання. Потрібно більш потужне згинальне обладнання і більш міцний інструмент.

3. Ризик розтріскування та зниження пластичності. При холодному формуванні такі сталі чутливі до концентраторів напруги. При малому радіусі згинання на зовнішній поверхні можливе руйнування матеріалу або поява мікротріщин.

4. Пошкодження поверхні. Внаслідок тиску і тертя на поверхні виникають подряпини, вм'ятини (сліди від інструменту). Це обумовлює використання спеціального інструменту для захисту поверхні.

Є сенс в застосування для виготовлення швелерів марок сталей листового прокату, що застосовують для виготовлення зварних труб великих діаметрів труб вітчизняних

та іноземних стандартів методом холодного згинання з локальним нагрівом та осадкою зон деформації в місцях кутів між полицею та стінкою. При нагріві збільшиться величина зерна металу.

При такій технології буде зміна властивостей при гарячій осадці полок в зонах 2 (рис.2). Термомеханічна обробка створює унікальну дрібнозернисту мікроструктуру, що забезпечує високу міцність. Нагрів металу вище за певну температуру (залежно від марки) руйнує цю структуру. Гаряче формування до заповнення кута а 90 градусів має контролюватись з урахуванням температур, які не повинні перевищувати температуру фазного перетворення металу в зонах 1 (рис.2). Це дозволяє зберегти механічні властивості полиць та стінки.

Додатково можна при закінченні осадки гарячого металу виконати локальну термообробку для отримання мікроструктури з меншою величиною зерна.

Нагрів локальних зон у кутах до 1250 С, та подальша деформація потребує попередньо лише до 5% маси виробу в місцях нагріву і деформації, а 95% перетину зберігає початкові механічні властивості. Також це дозволяє уникнути потоншення металу та запобігати утворенню структурних напружень у місцях деформації. Підвищується супротив швелера на крутіння. Гострий зовнішній кут працює всією своєю площею, на відмінність площі металу у закругленого кута.

У пропонуваній розвинутій технології виготовлення холодногнутого швелера. як приклад, можна застосовувати прокат за стандартами API Spec 5L з сталей X60 L415 та досягати у холодногнутих профілях границь міцності 760 Н/мм².

А у звичайній технології за ДСТУ 2834-94 у виробництві холодногнутих швелерів застосовують низьковуглецеві сталі (сталь 20, чи СтЗсп) з границями міцності 370-410 Н/мм².

Це дає змогу значно зменшувати вагу погонного метра профіля і дозволяє зменшувати кінцеву масу металічних конструкцій.

ВИСНОВКИ

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гарячекатаних швелерів не мають вику міцність.

Швелери холодногнуті можна виробляти з низьковуглецевих сталей, отриманих по технології контрольованої прокатки, де покращені якісні показники міцності металу. Це дасть можливість зменшувати масу погонного метра швелера і випускати металоконструкції з меншою масою.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногнутих профілів на прикладі швелера:

- застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей для листового прокату для труб, де збільшені показники міцності металу;
- підвищення жорсткості профілів за рахунок осадки полок та заповнення прямих кутів металом між полицею та стінкою при застосовуванні локального нагріву у кутах, що мають округлення;
- охолодженням деформованих ділянок для наближення якісних показників металу до механічних властивостей вхідного листа.

Розглянуті проблеми, які виникають при виробництві термомеханічно оброблених сталей.

Як приклад показано, що на теперішній час гнуті швелери виготовляють за ДСТУ 2834-94 з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм². Виробництво холодногнутого швелера за запропонованою технологією, наприклад, із сталі

X60 L415 за API Spec5L, де границя міцності досягає 760 Н/мм², дозволить значно зменшити масу погонного метра відносно гарячекатаного швелера.

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. Ілюкович, Б. М., Нехаев, Н. Е., Меркурьев С. Е., Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 5. – Днепропетровск: Днепро-ВАЛ, 2002. – 482 с. <https://vdoc.pub/documents/5-4on3iio3uk20>.
3. Григоренко В.У., Заболотній О.М. Складові розвитку методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування. Вісник Приазовського державного технічного університету Серія: Технічні науки. 2024 вип. 48. 2024 р. с. 73-82 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>.
4. Овсяников В.В. До питання застосування закордонних марок сталей для вітчизняних магістральних трубопроводів Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво №30, 2025. ПДТУ. С. 92-99. doi.org/10.31498/2522-9990302025347108.
5. 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_4lmPQFfJ6Yya2G93905EL60NMdiCCVEv/view.
6. Григоренко В.У., Заболотній О.М. 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>.

Zabolotnii O.M.

COMPONENTS FOR CREATING A TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COLD-BENT CHANNELS FROM WELDED STEELS OF HIGH STRENGTH

There are two types of channel production technology: hot section rolling technology from a square or rectangular billet; cold bending technology of a strip or sheet.

In hot section rolling, low-carbon steels that can be welded are mainly used. Such steels do not have high strength.

Reducing the metal content of channel structures is an important task. Issues of increasing the strength of channel metal are highly relevant given modern requirements for metal structures.

Bent steel channels are bent in places between the flange and the wall. Such a profile has less rigidity compared to hot-rolled channels.

The work proposes components of a developed technology for manufacturing cold-bent profiles. The first component is the use of sheet steels from low-carbon thermomechanically treated steels (from controlled rolling), where intensive thermal and mechanical treatment is performed, which allows to increase the strength indicators of the steel. At the same time, the possibility of high-quality welding of such steels remains.

For example, bent channels are made of low-carbon steels (steel 20, St3sp,) with strength limits of 370-410 N/mm² regulated by DSTU 2834-94, and it is possible to use a sheet according to API Spec 5L steel X60 L415, the strength limit of which reaches 760 N/mm².

The second component - for increased rigidity of the bent profile, it is proposed to heat the metal directly in the deformation zones of the corners and deposit the shelf, filling the 90-degree angle between the shelf and the rack. Using this method allows to bring the rigidity of the cold-bent channel closer to the rigidity of the hot-rolled one.

The proposed technology allows you to produce a bent channel from welded steels with increased strength. This will reduce the metal content of channel structures.

Keywords: *hot-rolled and cold-bent channels, strength, stiffness, weldability, controlled-rolled steels, local heating, local deformation, reduction in the mass of a linear meter of channel, thermomechanically treated steel.*

Стаття надійшла 24.03.2026р.

Стаття прийнята 27.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.