



БЕРНАЦЬКИЙ Артемій Володимирович,

канд. техн. наук, старший дослідник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-8050-5580

ДАНИЛЕЙКО Олександр Олександрович,

інженер-технолог I категорії, Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона Національної академії наук України;
асистент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних
технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства
та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного
університету України "Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського"
ORCID ID: 0000-0002-8501-0421

СІОРА Олександр Васильович

науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-1927-790X

НАБОК Тарас Миколайович,

молодший науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-9582-5763

ЮРЧЕНКО Юрій Вікторович,

інженер,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0001-9253-009X

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Вступ

У будівельній індустрії прагнуть до все тонших і легших конструкцій, зокрема шляхом використання сучасних високоміцних конструкційних сталей. В останні роки продовжуються розробки нових високоміцних конструкційних сталей, які мають, поряд із високою твердістю, хороші зварювальні властивості і високу ударну в'язкість. Використання цих сталей

окрім естетичних міркувань, пояснюється економією матеріалу. Високоміцними конструкційними сталями називають сталі з межею плинності $\sigma_T > 355$ МПа. Незважаючи на гарні зварювальні властивості, нормативна стійкість цих зварних з'єднань низька. Це стосується, зокрема, кутових швів, які часто використовуються в будівництві, так як вони можуть бути виготовлені без попередньої підготовки шва. У зв'язку з цим необхідно, щоб кутовий зварний шов був дуже великої товщини.

У більшості стандартів, які раніше застосовувалися, враховується тільки міцність основного матеріалу для стійкості шва, в той час, присадковий матеріал зварного шва повинен мати, що найменше, таку ж міцність, як і міцність основного матеріалу. Для конструкційних сталей нормальної міцності S235 і S355, ця умова важлива, адже для таких сталей присадковий зварювальний матеріал завжди має більш високу міцність, ніж матеріал основи. Для високоміцних сталей S460 і S690, може бути доцільним використання присадкових матеріалів з вищою або нижчою міцністю. Це вимагає детального знання впливу міцності металу зварного шва до стійкості кутових з'єднань високоміцних конструкційних сталей¹.

Високоміцні сталі для зварних конструкцій широкого призначення, повинні мати гарну пластичність, високий опір до крихкого руйнування і задовільну зварюваність. Необхідний комплекс технологічних властивостей сталей забезпечується структурою, яка формується в процесі мартенситного або бейнітного перетворення і визначається легуванням та термічною обробкою. Сталі виплавляють мартенівським або індукційним способами. В ряді випадків здійснюється додаткова обробка рідкого металу синтетичними шлаками: обдування аргоном чи електрошлаковим переплавом, що дозволяє обмежити вміст у сталі шкідливих домішок².

1. Механічні властивості і структура

Оптимальні механічні властивості і високий опір крихкому руйнуванню при мінусовій температурі високоміцні сталі набувають після гартування або нормалізації і подальшого високого відпуску.

З точки зору гартування сталі, при порівняно низькому вмісті вуглецю (C) і легуючих елементів, зокрема ефективні мікродобавки бору (B) в кількості 0,001–0,006 %. Це дає можливість зменшити вміст легуючих

1 Rasche, C. (2012). *Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kehl-nahtverbindungen höherfester Baustähle*. Stuttgart: Institut für Konstruktion und Entwurf.

2 Мусяченко, В. Ф., Миходуй, Л. И. (1991). Низколегированные бейнитно-мартенситные стали. В Э. Л. Макарова (ред.), *Сварка и свариваемые материалы, в 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов*, (с. 181-203). Москва: Металлургия.

елементів в сталі у поєднанні з 0,15–0,5 % Мо, оскільки бор забезпечує отримання стійкої зони термічного впливу (ЗТВ) в широкому діапазоні режимів зварювання.

Гарне поєднання властивостей мають сталі, що містять 0,4–0,6 % Мо і 0,002–0,006 % V з добавкою інших легуючих елементів. При наявності в сталі зазначеної кількості молібдену і бору, при відповідній обробці, забезпечується отримання стабільної бейнітної або мартенситної структури в листовому прокаті до 100 мм. До вказаних сталей відносяться сталі марок 13ХГМРБ, 14Х2ГМРБ, 14ХМНДФР та ін.

Для зварних конструкцій застосовуються безнікелеві сталі, які містять 0,15–0,3 % Мо і 0,002–0,006 % В (12Г2СМФАЮ). Товщина листового прокату не перевищує 30 мм. Володіючи високими характеристиками міцності і достатньою пластичністю, такі сталі поступаються сталям типу 14Х2ГМРБ по хладостійкості³.

Основними показниками зварюваності низьковуглецевих бейнітно-мартенситних сталей є опір зварних з'єднань до утворення холодних тріщин, крихкого руйнування, а також – механічні властивості зони термічного впливу, які перш за все пов'язані з фазовими перетвореннями і структурними змінами в сталі при зварюванні. На основі цих показників визначають технологічні і конструктивні умови отримання зварних з'єднань, які відповідають експлуатаційним вимогам до зварної конструкції.

У сталей 14ХГН2МДАФБ і 12ХГН2МФБДАЮ перетворення аустеніту в діапазоні швидкостей охолодження $v = 0,6\text{--}50^\circ\text{C}/\text{с}$ відбувається в бейнітній і мартенситній областях (рис. 1). При швидкості охолодження, що перевищує $v = 10^\circ\text{C}/\text{с}$, у них розвивається тільки мартенситне перетворення. При швидкості охолодження $v = 2,3^\circ\text{C}/\text{с}$ – відбувається бейнітне перетворення, відсутні виділення доєвтектоїдного фериту, що свідчить про високу стійкість аустеніту цих марок сталей.

Швидкість охолодження помітно впливає на величину часових напружень в температурній області фазового переходу (рис. 2). Різниця в кінетиці структурних перетворень призводить також до зміни величини залишкових напружень, що поширюються в зразках. З підвищенням швидкості охолодження в інтервалі $0,6\text{--}50^\circ\text{C}/\text{с}$ у сталі 14ХГН2МДАФБ вони зменшуються від 240 до 150 МПа⁴.

3 Мусияченко, В. Ф., Миходуй, Л. И. (1991). Низколегированные бейнитно-мартенситные стали. В Э. Л. Макарова (ред.), *Сварка и свариваемые материалы, в 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов*, (с.181-203). Москва: Металлургия.

4 Там само.

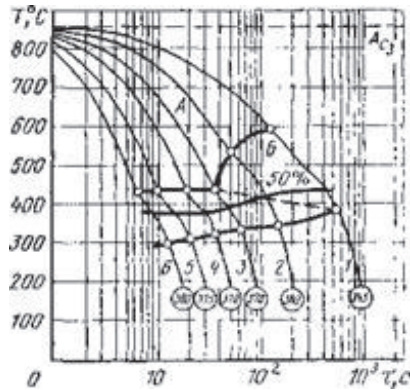


Рис. 1. Термокінетична діаграма розпаду аустеніту сталі 14ХГН2МДАФБ⁵

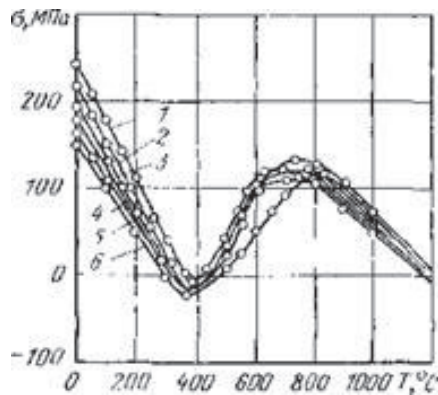


Рис 2. Вимірювання часових напружень при охолодженні зразків зі сталі 14ХГН2МДАФБ (термоцикли нагрів – охолодження)⁶

2. Високоміцні сталі

2.1. Хронологія виникнення високоміцних сталей

У розвитку зварювальних технологій важливе місце посідає розвиток високоміцних конструкційних сталей. Як показано на рис.3, нормалізована дрібнозерниста сталь S355N 1 1950 роках стала відправною точкою для розвитку конструкційних сталей з підвищеною границею плинності⁷.

Збільшуючи вміст легуючих елементів (переважно комплексно діючих елементів), вдалося досягти межі плинності нормалізованих сталей до 500 МПа. Важливі представники цієї групи є, наприклад, марки сталі S355N і

⁵ Мусияченко, В. Ф., Миходуй, Л. И. (1991). Низколегированные бейнитно-мартенситные стали. В Э. Л. Макарова (ред.), *Сварка и свариваемые материалы, в 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов*, (с. 181-203). Москва: Металлургия.

⁶ Там само.

⁷ Gerster, P. (2012). *Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze*. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

S460N. Для того, щоб збільшити границю плинності нормально відпалених сталей, вміст легуючих елементів повинен бути збільшений, але спостерігається погіршення зварюваності. Тому для підвищення механічних властивостей застосовують різке охолодження у воді.

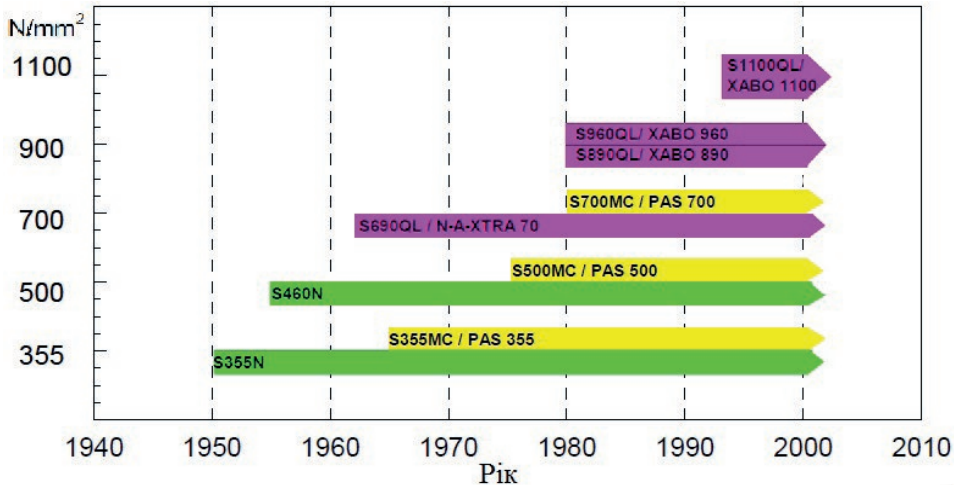


Рис. 3. Розвиток висококоміцних конструкційних сталей⁸

Покращені конструкційні сталі зі щонайменшою границею плинності 690, 890 і 960 МПа уже багато років є у використанні^{9,10,11,12}. Найважливішою була поява сталі S690Q/QL. Водночас, сталі з межами плинності 890 і 960 МПа широко використовуються в судинах під тиском, підйомних кранах і транспортних засобах. За даними¹³, верхня межа границі плинності у таких низьколегованих висококоміцних сталях складає 1100 МПа. Їх використовують переважно у виготовленні деталей будівельних кранів.

Цікавою альтернативою термооброблених сталей є сталі з позначкою MC, що позначає термомеханічні прокатані сталі із границею плинності від 355 до 690 МПа¹⁴. Вони використовуються для виготовлення труб великих

8 Gerster, P. (2012). Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

9 Kuhlmann, U., Dürr, A., Schröter, F. (2012). Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle im Stahlbau: Anwendung im Stahlbau insbesondere unter der Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit geschweißte Konstruktionen (ss. 130–135).

10 Uwer, D., Dißelmeyer, H. (1986). Erfahrungen mit dem Verarbeiten des hochfesten wasservergüteten Baustahls StE 890. Schweißen und Schneiden, 38(9), 430–436.

11 Uwer, D., Degenkolbe, J., Herr, D. (1992). Schweißen moderner hochfester Baustähle. Stahl und Eisen, 112(4), 29–35.

12 Uwer, D., Wegmann H. (2000). Schweißtechnische Verarbeitung niedriglegierter hochfester Bau-stähle. Stahl-Informationen-Zentrum Dokumentation, 570(1), 92–96.

13 Gerster, P. (2012). Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

14 Uwer, D., de Boer, H. (1989). Thermomechanisch gewalzte Stähle. Technica, 2, 65–70; Bleck, W., Preisendanz, C., Sonne, H.-M., van Gijzel, M., Martens, J. (2003). Werkstoff- und umformtechnische Untersuchungen an thermomechanisch gewalzten Warmbreitbändern der Stahlsorten PAS 60 und PAS 70. Thyssen, 1/93, 41–54.

діаметрів та в суднобудуванні, а також, як спеціальні, у машинобудуванні для виготовлення пристроїв для холодної обробки тиском.

У табл. 1 наведено огляд властивостей високоміцних сталей. Вони виготовляються у вигляді гарячекатаних листів товщиною від 1,5 – 20 мм чи кругляком діаметром від 3 мм ¹⁵.

Таблиця 1

Властивості високоміцних конструкційних сталей¹⁶

Güte	Norm	TKS-Güte	Typische chemische Zusammensetzungen Gew. %										min. ReH MPa	Rm MPa	Biegeradius r
			C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb		typ. CET	min.			
S355J2G3	10025	-	0,18	0,05	1,50						0,34	355	490 630	2,5 a	
S355MC	10149-2	PAS 355	0,07	0,05	1,10				0,04		0,18	355	430 550	1,0 a	
S500MC	10149-2	PAS 500	0,07	0,05	1,35			0,08	0,05		0,21	500	600 760	2,0 a	
S700MC	10149-2	PAS 700	0,07	0,45	1,80		(0,18)		0,06	Ti 0,12	0,25 (0,29)	700	750 950	2,5 a (WB) 3,0 a (GB)	
S690QL	10137-2	N-A-XTRA 70	0,17	0,20	0,95	0,20	0,25				0,30	690	770 940	3,0 a	
S960QL	10137-2	XABO 960	0,17	0,40	1,45	0,60	0,35	0,05			0,38	960	980 1150	4,0 a	
S1100QL	(10137-2)	XABO 1100	0,17	0,30	0,95	0,70	0,55	0,07		Ni 2,0	0,41	1100	1200 1500	4,0 a	

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40$$

2.2. Методи виготовлення

Сталі з високою межею плинності можуть бути отримані за допомогою різних виробничих процесів, які схематично показані на рис. 4. Маршрут виготовлення тісно залежить від хімічного складу сталі. Він призводить до різних властивостей обробки і застосування. Особливо хімічний склад сталі впливає на домінуючу величину сталей для зварних конструкцій – зварюваність¹⁷.

Загалом розрізняють:

– Нормалізовані сталі.

Вони виготовляються за допомогою звичайної гарячої прокатки, тобто прокатки до рекристалізаційної температури з подальшим нормальним

¹⁵ Gerster, P. (2012). *Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze*. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

¹⁶ Wegmann, H., Gerster, P. (2017). *Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Baustähle im Nutzfahrzeugbau*. Ehingen.

¹⁷ Kuhlmann, U., Dürr, A., Schröter, F. (2012). *Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle im Stahlbau: Anwendung im Stahlbau insbesondere unter der Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit geschweißte Konstruktionen* (ss. 130–135); Siegele, D., Baumgartner, J., Varfolomeev, I., Moroz, S., Brand, M., Bruder, T. (2013). *Lebensdauerbewertung von Schweißverbindungen unter besonderer Berücksichtigung von Eigenspannungen*.

відпалом в печі. З нормального відпалу ретельний нагрів до температур вище феритно-аустенітного перетворення з наступним повільним охолодженням. Це призводить до тонкої і регулярної структури зерна та високої межі плинності¹⁸.

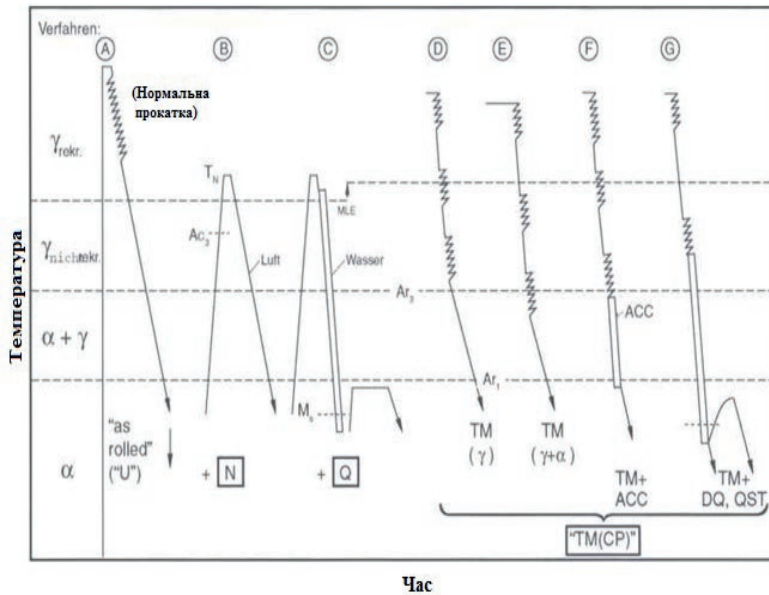


Рис. 4. Виробничі процеси для високоміцної сталі¹⁹

Зокрема стандартна марка сталі S355J2G3 виготовляється в якості листового металу за цими процесами. Більш висока міцність може бути досягнута за рахунок збільшення вмісту легуючих елементів і додавання так званих мікролегуючих елементів: титан, ніобій і ванадій, які мають більш дрібне зерно.

Прокат таких сталей визначені в DIN EN 10113-2²⁰ до межі плинності 460 МПа стандартизований з буквами N (нормальна якість температури з доведеним енергії удару при -20°C) і NL (якість низькотемпературної температури з доведеним енергії удару при -50°C), відповідно. Такі сталі можуть бути запропоновані в якості листового прокату товщиною до 200 мм.

– Сталі термомеханічної прокатки.

Під термомеханічною прокаткою (далі – ТМ) мають на увазі комбінацію термічної і механічної обробок, які забезпечують структуру, яка не

18 Schröter, F. (2003). Höherfeste Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung. Sonderdruck aus Bauingenieur, 9, 426–432.

19 Kuhlmann, U., Dürr, A., Schröter, F. (2012). Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle im Stahlbau: Anwendung im Stahlbau insbesondere unter der Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit geschweißte Konstruktionen (ss. 130–135).

20 DIN EN 10 113-2 (1993). Warmgewalzte Erzeugnisse aus schweißgeeigneten Feinkornbaustählen, Teil 2: Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte Stähle. Berlin: Deutsches Institut für Normung.

може бути отримана при застосуванні лише термічної обробки. Проводиться прокатка при температурі нижче температури рекристалізації, яка у поєднанні з мікролегуєчими елементами забезпечує формування дуже тонкої структури зерна. Таким чином, можлива висока ударна в'язкість і міцність без необхідності вдаватися до більш великої концентрації легуєчих елементів.

Як показано на рис. 5, можливі різні варіації при термомеханічному прокаті. Зокрема, для високоміцних сталей доцільно використовувати прискорене охолодження (ACC: Accelerated cooling) для точного регулювання властивостей. Залежно від марки сталі і розмірів, це охолодження може бути з подальшим відпалом. Після вибору остаточних умов охолодження, існує безліч різних варіантів процесу. Існує також TM + QST метод (загартування і відпуск (Quenching and self tempering)), який використовується в основному для прокатних балок ²¹.

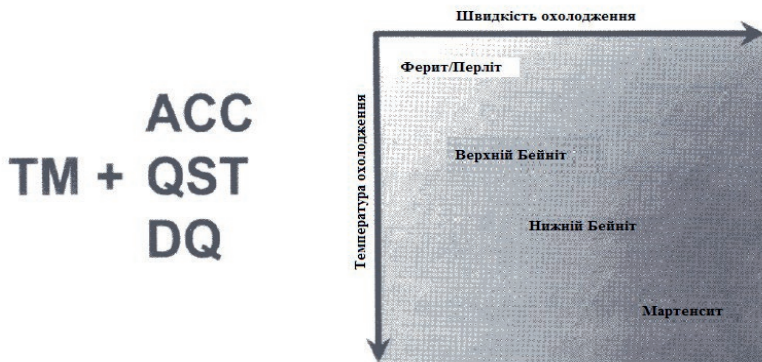


Рис. 5. Вплив різних видів термообробки при термомеханічній прокатці²²

Термомеханічні катані сталі для сталевих конструкцій нормуються згідно DIN EN 10113-3²³ до межі плинності 460 МПа і стандартизовані в даний час до товщини 120 мм. Вони позначаються буквами М (нормальної якості з ударною в'язкістю при температурі – 20°C) і ML (високої якості при низьких температурах з ударною в'язкістю при – 30°C).

Крім того, варто відзначити, що вже стали використовуватися сталі з межею плинності 500 МПа при товщині до 80 мм.

21 Degenkolbe, J., Uwer, D., Wegmann, H. (1985) Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen durch die Abkühlzeit $t_{8/5}$ und deren Ermittlung. *Thyssen Technische Berichte*, 1, 57–73.

22 Там само.

23 Schröter, F. (2003). Höherfeste Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung. *Sonderdruck aus Bauingenieur*, 9, 426–432.

3. Зварювальні процеси та матеріали

Сучасні високоміцні конструкційні сталі на практиці без проблем зварюються всіма методами. Через високий ступінь механізації та більш низький вміст водню в наплавленому металі, часто дугове зварювання ставлять на передній план. На рис.6 показане дугове зварювання рами автомобіля із сталі S960QL²⁴. Крім того, особливо для товстих листів, використовують метод зварювання під флюсом.



Рис. 6. Автомобільна рама із сталі S960QL для 80 т крана²⁵

Присадковий матеріал підбирають таким чином, щоб у нього були однакові механіко-технологічні властивості, як і в основного матеріалу: вони повинні мати однаковий клас твердості і вміст легуючих елементів. Також слід зазначити, що у зварний шов потрапляють легуючі елементи із матеріалу основи. Тому, перш за все при зварюванні високоміцних сталей, для кореневих і одиночних проходів використовується низьколегований присадковий матеріал. Чим більша границя плинності, тим більшою є вірогідність появи тріщин. В таблиці 2 показані актуальні європейські норми (EN) до присадкових матеріалів²⁶.

Виключенням є сталі із мінімальною границею плинності 1100 МПа. До цього часу для таких сталей не має еквівалентного зварювального присадкового матеріалу. Він є тільки для сталей з границями плинності 890 і 960 МПа.

24 Wegmann, H., Gerster, P. (2017). *Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Baustähle im Nutzfahrzeugbau*. Ehingen.

25 Degenkolbe, J., Uwer, D., Wegmann, H. (1985) Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen durch die Abkühlzeit $t_{8/5}$ und deren Ermittlung. Thyssen Technische Berichte, 1, 57–73.

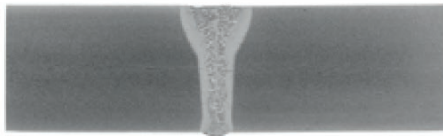
26 Wegmann, H., Gerster, P. (2017). *Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Baustähle im Nutzfahrzeugbau*. Ehingen.

З плином деякого часу, почали застосовувати лазерне зварювання для зварювання матеріалів товщиною 12 мм. В рамках ECSC-проекту було отримано зварне з'єднання пластин із високоміцних сталей товщиною 15 мм (рис.7) ²⁷.

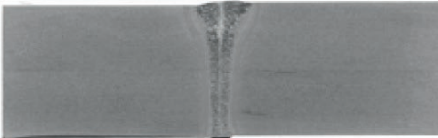
Таблиця 2

Європейські норми для присадкових матеріалів²⁸

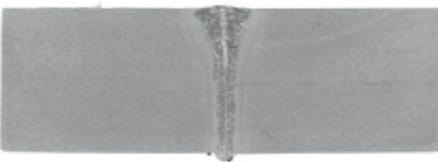
	GAS	LBH	UP	WIG	MAG / MIG	MSG / FD
не леговані і дрібнозернисті сталі	EN 12536	EN 499	EN 756	EN 1668	EN 440	EN 758
високоміцні Re > 500 N/mm²		EN 757	prEN 14295	EN 12534		EN 12535
Захисний газ / Порошок			EN 760	EN 439		
Умови поставки		EN 759 und EN 12074				



XABO 460
(S460MC)



N-A-XTRA 70
(S690QL)



XABO 890
(S890QL)

Рис. 7. Лазерне зварювання високоміцних будівельних сталей товщиною 15 мм²⁹

Енергія ефективної потужності q_{eff} через подвійне еліпсоїдне джерело тепла, форму і розмір, приблизно відповідає розплавленій ванні. На рис. 8 показаний загальний вид джерела тепла, який переміщують в

²⁷ Gerster, P. (2012). Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

²⁸ Wegmann, H., Gerster, P. (2017). Schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung hochfester Baustähle im Nutzfahrzeugbau. Ehingen.

²⁹ Gerster, P. (2012). Besonderheiten beim Schneiden und Schweißen hochfester Feinkornbaustähle bis 1100 N/mm² Mindeststreckgrenze. Duisburg: Ehingen und Horst Wegmann.

напрямку x . Умовний гаусівський розподіл щільності джерела енергії q з максимальним значенням у початку координат можливий через параметри a_1 і a_2 адаптації до продовгуватої форми ванни розплаву в напрямку зварного шва³⁰.

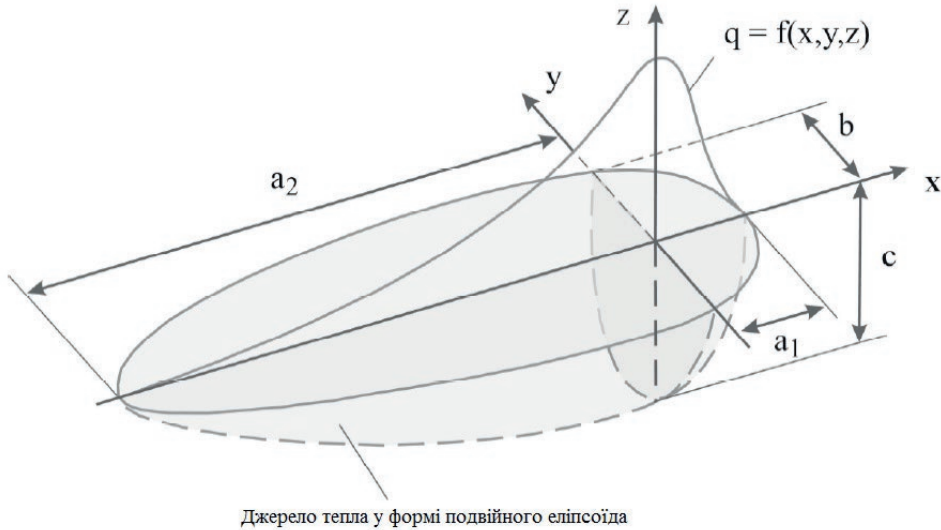


Рис. 8. Зображення геометрії зварного шва³¹

Тоді рівняння для перетворення руху джерела енергії в напрямку $\bar{y}$ на плоскій пластині зі змінною в часі швидкістю зварювання $v_s(t)$ матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} x &= \bar{x}, \\ y &= \bar{y} - v_s(t)(t - t_0), \quad v_s(t)(t - t_0), \\ z &= \bar{z} - v_s(t)(t - t_0), \text{ де} \end{aligned}$$

- x, y, z — Орт координат у локальній системі,
- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ — Орт координат у глобальній системі,
- $v_s(t)$ — Швидкість зварювання,
- t — Час у глобальній системі координат,
- t_0 — Початковий час.

На рис. 9 показано вище викладена ситуація. Просторова початкова точка може бути установлена через швидкість зварювання $v_s(t)$ і початковий час t_0 ³².

30 Hildebrand, J. (2008). *Numerische schweißsimulation bestimmung von temperatur, gefüge und eigenspannung an schweißverbindungen aus stahl- und glaswerkstoffen*. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar.

31 Там само.

32 Там само.

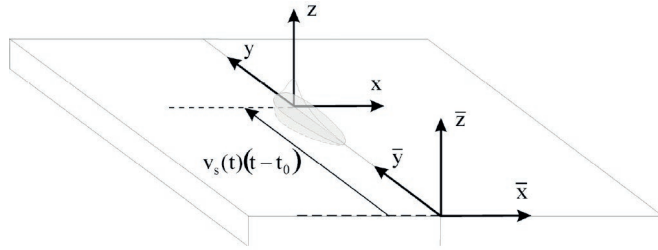


Рис. 9. Схема руху джерела енергії³³

Наступним етапом розвитку стала поява мікро легованих ізотропних сталей, які представлені на рис. 10.

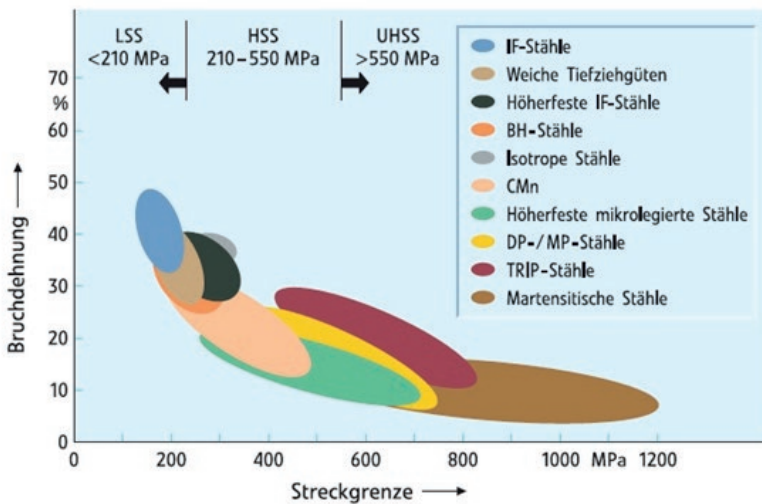


Рис. 10. Види сталей по властивостям на розтяг і опір³⁴

4. Лазерне зварювання

4.1. Особливості зварювання лазером

Вирішальним фактором при зварюванні лазерним випромінюванням є перенос світла від випромінювача до заготовки. При використанні CO₂-лазера, на відміну від Nd:YAG-лазера, використовується не оптоволокно, а охолоджувані металеві дзеркала у поворотному випромінювальному механізмі. В кінці оптичної лінії закріплена лазерна головка. У лазерній головці розташована фокусуюча лінза, яка може мати різну фокусну відстань. У фокусній плямі промінь досягає найвищої щіль-

³³ Hildebrand, J. (2008). *Numerische schweißsimulation bestimmung von temperatur, gefüge und eigenspannung an schweißverbindungen aus stahl- und glaswerkstoffen*. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar.

³⁴ Steffen, K. (2011) *Einfluss des Umformgrades (Kaltverfestigung) auf die Laserstrahlschweiß- und Löttechnik von Feinblechen mit Rm³ 800 N/mm²*. München: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München – Niederlassung der GSI mbH.

ності енергії. При зміні фокусної відстані змінюється діаметр (геометричні розміри) сфокусованого п'ятна і інтенсивність падає і значення мікротвердості змінюється, що показано на рис. 11³⁵.

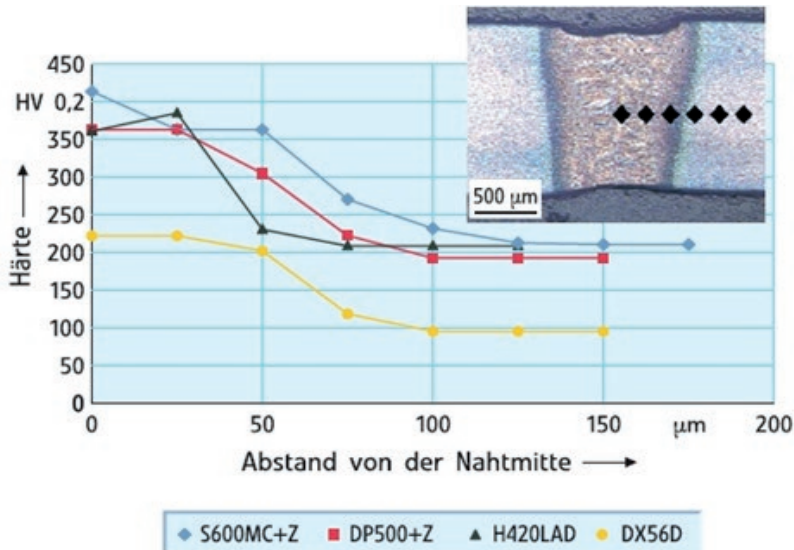


Рис. 11. Значення мікротвердості при лазерному зварюванні встик: крива жовтого кольору – м'яка сталь глибокої витяжки DX56D; крива синього кольору – мікро легована сталь гарячого прокату S600MC; крива чорного кольору – мікро легована сталь холодного прокату H420LAD; крива червоного кольору – двофазна сталь DP500

Розміщення заготовки відносно лазерної голови має важливе значення при обробці і забезпеченні максимальної глибини провару. Переваги та недоліки лазерного зварювання коротко представлено у таблиці 3³⁶.

Таблица 3

Переваги і недоліки лазерного зварювання³⁷

1	Переваги	Недоліки
Процес	Найбільша серед інших типів зварювання щільність потужності	Ретельна підготовка зварної поверхні (зазори між зварюваними деталями повинні бути мінімальними)
	Малі геометричні розміри зварного шва	Обмежена глибина провару (≤ 25 мм)
	Зварка на повітрі (порівняно WIG)	Точне позиціонування
	Безконтактний процес зварювання	
	Продуктивність	

35 Höfemann, M. (2003). *Hochfeste Stahlsorten prozesssicher laserschweißen* (ss. 27-31). München: Carl Hanser Verlag.

36 Günther, A. (2010). *Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungen bei hochfesten Feinblechen auf die Laserstrahlschweißbarkeit*. München: Munich University of Applied Sciences.

37 Там само.

Продовження табл. 3

1	2	3
Заготовка	Мінімальний термічний вплив	Небезпека утворення тріщин і підвищеної твердості
	Зварка готових деталей і важкодоступних місць	
	Менша стяжка/розподіл напружень	
	Зварюються різні матеріали	
Пристрій	Мала тривалість імпульсу	Складність подачі променю (Н-д: для CO ₂ -лазера)
	Вибагливість у обслуговуванні	Захист від лазерного випромінювання
	Можливість доступу установки >90 %	Велика окуповуваність
	Хороша автоматизація	Малий ККД CO ₂ -лазера <20 %
		Втрата потужності на оптичних елементах

На рис. 12 зображено поперечний переріз лазерного зварного шва з м'якої сталі глибокої витяжки (DX56D) і високоміцної сталі (H420LAD). Через невелику ширину шва (ширина зовнішньої сторони $b_0 < 2$ мм) цинкування не потребується. Структура зварного шва показує, що сорти сталі із високими цинковими покриттями, можуть гарно зварюватися лазером³⁸.

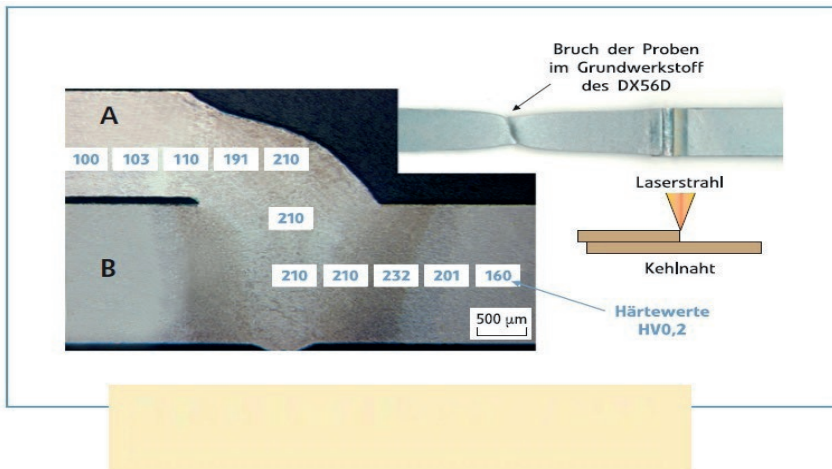


Рис. 12. Зображення лазерного зварного шва з м'якої сталі глибокої витяжки DX56D (A) товщиною 1,5 мм і високоміцної сталі H420LAD (B) товщиною 2 мм

На рис. 13 показано зварювання лазерним випромінюванням різних матеріалів в напусток. Видно, що значення мікротвердості відрізняються і мікроструктура поперечного перерізу зварного шва не однорідна³⁹.

38 Höfemann, M. (2003). *Hochfeste Stahlsorten prozesssicher laserschweißen* (ss. 27-31). München: Carl Hanser Verlag.

39 Höfemann, M., Christian, S. (2005). *Hochfeste Stahlsorten prozesssicher laserschweißen* (ss. 28-32). München: Carl Hanser Verlag.

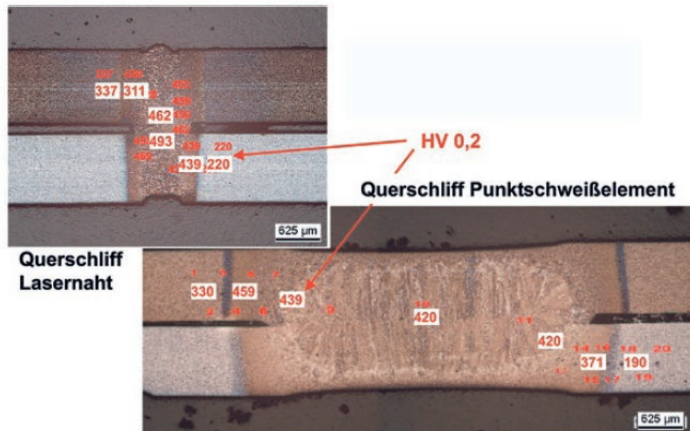


Рис. 13. Різниця твердості для нормальної сталі: поперечний шліф в напусток з мартенситної сталі SZMS1200 (верхня пластина) і двофазної сталі HXT600X (нижня пластина)

Як показано на рис. 14, при зварюванні в напусток важливу роль відіграє матеріал заготовок. Зокрема, на діаграмі показано величину зміщення заготовок відносно початкової осі зварного шва при дії однакових різнонаправлених сил⁴⁰.

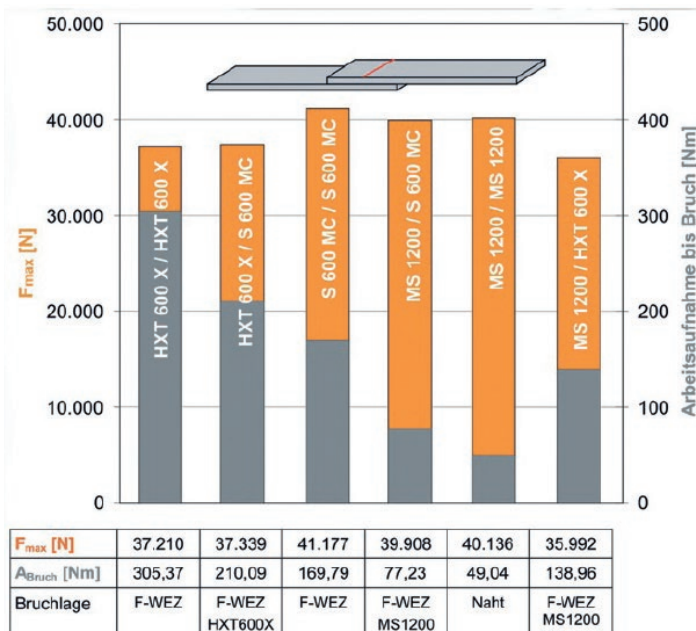


Рис. 14. Максимальна сила і енергетична чутливість лазерних з'єднань під статичним розтягуючим навантаженням

⁴⁰ Höfemann, M., Christian, S. (2005). *Hochfeste Stahlsorten prozesssicher laserschweißen* (ss. 28-32). München: Carl Hanser Verlag.

В наступному експерименті було використано матеріал CP-W800. Зразок був перевірений на фізичні, хімічні і технічні параметри. Для зварювання було використано установку CO₂-Laser Triagon TR060 фірми Rofin-Sinar (рис.15) з максимальною потужністю 6 кВт. В якості захисного газу використовувався захисний газ „Lasgon C1«. Суміш захисного газу складається з 50 % аргону і 35 % гелію, який позитивно впливає на формування зварної плазми, як і 15 % CO₂ – для більшої швидкості зварювання⁴¹.

На рис. 16 показано схему та процес зварювання деталей, які мають А-подібну форму. Також, продемонстровано на рис. 17 зварювання Т – зразків. В обох випадках, для заготовок, взято холоднокатані пластини (рис. 17).

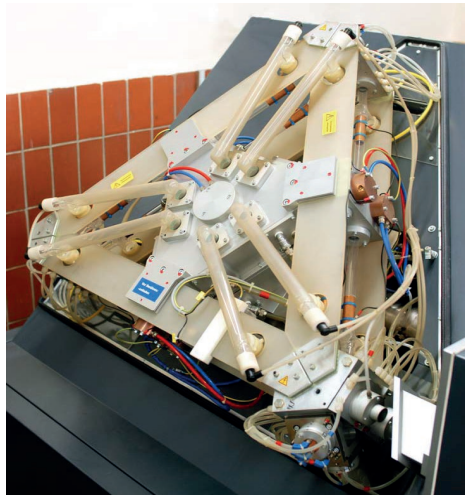


Рис. 15. CO₂-Laser Triagon TR060 фірми Rofin-Sinar

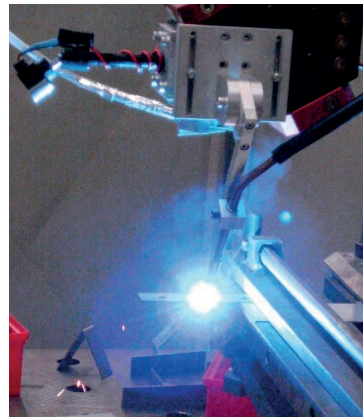


Рис. 16. Геометричний варіант 1 для форми А (506)

41 Günther, A. (2010). Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungen bei hochfesten Feinblechen auf die Laserstrahlschweißbarkeit. München: Munich University of Applied Sciences.

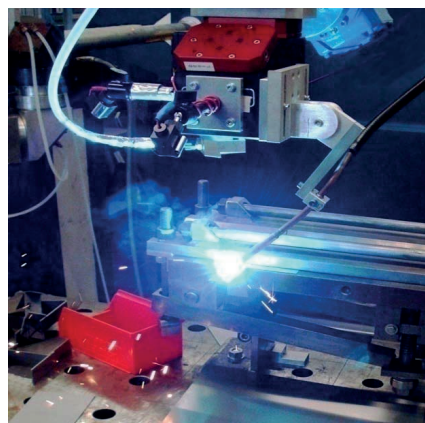


Рис. 17. Зажимний пристрій і зварювання Т – зразка (406)

У порівнянні із А-формою, через несиметричне виділення тепла зварюваної ванни і геометричної форми деталей, зварний шов утворився асиметричним (рис. 18, рис. 19). Режими зварювання лазерним випромінюванням показано у табл. 4⁴².

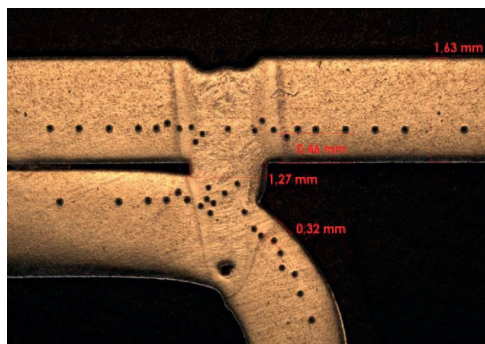
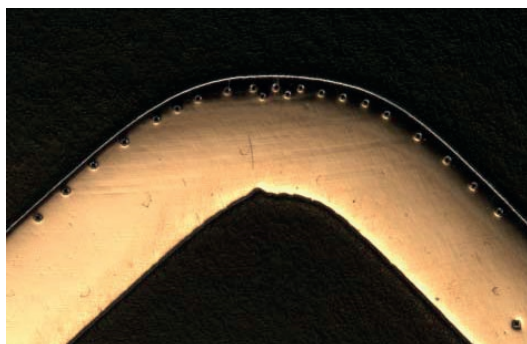


Рис. 18. Не зварений і зварений зразок відповідно $r = 2,5$ (406 – 25)

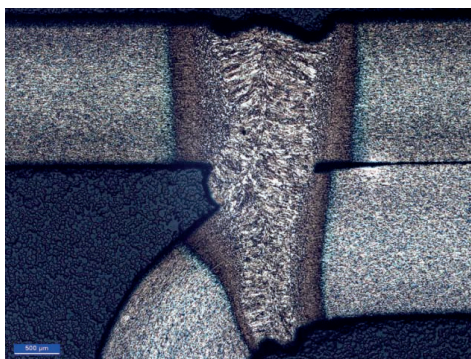


Рис. 19. Поперечні перерізи зварних швів зразків Т – форми 401 і 405 відповідно

42 Günther, A. (2010). Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungen bei hochfesten Feinblechen auf die Laserstrahlschweißbarkeit. München: Munich University of Applied Sciences.

Таблиця 4

Режими зварювання на лазері⁴³

P_L [KW] \ v_s [m/min]	3	3,5
2	Probe 400 E [J/cm]= 900	Probe 404 E [J/cm]= 1050
2,5	Probe 401 E [J/cm]= 720	Probe 405 E [J/cm]= 840
3	Probe 402 E [J/cm]= 600	Probe 406 E [J/cm]= 700
3,5	Probe 403 E [J/cm]= 514	Probe 407 E [J/cm]= 600

Попередній зразок $r=3,25$ mm

При більш детальному дослідженні заготовки А – форми (рис. 20), вдалося з'ясувати, що зварний шов неоднорідний і в ньому присутні тріщини (рис. 21, а), також наявні кольори мінливості у зоні зварювання (рис. 21, б)⁴⁴.



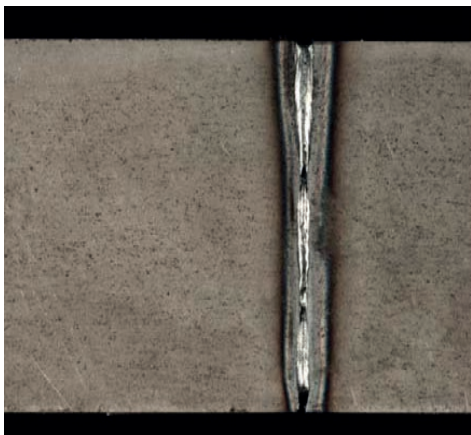
Рис. 20. Розірваний зварний шов заготовки А – форми (406)

Не дивлячись на те, що не всі зразки і режими є задовільними для забезпечення повного провару (рис. 22), вдалося визначити режими лазерного зварювання при яких отримано зварені деталі високої якості (рис. 23, рис. 24)⁴⁵.

⁴³ Günther, A. (2010). *Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungen bei hochfesten Feinblechen auf die Laserstrahlschweißbarkeit*. München: Munich University of Applied Sciences.

⁴⁴ Steffen, K. (2011) *Einfluss des Umformgrades (Kaltverfestigung) auf die Laserstrahlschweiß- und Löteignung von Feinblechen mit $R_m \geq 800$ N/mm²*. München: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München – Niederlassung der GSI mbH.

⁴⁵ Günther, A. (2010). *Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungen bei hochfesten Feinblechen auf die Laserstrahlschweißbarkeit*. München: Munich University of Applied Sciences; Steffen, K. (2011) *Einfluss des Umformgrades (Kaltverfestigung) auf die Laserstrahlschweiß- und Löteignung von Feinblechen mit $R_m \geq 800$ N/mm²*. München: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München – Niederlassung der GSI mbH.



а



б

Рис. 21. Зруйнований шов: а – не суцільний шов з тріщинами;
б – зміна забарвлення шва під дією тепла

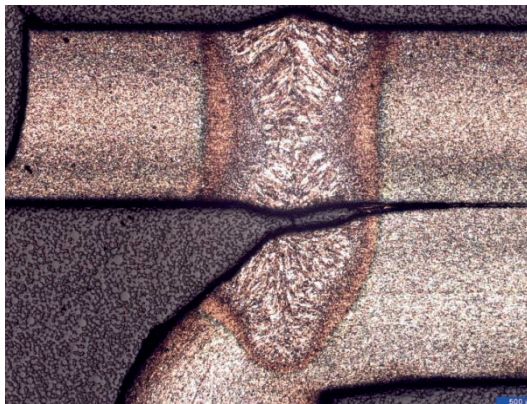


Рис. 22. Мікро шліф не повністю проварених зразків 406 і 506 відповідно



Рис. 23. Зварені зразки А-форми

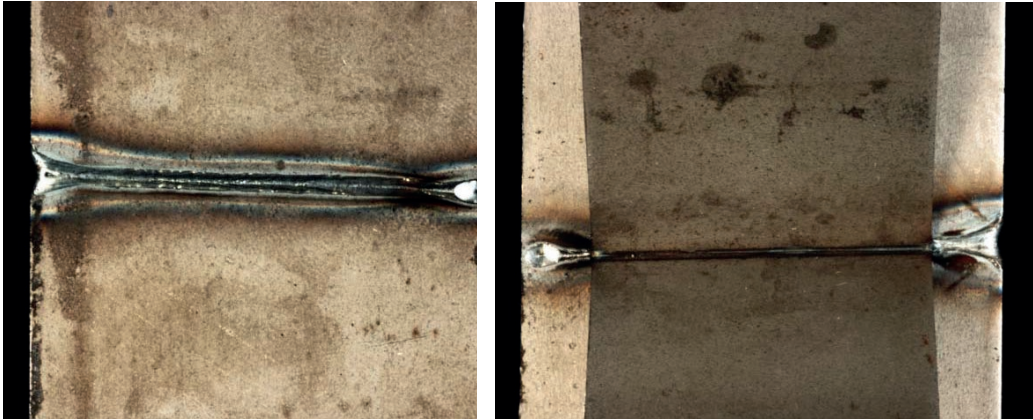


Рис. 24. Зразки верхньої і нижньої сторін відповідно

Висновки

Зі збільшенням концентрації дифузійного водню у зварних з'єднаннях високоміцних низьколегованих сталей, знижується опір уповільнену руйнуванню металу шва і ЗТВ.

Збільшення погонної енергії зварювання, з одного боку, сприяє формуванню в металі ЗТВ високоміцних низьколегованих сталей, структурних складових, які відрізняються підвищеною стійкістю проти сповільненого руйнування, а з іншої сторони – підвищенню рівня залишкових напружень.

Зростання залишкових напружень у зварних з'єднаннях низьковуглецевих сталей викликає зниження їх опору до утворення холодних тріщин, як в продольному, так і в поперечному, по відношенню до осі шва, напрямках.

Значний вплив на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях високоміцних сталей надають жорсткість закріплення і тип зварного з'єднання.

Конструктивне оформлення зварних з'єднань і вибір технологічних процесів зварювання високоміцних сталей слід виконувати таким чином, щоб виключити можливість формування в них високого рівня залишкових зварних напружень, дефектів мікроструктури металу шва і ЗТВ, а також унеможливити наявність ділянок з підвищеною концентрацією дифузійного водню.