

# ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ З МЕЖЕЮ ПЛИННОСТІ 690...1300 МПа

О.М. Берднікова

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Робота присвячена встановленню закономірностей впливу особливостей структурно-фазового складу (зеренної, субзеренної, дислокаційної структури, тощо) металу зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності на їх механічні характеристики й тріщиностійкість шляхом визначення структурних критеріїв, що забезпечують необхідний комплекс цих властивостей. Досліджено структуру і властивості зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 690 до 1300 МПа в залежності від швидкостей охолодження та зварювання, легування швів, умов термообробки та способів зварювання (дугове механізоване, лазерне, гібридне лазерно-дугове зварювання): конструкційних низьковуглецевих сталей бейнітно-феритного та бейнітно-мартенситного типу; високовуглецевих феритно-перлітного типу; легуваних середньовуглецевих сталей мартенситно-бейнітного типу спеціального призначення. Встановлено взаємозв'язок структурних параметрів з комплексом властивостей – міцністю, в'язкістю руйнування, рівнем локалізованої деформації та локальних внутрішніх напружень в металі зварних з'єднань. Показано, що при дотриманні певних співвідношень структурно-фазових складових, характеристики дислокаційної та субзеренної структури є визначальними для забезпечення міцності та тріщиностійкості металу зварних з'єднань високоміцних сталей. Отримано показники рівня локалізованої деформації в металі зварних з'єднань високоміцних сталей та встановлено як структурні складові впливають на тріщиностійкість металу. З метою забезпечення експлуатаційної надійності конструкцій при створенні наукоємних та перспективних технологій зварювання високоміцних сталей на основі матеріалознавчих експериментально-теоретичних досліджень встановлено структурні критерії, що гарантують необхідний комплекс механічних властивостей та тріщиностійкості цих з'єднань. Бібліогр. 12, рис. 4.

*Ключові слова:* високоміцні сталі, зварні з'єднання, структурно-фазовий склад, субструктура, щільність дислокацій, механічні властивості, локальні внутрішні напруження, локалізована деформація, тріщиностійкість

У різних галузях сучасної промисловості, у тому числі, будівельній, сільськогосподарській, транспортній, машинобудівній та оборонній, для виготовлення зварних металоконструкцій широко використовують низьковуглецеві, легovanі середньо- та високовуглецеві високоміцні сталі. У теперішній час техніка та конструкції відповідального призначення потребують використання сталей високого класу міцності у досить великому діапазоні механічних властивостей та, відповідно, різного структурно-фазового складу. Так, в будівельній та транспортній промисловості сільськогосподарського призначення використовуються конструкційні низьковуглецеві сталі з межею плинності 350...740 МПа. Це сталі з феритно-перлітною, бейнітно-феритною та бейнітно-мартенситною структурою. Межа міцності таких сталей досягає до 490...940 МПа. Для високовуглецевих сталей феритно-перлітного типу, що застосовуються в залізничному транспорті, цей показник складає 910...1130 МПа. А для середньовуглецевих легуваних сталей мартенситно-бейнітного типу спеціального призначення межа міцності досягає 1500...1700 МПа. Застосування високоміцних сталей дозволяє не тільки зменшити масу конструкцій, але і підвищити їх технічні характеристики за рахунок забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей – високих показників статичної та динамічної міцності, в'язкості руйнування та опору крихкому руйнуванню. Враховуючи той факт, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>  
© О.М. Берднікова, 2021

що багато конструкцій, виготовлених з високоміцних сталей, є конструкціями тривалого використання, особливе значення набувають дослідження впливу структурних факторів на механічні властивості та тріщиностійкість з'єднань цих сталей. Найчастіше при виготовленні зазначених металоконструкцій використовують механізоване або автоматичне зварювання в середовищі захисних газів [1–3]. При цьому використовують такі режими зварювання, які б дозволили, з одного боку, забезпечити високу продуктивність, а з іншого – забезпечити необхідний комплекс механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань. Останнім часом впроваджуються такі прогресивні технології, як лазерне та гібридне лазерно-дугове зварювання [4], що дає змогу отримувати зварні з'єднання зі значно меншими розмірами швів та зони термічного впливу, підвищити якість зварних з'єднань та продуктивність процесу у порівнянні з дуговим зварюванням.

Процеси структуроутворення в металі зварних з'єднань високоміцних сталей детально вивчаються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України у відділі «Фізико-хімічних досліджень матеріалів», який на протязі багатьох років очолював д-р техн. наук, академік НАН України Г.М. Григоренко. Значний внесок у встановлення структурно-фазових змін, що відбуваються під впливом режимів зварювання внесла д-р техн. наук, професор Л.І. Маркашова. Її наукова діяльність присвячена комплексним дослідженням структурно-фазового стану мета-

лу зварних з'єднань сталей, сплавів, різнорідних металів та металів з неметалевими матеріалами, тощо (більш ніж 300 наукових робіт).

Основні технологічні роботи щодо отримання зварних з'єднань високоміцних сталей з межею пластичності від 690 до 1300 МПа було виконано у відділі «Зварювання легованих сталей» під керівництвом д-ра техн. наук, чл.-кор. НАН України В.Д. Познякава.

Експериментальні роботи по розробці нових технологій лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання конструкційних сталей було проведено у відділі «Спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання» під керівництвом канд. техн. наук В.Д. Шелягіна.

Одержання надійних та якісних зварних з'єднань високоміцних сталей є актуальною проблемою, при вирішенні якої найбільш суттєве значення має детальне вивчення впливу структурно-фазового складу та конкретних параметрів структури, що формуються в металі швів та зони термічного впливу, на міцність та тріщиностійкість цих з'єднань [5–11]. Враховуючи, що окремі ділянки зони термічного впливу зварних з'єднань мають малі розміри, визначити їх механічні властивості традиційним шляхом (механічним випробовуванням зразків) не завжди представляється можливим, для цього можуть бути використані аналітичні методи оцінок, що базуються на результатах експериментальних досліджень структури.

Метою роботи було встановлення закономірностей впливу особливостей структурно-фазового складу металу зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності на їх механічні характеристики й тріщиностійкість шляхом визначення структурних критеріїв, що забезпечують необхідний комплекс цих властивостей [12].

Робота виконувалася на зварних з'єднаннях високоміцних сталей з використанням різних технологічних параметрів режимів зварювання (швидкостей охолодження та зварювання, умов термообробки, легування швів). Було обрано наступні три групи високоміцних сталей різного призначення та класу міцності:

1. Конструкційні сталі бейнітно-феритного та бейнітно-мартенситного типу (alform 620M; 17X2M; 14XГН2МДАФБ; N-A-XTRA-700) з  $\sigma_{0,2} = 690 \dots 740$  МПа та  $\sigma_B = 760 \dots 940$  МПа.

2. Високовуглецеві сталі феритно-перлітного типу (колісна сталь марки 2; 65Г) з  $\sigma_{0,2} = 785 \dots 980$  МПа та  $\sigma_B = 910 \dots 1110$  МПа. Дослідження колісних сталей були спрямовані на встановлення закономірностей впливу різних, притаманних процесу відновлення залізничних коліс наплавленням технологічних факторів (режими наплавлення, температура попереднього підігріву з'єднань, системи легування наплавленого металу, тощо), на фазово-структурний стан та параметри структури різних ділянок зварних з'єднань.

3. Леговані середньовуглецеві сталі спеціального призначення мартенситно-бейнітного типу (броньові – сталь типу 30X2H2MФ та Miilux Protection 500) з  $\sigma_{0,2} = 1300 \dots 1500$  МПа та  $\sigma_B = 1500 \dots 1700$  МПа. Основними проблемами при виготовленні відповідальних зварних вузлів і корпусів при зварюванні колісної броньової техніки спеціального призначення із термозміцнених високоміцних сталей є те, що внаслідок зварювання такі сталі можуть знеміцнюватися, а в зварних з'єднаннях утворюватися тріщини. В значній мірі властивості таких з'єднань залежать від того, які структури при зварюванні утворюються в металі ЗТВ. Суттєво на це впливають режими зварювання та умови охолодження металу. Саме питанням структуроутворення в металі зварних з'єднань таких сталей присвячено дослідження.

Дослідження проводили на модельних зразках-імітаторах обраних сталей, що отримані за термічними циклами зварювання в інтервалі температур охолодження  $600 \dots 500$  °С зі швидкістю  $w_{6/5} = 2,5 \dots 28$  °С/с та з'єднаннях, що отримано дуговим механізованим зварюванням в суміші захисних газів (82%Ar + 18%CO<sub>2</sub>) при використанні зварювальних дротів марок: Св-10ХН2ГСМФТЮ, Св-08Г2С, Св-08Х20Н9Г7Т, ДМО-1Г (для конструкційних сталей); Св-08Г2С; ПП-АН180МН (10ХН2ГСМФТЮ); Св-08ХМ; Св-08ХМФ (для колісних сталей); Св-10ГСМТ, Св-08Х20Н9Г7Т (для сталей спеціального призначення). Зварні з'єднання сталей 14ХГН2МДАФБ (Св-10ХН2ГСМФТЮ) та N-A-XTRA-700 (Union NiMoCr) отримували способами дугового зварювання при швидкості охолодження  $w_{6/5} = 10 \dots 38$  °С/с та швидкості зварювання  $v_{зв} = 18 \dots 50$  м/год (14ХГН2МДАФБ); лазерного зварювання при  $w_{6/5} = 28 \dots 103$  °С/с ( $v_{зв} = 18 \dots 50$  м/год, без зварювального дроту); гібридного лазерно-дугового зварювання при  $w_{6/5} = 58 \dots 63$  °С/с ( $v_{зв} = 72 \dots 110$  м/год). Зазначені режими гібридного лазерно-дугового зварювання забезпечують охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур  $600 \dots 500$  °С в дуже вузькому діапазоні, але значно відрізняються по параметру  $v_{зв}$ .

Запропоновано підхід, що базується на комплексі методів фізичного матеріалознавства. Дослідження мікроструктури металу швів і ЗТВ проводили методами світлової мікроскопії за допомогою мікроскопів Versamet-2 та Neophot-32. Мікротвердість металу вимірювали мікротвердоміром М-400 фірми «Лесо» при навантаженні 0,1 кг. Для виявлення зеренної і дислокаційної структури використовувались хімічні, електролітичні методи травлення та методи локального потоншення зразків. При дослідженнях вивчалися структури: фериту, аустеніту, перліту, мартенситу, бейніту верхнього та нижнього, та їх параметри – розмір пакетів та зерен, а також відповідні значення мікротвердості. Характер розподілу хімічних елементів, а та-

кож фрактографічні дослідження поверхні зламів зварних з'єднань зроблені за допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії (РЕМ, скануючий електронний мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди). Дослідженнями РЕМ вивчали характер руйнування металу по зонам зламів в залежності від навантаження та температури випробувань, об'ємну частку типу руйнування, розмір мікроелементів поверхні руйнування – фасеток крихкого чи квазікрихкого відколу, в'язких ямок, вторинних мікротріщин. Особливості субструктури та розподілу дислокаційної щільності у зварних з'єднаннях вивчали дослідженнями тонких фольг методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на мікроскопі JEM-200СХ фірми JEOL (Японія) при прискорювальній напрузі 200 кВ.

На базі експериментальних досліджень на всіх структурних рівнях зварних з'єднань високоміцних сталей проведено аналітичні оцінки міцності, в'язкості руйнування, локальних внутрішніх напружень та локалізованої деформації для кожного класу сталей. Визначено структурні фактори, які гарантують необхідний рівень механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань. Аналітична оцінка міцності була виконана з урахуванням вкладу кожного зі структурних параметрів: розмірів пакетів, субзерен, рейкової структури, щільності дислокацій, розмірів карбідних фаз та міжкарбідних відстаней, об'ємної частки структур, що формуються в металі досліджених зварних з'єднань високоміцних сталей. Методами математичної обробки з урахуванням комплексу всіх структурних складових та їх параметрів удосконалено експериментально-розрахунковий підхід аналітичної оцінки міцності, в'язкості руйнування, рівня локальних внутрішніх напружень та локалізованої деформації, що формуються в структурі зварних з'єднань високоміцних сталей під впливом термічних циклів зварювання. Було визначено диференційний внесок у міцність структурних складових різних видів структурного зміцнення: тертя решітки, твердорозчинного, зерненого, субзеренного, дислокаційного, дисперсійного зміцнення.

Дослідженнями зварних з'єднань конструкційних низьковуглецевих сталей показано, що під впливом термічних циклів дугового зварювання при збільшенні швидкості охолодження від  $w_{6/5} = 2,5$  до  $28$  °С/с змінюється характер перетворення переохолодженого аустеніту в проміжній області, що призводить до зміни фазового складу металу зварних з'єднань, об'ємних часток структурних складових, збільшення мікротвердості, загального подрібнення зеренної та пакетної структури, субструктури, збільшення скалярної внутрізеренної щільності дислокацій. Встановлено, що за рівних умов співвідношень структурно-фазових складових та параметрів зеренної (або пакетної) структури, характеристики дислокаційної та субзеренної структур є визначальними для забезпечення міцності та тріщиностійкості ме-

талу зварних з'єднань високоміцних сталей з межею пластичності від 600 до 1300 МПа [12].

В металі зони термічного впливу зварних з'єднань низько- та високовуглецевих сталей з феритно-бейнітною та феритно-перлітною структурою основного металу рівномірний розподіл щільності дислокацій ( $(2...4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \leq \rho \leq (7...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) при формуванні дрібнозернистої бейнітно-феритної або бейнітно-мартенситної структур, диспергуванні субструктури (до  $0,2...1,4$  мкм) та наявності 50...80 % нижнього бейніту забезпечує високий рівень властивостей міцності та тріщиностійкості цих з'єднань. При дуговому зварюванні це реалізується при швидкостях охолодження  $w_{6/5} = 20...28$  °С/с (для конструкційних феритно-бейнітних та бейнітно-мартенситних сталей) та  $w_{6/5} = 5...10$  °С/с (для колісних високовуглецевих феритно-перлітних сталей) [12].

При дослідженнях зварних з'єднань легованих середньовуглецевих сталей спеціального призначення встановлено, що безградієнтний розподіл щільності дислокацій ( $(7...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \leq \rho \leq 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) при формуванні подрібненої структури мартенситу відпуску з субструктурою розміром  $0,4...0,8$  мкм та невеликою часткою (5...20 %) складової нижнього бейніту, забезпечує високі службові властивості отриманих з'єднань [12]. Такий структурний стан забезпечується у випадках, коли при зварюванні метал зони термічного впливу охолоджується зі швидкостями  $w_{6/5} = 3,8...5$  °С/с. Відповідність цьому гарантує максимальний рівень в'язкості руйнування та тріщиностійкості зварних з'єднань. Показано, що найбільший показник в'язкості руйнування  $K_{1C} = 110$  МПа·м<sup>1/2</sup> отримано при  $w_{6/5} = 3,8...5$  °С/с за рахунок формування переважно структури відпущеного мартенситу з невеликою часткою бейніту нижнього (до 12 %). При збільшенні швидкості охолодження до  $w_{6/5} = 12,5$  та  $21$  °С/с значення  $K_{1C}$  знижується до 85 та 70 МПа·м<sup>1/2</sup>, відповідно. Таке зменшення показника  $K_{1C}$  пов'язано зі зменшенням частки нижнього бейніту, збільшенням частки мартенситної складової при присутності гартівного мартенситу.

У зварних з'єднаннях середньовуглецевих легованих сталей спеціального призначення з різними системами легування швів, виключно мартенситна структура при наявності гартівного мартенситу ( $M_{\text{гарт}}$ ) при неоднорідному розподілі щільності дислокацій та її максимальних показниках ( $\rho = (1...1,6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), формується при зварюванні дротами феритно-перлітного типу (Св-10ГСМТ) (рис. 1, а–в). У разі аустенітного зварювального матеріалу (Св-08Х20Н9Г7Т) в металі швів та ЗТВ щільність дислокацій значно зменшується ( $\rho = (8...9) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) при її рівномірному розподілі. При використанні Св-08Х20Н9Г7Т метал навколошовної ділянки ЗТВ має переважно структуру відпущеного мартенситу ( $M_{\text{відп}}$ , рис. 1, з, д) з невеликою часткою бейніту нижньо-

го ( $B_{II}$ , рис. 1, *e*). В обох випадках зварних з'єднань низькотемпературний відпуск (НТВ) призводить до зниження  $HV$ , рівномірного перерозподілу дислокацій та зниженню їх щільності. Більш значною мірою такі структурні зміни характерні для з'єднань, що отримані з використанням Св-10ГСМТ.

В металі конструкційних низьковуглецевих сталей з межею плинності більше ніж 600 МПа (14ХГН2МДАФБ; NA-XTRA-70) при високих швидкостях охолодження на режимах лазерного та гібридного лазерно-дугового процесів зварювання, у нижньому бейніті та відпущеному мартенситі в

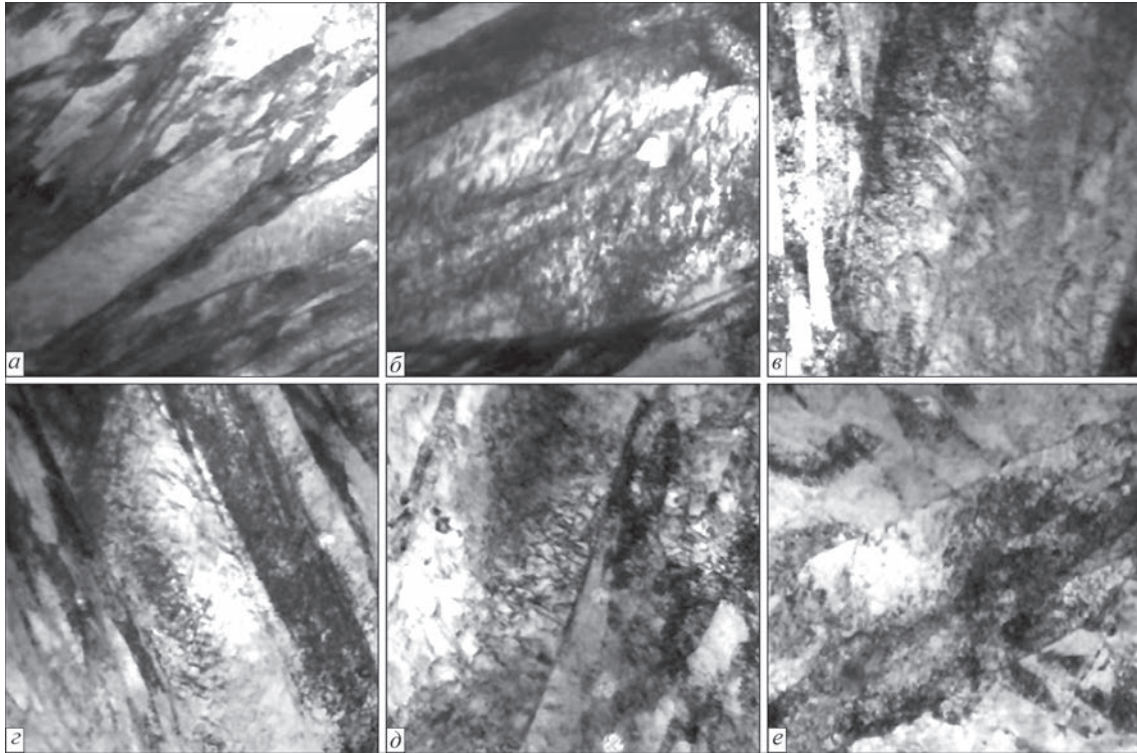


Рис. 1. Тонка структура  $M_{гарт}$  (*a, б*),  $M_{відп}$  (*в-д*) та  $B_{II}$  (*e*) в металі ЗТВ зварних з'єднань сталі типу 30Х2Н2МФ при використанні різних дровів: Св-10ГСМТ (*a-в*); Св-08Х20Н9Г7Т (*г-е*) після зварювання (*a*,  $\times 22000$ , *г*,  $\times 35000$ ) та НТВ (*в*,  $\times 35000$ , *д*,  $\times 2000$ , *е*,  $\times 35000$ )

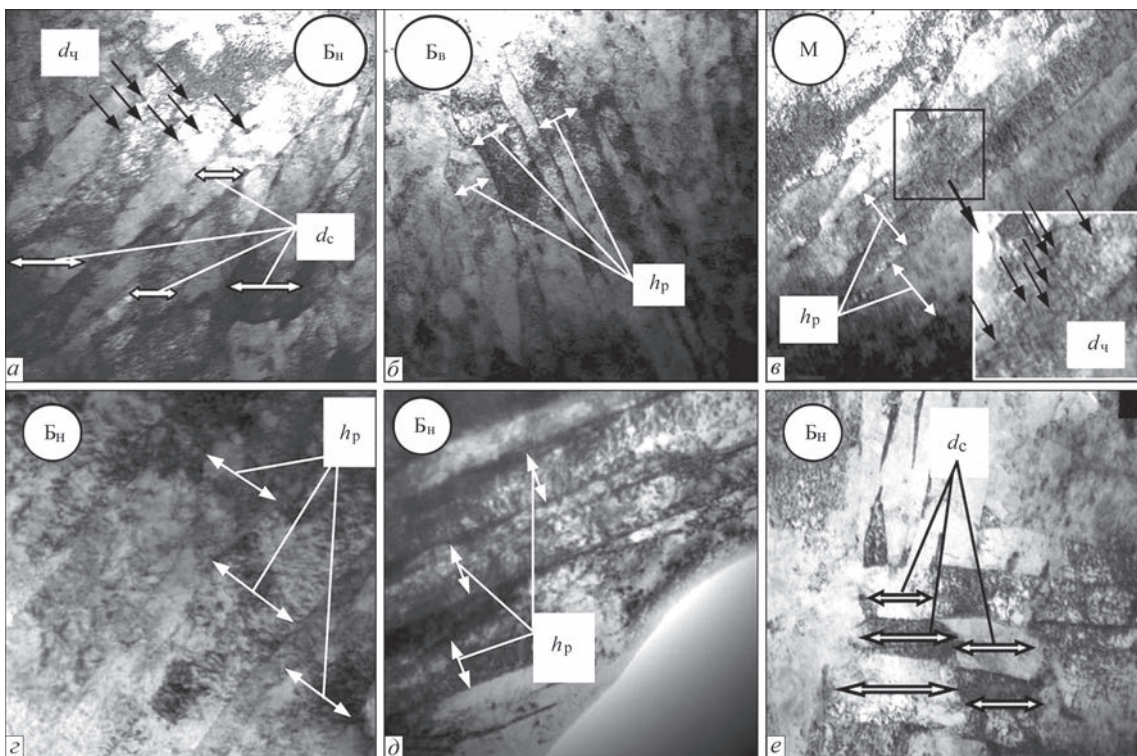


Рис. 2. Тонка структура металу ЗТВ зварних з'єднань сталей N-A-XTRA-70 (*a-в*) та 14ХГН2МДАФБ (*г-е*) при гібридному лазерно-дуговому зварюванні ( $w_{6/5} = 58 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ;  $v_{зв} = 72 \text{ м/год}$ ): *a, г, д, е* –  $B_{II}$ ; *б* –  $B_B$ ; *в* –  $M_{відп}$ ,  $\times 25000$

металі швів і ЗТВ утворюються наноструктури [9, 12]. Характерною особливістю структури, що формується при високошвидкісних режимах лазерного та гібридного зварювання високоміцних сталей при диспергуванні ширини рейок ( $h_p$ , рис. 2, *a-d*)  $B_n$  й верхнього бейніту ( $B_v$ ) є наявність фрагментованої субструктури  $B_n$  розміром 80...300 нм та чіткими границями (рис. 2, *a, e*). При цьому як структура  $B_n$ , так і  $M_{видн}$  характеризуються наявністю наночастинок карбідних фаз. Розмір наночастинок карбідних фаз ( $d_c$ ), рівномірно розподілених по всьому об'єму структури, становить 10...30 нм (рис. 2, *a, e*). Утворення наноструктурного стану у нижньому бейніті та відпущеному мартенситі буде підвищувати міцність, в'язкість руйнування та тріщиностійкість з'єднань конструкційних сталей.

При відповідній зміні режимів дугового, лазерного та гібридного лазерно-дугового зварюван-

ня конструкційних сталей змінюється співвідношення складових нижнього та верхнього бейніту, мартенситу, їх параметрів, об'ємної частки, а також щільності і розподілу дислокацій. При режимах з високою погонною енергією формуються переважно структури бейніту верхнього при загальному збільшенні розмірів зеренної, субзеренної структур з нерівномірним розподілом щільності дислокацій (від  $\rho = (4...6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $\rho = (1...2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ). Зниження погонної енергії сприяє переважному формуванню структур бейніту нижнього при значному подрібненні зерна, субзерна з рівномірним розподілом щільності дислокацій ( $\rho = (6...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). Такі структурні зміни забезпечують комплекс властивостей міцності та в'язкості руйнування (рис. 3).

Оцінки рівня локальних внутрішніх напружень ( $\tau_{вн}$ ), що наведені на діаграмах рис. 4, показують

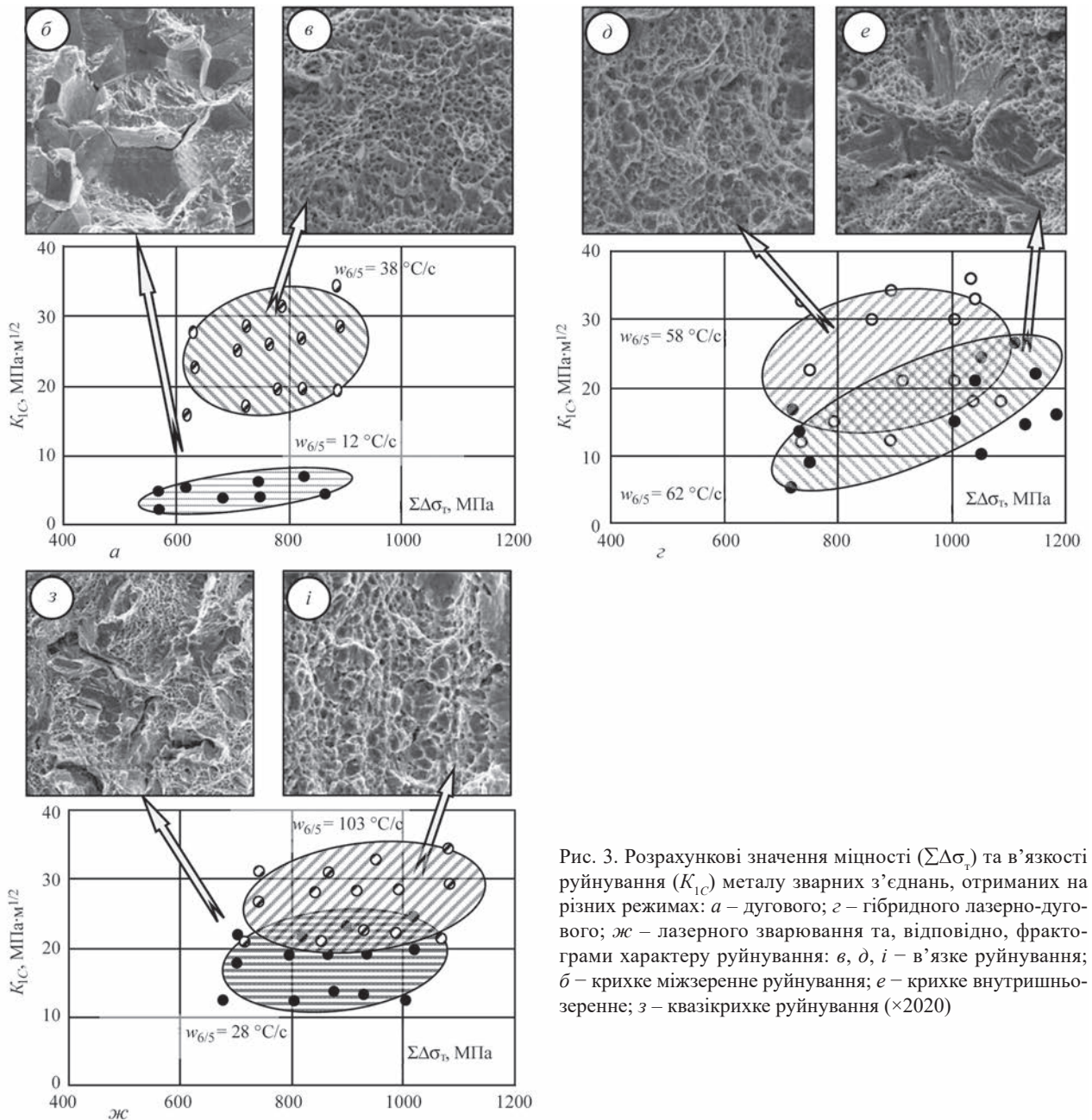


Рис. 3. Розрахункові значення міцності ( $\Sigma\Delta\sigma_r$ ) та в'язкості руйнування ( $K_{1C}$ ) металу зварних з'єднань, отриманих на різних режимах: *a* – дугового; *z* – гібридного лазерно-дугового; *ж* – лазерного зварювання та, відповідно, фрактограми характеру руйнування: *в, д, і* – в'язке руйнування; *б* – крихке міжзеренне руйнування; *е* – крихке внутрішньозеренне; *з* – квазікрихке руйнування ( $\times 2020$ )

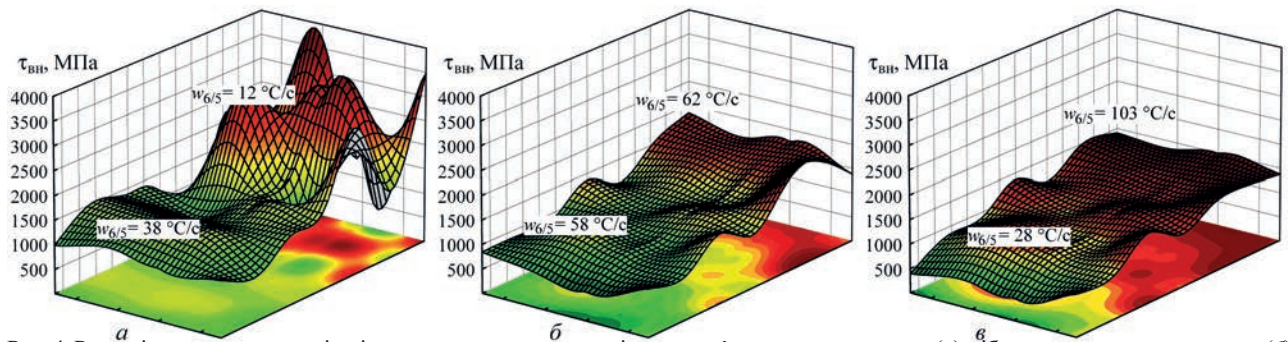


Рис. 4. Розподіл локальних внутрішніх напружень  $\tau_{\text{вн}}$  в структурі зварних з'єднань при дуговому (а), гібридному лазерно-дуговому (б) і лазерному зварюванні (в): максимальні значення  $\tau_{\text{вн}}$  при  $w_{6/5} = 12; 62; 103 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ ; мінімальні  $\tau_{\text{вн}}$  при  $w_{6/5} = 38; 58; 28 \text{ } ^\circ\text{C/c}$

наступне. Протяжні зони з максимальними значеннями  $\tau_{\text{вн}}$  (1900...3700 МПа) формуються в умовах дугового зварювання при режимах з мінімальною швидкістю охолодження уздовж міжзеренних границь  $B_B$  в місцях протяжних дислокаційних скупчень ( $\rho = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ), рис. 4, а. Це призводить до зародження мікротріщин в цих зонах і, відповідно, до зниження тріщиностійкості зварних з'єднань. Зменшення значень  $\tau_{\text{вн}}$  характерно для зварних з'єднань, отриманих при гібридному зварюванні ( $\tau_{\text{вн}} = 1470...1867$ , рис. 4, б) і особливо – при лазерному зварюванні ( $\tau_{\text{вн}} = 1470...1663$  МПа, рис. 4, в) чому сприяє формування в зоні зварювання дрібнозернистої структур  $B_B$  в поєднанні з рівномірним розподілом щільності дислокацій.

В результаті встановлено, що оптимальні властивості міцності, пластичності і тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних конструкційних сталей забезпечуються в умовах дугового зварювання при швидкості охолодження  $w_{6/5} = 38 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ , лазерного зварювання при  $w_{6/5} = 103 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ , і гібридного лазерно-дугового зварювання при  $w_{6/5} = 58 \text{ } ^\circ\text{C/c}$ , що обумовлено формуванням найбільш дисперсних структур – бейніту нижнього, дрібнозернистого відпущеного мартенситу при відсутності протяжних дислокаційних скупчень – концентраторів локальних внутрішніх напружень.

Встановлення закономірностей впливу структурно-фазового складу металу зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 600 до 1300 МПа, виконаних різними способами та з використанням різних режимів зварювання на їх фізико-механічні властивості, дозволило визначити умови, за яких в металі швів та ЗТВ будуть формуватися структури, що забезпечать їм необхідний комплекс механічних властивостей та високу тріщиностійкість. ТЕМ-дослідженнями встановлено взаємозв'язок параметрів субструктури, що формується, безпосередньо з дислокаційною структурою, а саме рівнем локалізованої деформації ( $\epsilon_d$ ) з полями  $\tau_{\text{вн}}$ , які зростають при підвищенні  $\rho$  [12]. Такі оцінки було проведено з урахуванням середньої відстані переміщення дислокацій ( $S$ , яка згідно з ТЕМ-дослідженнями відповідає параметрам субструктури) в процесі термодформацій-

ного впливу для зварних з'єднань всіх досліджених високоміцних сталей.

Так, для бейніту нижнього  $\epsilon_d \leq 20 \%$  при  $\rho = (4...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  та розмірах його субструктури 0,1...0,8 мкм. В структурі бейніту верхнього характерне формування зон локалізованої деформації в діапазоні  $10 \% \leq \epsilon_d \leq 70 \%$  при  $\rho = (8 \cdot 10^{10}...1,4 \cdot 10^{11}) \cdot \text{см}^{-2}$ . Значення рівня деформацій в мартенситних структурах також відрізняються. В відпущеному мартенситі  $\epsilon_d \leq 50 \%$ , а в гартівному  $40 \% \leq \epsilon_d \leq 140 \%$ . Виявлено, що суттєво знижує тріщиностійкість металу формування зон локалізованої деформації в діапазоні 50 %...140 % при  $\rho = (1,1...2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  в структурних складових бейніту верхнього та гартівного мартенситу.

Такі структури, як бейніт нижній та відпущений мартенсит забезпечують високий комплекс механічних властивостей металу зварних з'єднань високоміцних сталей. Для цих структур характерна відсутність протяжних концентраторів тріщиноутворення за рахунок відсутності дислокаційних скупчень – зон локалізації деформації, які значною мірою впливають на рівень локальних внутрішніх напружень.

Дослідження методом ТЕМ дозволили встановити взаємозв'язок параметрів субструктури, що формується, безпосередньо з дислокаційною структурою, а саме рівнем локалізованої деформації та полями внутрішніх напружень, які зростають при підвищенні щільності дислокацій. Показано, що одним з факторів впливу на рівень локалізованої деформації, окрім величини щільності дислокацій, є також субструктура металу, яка обумовлює перерозподіл дислокацій.

### Висновки

Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (швидкості охолодження та зварювання, легування швів, умов термообробки) на структурно-фазовий склад, параметри зеренної, субзеренної, дислокаційної структури металу швів та зони термічного впливу зварних з'єднань низьковуглецевих (конструкційних), середньовуглецевих легуваних (спеціального призначення) і високовуглецевих (колісних) сталей та взаємозв'язок структури з механічними властивостями цих з'єднань, рівнем локальних внутрішніх напружень та локалі-

зованої деформації, що формуються в різних структурних складових (бейніті нижньому та верхньому, гартівному та відпущеному мартенситі, тощо).

Проведено удосконалення експериментально-аналітичної методики оцінювання комплексу фізико-механічних властивостей по конкретним структурним параметрам всіх елементів структури, впроваджено математичну обробку даних. Встановлено кореляцію між структурними параметрами та показниками міцності, в'язкості руйнування, локальних внутрішніх напружень в металі зварних з'єднань високоміцних сталей, що дозволило класифікувати умови тріщиноутворення відносно комплексу структурних складових з урахуванням щільності дислокацій та особливостей субструктури.

Показано, як мікроструктура впливає на фізико-механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей широкого діапазону міцності. Узагальнення структурних умов забезпечення високого рівня комплексу механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей дало змогу запропонувати структурні критерії та вказати шляхи застосування їх до технологій та перспективних способів зварювання. На основі структурних критеріїв щодо фазового складу, диспергування зернової та субзернової структури при безградієнтному розподілі щільності дислокацій, розроблено науково обґрунтовані рекомендації для отримання якісних зварних з'єднань високоміцних сталей різного призначення та широкого діапазону міцності.

### Список літератури/References

1. Патон Б.Е. (2008) *Избранные труды*. Киев, Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины. Paton, B.E. (2008) *Selected proceedings*. Kiev, PWI [in Russian].
2. (2018) *Наука про матеріали, досягнення, перспективи*. Лобанов Л.М. (ред.). Київ, Академперіодика, Т. 2. (2018) *Science of materials, achievements, prospects*. Ed. by L.M. Lobanov. Kyiv, Akadempriodyka, Vol. 2 [in Ukrainian].
3. Poznyakov V.D. (2017) Welding technologies for production and repair of metal structures from high-strength steels. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 65–73.
4. (2018) *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент*. Сб. статей и докладов. И.В. Кривцун (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», 2018. ISBN 978-617-7015-74-0 (2018) *Physical processes in welding and processing of materials. Theoretical investigation, mathematical modeling, computational experiment*. In: Coll. of articles and reports. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, IAW. ISBN 978-617-7015-74-0 [in Russian].
5. Madej, K., Swidergoł, S., Jakubiec, P. (2015) Analysis of Cracks in Welded Joints of Pipes with Eyes made of S890QL1 Steel. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 6, 11–22. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2015.6/2>
6. Laukhin, D., Pozniakov, V., Beketov, O. et al. (2020) Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Engineering Materials*, 844, 146–154.
7. Ostash, O.P., Kulyk, V.V., Poznyakov, V.D. et al. (2019) Influence of the Modes of Heat Treatment on the Strength and Cyclic Crack-Growth Resistance of 65G Steel. *Mater Sci.*, 54(6), 776–782.
8. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M., Poznyakov, V.D. et al. (2020) Structural Transformations of the Metal of Heat-Affected Zone of Welded Joints of High-Strength Armor Steels. *Ibid*, 55(6), 863–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00380-7>
9. Markashova, L., Berdnikova, O., Alekseienko, T. et al. (2019) *Nanostructures in Welded Joints and Their Interconnection with Operation Properties. Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings*. A.D. Pogrebnyak, V. Novosad (Eds.). Singapore, Springer, pp. 119–128. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_12)
10. Vimalraj C., Kah P., Layus P. et al. (2019) High-strength steel S960QC welded with rare earth nanoparticle coated filler wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 105–119.
11. Francois Njock Bayock, Kah, P., Layus, P., Karkhin, V. (2019) Numerical and Experimental Investigation of the Heat Input Effect on the Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar Weld Joints of 690-MPa QT and TMCP Steel. *Metals*, 9(3), 355, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9030355>
12. Берднікова О.М. (2020) *Структурні критерії міцності та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. Київ, Інститут електросварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Berdnikova, O.M. (2020) *Structural criteria of strength and crack resistance of high-strength steel welded joints*. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].

## PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEEL WITH THE YIELD STRENGTH OF 690...1300 MPa

O.M. Berdnikova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The work is devoted to establishing regularities of influence of features of structural-phase composition (grain, subgrain, dislocation structures, etc.) of metal of welded joints of high-strength steels of different strength class on their mechanical characteristics and crack resistance by determining structural criteria providing the necessary set of these properties. The structure and properties of welded joints of high-strength steels with the yield strength from 690 to 1300 MPa was investigated depending on the rates of cooling and welding, alloying welds, heat treatment conditions and welding methods (mechanized arc, laser, hybrid laser-arc welding): bainite-ferrite and bainite-martensite type; high-carbon ferrite-pearlite type; alloyed medium-carbon steels of martensitic-bainite type of special purpose. The relationship of structural parameters with such set of properties as strength, fracture toughness, level of localized deformation and local inner stresses in the metal of welded joints was established. It was shown that in compliance with certain ratios of structural-phase components, the characteristics of dislocation and subgrain structure are decisive for providing strength and crack resistance of welded joints metal of high-strength steels. The indices of the level of localized deformation in the metal of welded joints of high-strength steels were obtained and it was established how structural components affect crack resistance of the metal. In order to provide the operational reliability of structures in the creation of science-intensive and promising technologies for welding of high-strength steels on the basis of material experimental and theoretical studies, structural criteria were established to provide the required set of mechanical properties and crack resistance of the mentioned joints. 12 Ref., 4 Fig.

*Keywords: high-strength steels, welded joints, structural-phase composition, substructure, dislocation density, mechanical properties, local inner stresses, localized deformation, crack resistance*

Надійшла до редакції 23.02.2021