

СТРУКТУРНІ КРИТЕРІЇ МІЦНОСТІ ТА ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ ТА ЇХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

О.М. Берднікова

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

Вивчено закономірності формування фазового складу, зеренної, субзеренної, дислокаційної структур при різних технологічних параметрах зварювання, взаємозв'язок структури з комплексом властивостей — міцністю, в'язкістю руйнування, рівнем локалізованої деформації та локальних внутрішніх напружень в металі зварних з'єднань високоміцних сталей. Досліджено зварні з'єднання високоміцних сталей різних за міцністю та призначенням: низьковуглецевих феритно-бейнітних та бейнітно-мартенситних; високовуглецевих феритно-перлітних; легованих середньовуглецевих мартенситних. Проведено удосконалення експериментально-аналітичної методики оцінювання комплексу фізико-механічних властивостей по конкретним структурним параметрам всіх елементів структури, впроваджено математичну обробку даних. Це дозволило класифікувати умови тріщиноутворення відносно комплексу структурних складових з урахуванням щільності дислокацій та особливостей субструктури. Такий експериментально-аналітичний підхід до досліджень закономірностей впливу структури металу на його міцність, в'язкість руйнування, локальні внутрішні напруження та локалізовану деформацію дозволяє оцінити як локальний рівень цих показників в залежності від структурних факторів, так й загальну тенденцію зміни механічних властивостей та тріщиностійкості. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: високоміцні сталі; зварні з'єднання; фазовий склад; мікроструктура; щільність дислокацій; характер руйнування; механічні властивості; тріщиностійкість

У даній час актуальним є вирішення науково-прикладної проблеми отримання надійних та якісних зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 600 до 1300 МПа: низьковуглецевих (конструкційних), середньовуглецевих легованих (спеціального призначення) і високовуглецевих (колісних) сталей [1–5]. Ці сталі є найбільш поширеними матеріалами для отримання відповідальних конструкцій тривалого та спеціального призначення.

Звісно, що основними параметрами термічного циклу зварювання, які впливають на структурно-фазові зміни в металі, є максимальна температура нагріву, швидкість нагріву та охолодження, час перебування металу вище температури фазового перетворення. Відповідно цьому, околошовна зона (зона термічного впливу) поділяється на ділянки: сплавлення; перегріву; повної перекристалізації; неповної перекристалізації та рекристалізації, у яких структурно-фазові параметри металу відрізняються [6]. Структура металу зварних з'єднань представляє собою досить складний комплекс структурних складових, що формуються під впливом термодформаційного циклу зварювання. Отримання термокінетичних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту по заданим термічним циклам дає змогу орієнтуватися на те, які структурно-фазові складові формуються в металі при різних швидкостях охолодження. Ця інформація дуже важлива для сприйняття температурно-часових умов фазового перетворення в металі того чи іншого складу. Однак

О.М. Берднікова — <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>

вона не завжди дає детальну кількісну оцінку комплексу структур, що формуються. Для такої оцінки, а тим більше у нерівноважних умовах отримання зварного з'єднання, необхідно застосування більш точного підходу до інформації про об'ємну частку структурних складових, параметри зеренної, субзеренної, дислокаційної структур, що формуються безпосередньо в металі зварних швів та у зоні термічного впливу. Тому існує необхідність у розширенні і узагальненні уявлень про структурно-фазовий склад металу зварних з'єднань високоміцних сталей, що відомі з попередніх досліджень. На сьогоднішній день не достатньо інформації, як впливає тонка структура на механічні властивості зварних з'єднань, а саме субструктура, розподіл щільності дислокацій тощо. Достовірну інформацію про такі структурні складові, як нижній або верхній бейніт, відпущений та гартівний мартенсит, параметри їх тонкої структури (розмір субзерен, рейок, фрагментів, карбідів та розподіл дислокацій) можливо отримати методом трансмісійної електронної мікроскопії. Такі дослідження дають можливість встановити взаємозв'язок структури з комплексом властивостей — міцністю, в'язкістю руйнування, рівнем локальних внутрішніх напружень та локалізованої деформації, що формуються в різних структурних складових, з метою забезпечення експлуатаційної надійності конструкцій при створенні наукоємних та перспективних технологій зварювання.

Подібний підхід був апробований також на різних матеріалах, де були отримані хороші результати відносно експериментальних показників механічних властивостей та локальних вну-

трішніх напружень у структурі алюмінієвих та титанових сплавів, монокристалів вольфраму, металокерамічних композиційних покриттів тощо [7–9]. При цьому предметом вивчення, в залежності від досліджуваного матеріалу (метали, сплави, композиційні матеріали та покриття, леговані або зміцнюючі поверхневі шари, різномірні матеріали, зварні з'єднання тощо), є наступні структурні фактори: фазовий та хімічний склад, мікротвердість, неметалеві включення, інтерметалідні фази, об'ємна частка та параметри структурно-фазових складових з урахуванням таких, як розмір зерна, субзерна, щільність дислокацій, дисперсні частинки первинних або вторинних фаз, їх розподіл та стехіометричний склад тощо. Особлива увага приділяється також вивченню як внутрішньо-, так й міжзеренних особливостей структури, границям різного типу, лініям сплавлення, дифузійним зонам, поверхням руйнування [10].

В даній роботі дослідження виконували на конструкційній високоміцній сталі бейнітно-феритного типу alform 620M з використанням різних технологічних параметрів дугового зварювання — швидкостей охолодження ($w_{6/5} = 3, 12$ та 25 °C/c) та легування швів (зварювальні дроти Св-10ХН2ГСМФТЮ та ДМО-1Г) [10]. На першому етапі дослідження проводили на модельних зразках-імітаторах обраної сталі, що отримані за термічними циклами зварювання в інтервалі температур охолодження $600...500$ °C зі швидкістю $3...25$ °C/c. На другому — досліджено з'єднання, отримані дуговим механізованим зварюванням в суміші захисних газів (82 % Ar + 18 % CO₂).

Запропоновано підхід, що базується на комплексі методів фізичного матеріалознавства, який включає: світлову (мікроскопи Versamet-2 і Neophot-32), скануючу (мікроскоп SEM-515 фірми «Philips», Нідерланди) та трансмісійну електронну мікроскопію (мікроскоп JEM-200CX фірми «JEOL» при прискорювальній напрузі 200 кВ, Японія); методи кількісної металографії для визначення параметрів структури; кількісні методи визначення скалярної щільності дислокацій та оцінки розміру дисперсних фаз; методи оцінки розподілу хімічних елементів та статистичної обробки результатів. З метою удосконалення аналізу результатів фрактографічних досліджень було запропоновано методологічний підхід до класифікації зламів по: типу силового навантаження; характеру руйнування; макро- та мікрорельєфу поверхні руйнування; мікромеханізмам руйнування; локальним концентраторам руйнування. Систематизацію отриманих даних та побудову графічних залежностей виконували з використанням сучасних комп'ютерних технологій. Було проведе-

но порівняння різних методичних підходів до аналітичної оцінки зміцнення металу зварних з'єднань, розроблено методологічний підхід до комплексної аналітичної оцінки фізико-механічних властивостей високоміцних сталей, удосконалено експериментально-аналітичні методики оцінки міцності та в'язкості руйнування зварних з'єднань, проведено математичну обробку даних за допомогою програм, що реалізовані в математичних пакетах.

Вивчено особливості структурно-фазових складових: бейніту верхнього (B_v) та нижнього (B_n), їх параметри — розмір пакетів та зерен (рис. 1, а–в), відповідні значення мікротвердості, об'ємну частку структурних складових (V_v), характер руйнування металу по зонам зламів (рис. 1, ж–и), розмір мікроелементів поверхні руйнування (фасеток крихкого чи квазікрихкого типу, в'язких ямок, вторинних мікротріщин), особливості тонкої структури металу на дислокаційному рівні. Детальні дослідження методом трансмісійної електронної мікроскопії (рис. 1, з–е) дозволили визначити параметри субзерної (d_c) та рейкової структури (h_p), щільності дислокацій (ρ), розмірів карбідних фаз та міжкарбідних відстаней (λ) (таблиця).

Показано, що в умовах імітації зварювання сталі alform 620M ($w_{6/5} = 3...25$ °C/c) зі збільшенням швидкості охолодження змінюється співвідношення фазових складових металу ЗТВ при зменшенні частки B_v , збільшенні мікротвердості, подрібненні пакетної структури та субструктури (рис. 1, а–в, таблиця). В структурних складових B_n незначно змінюється щільність дислокацій. Її градієнт спостерігається в структурі B_v (рис. 1, з), а рівномірний розподіл — в структурі B_n (рис. 1, д, е).

Фрактографічними дослідженнями після випробувань на ударний вигин ($T_{\text{випр}} = 20; -20; -40$ °C) встановлено, що в зразках зламів сталі alform 620M при переході $w_{6/5}$ від 3 до 25 °C/c збільшується у 2...4 рази зона в'язкого руйнування в ділянці біля надрізу, зменшуються довжина зони магістральної тріщини, розмір параметрів мікрорельєфу руйнування (фасеток відколу, вторинних мікротріщин) та V_c крихкого руйнування (рис. 1, ж, з).

Швидкість охолодження, що становить 25 °C/c, забезпечує високий рівень механічних властивостей металу ЗТВ ($\sigma_{0,2}$ до 595 МПа; σ_B до 780 МПа; $KCV > 300$ Дж/см² при $T_{\text{випр}} = 20; -20$ °C та KCV до 155 Дж/см² при $T_{\text{випр}} = -40$ °C) за рахунок формування дрібнозернистої структури (переважно B_n) при рівномірному розподілі щільності дислокацій.

При застосуванні зварювальних дротів (Св-10ХН2ГСМФТЮ та ДМО-1Г) після випробувань на триточковий вигин встановлено, що для всіх зварних з'єднань при $T_{\text{випр}} = 20$ °C в зоні втом-

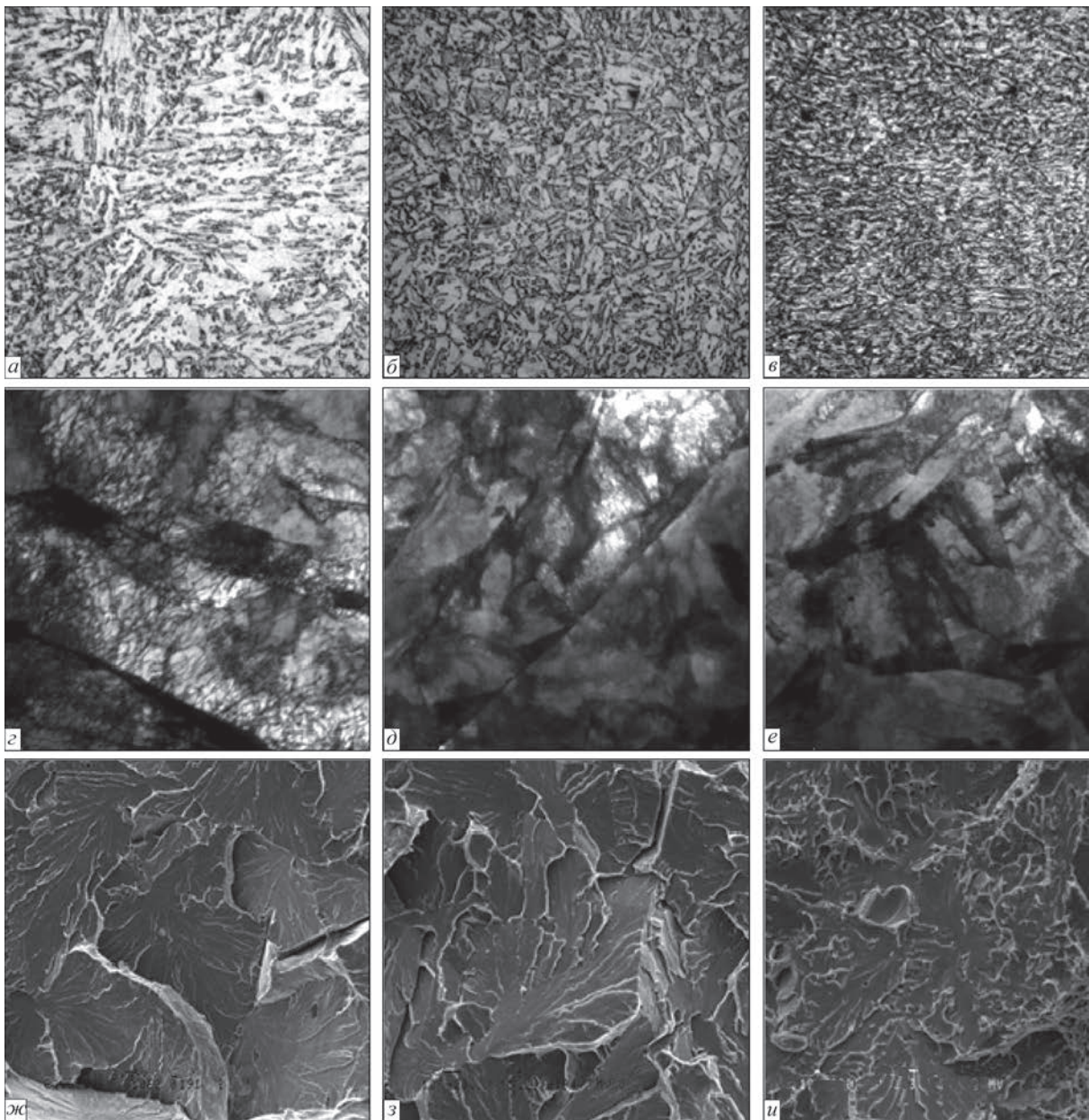


Рис. 1. Мікроструктура (*a–в*, $\times 1000$), дислокаційна структура B_v (*г*, $\times 14000$) та B_H (*д*, $\times 18000$; *е*, $\times 22000$), характер крихкого (*ж*, $\times 850$; *з*, $\times 1550$) та квазікрихкого (*и*, $\times 1550$) руйнування в зоні магістральної тріщини ($T_{\text{випр}} = -20$ °C) металу ЗТВ зразків-імітаторів сталі alform 620M при різних швидкостях охолодження, °C/c: 3 (*a*, *г*, *ж*); 12 (*б*, *д*, *з*); 25 (*в*, *е*, *и*)

Структурні параметри металу ЗТВ зразків-імітаторів сталі alform 620M при різних швидкостях охолодження ($w_{6/3}$), °C/c

Режим	3		12		25	
	B_v	B_H	B_v	B_H	B_v	B_H
V_v , %	70	30	40	60	20	80
h_p , мкм	0,8...1,9	0,7...1,0	0,7...1,5	0,5...0,7	0,4...1,1	0,4...0,85
d_c , мкм	–	0,7...1,5	–	0,5...1,3	–	0,4...1,2
λ , мкм	0,8...1,9	0,2...0,7	0,7...1,5	0,2...0,7	0,4...1,1	0,2...0,6
$\rho(\text{min})$, см ⁻²	4...5 $\cdot 10^{10}$	3 $\cdot 10^{10}$	5...6 $\cdot 10^{10}$	3...4 $\cdot 10^{10}$	5...6 $\cdot 10^{10}$	3...4 $\cdot 10^{10}$
$\rho(\text{max})$, см ⁻²	7...8 $\cdot 10^{10}$		6...7 $\cdot 10^{10}$		6...7 $\cdot 10^{10}$	

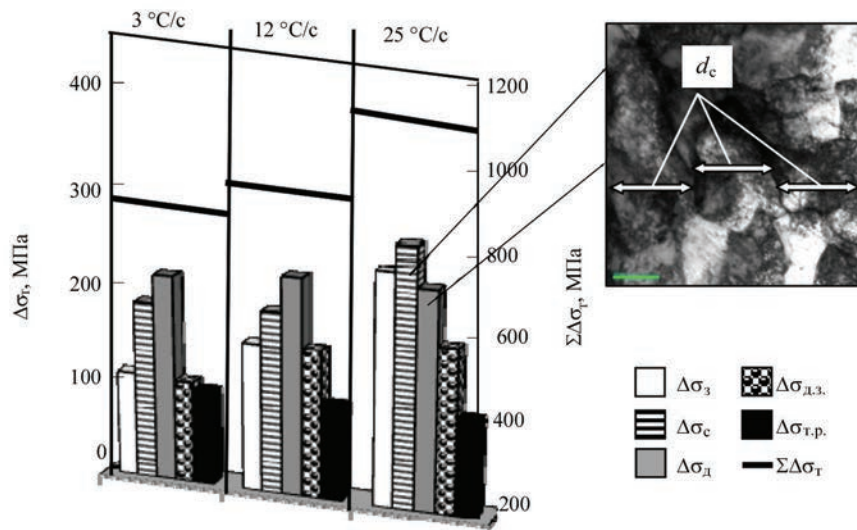


Рис. 2. Диференційний внесок структурних параметрів в розрахункову міцність ($\Sigma\Delta\sigma_T$) металу 3ТВ модельних зразків високоміцної сталі alform 620M при різних швидкостях охолодження та, відповідно, структура B_n ($\times 3500$) з найбільшим внеском субструктурного, дислокаційного та дисперсійного зміцнення

ної тріщини характер руйнування квазікрихкий, а в зоні магістрального розвитку тріщини в'язкий з невеликою часткою крихких ділянок ($< 10\%$). При $T_{\text{випр}} = -40^\circ\text{C}$ частка в'язкого руйнування зменшується (на $10\dots 25\%$). При цьому максимальна $V_{\text{ч}}$ в'язкого руйнування спостерігається в металі зварного з'єднання, виконаного зварювальним дротом Св-10ХН2ГСМФТЮ, що і підтверджується більш високими значеннями показника K_{1C} (в порівнянні з зварним з'єднанням з дротом Св-ДМО-1Г), $\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$: $93,5\dots 109,4$ (шов) та $91,2\dots 104,2$ (3ТВ).

На базі експериментальних досліджень на всіх структурних рівнях проведено аналітичні оцінки міцності, в'язкості руйнування, локалізованої деформації та локальних внутрішніх напружень, що формуються у структурі високоміцної сталі. Визначено структурні фактори, які гарантують необхідний рівень механічних властивостей та тріщиностійкість металу. Аналітична оцінка міцності ($\Sigma\Delta\sigma_T$) була виконана з урахуванням внеску 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 зразків високоміцних сталей. Було визначено диференційний внесок у $\Sigma\Delta\sigma_T$ різних видів структурного зміцнення [3, 10]: твердорозчинного ($\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$), зеренного ($\Delta\sigma_z$), субзеренного ($\Delta\sigma_c$), дислокаційного ($\Delta\sigma_d$), дисперсійного ($\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$) та тертя решітки ($\Delta\sigma_0$).

В металі зразків-імітаторів сталі alform 620M при всіх швидкостях охолодження максимальний внесок в $\Sigma\Delta\sigma_T$ забезпечує дислокаційне ($\Delta\sigma_d$) та субструктурне ($\Delta\sigma_c$) зміцнення (рис. 2). При $w_{6/5} = 25^\circ\text{C/c}$ загальний рівень міцності $\Sigma\Delta\sigma_T$ підвищується при

збільшенні внеску $\Delta\sigma_c$ та $\Delta\sigma_z$ за рахунок значного подібнення субзеренної та зеренної структури.

Крім того, формування дрібнозернистої структури, переважно B_n , забезпечує підвищення в'язкості руйнування (K_{1C}) (рис. 3). Значення коефіцієнта інтенсивності напружень (K_{1C}) визначались по залежності Крафта [11]:

$$K_{1C} = (2E\sigma_T d_y)^{-1/2}, \quad (1)$$

де E — модуль Юнга; σ_T — зміцнення; d_y — розмір ямок на поверхні руйнування.

Наступним етапом структурно-аналітичного дослідження впливу структури на властивості металу було виявлення реальної картини зон розподілу локальних внутрішніх напружень ($\tau_{\text{вн}}$), тобто концентраторів напружень, величини цих характеристик стану матеріалу. Поставлена задача має ключове значення, оскільки процеси формування осередків зародження тріщин та руйнування починаються безпосередньо з концентраторів внутрішніх напружень [10, 12–14]. Оскільки рівень локальних внутрішніх напружень та деформацій можуть бути визначені тільки на основі реальних картин розподілу щільності дислокацій, то ця інформація була забезпечена використанням методу ТЕМ. Рівень локальних внутрішніх напружень визначався по залежності:

$$\tau_{\text{вн}} = Gbhp/\pi(1 - \nu), \quad (2)$$

де G — модуль зсуву; b — вектор Бюргерса; h — товщина фольги; ρ — щільність дислокацій; ν — коефіцієнт Пуассона.

Встановлено, що найменший рівень $\tau_{\text{вн}} = 924\dots 1109$ МПа ($0,11\dots 0,13$ від ($\tau_{\text{теор}}$) теоретичної міцності) формується в металі модельних зразків сталі alform 620M, що охолоджувалися при макси-

мальній швидкості ($w_{6/5} = 25 \text{ }^\circ\text{C/c}$), у структурі нижнього бейніту при рівномірному розподілі щільності дислокацій ($\rho = (5 \dots 6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) (рис. 4, а).

Підвищення рівня $\tau_{\text{вн}}$ до 1294...1474 МПа (0,15...0,18 від $\tau_{\text{теор}}$) спостерігається в металі зразків сталі alform 620M, що охолоджувалися при мінімальній швидкості ($w_{6/5} = 3 \text{ }^\circ\text{C/c}$) в структурі $B_{\text{в}}$ у місцях максимальних величин щільності дислокацій, що призводить до формування в структурі концентраторів внутрішніх напружень — зон тріщиноутворення (рис. 4, б).

Таким чином, встановлено, що рівномірний розподіл щільності дислокацій в металі сталі alform 620M при формуванні субструктури та найбільшій кількості нижнього бейніту забезпечує високий рівень властивостей міцності та тріщиностійкості металу, що при дуговому зварюванні реалізується при швидкості охолодження $25 \text{ }^\circ\text{C/c}$.

Аналогічні комплексні експериментально-аналітичні дослідження закономірностей формування структурно-фазового складу та його впливу на властивості міцності й тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності ($\sigma_{0,2} = 690 \dots 1500 \text{ МПа}$ та $\sigma_{\text{в}} = 760 \dots 1700 \text{ МПа}$) та призначення (конструкційні, колісні, спеціальні) було проведено й подальше [10]. Ці сталі відрізняються за структурно-фазовим складом: конструкційні сталі бейнітно-феритного та бейнітно-мартенситного типу (17X2M, 14XГН2МДАФБ, N-A-XTRA-700); високовуглецеві сталі феритно-перлітного типу (колісна сталь марки 2, 65Г); леговані середньовуглецеві сталі спеціального призначення мартенситно-бейнітного типу (броньові — сталь типу 30X2H2MФ та Miilux Protection 500).

На базі експериментальних досліджень методом ТЕМ щільності дислокацій для кожної структурної складової та параметрів цих структур було проведено аналітичні оцінки рівня локалізованої деформації [12] у металі досліджених сталей:

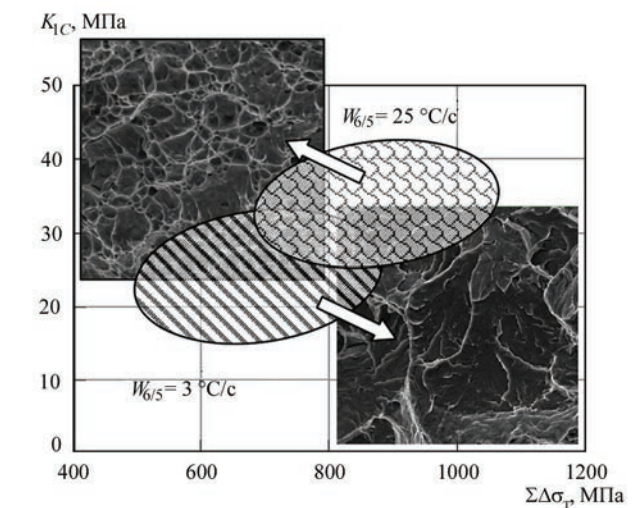


Рис. 3. Розрахункові значення міцності ($\Sigma\Delta\sigma_T$) та в'язкості руйнування (K_{IC}) у ЗТВ модельних зразків сталі alform 620M та фрактограми крихкого ($w_{6/5} = 3 \text{ }^\circ\text{C/c}$) і в'язкого ($w_{6/5} = 25 \text{ }^\circ\text{C/c}$) руйнування після випробувань на ударний вигин ($T_{\text{випр}} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$), $\times 1550$

$$\varepsilon_{\text{л}} = \alpha_1 \rho b S, \quad (3)$$

де α_1 — коефіцієнт, що зв'язує деформацію розтягання зі зсувною деформацією; ρ — щільність дислокацій; b — вектор Бюргерса; S — середня відстань переміщення дислокацій, згідно з дослідженнями ТЕМ відповідає параметрам субструктури металу.

Всі розрахункові дані показників локалізованої деформації у різних структурно-фазових складових (фериті (Ф), аустеніті (А), перліті (П), бейніті нижньому ($B_{\text{н}}$) та верхньому ($B_{\text{в}}$), мартенситі відпущеному ($M_{\text{відп}}$) та гартівному ($M_{\text{гарт}}$)) було узагальнено в залежності від щільності дислокацій та середньої відстані їх переміщення, а саме параметрів субструктури. Отримані дані для різних структурних складових, що формуються в металі зварних з'єднань високоміцних сталей широкого діапазону міцності, дозволили визначити як та яка структурна складова буде впливати на тріщиностійкість металу. Несприятливими струк-

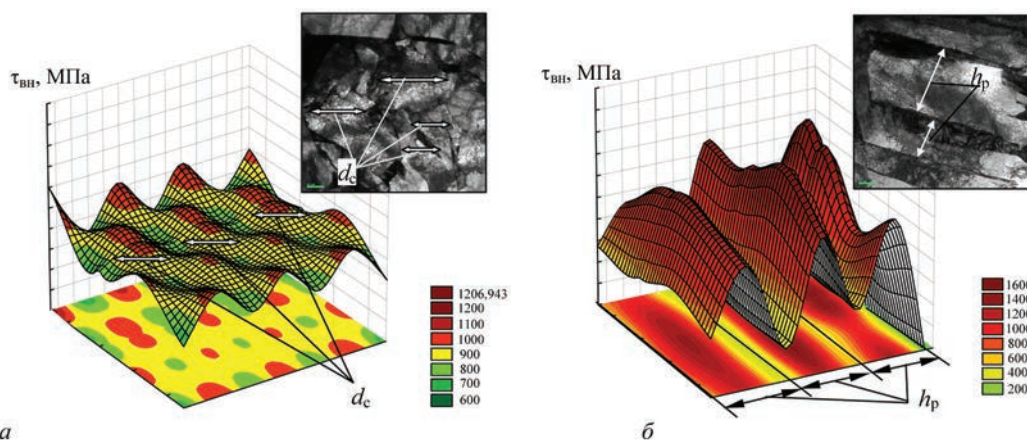


Рис. 4. Локальні внутрішні напруження ($\tau_{\text{вн}}$) в металі зразків-імітаторів сталі alform 620M після охолодження з швидкостями, $^\circ\text{C/c}$: 3 (а) та 25 (б) у структурних зонах $B_{\text{н}}$ (а) та $B_{\text{в}}$ (б)

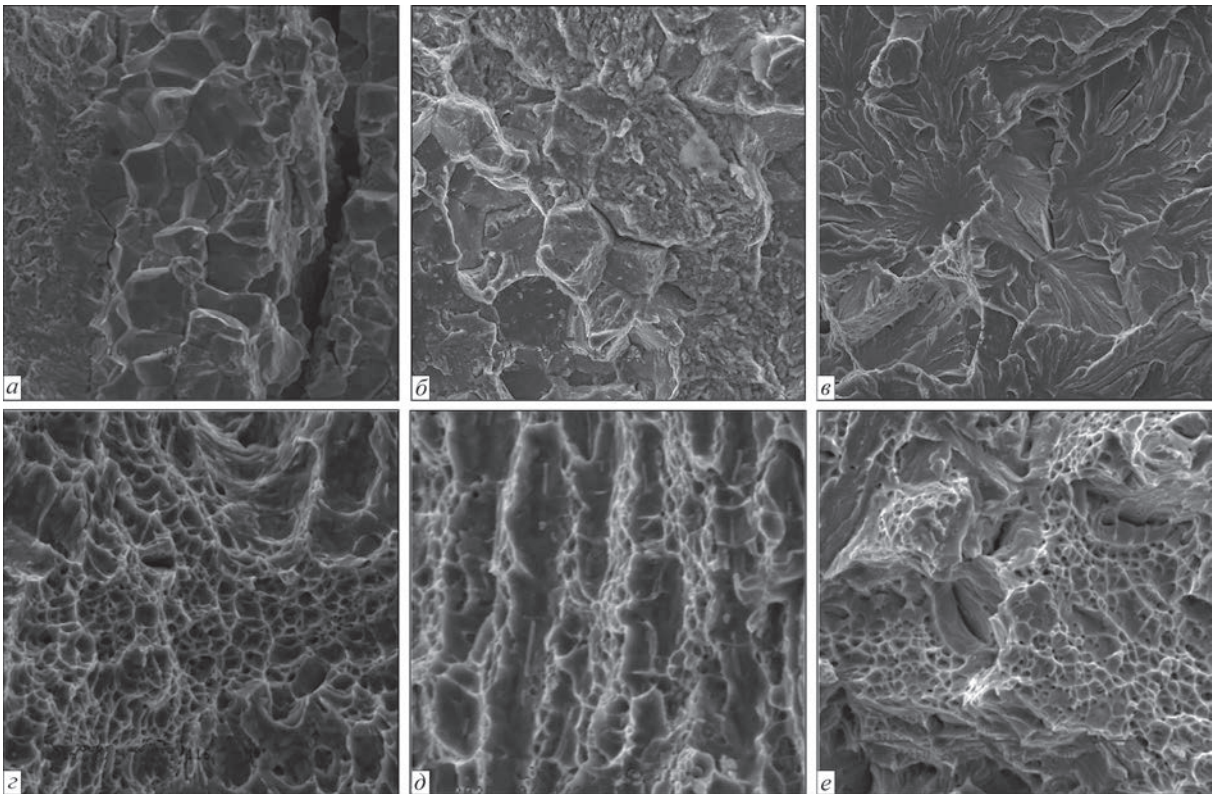


Рис. 5. Фрактограми характеру руйнування високоміцних сталей: *a, б* — крихке з ділянками міжзеренного руйнування та вторинними тріщинами; *в* — крихкий внутрішньозеренний відкол; *г-е* — в'язке руйнування

турними складовими з точки зору формування градієнтних по щільності дислокацій та інтенсивності зон локалізації деформації є структури $M_{\text{гарт}}$ ($50\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 140\%$) та $B_{\text{в}}$ ($10\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 60\%$), що підтверджується крихким руйнуванням металу (рис. 5, *a-в*). Найбільш сприятливими структурними складовими відносно тріщиностійкості є структурні складові Φ ($1\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 20\%$), A ($10\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 30\%$), $\Phi+П$ ($2\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 40\%$), $B_{\text{н}}$ ($2\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 30\%$) та $M_{\text{відп}}$ ($15\% \leq \epsilon_{\text{д}} \leq 50\%$), які забезпечують в'язкість металу (рис. 5, *г-е*).

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. При цьому такі структури, як бейніт нижній та відпущений мартенсит, забезпечують високий комплекс механічних властивостей металу зварних з'єднань високоміцних сталей.

Висновки

1. На основі матеріалознавчих експериментально-теоретичних досліджень закономірностей впливу структурно-фазового складу металу зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності та призначення було запропоновано практичні рекомендації до оптимізації технологічних режимів зварювання, які забезпечать структурні критерії отримання найкращого комплексу

фізико-механічних властивостей зварних з'єднань високоміцних сталей.

2. Такий комплексний експериментально-аналітичний підхід до досліджень закономірностей впливу структури металів, сплавів, зварних з'єднань тощо на їх міцність, в'язкість руйнування, локальні внутрішні напруження та локалізовану деформацію дозволяє оцінити як локальний рівень цих показників в залежності від структурних факторів, так й загальну тенденцію зміни механічних властивостей та тріщиностійкості металу.

Список літератури

1. Позняков В.Д., Гайворонський О.А., Маркашова Л.І. (2018) Підвищення технологічної міцності та експлуатаційних властивостей зварних з'єднань високовуглецевих легованих сталей. *Наука про матеріали, досягнення, перспективи*. Київ, Академперіодика, 2, 225–239.
2. Горынин И.В. (1980) Свариваемые корпусные высокопрочные стали и их применение. *Современные проблемы сварки и специальной электрометаллургии*. Киев, Наукова думка, 120–131.
3. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. (1985) *Специальные стали*. Москва, Металлургия.
4. Haivorons'kyi O.A., Poznyakov V.D., Markashova L.I. et al. (2015) Structural and mechanical properties of the heat-affected zone of restored railway wheels. *Fiz.-Khim. Mekh. Mater.*, 51(4), 114–119. DOI: 10.1007/s11003-016-9876-6.
5. Ostash O.P., Andreiko I.M., Kulyk V.V. et al. (2009) Influence of the mode of thermal treatment and load ratio on the cyclic crack-growth resistance of wheel steels. *Ibid.*, 45(2), 63–70.
6. Грабин В.Ф. (1982) *Металловедение сварки плавлением*. Киев, Наукова думка.

7. Маркашова Л.И., Позняков В.Д., Бердникова Е.Н. и др. (2017) Структура и эксплуатационные свойства сварных соединений высокопрочных сталей, алюминиевых и титановых сплавов. *Автоматическая сварка*, **7**, 8–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.07.02>
8. Патон Б.С., Григоренко Г.М., Маркашова Л.И. та ін. (2018) Структура крупних профільованих монокристалів вольфраму, отриманих адитивним плазмово-індукційним наплавленням. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2018.04.03>
9. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. (Springer Nature).
10. Бердникова О.М. (2020) Структурні критерії міцності та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
11. Романив О.Н. (1979) *Вязкость разрушения конструкционных сталей*. Москва, Metallurgiya.
12. Иванова В.С., Гордиенко Л.К., Геминов В.Н. (1965) *Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов*. Москва, Наука.
13. Фарбер В.М., Селиванова О.В. (2001) Классификация процессов релаксации напряжений и их проявление при пластической деформации металлов. *Металлы*, **1**, 110–115.
14. Конева Н.А., Лычагин Д.В., Теплякова Л.А. и др. (1986) *Дислокационно-дислокационные субструктуры и упрочнения. Теоретическое и экспериментальное исследование дислокаций*. Ленинград, ЛФТИ, сс. 116–126.
3. Goldshtejn, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Yu.G. (1985) *Special steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Haivorons'kyi, O.A., Poznyakov, V.D., Markashova, L.I. et al. (2015) Structural and mechanical properties of the heat-affected zone of restored railway wheels. *Fiz.-Khim. Mekh. Mater.*, **51(4)**, 114–119. DOI: 10.1007/s11003-016-9876-6.
5. Ostash, O.P., Andreiko, I.M., Kulyk, V.V. et al. (2009) Influence of the mode of thermal treatment and load ratio on the cyclic crack-growth resistance of wheel steels. *Ibid.*, **45(2)**, 63–70.
6. Grabin, V.F. (1982) *Metal science of fusion welding*. Kiev, Naukova Dumka, 120–131 [in Russian].
7. Markashova, L.I., Poznyakov, V.D., Berdnikova, E.N. et al. (2017) Structure and service properties of welded joints of high-strength steels, aluminium and titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **7**, 8–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.07.02>
8. Paton, B.E., Grigorenko, G.M., Markashova, L.I. et al. (2018) Structure and large profiled single crystals of tungsten, produced by additive plasma-induction surfacing. *Suchasna Elektrometallurgiya*, **4**, 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2018.04.03>
9. Markashova, L., Tyurin, Y., Berdnikova, O. (2019) Effect of nano-structured factors on the properties of the coatings produced by detonation spraying method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 109–117. (Springer Nature).
10. Berdnikova, O.M. (2020) *Structural criteria of strength and corrosion resistance of welded joints of high-strength steels*: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
11. Romaniiv, O.N. (1979) *Fracture toughness of structural steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Ivanova, V.S., Gordienko, L.K., Geminov, V.N. (1965) *Role of dislocations in strengthening and fracture of metals*. Moscow, Nauka [in Russian].
13. Farber, V.M., Selivanova, O.V. (2001) Classification of the stress relaxation processes and their manifestation in plastic deformation of metals. *Metally*, **1**, 110–115 [in Russian].
14. Koneva, N.A., Lychagin, D.V., Teplyakova, L.A. et al. (1986) *Dislocation-disclination substructures and strengthening. Theoretical and experimental investigation of disclinations*. Leningrad, LFTI, 116–126 [in Russian].

References

STRUCTURAL CRITERIA OF STRENGTH AND CRACK RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH STEELS AND THEIR WELDED JOINTS

O.M. Berdnikova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Regularities of formation of phase composition, grain, subgrain and dislocation structures at different technological parameters of welding, interrelation of the structure with a set of properties: strength, fracture toughness, level of localized strain and local internal stresses in the metal of high-strength steel welded joints were investigated. Welded joints of high-strength steels, differing by their strength and purpose, namely low-carbon ferritic-bainitic and bainitic-martensitic; high-carbon ferritic-pearlitic; and alloyed medium-carbon martensitic steels, were studied. Experimental-analytical procedure for evaluation of a complex of physico-mechanical properties of all the structure elements by specific structural parameters was improved, and mathematical processing of the data was introduced. It allowed classifying the cracking conditions with respect to a set of structural components, taking into account the dislocation density and substructure features. Such an experimental-analytical approach to studying the regularities of metal structure impact on its strength, fracture toughness, local internal stresses and localized strain allows evaluation both of the local level of these values, depending on structural factors, and of the general tendency of the change in mechanical properties and crack resistance. Ref. 14, Tabl. 1, Fig. 5.

Key words: high-strength steels; welded joints; phase composition; microstructure; dislocation density; fracture mode; mechanical properties; crack resistance

Надійшла до редакції 08.04.2021