

УДК 621.791.(92+046):669.245:539.424

Олександр Яровицин, к.т.н., с.д.; Микола Черв'яков, д.т.н., с.н.с.; Георгій Хрущов; Іван Волосатов

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

**РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ДІЛЯНКИ ЗОНИ ТЕРМІЧНОГО
ВПЛИВУ ВАЖКОЗВАРЮВАНОВОГО НІКЕЛЕВОГО ВИСОКОЖАРОМІЦНОГО
СПЛАВУ**

Анотація. На базі випробувань на повздовжній статичний розтяг зразка «50% основного та 50% наплавленого металу» в діапазоні температур 20-1100°C для нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 розроблена ресурсозберігаюча методика. Вона дозволяє для наплавленої кромки експериментально оцінити величину критичної деформації руйнування ϵ для високотемпературної ділянки зони термічного впливу в основному металі та розрахунковим шляхом – її границю міцності.

Ключові слова: нікелевий жароміцний сплав; високотемпературна ділянка зони термічного впливу; статичний розтяг; критична деформація руйнування

Oleksandr Yarovytsyn, Ph.D.; Mykola Cherviakov, Ph.D.; Heorhii Khrushchov; Ivan Volosatov

**DEVELOPMENT AND APPROVAL OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING
THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE HIGH-TEMPERATURE SECTION OF
THE HEAT-AFFECTED ZONE OF DIFFICULT-TO-WELD NICKEL-BASED
SUPERALLOY**

Abstract. A resource-saving technique was developed on the basis of longitudinal tensile tests of the "50% base and 50% deposited metal" sample in the 20-1100°C temperature range for nickel nickel-based superalloy of the ZhS6 type. It allows for the welded edge to experimentally estimate the the critical rupture strain ϵ value for the high-temperature section of the heat-affected zone (HAZ) in the base metal and its ultimate tensile strength by calculation.

Keywords: difficult-to-weld nickel-based superalloys, micro-plasma powder welding deposition, longitudinal tensile test, high-temperature section of the heat-affected zone, deformation capacity.

Вступ. В нашій країні освоєні та широко застосовуються промислові технології відновлення кромки робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з нікелевих жароміцних сплавів (ЖС) з високим вмістом зміцнюючої γ' -фази мікроплазмовим порошковим наплавленням (МПН) [1-2]. Розширення технологічних можливостей відновлення деталей авіаційних ГТД стикається зі збільшенням проявів схильності до утворення гарячих тріщин в зварних з'єднаннях «основний-наплавлений метал», що зокрема корелюються зі зростанням об'єму наплавленого металу та довжини наплавленого валика [3]. Актуальною є розробка таких методик досліджень, що дозволяють акцентуватися на визначенні характеристик опірності до утворення тріщин для окремих типових зон зварного з'єднання. Як важлива характеристика стадії такої опірності зарекомендувала себе критична деформація руйнування ϵ , яку достатньо просто визначати при випробуваннях на статичний розтяг. Попередні дослідження, виконані за стандартизованою (ISO/TR 17641-3) методикою Vareststraint test для нікелевого ЖС ЖС6У [4], вимагали використання вузькоспеціалізованого обладнання з спільним динамічним деформуванням металу шву й зони термічного

впливу (ЗТВ) основного металу (ОМ). Для цього була необхідна значна кількість пластин ЖС, а результати не дозволяли отримати експериментальні дані за ε окремо для кожної з зазначених вище типових зон зварного з'єднання.

Методика досліджень. В основу розробленої методики оцінки механічних властивостей та деформаційної здатності високотемпературної ділянки (ВТД) ЗТВ нікелевого ЖС покладено попередньо виявлені закономірності повздовжнього руйнування зразка наплавленого металу (НМ), що складався з двох сплавлених шарів зі значним чином відмінною пластичністю. Встановлено [5], що такий двошаровий зразок в процесі випробувань на поздовжній статичний розтяг руйнується з критичною деформацією ε , яка практично співпадає з відповідною величиною, визначеною для окремо випробуваної його найменш пластичної зони. Нова методика базувалася на вирішенні оберненої задачі. Малопластичною зоною з невідомою величиною ε , що визначалася шляхом випробувань двошарового зразка «50 % ОМ + 50 % НМ» на поздовжній статичний розтяг при $T = 20-1100^{\circ}\text{C}$ на сервогідравлічній машині MTS-810, виступала ВТД ЗТВ ОМ нікелевого ЖС (рис. 1-а), що припадала на певну частину площі поперечного перерізу робочої ділянки мініатюрного плоского пропорційного зразка (рис. 1-б).

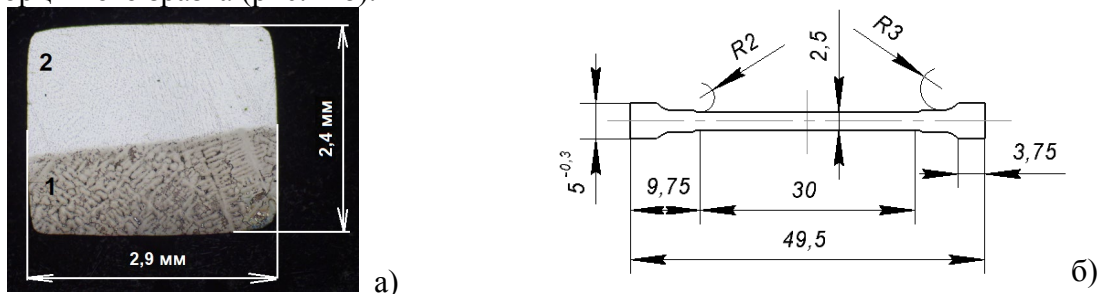


Рисунок 1. Поперечний переріз робочої ділянки (а) двошарового плоского пропорційного мініатюрного зразка (б). Примітка: 1 – ОМ нікелевого ЖС типу ЖС6; 2 – НМ сплаву Inconel 625

Загальну схему підготовки зразків МПН проілюстровано на рис. 2. Як зразки ОМ використовувалися пластинки литих полікристалічних сплавів ЖС6У та ЖС6К розмірами $100 \times 50 \times 5$ мм, що після вакуумно-індукційної виплавки за серійною технологією пройшли попередню термічну обробку за режимом гомогенізації $1210^{\circ}\text{C}-4$ год. У якості НМ для формування верхньої частини зварної заготовки – жаростійкий сплав Inconel 625 з підвищеною пластичністю. Підготований торець пластини попередньо потоншувався шліфуванням до 3,5-4,0 мм; одношарове МПН (див. рис. 2-а) присадного порошку Inconel 625 фракцією 53-150 мкм із застосуванням захисного газу 90% Ar+10% N₂ виконувалося на імпульсному зварювальному струмі з $I_{\text{RMS}} = 30-35$ А при швидкості 0,9-1,1 м/год. та кількості подачі дисперсної присадки 5,0 г/хв. Після зняття бокових підсилень наплавленого валика і хімічного травлення в реактиві Марбле (див. рис. 2-б) та проводилося нанесення розмітки відносно виявленої лінії сплавлення (див. рис. 2-в). Зразки для механічних випробувань вирізалися (див. рис. 2-в) на електроіскровому верстаті типу DK 7735; надалі поверхні електроерозійних різів полірувалися. Такі зразки випробовувалися без термічної обробки – у структурному стані «as built» за ISO/ASTM 52900. Фактичний розподіл площ поперечного перерізу ОМ та НМ (див. рис. 1-а) на випробуваних зразках уточнювався при металографічних дослідженнях. Додатково окремо випробовувалися зразки ОМ сплавів ЖС6У і ЖС6К, а також зразки НМ Inconel 625, виготовлених електроерозійною різкою зі зварної заготовки з багатошаровим наплавленням типу «вертикальна стінка».

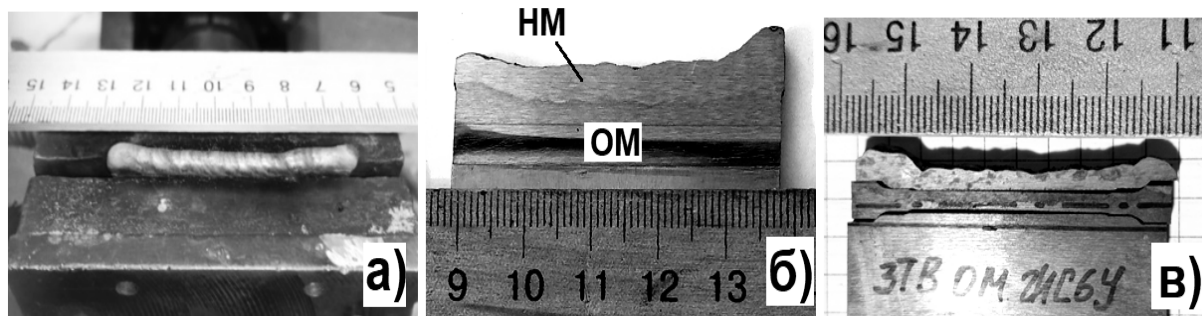


Рисунок 2. Основні етапи підготовки зразків «50 % ОМ + 50 % НМ» способом МПН

Результати та їх аналіз. Експериментальні дані для величини критичної деформації руйнування ε в залежності від температури 20-1100°C для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К представлено на рис. 3. Металографічні дослідження показали, що для випробуваних двошарових зразків відносна площа поперечного перерізу ОМ складала: на основі сплаву ЖС6У – 0,60...0,70; на основі сплаву ЖС6К – 0,45...0,55. Встановлено, що для ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К спостерігається значне зниження деформаційної здатності порівняно з відповідним литим ОМ. Зокрема, при $T=600-1000^\circ\text{C}$ для ВТД ЗТВ ОМ спостерігається малопластичний стан з $\varepsilon = 0,3-1,0\%$. Результати розрахунків границі міцності σ_B для ВТД ЗТВ, виконані на базі відповідних експериментальних даних випробуваних зразків «50 % ОМ + 50 % НМ» на базі сплавів ЖС6У,К та зразків «100 % НМ» Inconel 625 з урахуванням реальних співвідношень площ поперечного перерізу між ОМ та НМ, наведено на рис. 4.

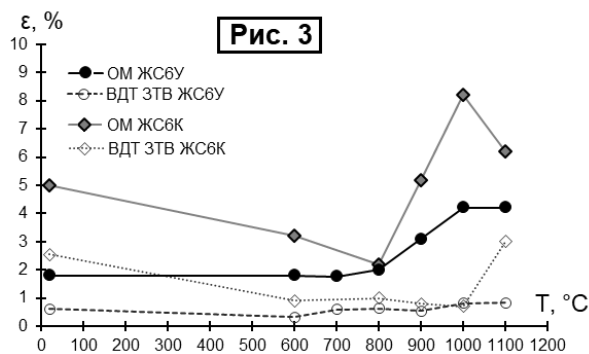


Рисунок 3. Залежність критичної деформації руйнування ε від температури T для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К

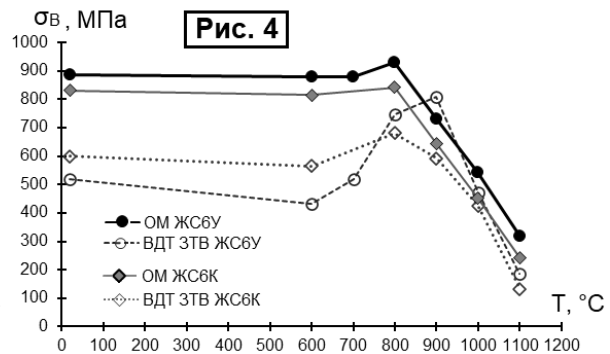


Рисунок 4. Залежність границі міцності σ_B від температури T для ОМ та його ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К

Вони засвідчили також наявність в діапазоні температур 20-800°C помітного зменшення ВТД ЗТВ, товщина якої за даними металографічних досліджень була 1,1...1,7 мм. Величина такого зменшення складає 30-45 % відносно σ_B литого ОМ ЖС. Його наявність можна пов'язати з характерним зменшенням розмірів міждендритних проміжків на ВТД ЗТВ ОМ через укрупнення гілок дендритів під дією зварювального термомеханічного циклу. За даними попередніх досліджень також встановлено наявність у структурному стані «as built» при $T=600-1100^\circ\text{C}$ подібного малопластичного стану з $\varepsilon \leq 1,0\%$ і для НМ сплавів ЖС6У,К (рис. 5).

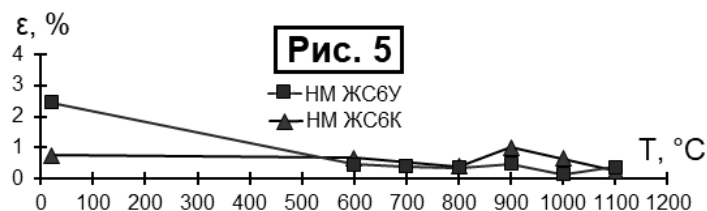


Рисунок 5. Залежність критичної деформації руйнування ϵ від температури T для НМ сплавів ЖС6У та ЖС6К

Заклучення. Розроблено ресурсозберігаючу методику оцінки механічних властивостей та деформаційної здатності ВТД ЗТВ глибиною 1,1-1,7 мм та апробовано її на сплавах ЖС6У та ЖС6К. Для ВТД ЗТВ сплавів ЖС6У та ЖС6К порівняно з відповідним литим ОМ встановлено: при 20-1100°C деградацію деформаційної здатності щонайменше у 2-3 рази; при 20-800°C значне її зменшення у 30-45 %. Показано, що відома висока схильність ЖС типу ЖС6 до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням обумовлена одночасним формуванням малопластичних станів як з боку ВТД ЗТВ ОМ, так і з боку НМ цього ж хімічного складу. В таких умовах можливості серійних технологій ремонту обмежуються відновленням способом МПН малогабаритних робочих лопаток авіаційних ГТД з довжиною наплавленого валика до 40 мм [1,2,6]. Подальше освоєння розмірів дефектів, можливих до відновлення способом МПН без проявів схильності до утворення тріщин, пов'язується з усуненням малопластичного стану принаймні для однієї з типових зон зварного з'єднання нікелевого ЖС, перш за все – з боку НМ [3,5].

Перелік посилань

1. Жеманюк П.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. Автоматическая сварка, №8, С. 43 - 46.

2. Ющенко К.А., Яровицин О.В., Хрущов Г.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2022) Дослідження та оптимізація серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. Космічна наука і технологія, №3(28), С. 3-16. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.01-01>

3. Ющенко К.А., Яровицин О.В., Наконечний О.О., Волосатов І.Р., Фомакін О.О., Хрущов Г.Д. (2020) Розробка технології відновлення сектора соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 мікроплазмовим порошковим наплавленням. Автоматичне зварювання, №11, С. 27-31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2020.11.05>

4. Петрик І.А. Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси та технології»– Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона –2007. – 24 с.

5. Патент UA 127421, B23K 10/02, B23K9/04, B23K9/23, B23K6/00. Спосіб мікроплазмового порошкового 3D-наплавлення деталей з нікелевих жароміцних сплавів. Опубл. 16.08.2023, Бюл. №33/2023. Винахідники: Ющенко К.А, Яровицин О.В. Наконечний О.О., Хрущов Г.Д., Волосатов І.Р., Черв'яков М.О., Фомакін О.О., Ковальчук С.С.

6. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О., Звягинцева А.В., Волосатов І.Р., Хрущов Г.Д. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединения трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. Автоматическая сварка, №7, С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>