

Оцінка деформаційної здатності наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів з високим вмістом γ' -фази

О.В. Яровицин, кандидат технічних наук, yarovytsyn@ukr.net

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, м. Київ

В умовах багатошарового мікроплазмового порошкового наплавлення важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів з вмістом зміцнюючої γ' -фази більше 50 об. % схильність до утворення тріщин повторного нагріву у відповідному зварному з'єднанні «литий-наплавлений метал» в значній мірі визначається структурою і властивостями саме наплавленого металу.

При оцінюванні його схильності до утворення тріщин запропоновано не post factum кількісно оцінювати її прояви за кількістю та довжиною тріщин, а безпосередньо на стадії опірності наплавленого металу їх утворенню. Показано, що об'єктивною методикою досліджень деформаційної здатності може бути випробування на статичний розтяг зразків наплавленого металу при підвищених температурах (1000 °C). Це дозволяє перейти від двомірної системи її оцінки «температура T – критична деформація ϵ » при використанні машинної проби Varestraint test за міжнародним стандартом з випробувань на опірність до утворення гарячих тріщин ISO 17641:2005 до тривимірної системи «температура T – критичні напруження σ – критична деформація ϵ ».

Для наплавленого металу сплаву ЖС32-ВИ, отриманого способом мікроплазмового порошкового наплавлення, у стані безпосередньо після наплавлення встановлено показники обмеженої деформаційної здатності при 1000 °C: $\sigma_{\epsilon}^{кр} \sim 345$ МПа; $\epsilon_{кр} \sim 0,1$ %. З огляду на обмежену деформаційну здатність наплавленого металу пропонується кількісне значення критерію $\epsilon_{1000^{\circ}\text{C}}$ використовувати для прогнозних оцінок щодо забезпечення технологічної міцності важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів.

Знижений рівень механічних властивостей наплавленого металу сплаву ЖС32-ВИ після його кристалізації пов'язується з рядом особливостей його первинної литої структури. Растровою електронною мікроскопією виявлено наступні відмінності порівняно з аналогічним литим металом сплаву ЖС32-ВИ: переріз дендритної комірки; дисперсність та рівномірність розподілу часток карбідної фази, відсутність при збільшеннях до $\times 5000$ візуальних ознак виділення часток зміцнюючої γ' -фази на осях дендритів. Показано, що наявність дисперсного зміцнення у структурі нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32-ВИ та ЖС6-ВИ залежить від швидкості охолодження розплавленого металу при кристалізації, а у випадку наплавленого металу воно остаточно формується тільки в процесі наступних термічних обробок в діапазоні режимів старіння-гомогенізація.

Методичні підходи оцінки деформаційної здатності наплавленого металу за показниками $\sigma_{0,2}$, σ_{ϵ} , $\epsilon_{1000^{\circ}\text{C}}$ кута загину β доцільно використовувати для металу багатошарового наплавлення.

Методи дослідження та контролю якості металів

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, дисперсійне зміцнення, γ' -фаза, мікроплазмове порошкове наплавлення, наплавлений метал, мікроструктура, випробування на статичний розтяг, деформаційна здатність.

Технологічний процес мікроплазмового порошкового наплавлення (МПН) (рис. 1) порівняно з процесом лазерно-порошкового наплавлення дозволив протягом 2005-2008 років розробити відповідне обладнання та ряд технологічних рішень щодо відновлення кромки деталей авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32-ВИ (таблиця), що раніше вважалися незварюваними, та ефективно застосовувати їх у вітчизняній промисловості [1-3].

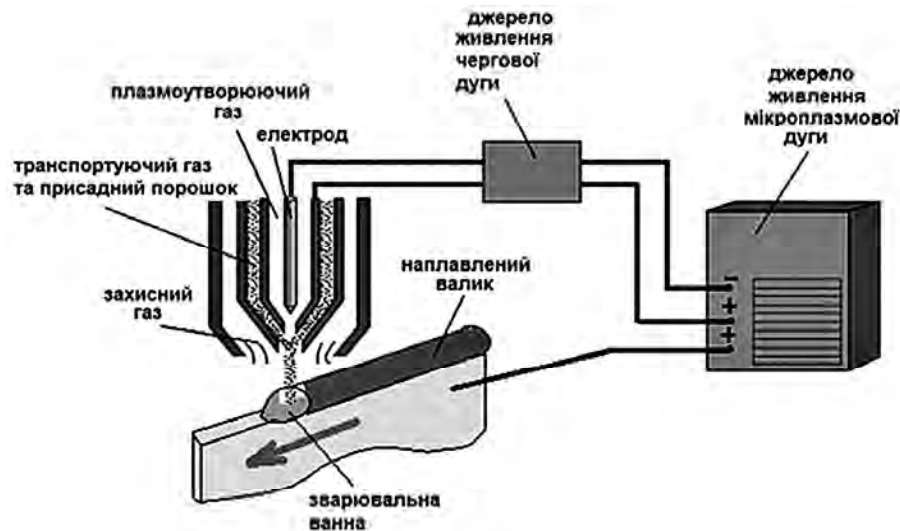


Рис. 1. Схема процесу МПН при ремонті кромки деталей авіаційних ГТД.

Хімічний склад досліджуваних сплавів

Сплав	ваг. %												
	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Fe	Mn	Si	B
ЖС32-ВИ	0,12-0,18	4,3-5,6	Осн,	8,0-10,0	5,6-6,3	--	0,8-1,4	7,8-9,5	1,4-1,8	3,5-4,5	3,5-4,5	<1,0	<0,02
ЖС6У-ВИ	0,13-0,20	8,0-9,5	Осн,	9,5-10,5	5,1-6,0	2,0-2,9	1,2-1,4	9,5-11,0	0,8-1,2	<1,0	<0,4	<0,4	< 0,035
ЖС6К-ВИ	0,13-0,2	9,5-12,0	Осн,	4,0-5,5	5,0-6,0	2,5-3,2	3,5-4,8	4,5-5,5	1,4-1,8	<2,0	<0,4	<0,4	< 0,02
ЧС40	0,05	19,0-21,0	Осн,	---	2,4-2,7	---	8,0-10,0	4,5-5,5	---	---	---	≤5,0	---

Основною тенденцією розвитку технології МПН впродовж останніх років є перехід від одно-двошарового наплавлення з об'ємом наплавленого металу 0,5...2,0 см³ до багатошарового (до 10...20 см³) з поступовим освоєнням нових зон ремонту деталей авіаційних ГТД у двох напрямках: за висотою Н та довжиною L наплавленого валика. Ширина кромки робочої або соплової лопатки при цьому в більшості випадків залишається в діапазоні 1,5...2,5 мм. В ряді випадків при

багатошаровому наплавленні фіксується збільшення схильності наплавленого металу сплавів типу ЖС32-ВИ та ЖС6-ВИ до утворення тріщин (наприклад [4]). Попри [2, 3, 5, 6] можна вважати, що структурний стан наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів з високим вмістом γ' -фази, зокрема – способом МПН, та його схильність до утворення тріщин раніше системно не досліджувалися. В даній роботі опір такого металу до утворення тріщин в процесі багатошарового наплавлення пропонується розглядати з точки зору деформаційної здатності (запасу пластичності) матеріалу.

Метою роботи є обґрунтування вибору і опис нової методики експериментальних досліджень деформаційної здатності наплавленого металу важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВИ на основі комплексного аналізу мікроструктури (растрова електронна мікроскопія) та результатів високотемпературних випробувань на статичний розтяг.

Для технологічних потреб ряд нікелевих жароміцних сплавів (типу ЖС6-ВИ та ЖС32-ВИ) виготовляється у вигляді трьох основних переділів, що відрізняються швидкістю кристалізації розплавленого металу. Розпилений порошок зі сферичною формою часток використовується як присадний матеріал [1-7], зокрема – для мікроплазмового порошкового наплавлення [2-4]. Швидкість охолодження дисперсних часток при розпиленні розплаву у середовищі аргону складає 103-106 °C/с [7]. Наплавлений метал, отриманий способом мікроплазмового порошкового наплавлення [3-5], використовується при відновленні пошкоджених при експлуатації кромek лопаток авіаційних ГТД. В області типових технологічних режимів він охолоджується після кристалізації зварювальної ванни в інтервалі температур 1200-1420 °C зі швидкістю 15-55 °C/с [8]. Литий метал сплавів типу ЖС32-ВИ та ЖС6-ВИ використовується для виготовлення робочих і соплових лопаток сучасних авіаційних ГТД [9-10]. Швидкість охолодження при кристалізації сплаву ЖС32-ВИ в процесі виготовлення лопаток вакуумно-індукційною виплавою на установках типу УВНК-8П складає до 1.3 °C/с [10].

Дослідження методом растрової електронної мікроскопії типових мікроструктур нікелевих жароміцних сплавів зазначених вище технологічних переділів, показали, що залежно від умов кристалізації і подальшого охолодження формуються певні типи структур, які, крім розмірів дендритної ячейки, можна також характеризувати з точки зору дисперсно зміцнюючої γ' -фази: її відсутністю (присадний порошок, рис. 2 а, г); частковою її присутністю в міждендритних проміжках (наплавлений метал, рис. 2 б, в, д); присутністю на осях дендритів та у міждендритних проміжках (литий метал, рис. 3 в).

За даними [10] в литому нікелевому жароміцному сплаві дисперсне зміцнення γ' -фазою реалізується безпосередньо вже при його охолодженні на 10-20 °C нижче T_{solvus} . Навпаки, встановлено, що в наплавленому металі нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32 та ЖС6 при його наступній термічній обробці процеси структуроутворення протікають одночасно із остаточною реалізацією процесу дисперсного зміцнення γ' -фазою. Приклади реалізації такого дисперсного зміцнення в наплавленому металі ЖС32 наведено на рис. 4.

Відомі стандарти з методик оцінки опору матеріалів до утворення гарячих тріщин [11-12] при зварюванні плавленням відзначають запас пластичності (деформаційної здатності) металу лише опосередковано оперують системою показників: «загальна довжина тріщин L_{tot} ; критична швидкість розтягу випробуваного зразка $V_{\text{кр}}$ або деформація ε , при якій утворюються гарячі тріщини; температурний інтервал крихкості ТІК». У якості основних недоліків таких нормативних документів рядом спеціалістів зі зварюваності, зокрема

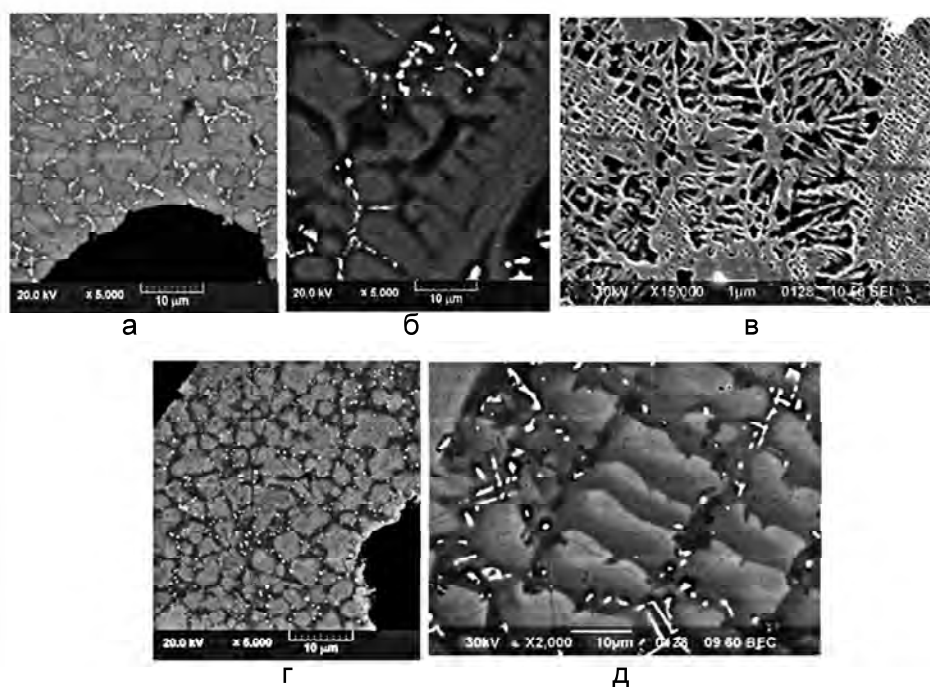


Рис. 2. Структури сплаву ЖС32-ВИ (а-в) та ЖС6У (г, д) залежно від технологічного переділу. а, г – присадний порошок, розпилений в середовищі аргону; б, в, д – наплавлений метал. РЕМ.

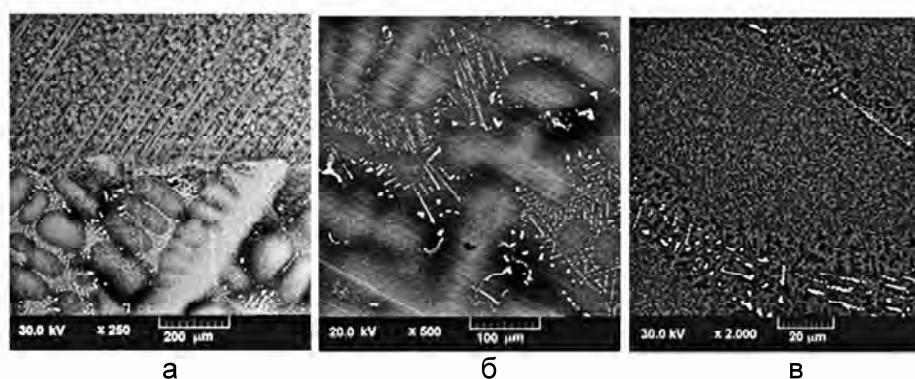


Рис. 3. Структури металу сплаву ЖС32-ВИ. а – наплавлений метал (зверху) і основний литий метал (знизу); б, в – основний метал. РЕМ.

Б. Ф. Якушиним (РФ) [13], додатково відзначаються низька універсальність та досить велика кількість різних показників з відсутністю кореляційних коефіцієнтів як між ними, так і з загальноприйнятими фізико-механічними властивостями металу шву.

Схему стандартизованої машинної проби Varestraint test [12], що передбачає динамічне деформування в процесі формування зварного шву, наведено на рис. 5 а; приклад оцінки з її використанням температурного інтервалу крихкості литого нікелевого жароміцного сплаву – на рис. 5 б. Згідно з сучасних уявлень, зокрема – на базі теорії технологічної міцності М. М. Прохорова [14], при зварюванні плавленням ймовірність утворення гарячих тріщин металу з аустенітною

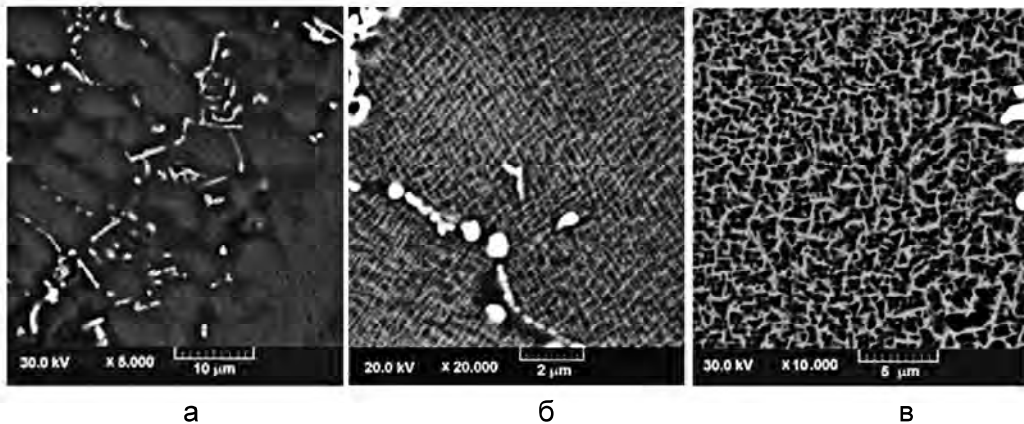


Рис. 4. Мікроструктури наплавленого металу після різних термічних обробок: а – сплав ЖС32-ВІ, без т/о; – сплав ЖС32, т/о 1050 °С - 2,5 год.; в – сплав ЖС32-ВІ, т/о 1265 °С - 1,5 год. РЕМ.

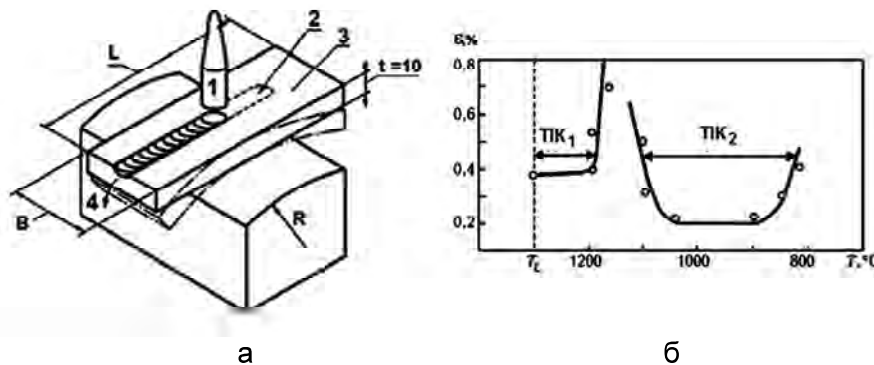


Рис. 5. Схема стандартизованої машинної проби Varestraint test [12] і результати оцінки температурного інтервалу крихкості литого нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС32-ВІ [16]. Позначення: положення аргондугового пальника при загині зразка; 2 – завершення зварювання; 3 – зразок; 4 – змінювана гідравлічною системою швидкість загину зразка.

структурою визначається співвідношенням 3-х основних факторів: температурним інтервалом крихкості ТІК; мінімальною пластичністю (запасом деформаційної здатності) матеріалу в ТІК; інтенсивністю нарощування деформацій, що залежить від потужності режиму та жорсткості зварної конструкції. Виникнення «гарячих» тріщин в наплавленому металі і зоні термічного впливу основного металу нікелевих жароміцних сплавів зумовлено перевищенням деформаціями, що розвиваються при охолодженні зварного з'єднання, запасу пластичності металу в його певній зоні [12].

Стандартизована машинна проба Varestraint test [12, Part 3], що передбачають динамічне деформування в процесі утворення зварного шву на поверхні пластини (рис. 5 а), порушують принцип достовірності фізичного моделювання умов багатопарового МПН при відновленні кромки лопаток авіаційних ГТД або ЗД-наплавлення (рис. 1). Основним недоліком є одночасне деформування системи «ЗТВ основного металу – метал шву», що не дає можливість чітко локалізувати визначену характеристику запасу пластичності для кожної з цих зон. Значним недоліком машинної проби Varestraint test є достатньо великі розміри довжини L та ширини B для необхідних зразків (L=80...30 мм, B=40...100 мм) і достатньо велика їх кількість (рис. 5 а).

Методи дослідження та контролю якості металів

Відповідно, ще на стадії попередньої підготовки необхідних заготовок зразків наплавленого металу з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів з високим вмістом зміцнюючої γ' -фази це закономірно може призвести до ряду проблем. По-перше – це велика ймовірність утворення тріщин у вихідних заготовках зразків внаслідок штучно підвищеної жорсткості зварного з'єднання зі збільшеним об'ємом багат шарового наплавлення [4, 5, 18], що ставить під сумнів достовірність випробувань за зазначеними методиками. По-друге, – це ряд економічних та технологічних чинників, несприятливих в сучасних реаліях вітчизняної науки: необхідність індивідуального замовлення пластин литого матеріалу; значна вартість таких заготовок; підвищена трудомісткість багат шарового наплавлення та його наступної механічної обробки для заготовок об'ємом більше 12-15 см³.

Виходячи із задекларованої у міжнародному стандарті [12, *Part 1-2*] можливості застосування для оцінки схильності металу до утворення гарячих тріщин випробувань на повздовжній розтяг і загин, а також з огляду на ряд раніше опублікованих даних з оцінки температурних інтервалів крихкості литих нікелевих жароміцних сплавів ЧС70, ЖС26-ВИ, ЖС6У-ВИ [15-17], пропонується такі випробування використовувати також і для оцінки запасу високотемпературної пластичності багат шарового наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів, аналізуючи метал у стані безпосередньо після наплавлення.

Такий підхід дозволить не *post factum* кількісно оцінювати прояви схильності до утворення гарячих тріщин [12], а акцентуватися саме на дослідженнях стадії опірності наплавленого металу їх утворенню, вивчаючи і кількісно описуючи його деформаційну здатність.

Попередні інтегральні оцінки діаграм статичного розтягу наплавленого металу сплавів різного рівня жароміцності ЧС40 (гомогенного типу) та ЖС32-ВИ (з дисперсним зміцненням γ' -фазою у кількості 60-62 об. % [9-10]) у стані безпосередньо після наплавлення показують різницю більше ніж у 30 разів у витратах енергії на руйнування такого наплавленого металу (рис. 6 а, б). Також встановлено, що результати випробувань наплавленого металу сплавів ЧС40 і ЖС32-ВИ на статичний розтяг при 1000 °С корелюються з результатами випробувань на загин при кімнатній температурі (рис. 6 в), що характеризуються кутом $\beta \leq 180^\circ$, при якому на зразку з'являється або не з'являється руйнівна тріщина.

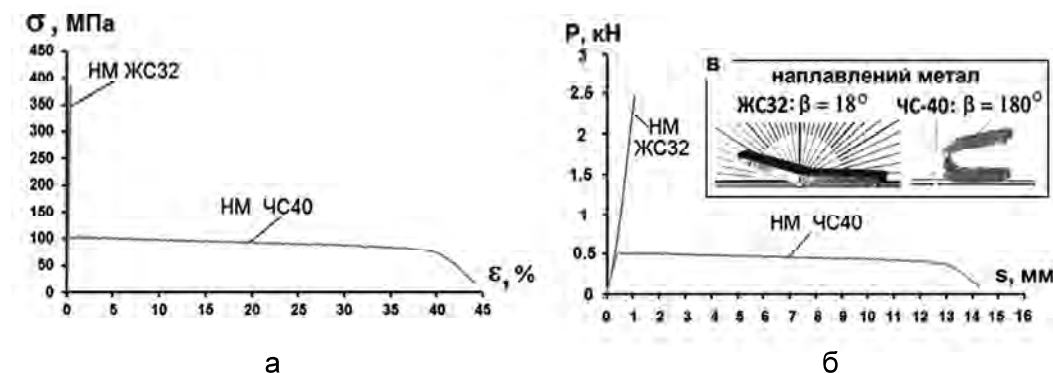


Рис. 6. Особливості опису енергетичних витрат на руйнування наплавленого металу (НМ) нікелевих жароміцних сплавів ЖС32-ВИ та ЧС40 при високотемпературному (1000 °С) статичному розтягу в системах координат «напруження σ – деформація ϵ » (а), «навантаження P – переміщення захватів s » (б) та кореляція відповідних даних з випробуваннями на загин (в).

Додатково слід відзначити, що для наплавленого способом МПН металу сплаву ЖС32-ВИ, у стані безпосередньо після наплавлення випробуваннями на статичний розтяг при 1000 °С встановлено показники обмеженої деформаційної здатності $\sigma_{0.2} \sim 345$ МПа; $\epsilon \sim 0,1$ %) порівняно з відповідними характеристиками для литого сплаву ($\sigma_b \sim 680$ МПа; $\epsilon \sim 14$ % [10]). Це можна пов'язати з відмінностями будови дендритної структури в наплавленому та литому металі (рис. 2, 3).

Наведені експериментальні дані та подібні результати для наплавленого металу сплаву ЖС6К-ВИ ($\epsilon_{1000^\circ\text{C}} \sim 0,7$ %) з попередньо опублікованої за участю автора роботи [4], дозволяють зробити висновок про можливість прогнозування за кількісним значенням критерію $\epsilon_{1000^\circ\text{C}}$ закономірностей опірності наплавленого металу утворенню гарячих тріщин в процесі перебігу послідовних термдеформаційних циклів в типових випадках багат шарового наплавлення кромки лопатки. Обрана температура 1000 °С, як правило, співпадає з температурою провалу пластичності для литого металу з вмістом зміцнюючої γ' -фази більше 50 об. % [15-17] і є розрахунковою температурою експлуатації статорних і роторних деталей з сплавів типу ЖС6-ВИ та ЖС32-ВИ для гарячого тракту сучасних авіаційних ГТД [9].

До переваг запропонованого підходу з оцінки деформаційної здатності наплавленого металу нікелевих жароміцних сплавів з використанням мініатюрних зразків [18] можна віднести: низьку матеріаломісткість зразків для випробувань і вихідних заготовок – відповідно 0,5...0,8 см³ та 4...7 см³; використання універсального обладнання, що передбачає випробування на статичний розтяг в діапазоні температур до 1100 °С; отримання в ході випробувань об'єктивних даних з загальноприйнятих і зрозумілих характеристик короточасних механічних властивостей наплавленого металу ($\sigma_{0.2}$, σ_b , ϵ), що можна надалі використовувати і для математичного моделювання термдеформаційних процесів в наплавленому металі; можливість прогнозування схильності до утворення тріщин для різних типів наплавленого металу за відомими показниками $\sigma_b^{\text{кр}}$ та $\epsilon_{\text{кр}}$.

Висновки

1. Запропоновано для оцінки деформаційної здатності наплавленого металу важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32-ВИ та ЖС6-ВИ використовувати випробування на статичний розтяг у стані безпосередньо після наплавлення, зокрема при температурі 1000 °С, і оцінювати витрати енергії на руйнування зразка, що опосередковано характеризуються значеннями границі міцності $\sigma_b^{\text{кр}}$ та відносного подовження $\epsilon_{\text{кр}}$.

2. Даний підхід, на відміну від поширеної стандартизованої машинної проби Varestraint test згідно ISO 17641:2005 Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes, що описує деформаційну здатність зварного з'єднання у двовимірній системі «температура Т – критична деформація ϵ » дозволяє її описувати для наплавленого металу вже у тривимірній системі «температура Т – критичні напруження σ – критична деформація ϵ ».

3. Викладені у даній роботі методичні підходи, засновані на кількісній оцінці деформаційної здатності (запасу пластичності) наплавленого металу важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів типу ЖС32-ВИ та ЖС6-ВИ за показниками $\sigma_{0.2}$, σ_b , ϵ та кута загину β у поєднанні з вивченням їх структурного стану, доцільно використовувати для порівняльних прогнозних оцінок щодо забезпечення технологічної міцності наплавленого металу відмінного хімічного складу в типових умовах багат шарового наплавлення.

Література

1. Неруш С.В., Ермолаев А.С., Рогалев А.М., Василенко С.А. Исследование технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления (ТВД) из сплава ЖС32-ВИ методом лазерно-порошковой наплавки с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ, изготовленного методом атомизации // Электронный научный журнал «Труды ВИАМ» – 2016. – №8(44) – С. 24-34. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4>.
2. Ющенко К.А., Савченко В.С., Яровицын А.В. [и др.] Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой // Автомат. сварка. – 2010. – №8. – С. 25-29.
3. Жеманюк П.Д., Петрик И.А., Чигилейчик С.Л. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства // Автомат. сварка. – 2015. – №8. – С. 43-46.
4. Ющенко К. А., Звягінцева Г. В., Яровицин О. В. та ін. // Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із нікелевих жароміцних сплавів // Металофізика та новітні технології. – 2019. – №10 (том 41). – С. 1345-1364. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>
5. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32 // Автомат. сварка. – 2017. – №2. – С. 3-7. <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
6. Заводов А. В., Петрушин Н. В., Зайцев Д. В. Микроструктура и фазовый состав жаропрочного сплава ЖС32 после селективного лазерного сплавления, вакуумной термической обработки и горячего изостатического прессования // Letters on materials. – 2017. – vol. 7, Issue 2. – pp. 111-116. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-2-111-116>
7. Терновой Ю.Ф., Баглюк С.А., Кудиевский С.С. Теоретические основы распыления металлических расплавов. – Запорожье: Издательство Запорожской государственной инженерной академии, 2008. – 298 с.
8. Yarovytsyn O.V., Khuschchov H.D., Chyhileychik S.L. Estimation to optimize energy spent on a single welding pool creation in micro-plasma powder deposition process of JS32 nickel superalloy HPTblade's bandage shelve // International Journal of Mechanical and Production Engineering. – Volume 7, Issue 1, Jan. 2019. – 5 p. IJMPE-IRAJ-DOI-14928.
9. Богуслаев В.А., Муравченко В.М., Жеманюк П.Д. и др Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Часть II. – Запорожье: Изд. ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
10. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие. – Екатеринбург.: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 160 с.
11. ГОСТ 26389-84 Соединения сварные. Методы испытания на сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке плавлением.
12. ISO 17641:2005 Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes.
13. Якушин Б.Ф. Сравнительный анализ стандарта ISO 17641-2005 и действующего стандарта РФ по оценке сопротивляемости образованию горячим трещин при сварке // Автомат. сварка. – 2012. – № 11. – С.46-49.

14. Прохоров Н.Н. Технологическая прочность сварных швов в процессе кристаллизации. – М.: Металлургия, 1979. – 248с.
15. Черв'яков М.О. Напружено-деформований стан та технологічна міцність зварних з'єднань високоміцних нікелевих сплавів. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 05.03.06 “Зварювання та споріднені процеси та технології” / М.О. Черв'яков. – Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – 2007 р. – 17 с.
16. Ющенко К.А., Савченко В.С., Червякова Л.В., Девид С., Витек Дж. Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
17. 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” / І.А. Петрик. – Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – 2007. – 24 с.
18. Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. и др. Оценка кратковременных механических свойств соединения трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6 // Автомат. сварка. – 2019. – №7. – С. 38-45. <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>.

References

1. Nerush S.V., Ermolaev A.S., Rogalev A.M., Vasilenko S.A., *Trudy VIAM*, 2016, No 8, pp. 24-34 [in Russian]. <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4>.
2. Yushchenko K.A., Savchenko V.S., Yarovitsyn A.V., Nakonechny A.A., Nastenka G.F., Zamkovo V.E., Belozertsev O.S., Andrejchenko N.V., *The Paton Welding J.*, 2010, No 8, pp. 25-29 [in English].
3. Zhemanyuk P.D., Petrik I.A. and Chigilejchik S.L., *The Paton Welding J.*, 2015, No 8, pp. 43-46 [in English]. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.08>
4. Yushchenko K. A., Zviagintseva G. V., Yarovytsyn O. V., Chervyakov N. O., Khrushchov H. D., Volosatov I. R., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2019, Vol. 41, Issue 10, pp. 1345-1364 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>.
5. Yushchenko K. A., Yarovitsyn A.V., Chervyakov N. O., *The Paton Welding J.*, 2017, No 2, pp. 2-6 [in English]. <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.02.02>
6. Zavodov A. V., Petrushin N.V., Zaitsev D.V., *Letters on materials*, 2017, Vol. 7, Issue 2, pp. 111-116 [in Russian]. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2017-2-111-116>.
7. Ternovoj Yu.F., Baglyuk S.A., Kudievsky S.S., *Teoreticheskie osnovy raspyleniya metallicheskih rasplavov* (Theoretical principles of metallic melt spraying), Zaporozhie: Zaporozhie GIA Publishing House, 2008, 298p. [in Russian].
8. Yarovytsyn O.V., Khuschchov H.D., Chyhileychik S.L., *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2019, Vol. 7, Issue 1, 5 p. – IJMPE-IRAJ-DOI-14928[in English].
9. Bohuslaev V.A., Muravchenko V.M., Zhemanyu P.D. et al., *Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki turbiny. Chast' II*. (Technological support of service characteristics of GTE parts. Turbine blades. Pt 2), Zaporozhie: OJSC Motor Sich Publishing House, 2003, 420 p. [in Russian].

10. Kuznetsov V.P., V.P. Lesnikov, N.A. Popov, The structure and properties of single-crystal high temperature strength nickel alloys: a training manual, Yekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016, 160 p. [in Russian].
11. GOST 26389-84 Soyedineniya svarnyye. *Metody ispytaniya na soprotivlyayemost obrazovaniyu goryachikh treshchin pri svarke plavleniyem* (Welded joints. Test methods for resistance to hot cracking during fusion welding) [in Russian].
12. ISO 17641:2005 *Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes* [in English]
13. Yakushin B.F., *The Paton Welding J.*, 2012, No 11, pp. 41-44 [in English]
14. Prokhorov N.N., *Tekhnologicheskaya prochnost svarnykh shvov v protsesse kristallizatsii* (Technological strength of welds in the crystallization process), Moskva: Metallurgy Publishing House, 1979, 248p. [in Russian].
15. Chervyakov M. O. *Napruzhenno-deformovanyy stan ta tekhnolohichna mitsnist' zvarnykh z'yednan' vysokomitsnykh nikelovykh splaviv* (Stress-strain state and welded joints technological strength of high-strength nickel alloys), Thesis of Disser. for the Degree of Cand. Techn. Sci., Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2007, 17 p. [in Ukrainian].
16. Yushchenko K. A., Savchenko V.S., Chervyakova L.V., David S., Vitek J. *The Paton Welding J.*, 2005, No 6, pp. 2-5 [in English].
17. Petrik I. A., *Protsesy vidnovlennya zvaryuvannyam ta payannyam lopatok hazoturbinnnykh dvyhuniv z vazhkozvaryuvanykh splaviv na nikeloviy ta tytanoviy osnovi* (Processes of Restoration of Gas Turbine Engine Blades Made of Nickel- and Titanium-Based Hard-to-Weld Alloys by Welding and Brazing), Thesis of Disser. for the Degree of Cand. Techn. Sci., Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute, N.A.S. of Ukraine: 2007, 24 p. [in Ukrainian].
18. Yushchenko K. A., Yarovitsyn O. V., Chervyakov N. O. et al., *The Paton Welding J.*, 2019, No 7, pp. 29-35 [in English]. <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.07.07>.

Одержано 15.04.20

O. V. Yarovytsyn

About the deformation ability of overlay metal of nickel-base difficult to weld high temperature strength alloys with γ' -phase strengthening high content

Summary

Under conditions of multilayer microplasma powder overlay welding process of nickel-base difficult to weld high temperature strength alloys with a content of the strengthening γ' -phase more than 50 vol. % the tendency to the reheating cracks formation in the corresponding welded joint "cast-deposited metal" from is largely determined by the structure and properties of the deposited metal.

With appropriate research studies of the crack formation tendency, it was proposed not to post factum quantitatively evaluate its manifestations by the number and length of cracks, but to focus on studies of the preliminary resistance stage to their formation in the overlay metal. It is shown that an objective method for the deformation ability studying can be tensile testing at elevated temperatures (1000 °C) of overlay metal samples. This allows us to move from the two-dimensional system of its assessment "temperature T - critical strain ϵ " when using a common machine test

according to the international standard for hot crack testing resistance ISO 17641: 2005 to the three-dimensional system "temperature T - critical stress σ (R_m^{cr}) - critical deformation ε (A^{cr})".

For the overlay metal ZhS32 obtained by the microplasma powder overlay welding process, in the state immediately after deposition, the limited deformation capacity at 1000 °C was established: $R_m^{\text{cr}} \sim 345$ MPa (tensile strength); $A^{\text{cr}} \sim 0,1$ % (percentage elongation).

Based on the previously established limited deformation ability of the ZhS6K overlay metal in the after deposition state, it is proposed to use the quantitative criterion $\varepsilon_{1000^\circ\text{C}}$ ($A_{1000^\circ\text{C}}$) for predictive assessments of the possibility of ensuring the technological strength of the overlay metal of nickel-base difficult to weld high temperature strength alloys. The reduced level of mechanical properties of the overlay metal ZhS32 after its crystallization in the welding pool is associated to the some its primary structure features. Using scanning electron microscopy, the following differences were established in comparison with a similar cast metal of the ZhS32 alloy: dendritic cell cross section; dispersion and uniform distribution of the carbide phase particles; the visual signs absence of the release of strengthening γ' -phase particles on the dendrite axes. It is shown that the presence of dispersed hardening in the structure of nickel-base high temperature strength alloys of the ZhS32 and ZhS6 types depends on the cooling rate of the molten metal during crystallization, and in the case of the overlay metal it is finally formed only during subsequent heat treatments in the range of aging-homogenization modes.

Keywords: nickel-base high temperature strength alloys; dispersed hardening; γ' -phase; microplasma powder overlay welding process; overlay metal; microstructure; tensile testing; deformation ability.

Жунал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2019 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,

банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172

Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,

з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа передплати та відомості про передплатника

просимо надсилати до редакції,

вказавши номер і дату платіжного документа.