

УДК 621.791.14

Зяхор І.В., канд. техн. наук
 Завертаний М.С.
 Левчук А.М.
 Шило Ю.А.

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ, zavertannyi@gmail.com

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ У РІЗНОЙМЕННОМУ СПОЛУЧЕННІ

Елементи турбін авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) виготовляють із різнойменних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) та з'єднуються між собою механічним кріпленням, що обумовлює збільшення ваги турбіни та двигуна в цілому. Тому актуальним завданням при розробці нових конструкцій ГТД є заміна механічних кріплень елементів турбіни нерозр'ємними з'єднаннями [1-2], зокрема виконаними зварюванням тертям (ЗТ) у різних технологічних модифікаціях – ЗТ обертанням і лінійним ЗТ [3-5].

При ЗТ одержання якісних з'єднань можливо за умови забезпечення певної величини тиску і потужності тепловиділення в процесі нагрівання, достатніх для деформації металу в зоні з'єднання на задану величину. Тому при ЗТ контролюється процес осадки заготовок і фіксується величина загальної осадки, при якій забезпечується формування якісного (бездефектного) зварного з'єднання. Мета роботи – встановити особливості деформації різнойменних ЖНС, які використовуються у конструкції вітчизняних ГТД, в залежності від значень параметрів режиму зварювання і на цій основі удосконалити технологію ЗТ, для забезпечення формування бездефектних з'єднань.

Досліджували деформацію (осадку) заготовок при формуванні з'єднань різнойменних ЖНС – гранульного сплаву ЕП741НП із деформованим сплавом ЕІ698ВД і ливарним сплавом ВЖЛ12У. Встановлено, що у першому випадку осадка відбувається переважно за рахунок сплаву ЕІ698ВД – осадка заготовки із сплаву ЕП741НП не перевищує 20% від величини загальної осадки при ЗТ. За результатами експериментів побудовано залежність швидкості осадки від тиску при нагріванні (рис. 1,а). Залежність можна виразити лінійною функцією, в якій зі збільшенням тиску пропорційно зростає швидкість осадки. Встановлено, що мінімальне значення тиску, при якому спостерігається осадка заготовок, становить $P_{\min}=80$ МПа (окружна швидкість $V=1,2$ м/с).

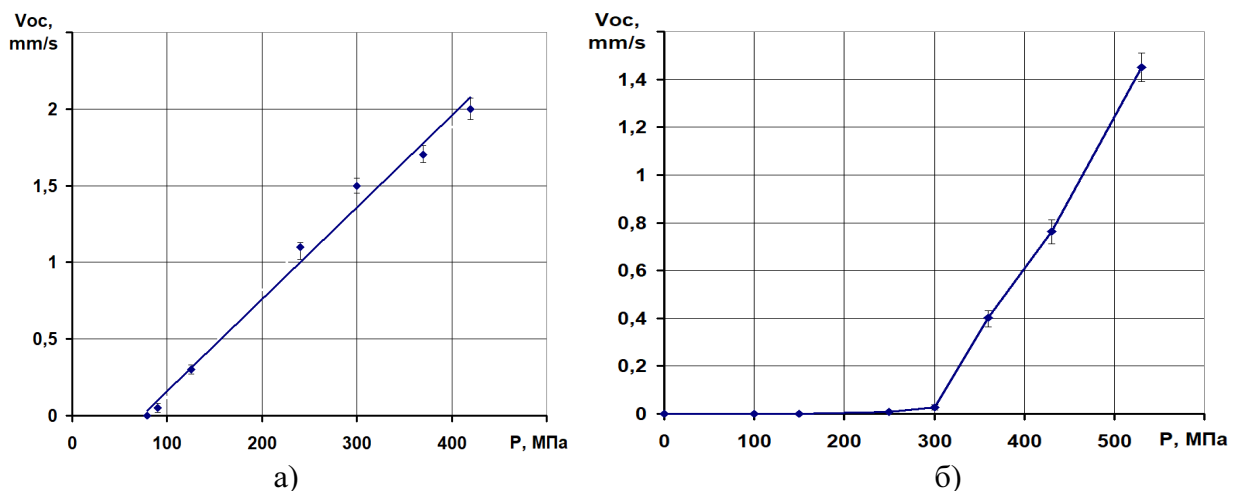


Рис. 1 – Залежність швидкості осадки від тиску при ЗТ сплавів ЕП741НП із ЕІ698ВД (а) та ЕП741НП із ВЖЛ12У (б)

При ЗТ гранульного сплаву ЕП741НП із ливарним ВЖЛ12У осадка заготовок при значенні тиску менше $P_H=300$ МПа (окружна швидкість $V=1$ м/с) практично не спостерігається (рис. 1, б). В діапазоні значень тиску 300...530 МПа відбувається осадка заготовок, при цьому залежність її швидкості V_{oc} від тиску при нагріванні апроксимується лінійною функцією.

На рис. 2,а приведено дані реєстрації параметрів процесу ЗТ сплаву ЕП741НП із сплавом ВЖЛ12У. Виявлено аномальний ступінчастий характер осадки при перевищенні певного критичного значення тиску $P_{крит}$. Зокрема для окружної швидкості $V=1$ м/с, деформація заготовки з боку сплаву ЕП741НП при $P_{крит} > 550$ МПа характеризується почерговою зміною швидкості укорочення: ділянки із низькою швидкістю осадки $V_{oc}=0,4...0,8$ мм/с змінюються на стрибкоподібну високошвидкісну осадку ($V_{oc}=5$ мм/с), під час якої спостерігались викиди із зони контакту часток нагрітого металу, що, імовірно, перебував у твердо-рідкому стані. При цьому, спостерігається формування ґрату з боку сплаву ВЖЛ12У (рис. 2, б) та його відсутність з боку ЕП741НП.

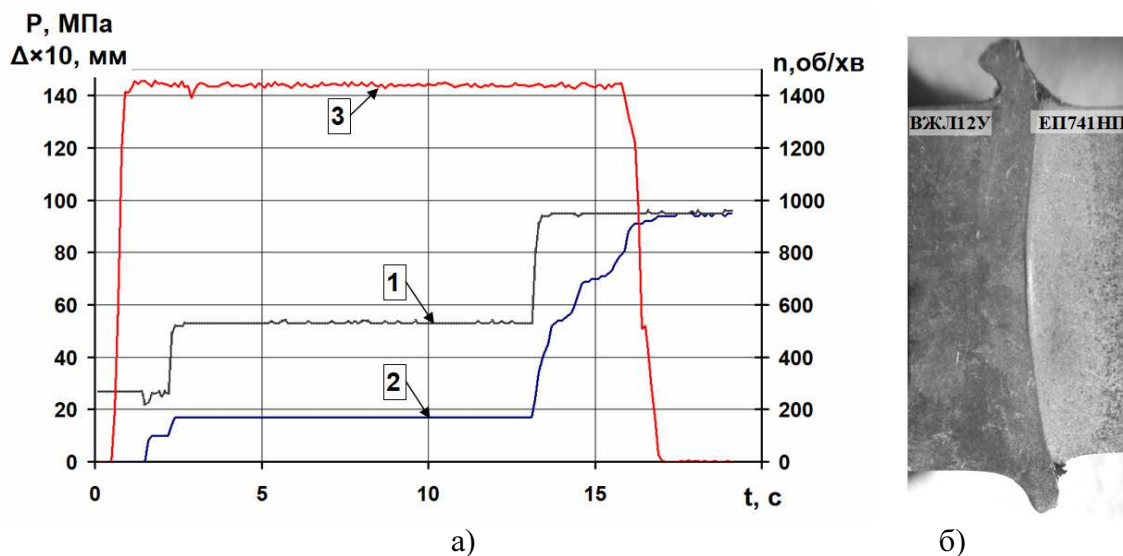


Рис. 2 – Результати реєстрації параметрів процесу ЗТ сплавів ВЖЛ12У і ЕП741НП (1 – тиск зварювання P ; 2 – осадка (укорочення) заготовок Δ ; 3 – частота обертання n) та макрошліф з'єднання (б)

На основі отриманих даних визначено діапазон зміни параметрів процесу ЗТ різнойменних ЖНС – гранульного ЕП741НП із деформованим ЕІ698ВД і ливарним ВЖЛ12У. Удосконалено технологію комбінованого ЗТ, яка за рахунок прикладення підвищеного зусилля проковки на етапі програмованого зниження швидкості обертання заготовок, забезпечує відсутність аномальних явищ у процесі осадки та формування бездефектних з'єднань при ЗТ різнойменних високолегованих ЖНС.

Список посилань

1. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей [Текст] / Ю.С. Елисеев, С.Б. Масленков, В.А. Гейкин, В.А. Поклад – М.: Наука и технологии, 2001. – 544 с.
2. Изготовление конструкции типа «блиск» из разноименного сочетания материалов (обзор) [Текст] / О.Г. Оспенникова, В.И. Лукин, А.Н. Афанасьев-Ходыкин, И.А. Галушка // Труды ВИАМ. – 2018. – № 10. – С. 10-16.
3. Linear and rotary friction welding review [Текст] / W. Li, A. Vairis, M. Preuss, T. Ma // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61. – Issue 2. – pp. 71-100.
4. Inertia friction welding of dissimilar superalloys Mar-M247 and LSHR [Текст] / O.N. Senkov, D.W. Mahaffey, S.L. Semiatin, C. Woodward // Metallurgical and materials transactions A. – 2014. – Vol. 45A. – pp. 5545-5561.

5. Analysis of microstructural changes induced by linear friction welding in a nickel-base superalloy [Текст] / O.T. Ola, O.A. Ojo, P. Wanjara, M.C. Chaturvedi // Metallurgical and materials transactions A. – 2011. – Vol. 42A. – pp. 3761-3777.

УДК 539.219.3

**Мазанко В.Ф., докт. техн. наук, професор
Герцикен Д.С., канд. фіз-мат. наук**

Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ, vmazanko@imp.kiev.ua

ДИФУЗИЯ В ТВЕРДОМУ СТАНІ МЕТАЛІВ ЗА РІВНОВАЖНИХ УМОВ ТА ПРИ ІМПУЛЬСНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Слово «дифузія» походить від латинського *diffusio* – розповсюдження, поширення, розтікання, взаємне проникнення атомів (молекул) речовин, які знаходяться у контакті, внаслідок теплового руху часток речовини: молекул, атомів, іонів, і вона відбувається в напрямку зменшення концентрації речовини й веде до його рівномірного розподілу по об'ємі. Як відомо, дифузія буває в газах, рідинах і твердих тілах. В основі різноманітних дифузійних явищ лежить єдиний механізм атомарного (молекулярного) переносу маси.

За рівноважних умов, тобто постійній температурі відпалу та інших незмінних параметрах, найбільш швидко дифузія відбувається в газах, повільніше в рідинах, ще повільніше - у твердих тілах. Траєкторія руху кожної частки газу являє собою ламану лінію, тому що при зіткненнях вона міняє напрямок і швидкість руху. Тому величина зсуву частки, обмірювана по прямій між початковою й кінцевою крапками, набагато менше шляху, фактично пройденому часткою. Отже швидкість дифузійного проникнення менше швидкості самих молекул. Число зіткнень росте пропорційно часу, збільшується з ростом температури, зменшується зі зменшенням тиску й молекулярної маси. Дифузія великих часток (наприклад, диму або суспензії) здійснюється завдяки броунівському руху. У рідинах дифузія здійснюється перескоком молекул з одного стійкого положення в інше. Кожний стрибок відбувається при наданні молекулі енергії, достатньої для розриву її зв'язків із сусідніми молекулами й переходу в оточення інших молекул у нове енергетично вигідне положення. Переміщення при такому стрибку не перевищує міжмолекулярної відстані. З ростом температури збільшується швидкість. У твердому тілі можуть діяти кілька механізмів: обмін місцями атомів з вакансіями, переміщення атомів по міжвузлях, одночасне циклічне переміщення декількох атомів за краудіонним механізмом, міграція атомів по дефектах кристалічної ґратки: границь зерен та фаз, вздовж дислокацій, в тонкому поверхневому шарі та ін. Збільшення числа дефектів, що виникають при нагріванні, гартуванні, статичних та імпульсних деформаціях, бомбардуванні іонами та електронами та інших впливах на метал полегшує переміщення атомів у твердому тілі, тому їх рухливість підвищується.

Дифузійні процеси у твердій фазі лежать в основі спікання порошків, хіміко-термічної обробки металів, створення нероз'ємного з'єднання без розплавлення шляхом дифузійного зварювання, створення покриттів з потрібними властивостями або модифікування приповерхневих шарів металічних матеріалів та ін. Дифузійна металізація полягає в насиченні поверхневих шарів металевих виробів різними металами, і саме покриття може формуватися із твердої, рідкої парової або газової фаз, але його адгезію з основним матеріалом забезпечує взаємна дифузія, яка відбувається між покриттям та масивним матеріалом (виробом).

Вивчення дифузії в твердому стані розпочалось з 1896 р., коли шотландський вчений В. Ч. Робертс-Остин на металічній парі золото-свинець експериментально довів існування дифузії в твердій фазі [1]. В його честь російський вчений Д. К. Чернов одну із фазових