

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАКЕТІВ ЛОПАТОК ТЕПЛОФІКАЦІЙНИХ ПАРОВИХ ТУРБІН

Ю.В. Орса, В.М. Нестеренков, В.І. Загорніков, М.О. Русиник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: zagora1954@gmail.com

Запропоновано промислову технологію виготовлення пакетів лопаток парових турбін із жароміцної високолегованої сталі мартенситного класу марки 18X11МНФБ-Ш. У дослідне виробництво було впроваджено технологічний процес, що дозволив вирішити проблему зварювання пакетів лопаток завтовшки 120 мм. Розроблено технологічне оснащення, необхідне для позиціонування деталей пакета в процесі збирання та зварювання. Представлено результати експериментальних досліджень зварюваності електронним променем жароміцної сталі мартенситного класу. Встановлено, що попередній підігрів до 200...250 °С розфокусованим електронним променем у вакуумній камері пакетів лопаток дозволяє отримати вищі пластичні властивості зварних з'єднань. Вказано необхідні параметри режимів термообробки після зварювання для зняття внутрішніх напруг та забезпечення необхідних механічних властивостей виробу. Бібліогр. 9, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: пакет лопаток, жароміцна сталь, електронно-променеве зварювання, термообробка

Вступ. Робочі лопатки є одними з найбільш відповідальних частин парової турбіни, що визначають багато в чому її надійність та термін служби. Вони піддаються напругам від розтягування і від вигину, що викликано дією відцентрових сил, а також сил, що виникають внаслідок зміни напрямку руху газу в міжлопаткових каналах. З метою підвищення вібраційної надійності турбіни її робочі лопатки в кількості від 2 до 5 штук з'єднуються за допомогою зварювання в пакети. Очевидно, що наявність будь-яких дефектів у зварних з'єднаннях, розташованих у хвостовій частині пакета, утворює складності при кріпленні його до ротора турбіни, є неприпустимими. У даній статті розглядаються лопатки першого ступеня ротора з цільно-фрезерованим профілем, зварені в пакет між собою встик по бандажній та хвостовій частинах. У світовій практиці парового турбобудування зварювання робочих лопаток у пакети застосовується вже кілька десятиліть, у тому числі зі застосуванням електронно-променевого зварювання [1]. Застосування електродугового зварювання пов'язане з наплавленням великого об'єму металу, що призводить до значних залишкових деформацій парових каналів лопаткових апаратів. Замість електродугового зварювання, що дає порівняно масивні (об'ємні) шви та утворює проблеми деформацій форми зварних виробів, застосовують електронно-променеве зварювання (ЕПЗ), яке дає більш якісний зварний шов без ефекту короблення. Високий вакуум у камері електронно-променевої машини сприяє високій металургійній чистоті зварювальної ванни за рахунок її інтенсивної дегазації.

У сучасних паротурбінних установках, що працюють при високих тисках і температурах до 600 °С, при виготовленні пакетів лопаток широко використовуються високохромисті жароміцні сталі мартенситного класу марок 15X11МФ-Ш, 18X11МНФБ-Ш та 20X12ВНМФ-Ш. Їх зварювання пов'язане з відомими труднощами щодо забезпечення необхідних фізико-механічних і службових властивостей зварних з'єднань. Особливістю зварювання названих сталей є: схильність до уповільненого руйнування та знеміцнення в біляшовній зоні, гарячих тріщин, а також нестабільне формування електронно-променевих швів глибиною понад 60 мм, що супроводжується утворенням кореневих дефектів та раковин [2].

У відомих роботах [1, 3] застосування електронно-променевого зварювання пакетів лопаток обмежувалося загальною товщиною хвостової частини 50...60 мм. Конструкція сучасних парових турбін потребує з'єднання пакетів лопаток з товщиною хвостової частини до 120 мм. Таким чином, розробка технології ЕПЗ товстостінних конструкцій з жароміцної високохромистої сталі є актуальним та затребуваним промисловістю завданням. Метою цієї роботи була оптимізація технології зварювання пакетів лопаток із жароміцної високохромистої сталі мартенситного класу 18X11МФБ-Ш завтовшки 120 мм.

Матеріали та обладнання, які застосовуються при виготовленні пакетів лопаток парових турбін. У цій роботі розглянуто приклад зварювання пакету лопаток з жароміцної високолегованої хромистої сталі марки 18X11МФБ-Ш (ЕП-291). Вона

Нестеренков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7973-1986>, Орса Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-1208-4171>,

Загорніков В.І. – <https://orcid.org/0000-0003-0456-173X>, Русиник М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-7591-7169>

© Ю.В. Орса, В.М. Нестеренков, В.І. Загорніков, М.О. Русиник, 2023

Таблиця. Хімічний склад сталі марки 18Х11МФБ-Ш, мас. %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Nb	V
0,15...0,21	до 0,6	0,6...1,0	0,5...1,0	до 0,025	до 0,03	10...11,5	0,8...1,1	0,2...0,45	0,2...0,4

застосовується для виготовлення робочих і соплових лопаток парових турбін при робочій температурі пари до 600 °С. Хімічний склад сталі представлений у таблиці.

Відомо, що сталь цієї марки важкозварювана, мартенситного класу та вимагає виконання попереднього підігріву. Для забезпечення необхідних службових властивостей отримані зварні з'єднання підлягають обов'язковій термообробці (високий відпуск).

Попередній контроль якості проводився за допомогою дефектоскопа УДМ-3М на частотах 2,5 та 5,0 МГц. Мікроструктуру досліджували за допомогою металографічного мікроскопа марки «NEOPHOT-32» зі збільшенням 20...400. Фотографії виявлених структур були отримані за допомогою цифрової фотокамери «OLYMPUS C-500».

Мікроструктуру досліджували на шліфах завтовшки 23 мм. Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі М-400 фірми LECO при навантаженні 1 кг.

Технологічний процес електронно-променевого зварювання пакету лопаток. Відпрацювання режимів ЕПЗ жароміцної високолегованої хромистої сталі марки 18Х11МФБ-Ш здійснювали на пластинах товщиною 23 і 120 мм, що імітують зварне з'єднання бандажної та хвостової частин пакету лопаток. Роботи виконувались на лабораторній установці типу УЛ-209 конструкції Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона з комп'ютерним управлінням усіма параметрами та системами. Установка УЛ-209 укомплектована енергетичним комплексом на базі ЕЛА-60/30 та електронно-променевою гарматою, що переміщується всередині вакуумної камери вздовж лінійних координат X, Y, Z. При прискорюючій напрузі $U_{пр} = 60$ кВ електронно-променева гармата з металевим вольфрамовим катодом діаметром 3 мм забезпечує діапазон струму електронного пучка $I_n = 0...500$ мА і виконання технологічних розгорток пучка в процесі ЕПЗ (коло, еліпс, штрих) з амплітудою 0...5 мм. Точність позиціонування електронно-променевої гармати становить не менше 0,1 мм. Фокусування електронного променя на поверхні виробу, що зварюється, суміщення його зі стиком та візуалізація процесу ЕПЗ при виконанні технологічних прихваток здійснюється за допомогою системи «РАСТР» у вторинно-емісійному зображенні. При цьому забезпечується точність суміщення не менше 0,1 мм та збільшення об'єкта спостереження у 5 разів.

Якість зварних швів оцінювалася за рівномірністю формування лицьових валиків та наявністю внутрішніх дефектів у шві, що визначалися за допомогою вивчення макро- та мікрошліфів. Для пакетів лопаток кожного типорозміру було розроблено спеціалізоване складально-зварювальне оснащення (рис. 1).

Пакет лопаток 7 встановлюється в корпус оснащення 1 і фіксується в ньому за допомогою закладних планок 2 і затискних болтів 4. Точне позиціонування пакета в корпусі оснащення здійснюється завдяки регульованому упору 5 і притискачам 3.

Конструкція оснащення забезпечує вертикальне розташування площини стику як для бандажної, так і для хвостової частин зібраного під зварювання пакета лопаток. Для фіксації кожного корпусу оснащення на робочому столі зварювальної установки УЛ-209 в заданому положенні використовується перехідна опорна плита 6.

При вертикальному розташуванні корпусу відбувається процес зварювання бандажної частини пакета (рис.1, а). Для з'єднання хвостової частини пакета

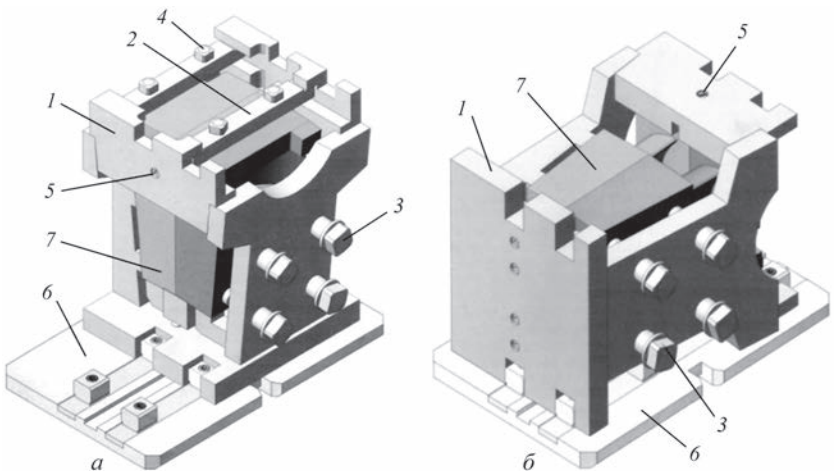


Рис. 1. Пакети лопаток у оснащенні: а – положення для зварювання бандажної частини пакета; б – положення для зварювання хвостової частини пакета

ни пакета лопаток була запропонована технологія ЕПЗ двома швами з обох сторін цієї частини пакета. Зварювання виконувалося таким чином, що другий шов перекривав перший у кореневій частині на 15...20 % по глибині. Цей технологічний прийом забезпечував з'єднання деталей завтовшки 120 мм з відносно невеликим введенням теплової енергії. А це, у свою чергу, дозволило виключити значні поводки виробів, що зварюються, і мінімізувати припуски на їх механічну обробку.

Зварювання товстостінної хвостової частини пакету виконувалося при горизонтальному розташуванні корпусу оснащення (рис 1, б). Для забезпечення якості зварних з'єднань при використанні двостороннього зварювання хвостової частини пакету особливу увагу було приділено отриманню швів із закругленням у корені та відсутністю кореневих дефектів.

Щоб запобігти утворенню несучільностей у металі кореневої частини, шви у поперечному перерізі повинні мати максимально можливий радіус закруглення кореня r_w . Швидкість охолодження металу в корені шва на момент кристалізації становить [5]:

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{T=T_M} \approx -\eta_T \frac{aT_i}{r_w^2},$$

де a – коефіцієнт температуропровідності; η – термічний ККД; T – температура; T_M – температура металу на момент кристалізації; r_w – радіус кореня.

Чим більший r_w , тим повільніше остигають стінки парогазового каналу і краще йде заповнення розплавленим металом кореневої частини шва без утворення дефектів у вигляді порожнеч та несплавень. Для отримання необхідного радіусу в корені шва використовували розгортку електронного променя по колу діаметром 1,2 мм [5, 6]. За один цикл відкачування вакуумної камери установки може виконуватися одночасне ЕПЗ до 12 штук зібраних пакетів лопаток (рис. 2).

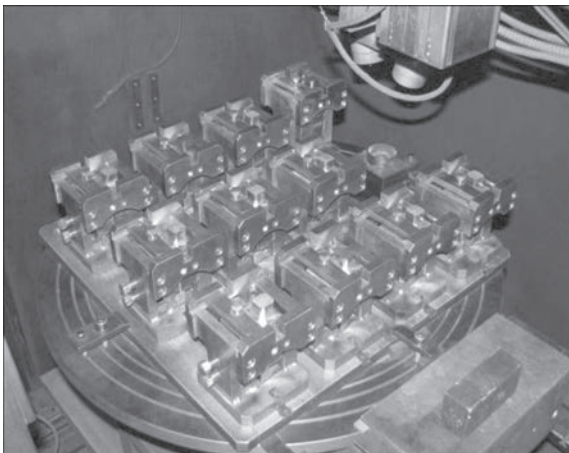


Рис. 2. Набір пакетів лопаток в оснащенні перед виконанням ЕПЗ

На першому етапі виконується зварювання вздовж стику бандажної частини пакета, на другому – хвостової частини з обох боків. Введення та виведення зварювального струму здійснюється на технологічних (вивідних) планках, що видаляються при подальшій механічній обробці пакета.

Особливості ЕПЗ пакетів лопаток парових турбін. Запропоновано технологію ЕПЗ з використанням розгорнутого електронного променя для попереднього локального підігріву зони зварного з'єднання. При підігріві застосовувалася комбінація розфокусованого променя та його осциляції.

Відомо, що при зміні струму фокусування змінюється концентрація електронного променя. Завдяки цьому вдається розширити його діаметр і підвищити стійкість каналу в зварювальній ванні, що сприяє стабільності у формуванні швів. Експериментально встановлено, що при ЕПЗ пакетів лопаток великої товщини розташування фокусу електронного пучка має бути в районі середини глибини проплавлення. Це забезпечує формування проплавів глибиною до 70 мм без виникнення внутрішніх дефектів (рис. 3). Розташування фокусу пучка в нижній третині шва або на рівні кореня призводило до появи корневих дефектів.

Зварювання хвостової частини пакету товщиною до 120 мм виконується з двох сторін зустрічними швами, причому кожний з швів забезпечує проплавлення до 60 % загальної товщини хвостової частини. Величина перекриття при цьому становить приблизно 12...18 мм.

Макрошліф з проплавом зустрічними швами на зразку загальною товщиною 120 мм наведено на рис. 4.

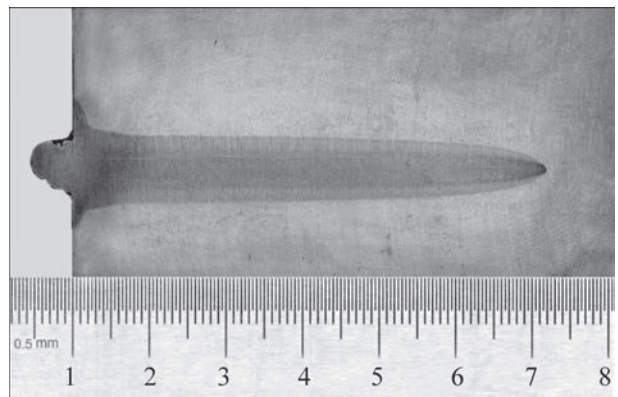


Рис. 3. Макрошліф бездефектного проплаву глибиною 70 мм

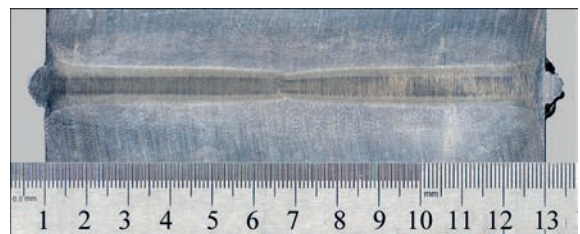


Рис. 4. Макрошліф з проплавом зустрічними швами хвостової частини пакета лопаток товщиною 120 мм

Для запобігання знеміцненню металу зварного з'єднання на ділянці високого відпуску швидкості зварювання слід встановлювати в межах 3...5 мм/с. Відомо, що ширина зони знеміцнення і ступінь знеміцнення зростають зі збільшенням товщини металу, що зварюється, оскільки при цьому зростає тривалість його перебування при температурі високого відпуску на рівні 740...760 °С. Тому режим ЕПЗ повинен забезпечити на товщині 120 мм структуру дрібно-голчастого мартенситу, сприятливу з точки зору підвищення пластичності.

При ЕПЗ хвостової частини пакету із глибиною проплавлення 70 мм оптимальна частота кругової розгортки f становить 100...300 Гц при діаметрі 1,2 мм. Застосування такої розгортки на швидкості 4 мм/с призводить до утворення по осі зварного шва структури рівновісних кристалітів шириною близько 200 мкм. Збільшення ширини зони рівновісних кристалітів до цих розмірів запобігає утворенню гарячих тріщин та ймовірності крихкого руйнування [7]. Зварювання кожного з зустрічних швів виконувалося при струмі електронного променя 320 мА при швидкості зварювання 4 мм/с.

Відповідно до СТП 735.104.-78 при зварюванні бандажних полиць із практично наскрізним проплавленням формування зворотного валика не допускається. Ця вимога виконується при фокусуванні променя на рівні кореневої частини стикового з'єднання та струмі електронного променя 95 мА для встановленої швидкості зварювання 5 мм/с (рис. 5).

Металографічні дослідження зварних з'єднань сталі марки 18X11МНФБ-Ш.

Дослідження показали, що при недостатньому попередньому нагріванні (до 100...150 °С) в металі зварного з'єднання можуть утворюватися тріщини (рис. 6).

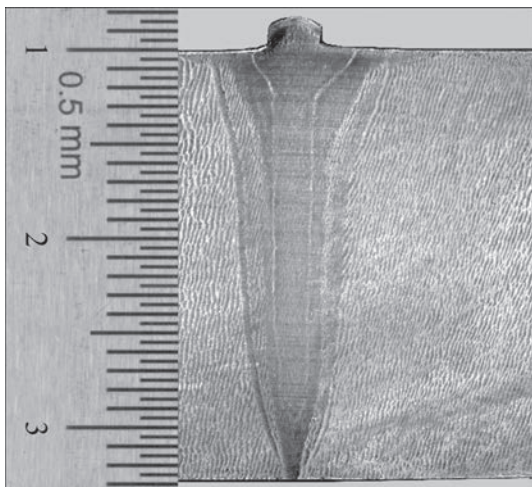


Рис. 5. Макрошліф зварного з'єднання, отриманого на зразку-імітаторі бандажної частини пакету завтовшки 23 мм

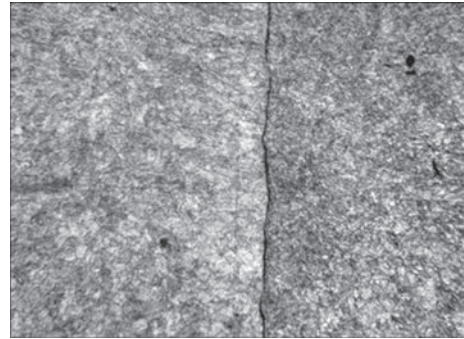


Рис. 6. Тріщина в металі зварного з'єднання, отриманого на сталі марки 18X11МНФБ-Ш, $\times 100$

З урахуванням необхідності забезпечити запас технологічної міцності при розробці технології ЕПЗ, було визначено температуру попереднього підігріву зони зварного з'єднання на рівні 200...250 °С. Температура підігріву контролювали оптичним пірометром з похибкою не більше 1...2 %. Результати досліджень показали, що попередній підігрів до більш високої температури не дає переваги і може призвести до зниження ударної в'язкості та тривалої міцності зварного з'єднання. Це можна пояснити тим, що під час зварювання пакетів лопаток з послідовним накладенням кількох швів введення підігріву $T > 300$ °С знижує швидкість охолодження в інтервалі 890...500 °С і зміщує перетворення в бейнітну область [8, 9]. Останнє неприпустимо, оскільки γ - α перетворення відбувається з утворенням крупно-гольчастої структури бейніту, з низькими пластичними властивостями міцності. Отже, використання температури попереднього підігріву більш ніж $T > 300$ °С супроводжується розміцненням до 10 % при ширині зони до 0,2...0,6 мм, що пов'язано з зростанням кристалітів та супроводжується зниженням тривалої міцності зварного з'єднання.

Для металографічних досліджень були використані два зразки зварного з'єднання. Один зразок був у стані без термообробки (ТО) після зварювання. Другий – після виконання ТО. Ступінь зміцнення або знеміцнення визначалася у відсотках до значень твердості основного металу поза зоною термічного впливу. Залежність форми шва від параметрів ЕПЗ вивчалася на поперечних макрошліфах, вирізаних зі зразків після їх зварювання.

При візуальному огляді та огляді на мікроскопі при невеликому збільшенні встановлено, що метал шва зразка без термообробки має щільну структуру без видимих дефектів (пор, тріщин). Зона термічного впливу (ЗТВ) симетрична відносно осі шва. В корені шва ширина ЗТВ становить близько 0,5 мм. Далі, ближче до верхньої частини шва вона поступово збільшується до 2 мм. Стовбчасті кристаліти у шві зростають від лінії сплавлення до центру шва під прямим кутом до лінії сплав-

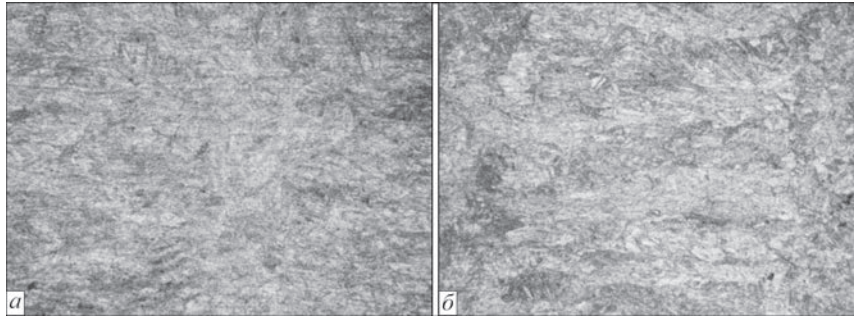


Рис. 7. Макроструктура ($\times 200$) центральної частини шва: а – без ТО; б – з ТО

лення, де стикаються у центральній частині шва та утворюють невелику область комірчастої литої структури завширшки 0,2 мм. У верхній частині шва кристаліти розходяться віялом від верхньої кромки шва. Мікроструктура шва зразка без термообробки являє собою суміш дрібногольчастого мартенситу, мінімальної кількості δ -фериту (біля 1,0...1,5 %), карбідів та інтерметалідів, склад яких можна визначити лише за допомогою електронного мікроскопа. Максимальна твердість спостерігалася на лінії сплавлення і досягала $453HV_1$.

ЗТВ представлена дисперсною сорбітною структурою з виділенням карбідів та інтерметалідів (рис. 7, а). Мікроструктура основного металу (ОМ) являє собою феритну матрицю з виділеннями карбідів та інтерметалідів.

Зразок, що піддавався термообробці після зварювання, має мікроструктуру шва, яка складається

ся з відпущеного мартенситу з твердістю HV_1 – 343...363 кгс/мм², також з невеликою кількістю δ -фериту (1,0...1,5 %), карбідів та інтерметалідів (рис. 7, б). Мікроструктура ЗТВ складається з сорбіту, карбідів та інтерметалідів. Структура ОМ після термообробки не зазнала істотних змін і являє собою феритну основу з виділеннями карбідів та інтерметалідів.

Враховуючи підвищену схильність до крихкого руйнування жароміцних сталей мартенситного класу після зварювання, пакети лопаток після ЕПЗ піддаються термічній обробці для зняття внутрішніх напружень та формування структури з необхідними механічними властивостями.

Режим відпуску пакетів лопаток був наступний: температура електропечі під час завантаження $T \leq 200$ °С. Нагрів ступінчастий з витримкою при температурі: 1 ст. 200 °С – 2 год.; 2 ст. 400 °С – 2 год.; 3 ст. 600 °С – 2 год. 30 хв. Температура відпуску становить 680..700 °С, витримка – 4...5 год.

Були проведені порівняльні вимірювання твердості зварних з'єднань сталі 18Х11МНФБ-Ш в стані після ЕПЗ та подальшого високого відпуску (рис. 8).

Вибір оптимального режиму термічної обробки проведено на підставі результатів вимірювань твердості зварних з'єднань (у металі шва та ЗТВ). Після виконання високого відпуску перепад за твердістю металу шва з основним металом не перевищував 20 %, максимальна твердість металу шва не перевищувала $350HV_1$. При цьому знеміцнення металу ЗТВ майже не спостерігалось.

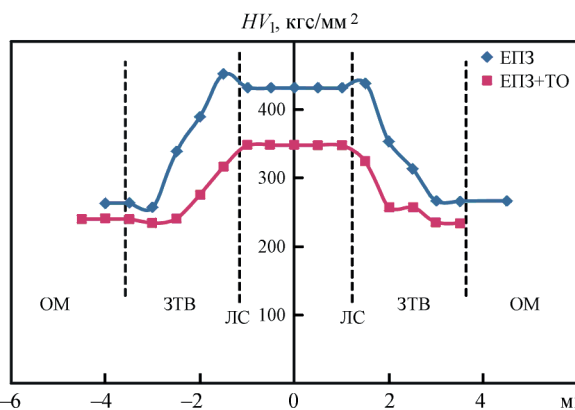


Рис. 8. Графік розподілу твердості у зварному з'єднанні сталі 18Х11МНФБ-Ш

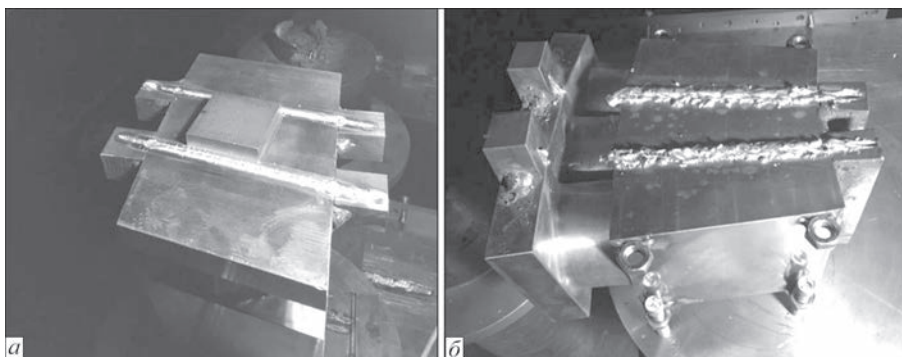


Рис. 9. Зовнішній вигляд пакету лопаток з товщиною хвостової частини 120мм, виготовлений за допомогою ЕПЗ: а – вигляд бандажної частини пакету; б – вигляд хвостової частини пакету

Після отримання оптимальних режимів як ЕПЗ, так і термообробки, було виготовлено дослідну партію товстостінних експериментальних пакетів робочих та замкових лопаток турбіни (рис. 9).

Висновки

1. Оптимальний термічний цикл при ЕПЗ високохромистої мартенситної сталі марки 18X11МНФБ-Ш забезпечується при зварюванні з попереднім підігрівом на швидкостях 3...5 мм/с, що дає можливість отримати більш високі пластичні властивості зварних з'єднань. Було визначено температуру попереднього підігріву зони зварного з'єднання перед ЕПЗ на рівні 200...250 °С.

2. Запропонований та експериментально перевірений спосіб двостороннього зварювання пакетів лопаток парових турбін з товщиною хвостової частини 120 мм зі сталі 18X11МНФБ-Ш дозволяє запобігти знеміцненню та утворенню холодних тріщин і корневих дефектів у зоні шва, практично забезпечуючи рівномірність отриманого зварного з'єднання.

3. Результати відпрацювання технології ЕПЗ товстостінних конструкцій з жароміцної високолегованої хромистої сталі дозволяють рекомендувати її для промислового виробництва пакетів лопаток сучасних парових турбін. Розроблені складально-зварювальні пристосування та технологія зварювання були застосовані при виготовленні дослідно-промислової партії пакетів робочих та замкових лопаток в кількості 76 штук за замовленням АТ «Полтавський турбомеханічний завод».

Список літератури

1. Хейфец М.Л., Бородавко В.И., Пынькин А.М. и др. (2018) Технологический процесс электронно-лучевой сварки пакета лопаток паровых турбин. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, **3**, 9–13.
2. Шоршоров М.Х. (1965) *Металловедение сварки сталей и сплавов титана*. Москва, Наука.
3. Бородавко, В.И., Вабищевич, П.А., Грецкий Н.Л. и др. (2017) Применение электронно-лучевой сварки при изго-

товлении пакета лопаток паровых турбин. *Инженер-механик*, **2**(75), 27–30.

4. Nesterenkov, V.M., Nazarenko, O.K., Akopyants, K.S. (1998) Closing of circumferential welds of thick steels. *6-th International conference on welding and melting by electron and laser beams, Cissfel 6, France, Toulon, 15–19 June 1998*, 623–630.
5. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А. (1981) Выбор параметров вращения пучка по окружности и их влияние на геометрию шва при электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, **10**, 25–28.
6. Нестеренков В.М. (2003) Применение сканирующего сварочного электронного луча для устранения корневых дефектов на сталях большой толщины. *Там же*, **9**, 7–12.
7. Голиков И.В., Масленков С.Б. (1977) *Дендритная ликвация в сталях и сплавах*. Москва, Металлургия.
8. Шилов Г.А. (1984) *Электронно-лучевая сварка пакетов крупногабаритных лопаток из высокохромистых мартенситных сталей*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев.
9. Шилов Г.А., Сидорский Н.А. (1978) Влияние параметров сварки и фокусировки электронного пучка на формирование вертикальных швов при сварке без подкладок. *Автоматическая сварка*, **11**, 37–40.

References

1. Kheifets, M.L., Borodavko, V.I., Pynkin, A.M. et al. (2018) Technological process of electron beam welding of steam turbine blade package. *Naukoyomkie Tekhnologii v Mashinostroenii*, **3**, 9–13 [in Russian].
2. Shorshorov, M.Kh. (1965) Physical metallurgy of welding of steels and titanium alloys. Moscow, Nauka [in Russian].
3. Borodavko, V.I., Vabishchevich, P.A., Gretskey, N.L. et al. (2017) Application of electron beam welding in producing of steam turbine blade package. *Inzhener-Mekhanik*, **2**(75), 27–30 [in Russian].
4. Nesterenkov, V.M., Nazarenko, O.K., Akopyants, K.S. (1998) Closing of circumferential welds of thick steels. In: *6-th Int. Conf. on Welding and Melting by Electron and Laser Beams, Cissfel 6* (France, Toulon, 15–19 June 1998), 623–630.
5. Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A. (1981) Selection of parameters of circular beam rotation. *Avtomatich. Svarka*, **10**, 25–28 [in Russian].
6. Nesterenkov, V.M. (2003) Application of scanning electron beam for welding to prevent root defects in thick steels. *The Paton Welding J.*, **9**, 5–10.
7. Golikov, I.V., Maslenkov, S.B. (1977) *Dendritic segregation in steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Shilov, G.A. (1984) *Electron beam welding of large-sized blade packages from high-chromium martensitic steels*. In: Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kyiv [in Russian].
9. Shilov, G.A., Sidorsky, N.A. (1978) Influence of welding parameters and electron beam focusing on formation of vertical welds in welding without backing. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 37–40 [in Russian].

USE OF ELECTRON BEAM WELDING FOR MANUFACTURE OF BLADE PACKAGES FOR COGENERATION STEAM TURBINES

Yu.V. Orsa, V.M. Nesterenkov, V.I. Zagornikov, M.O. Rusynyk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: zagora1954@gmail.com

Industrial technology for manufacturing blade packages of steam turbines from heat-resistant high-alloy steel of martensitic grade 18Kh11MNFb-Sh was offered. A technological process was introduced into the experimental production, which allowed solving the problem of welding blade packages of 120 mm thickness. The technological equipment was developed required for positioning package parts in the process of assembly and welding. The results of experimental studies of weldability of heat-resistant steel of martensitic grade by electron beam were presented. It was established that preheating of blade packages up to 200...250 °C using the defocused electron beam in the vacuum chamber allows obtaining higher ductile properties of welded joints. The required parameters of heat treatment modes after welding were indicated in order to remove inner stresses and provide the necessary mechanical properties of a product. 9 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: blade package, heat-resistant steel, electron beam welding, heat treatment

Надійшла до редакції 20.04.2023