

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ НА СКЛОННОСТЬ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС32 К ОБРАЗОВАНИЮ ТРЕЩИН

К. А. ЮЩЕНКО, А. В. ЯРОВИЦЫН, Н. О. ЧЕРВЯКОВ

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проанализирован технологический опыт ИЭС им. Е. О. Патона в области разработки наплавочных технологий серийного ремонта кромок лопаток авиационных ГТД из никелевых жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией ЖС26 и ЖС32 на основе микроплазменной порошковой наплавки. Показано, что величина погонной энергии при однослойной или многослойной наплавке на сварочном токе до 40 А может достаточно однозначно определять склонность к образованию трещин в соединениях «основной–наплавленный металл». Установлены диапазоны значений суммарных погонных тепловложений, при которых с высокой вероятностью наблюдается отсутствие или наличие трещин – или горячих, или повторного нагрева. Библиогр. 18, рис. 7.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, микроплазменная порошковая наплавка, свариваемость, склонность к образованию трещин, эффективная тепловая мощность дуги, погонная энергия, суммарные погонные тепловложения

Никелевые жаропрочные сплавы ЖС26 и ЖС32 с направленной и монокристаллической структурой, содержащие 60 об. % и более упрочняющей γ' -фазы, применяются в ряде современных авиационных двигателей в качестве материалов литых рабочих лопаток турбины высокого и среднего давления [1, 2]. Их уплотнительные и антивибрационные элементы, работающие при температуре более 900 °С, в первую очередь изнашиваются и повреждаются в процессе эксплуатации. При продлении ресурса авиационного двигателя разработка технологий восстановления кромок рабочих лопаток наплавкой ввиду значительной их стоимости уже длительное время является весьма актуальной [3–9].

Ранее данные никелевые жаропрочные сплавы ввиду высокого содержания упрочняющей γ' -фазы считались несвариваемыми из-за высокой склонности к образованию горячих трещин при применении присадочного материала, идентичного по химическому составу и уровню жаропрочности основному металлу.

Возникновение горячих трещин в наплавленном металле и ЗТВ основного металла с аустенитной структурой обусловлено превышением деформаций, развивающихся при охлаждении сварного соединения или под действием извне, пластичности металла в определенной его зоне [10]. В сплаве ЖС32 при $T = 20 \dots 1100$ °С модуль упругости Юнга E снижается от 140 до 90 ГПа, а термический коэффициент линейного расширения α возрастает в интервале $(1,1 \dots 2,4) \cdot 10^{-5}$ 1/°С

[11]. Ввиду известной пропорциональности деформаций твердых тел в процессе нагрева производению $E\alpha T$ [12] можно полагать, что высокие значения темпа нарастания растягивающих деформаций при охлаждении сварных соединений с участием сплава ЖС32 обусловлены соответствующим сочетанием указанных физико-механических свойств данного материала при высокой температуре. Считается, что одним из наиболее эффективных технологических приемов предотвращения возникновения трещин при сварке плавлением никелевых жаропрочных сплавов является снижение тепловложений в изделие [13], что в большинстве случаев достигается за счет ограничения силы сварочного тока.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан процесс микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32, который в настоящее время применяется для серийного ремонта рабочих лопаток из сплавов ЖС26 и ЖС32 [5–9].

Особенностью данного процесса является оперативное управление сварочным током в диапазоне 2...35 А, скоростью наплавки в диапазоне 0,2...3,0 м/ч и количеством присадочного порошка в пределах 0,5...5,0 г/мин в зависимости от толщины наплавляемой кромки лопатки и требуемого сечения валика [5–9]. Необходимое сечение наплавленного валика определяется глубиной износа или повреждений кромки лопатки (рис. 1) и может быть обеспечено за один [5–7] или несколько [8, 9] слоев восстановительной наплавки.

В опубликованных ранее работах [5–9] основное внимание уделялось фиксации

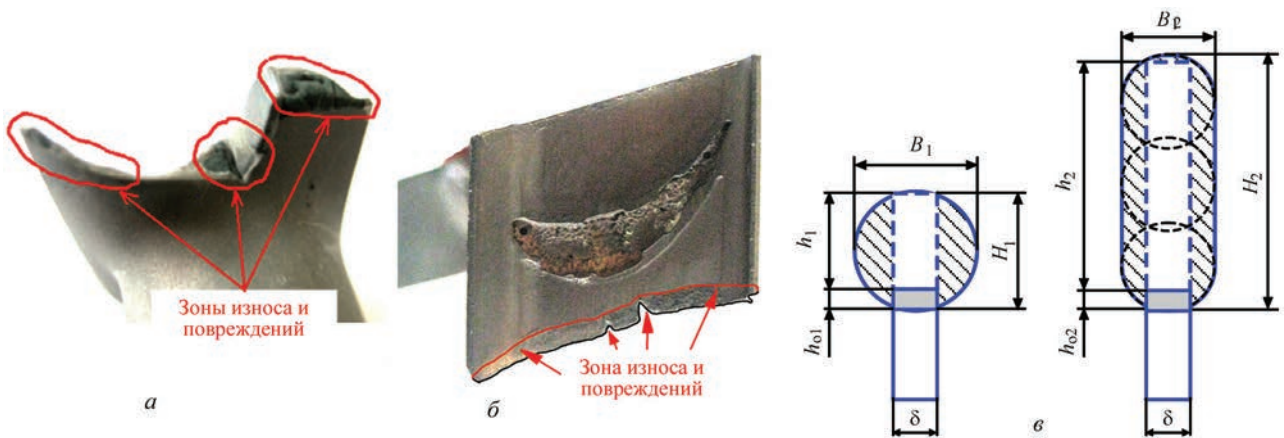


Рис. 1. Внешний вид удаляемой зоны износа, повреждений на кромках лопаток авиационных ГТД (а, б) и схема распределения основного и наплавленного металла в поперечных сечениях валика при их однослойной ($h_1 \leq 4$ мм) и многослойной ($h_1 > 4$ мм) восстановительной наплавке (в) (δ — толщина кромки лопатки; h_{o1} , h_{o2} — глубина проплавления основного металла; H_1 , H_2 — высота наплавленного валика; h_1 , h_2 — эффективная высота наплавленного валика; B_1 , B_2 — ширина наплавленного валика)

дельных режимов микроплазменной наплавки, при которых в сплавах ЖС26 и ЖС32 их склонность к образованию трещин при сварке плавлением и последующей термической обработке не проявлялась.

В последнее время актуально освоение многослойной наплавки сплава ЖС32 ввиду расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей и увеличения зон эксплуатационных повреждений [8, 9]. В связи с этим целью данной работы является оценка технологических диапазонов режимов микроплазменной порошковой наплавки с точки зрения стойкости к образованию трещин в сварном соединении «основной–наплавленный металл» в системах ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32 — как горячих в процессе сварки плавлением, так и возникающих при последующей их термической обработке.

Ряд ведущих западных исследователей характеризует сварочные процессы по положению областей склонности и несклонности к образованию трещин в соответствующих сварных соединениях никелевых жаропрочных сплавов в зависимости от величины тепловложений и скорости сварки [14]. Попыток подобного анализа для рассматриваемых сплавов и процесса микроплазменной порошковой наплавки еще не проводилось.

В нашем случае в качестве анализируемых обобщенных показателей его режимов были выбраны:

- эффективная тепловая мощность дуги $q_{и}$, характеризующая удельную мощность теплового потока микроплазменной дуги в анод в единицу времени, и в первую очередь зависящая от значения силы сварочного тока [5, 15];

- погонные тепловложения в изделие, характеризующие среднее количество внесенного тепла на 1 мм длины наплавленного валика и, в частности, обусловленные длительностью существова-

ния металла сварочной ванны в расплавленном состоянии [16, 17].

При однослойной наплавке они соответствуют погонной энергии $q_{и}/v$ (с учетом эффективного КПД нагрева изделия); при многослойной наплавке определяются суммой погонных энергий при наплавке каждого слоя $\Sigma Q_{г}/L$.

Результаты получены в процессе отработки и освоения промышленных технологий ремонта микроплазменной порошковой наплавкой кромок рабочих лопаток из сплавов ЖС26 и ЖС32 с наработкой до 3...6 тыс. ч, в частности, на авиационном двигателе Д18Т [6, 7]. При этом в случае многослойной наплавки промежуточные термические обработки для релаксации сварочных напряжений после наплавки каждого слоя либо не проводились [8], либо ввиду технологических требований ограничивались режимом 1050 °С (2,5 ч) [6, 7]. При таких режимах термической обработки растворимость γ' -фазы в сплаве ЖС32 не превышает 50 % [18]. Поэтому считается, что они не оказывают значительного релаксирующего эффекта на накопленные сварочные напряжения и деформации в отличие от полного $\gamma + \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$ -превращения в процессе гомогенизации никелевых жаропрочных сплавов ЖС26 и ЖС32.

Статистические данные по режимам микроплазменной порошковой наплавки собирались в ходе регистрации ее электрических параметров и их последующей обработки по методике работы [16]. В диапазоне токов 5...40 А определялись усредненные энергетические показатели режимов наплавки [15, 16]: эффективной тепловой мощности дуги $q_{и}$ и погонной энергии $q_{и}/v$. Используемая методика через зависимость $q_{и}(I)$ позволяла учитывать импульсные режимы сварочного тока с различной формой импульса и скважностью, а также степень сжатия микроплазменной дуги, обусловленную диаметрами каналов плаз-

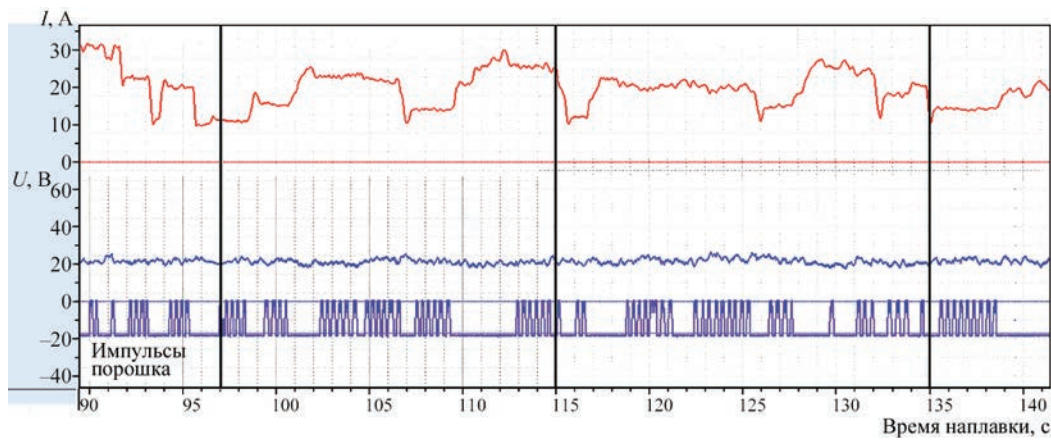


Рис. 2. Фрагмент регистрации параметров режима наплавки торцевой поверхности верхней бандажной полки рабочей лопатки ТСД из сплава ЖС26



Рис. 3. Внешний вид рабочих лопаток авиационных ГТД, восстановленных микроплазменной порошковой наплавкой сплава ЖС32: *а* — рабочая лопатка ТВД, сплав ЖС32, двигатель Д18Т [6]; *б* — рабочая лопатка ТСД, сплав ЖС26, двигатель Д18Т [7]; *в* — небандажированная рабочая лопатка ТВД с внутренней газоохлаждаемой полостью [8]

менного и фокусирующего сопел микроплазмотрона и составом защитного газа в системе $Ar + (0...10)\% H_2$. При этом анализировался процесс наплавки (рис. 2) либо непосредственно опытных и опытно-промышленных партий лопаток авиационных ГТД (рис. 3), либо процесс наплавки образцов в виде узкой подложки [15] шириной до 5 мм, имитирующих реальные режимы восстановления кромок лопаток (рис. 4). В некоторых случаях (см. рис. 4, *а*) такие образцы в дальнейшем использовались для оценки уровня жаропрочности сварного соединения «основной–наплавленный металл» сплава ЖС32 [6].

Анализируемые значения погонных тепловложений в изделие в рассматриваемых сварных соединениях соотносились с технологической прочностью по критерию склонности к образованию трещин в соединении «основной–наплавленный металл» систем никелевых жаропрочных сплавов ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32. Нарушения технологической прочности соответствующего соединения либо не проявлялись в процессе сварки плавлением и при последующей их термической обработке (рис. 5), либо в определенных условиях проявлялись с высокой вероятностью в виде макро- и микротрещин при сварке плавлением и/или при последующей термической обработке наплавленных деталей (рис. 6). Макротрещины выявлялись визуально или капиллярным контролем,

микротрещины — металлографическим анализом продольных сечений соединения «основной–наплавленный металл» при увеличении $\times 50...200$.

Статистический анализ показал, что для микроплазменной порошковой наплавки значение эффективной тепловой мощности дуги в диапазоне менее 650 Вт, соответственно и значе-

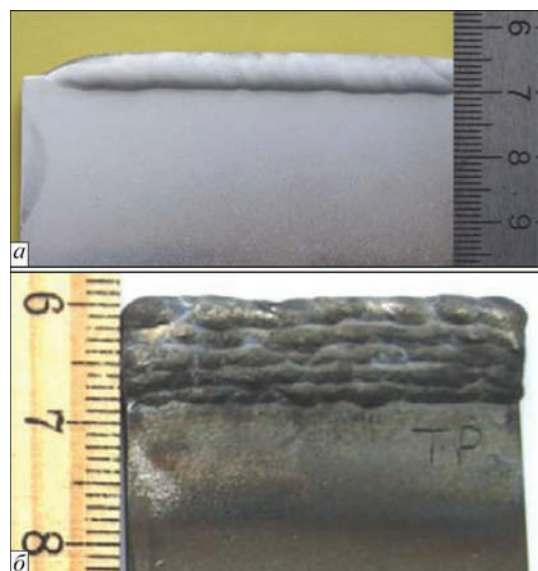


Рис. 4. Внешний вид образцов из сплава ЖС32, имитирующих восстановительную наплавку кромок лопаток авиационных ГТД: *а* — однослойная наплавка на узкую подложку шириной 3,5 мм; *б* — пятислойная наплавка на узкую подложку шириной 2,5 мм

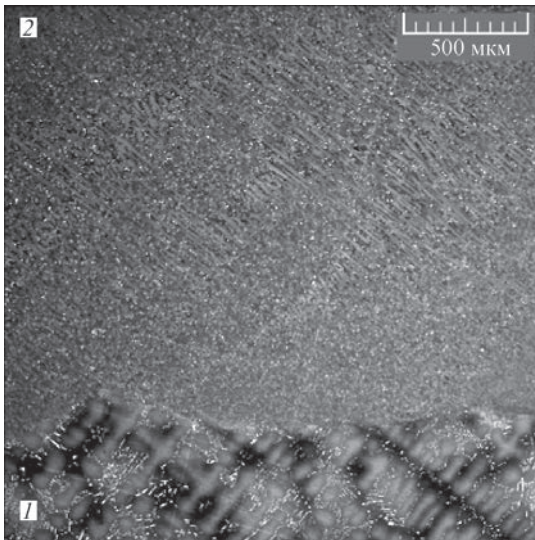


Рис. 5. Пример качественной микроструктуры соединения «основной (1) – наплавленный (2) металл» системы ЖС32-ЖС32, район линии сплавления, РЭМ

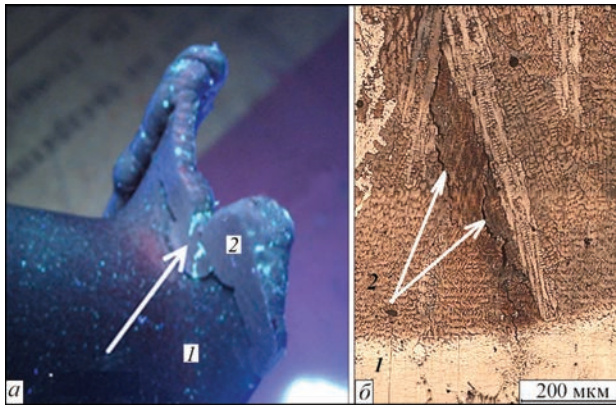


Рис. 6. Примеры внешнего вида макро- и микротрещин (указаны стрелками) в соединении «основной (1) – наплавленный (2) металл», выявленных в процессе отработки технологии микроплазменной порошковой наплавки рабочей лопатки ТСД авиационного двигателя Д18Т (сплав ЖС26): а — при капиллярном контроле; б — при металлографическом контроле (оптическая микроскопия)

ние сварочного тока до 30...40 А включительно, нельзя однозначно считать технологическим параметром, полностью определяющим склонность к образованию трещин в соединениях «основной–наплавленный металл» на узкой подложке шириной 1...5 мм. Возможны как нарушения технологической прочности в диапазоне значений $q_{и} = 150...450$ Вт, так и получение соответствующих сварных соединений без образования трещин при $q_{и} \approx 600$ Вт.

В то же время величина суммарных погонных тепловложений $\Sigma Q_{\Sigma}/L$ (рис. 7) уже достаточно однозначно характеризует вероятность образования трещин в рассматриваемых соединениях «основной–наплавленный металл» систем ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32. Граница между зонами, где технологическая прочность соответствующих соединений с высокой вероятностью обеспечивается

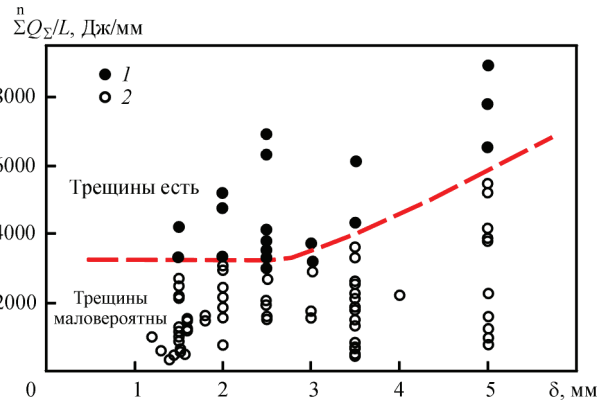


Рис. 7. Зависимость проявления (1) и не проявления (2) склонности к образованию трещин в соединении «основной–наплавленный металл» систем ЖС26–ЖС32 и ЖС32–ЖС32 от величины суммарных погонных тепловложений $\Sigma Q_{\Sigma}/L$ и ширины узкой подложки δ

или не обеспечивается, проходит в зависимости от ширины узкой подложки $\delta = 1...5$ мм при $\Sigma Q_{\Sigma}/L = 3200...4200$ Дж/мм. В дальнейшем уровень предельно допустимых погонных тепловложений для серийного ремонта следует дополнительно уточнять в зависимости от степени воздействия ряда технологических факторов: состояния основного металла; высоты наплавленного валика и количества его слоев; начальной температуры соединения перед наплавкой последующего слоя и прочих.

Экспериментально установлено, что при однослойной и многослойной микроплазменной порошковой наплавке на узкую подложку шириной 1...5 мм в технологическом диапазоне параметров режимов, характеризующемся $I \leq 40$ А, $q_{и} \leq 650$ Вт и $\Sigma Q_{\Sigma}/L \leq 3000...4000$ Дж/мм, в зоне термического влияния наплавленного валика темп нарастания растягивающих деформаций при охлаждении сварного соединения, как правило, не превышает критических значений предельно допустимой деформации для сплавов ЖС26 и ЖС32.

Таким образом показано, что эффективная тепловая мощность дуги и значение сварочного тока в диапазоне до 40 А с точки зрения проявления склонности рассматриваемых никелевых жаропрочных сплавов с направленной кристаллизацией к образованию трещин при сварке плавлением играют значительно меньшую роль, чем представлялось ранее. В частности, это подтверждается возможностью выполнения качественных наплавов при изменении силы сварочного тока в 2-3 раза на протяжении достаточно длительного промежутка времени (см. рис. 2). Более корректно считать, что влияние силы тока и эффективной тепловой мощности дуги проявляется опосредованно через величину суммарных погонных тепловложений наряду со скоростью наплавки и количеством слоев наплавленного металла.

Выводы

1. Для условий микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку шириной 1...5 мм ограниченно свариваемого никелевого жаропрочного сплава ЖС32 проанализирован технологический диапазон энергетических показателей режимов наплавки, используемых для восстановления кромок лопаток авиационных ГТД, обеспечивающих отсутствие горячих трещин или трещин повторно-го нагрева.

2. Впервые установлена граница между технологическими диапазонами режимов наплавки, где наблюдается отсутствие или наличие трещин, в том числе горячих в процессе сварки плавлением. Ее положение в зависимости от ширины узкой подложки характеризуется величиной суммарных погонных тепловложений 3200...4200 Дж/мм.

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки турбины. Ч. II. / В. А. Богуслаев и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2003. – 420 с.
2. Мелехов Р. К., Похмурский В. И. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості. Деградація. – К.: Наукова думка, 2003. – 384 с.
3. Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД / Г. И. Пейчев и др. // Технологические системы. – 2000. – № 3. – С. 40–42.
4. Петрик И. А., Перемиловский И. А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов // Там же. – 2001. – № 3. – С. 90–92.
5. Яровицын О. В. Мікроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ' -фази 45...65 %: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології». – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009. – 21 с.
6. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К. А. Ющенко и др. // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
7. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»: зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2012. – С. 506–509.
8. Разработка технологии микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32 для восстановления газоохладяемых рабочих лопаток авиационной турбины высокого давления / К. А. Ющенко и др. // Там же. – 2016. – С. 696–701.
9. 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 // Автоматическая сварка. – 2015. – № 8. – С. 43–46.

10. Destructive tests on welds in metallic materials – Hot cracking tests for weldments – Arc welding processes. – Part 1: General: ISO 17641-1:2004 – 12 p.
11. Будиновский С. А., Каблов Е. Н., Мубояджан С. А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии», 2011. – С. 26–37.
12. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений: пер. с англ.; под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Мир, 1964. – 518 с.
13. Сварка. Резка. Контроль: справочник: в 2 т; под общ. ред. Н. П. Алешина и Г. Г. Чернышева. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
14. DuPont J. N., Lippold J. C., Kisser S. D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009 – 455 p.
15. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. – К.: Екотехнологія, 2007. – 292 с.
16. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5-6. – С. 18–25.
17. Ющенко К. А., Яровицын А. В., Червяков Н. О. Закономерности дискретно-аддитивного формирования микроразмеров кристаллизующегося металла при многослойной микроплазменной порошковой наплавке никелевых сплавов // Там же. – 2016. – № 5-6. – С. 154–161.
18. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина; под ред. Е. Каблова. – М.: Наука, 2006. – 272 с.

К. А. Ющенко, О. В. Яровицын, М. О. Черв'яков

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

**ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ
МІКРОПЛАЗМОВОГО ПОРОШКОВОГО
НАПЛАВЛЕННЯ НА СХИЛЬНІСТЬ НІКЕЛЕВОГО
СПЛАВУ ЖС32 ДО УТВОРЕННЯ ТРІЩИН**

Проаналізовано технологічний досвід ІЕЗ ім. Є. О. Патона в області розробки технологій мікроплазмового порошкового наплавлення для серійного ремонту кромок лопаток авіаційних ГТД з нікелевих жароміцних сплавів ЖС26 та ЖС32 з направленою кристалізацією. Показано, що величина погонної енергії при одношаровому або сума погонних енергій при багатшаровому наплавленні на зварювальному струмі до 40 А може достатньо надійно визначати схильність до утворення тріщин у з'єднаннях «основний–наплавлений метал». Встановлено діапазони значень сумарних погонних тепловкладень, при яких з високою ймовірністю спостерігається відсутність або наявність у відповідних зварних з'єднаннях тріщин — або горячих, або повторного нагріву. Бібліогр. 18, рис. 7.

Ключові слова: нікелеві жароміцні сплави, мікроплазмове порошкове наплавлення, зварюваність, схильність до утворення тріщин, ефективна теплова потужність дуги, погонна енергія, сумарні погонні тепловкладення

Поступила в редакцію 01.08.2016