

РЕМОНТНАЯ НАПЛАВКА ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ДЕФЕКТАМИ И ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

К.А. Ющенко¹, И.С. Гах¹, Б.А. Задерий¹, А.В. Звягинцева¹, О.П. Карасевская²

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины.

03142, г. Киев, бульв. Академика Вернадского, 36. E-mail: Karas@imp.kiev.ua

На основе изучения натуральных лопаток газовых турбин после изготовления и эксплуатации определены основные типы дефектов и повреждений. Большая часть дефектов расположена на поверхности. Показана возможность выполнения операций по их устранению путем электронно-лучевой наплавки с присадкой того же состава, что и лопатка. Установлена связь температурно-временных параметров формирования ремонтных швов, их размеров и геометрии. Определены технологические схемы обеспечения температурно-временных и кристаллографических ориентационных условий сохранения монокристаллической структуры при ремонте лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. Изучены особенности формирования сварных швов, их структура в зависимости от технологических параметров процесса электронно-лучевой наплавки. Разработаны и опробованы способы практической реализации полученных результатов при ремонте участков лопаток разной кристаллографической ориентации. Приведены примеры ремонта лопаток со структурными дефектами поверхности пера и повреждениями кромок, при которых обеспечивается восстановление исходной геометрии, кристаллографической ориентации и монокристаллической структуры. Библиогр. 26, рис. 9.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, газовые турбины, лопатки, жаропрочные никелевые сплавы, дефекты и повреждения, восстановление, монокристаллическая структура

Рабочие лопатки газовой турбины авиационного двигателя являются наиболее нагруженными элементами горячего тракта, отвечающие за эксплуатационные характеристики, ресурс и надежность силовой установки в целом [1, 2]. Это обуславливает высокие требования к материалам, из которых они изготавливаются, к их составу и качеству структуры. В настоящее время больше всего отвечают этим требованиям высоколегированные никелевые сплавы с монокристаллической структурой. Однако экстремальные условия работы лопаток обуславливают значительную степень эрозионного повреждения, что существенно снижает силовые, экономические и др. характеристики двигателя, в том числе безопасность и надежность его работы. Весьма критичны в этом отношении и дефекты структуры, которые могут возникать в процессе выращивания монокристаллических лопаток вследствие нарушения условий направленной кристаллизации.

Анализ статистических данных производства и эксплуатационных повреждений монокристаллических лопаток показывает [2–5], что большая их часть приходится на поверхность. К эксплуатационным дефектам относят механические повреждения и эрозию, поверхностные трещины термической усталости кромок пера лопатки, уплотнителей бандажных полок; к производственным — раковины и зерна на поверхности пера глубиной 150...500 мкм, струйная ликвация, выде-

ление карбидов. Общим признаком дефектов является их поверхностное расположение и глубина залегания до 500 мкм.

Учитывая всевозрастающий объем производства и применения лопаток с направленной и монокристаллической структурой из жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) в современных газовых турбинах, высокую себестоимость, значительный процент брака (до 30...70 %) при их изготовлении и повреждения в процессе эксплуатации, а также необходимость продления ресурса двигателей, становится очевидной актуальность ремонта.

Основным вопросом, кроме восстановления геометрии поверхности, является обеспечение монокристаллической структуры и исходной кристаллографической ориентации металла швов в области ремонта. Применение сварки плавлением при ремонте лопаток с поликристаллической структурой [6–10] позволяет решать соответствующие задачи ряда авиационно-ремонтных предприятий. Применение же ее для ремонта лопаток с монокристаллической структурой сдерживается ввиду особенности структуры и эксплуатационными требованиями.

Анализ условий формирования монокристаллической структуры сварных швов ЖНС [11–15], показал, что наиболее существенным при ремонте лопаток является обеспечение высокого температурного градиента на фронте роста и плоского ма-

крофронта при кристаллизации. Конструктивные и геометрические особенности лопатки, толщины сечения металла в месте ремонта накладывает определенные трудности. При этом возникают вопросы не только выбора способа и режимов сварки, вида присадочного материала и способа его подачи в сварочную ванну, но и обеспечение управляемого тепловложения.

Способ сварки для выполнения ремонта.

Для осуществления ремонта лопаток с поликристаллической структурой ЖНС используют такие методы сварки с присадкой как аргонодуговая, микроплазменная, лазерная, электронно-лучевая [6–10]. Каждый из них имеет свои особенности, которые определяют ограничение их применения при ремонте лопаток с монокристаллической структурой.

Аргонодуговой и микроплазменные методы ограничены сложностью прецизионного управления термическими циклами, ограничением перегрева основного и наплавляемого металла при формировании монокристаллической структуры. Кроме того, основные легирующие ЖНС, особенно γ' -образующие элементы алюминий и титан, увеличивают вероятность образования горячих трещин при сварке плавлением [15–20]. Недостаточная защита расплава ванны приводит к окислению и образованию тугоплавких оксидов [20, 21]. Последние не только затрудняют формирование монокристаллической структуры наплавки, но и могут служить центрами кристаллизации зерен случайной ориентации (ЗСО), что является браковочным признаком [13, 22, 23]. Особенно неприемлемым является обогащение кислородом сварочной ванны за счет:

- окисления поверхности ванны;
- наличия примесей в присадочном материале;
- наличия остаточного кислорода в газовой защитной атмосфере, в том числе и при нарушении ламинарности истечения потока защитного газа.

Применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в среде высокого вакуума рабочей камеры ($10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст.) исключает эти проблемы. При выборе способа сварки исходили из возможности соблюдения при наплавке кристаллографической ориентации [12–15], температурно-временных [11] и температурно-пространственных условий направленной кристаллизации. Учитывалось, что в общем случае при сварке имеет место неравновесность и неравномерность этих условий как по времени, так и по сечению сварного соединения, которые усиливаются сложной, переменной геометрией, толщиной, и кристаллографией ремонтируемого участка. Поэтому основное внимание было уделено энергетическим и техно-

логическим характеристикам способа сварки, с помощью которых можно было ограничить отрицательное влияние указанных выше факторов.

Способ ЭЛС позволяет в широком диапазоне управлять основными структуроопределяющими параметрами кристаллизации сварочной ванны:

- температурой и временем существования расплава;
- геометрией макрофронта затвердевания;
- температурно-временными параметрами на фронте кристаллизации.

Это позволило достичь измельчения дендритов, а также γ' -фазы, карбидов, оптимизировать их морфологию, уменьшить дендритную ликвицию. Такая структура способствует улучшению как механических свойств, так и эксплуатационных характеристик при сохранении кристаллографической ориентации монокристаллов.

Наплавочный материал. Для обеспечения механических свойств и эксплуатационных характеристик изделий при ремонтных работах, кроме обеспечения температурно-временных и ориентационных условий формирования монокристаллической структуры наплавки, необходимо соответствие химического состава наплавленного и основного металла. В связи с тем, что изготовление проволочного присадочного материала из ЖНС с содержанием более чем 60 % упрочняющей γ' -фазы из-за высокой прочности и низкой пластичности проблематично, рассматривалась возможность применения порошковых и прутковых материалов.

В качестве одного из лучших вариантов подачи порошка в зону наплавки возможно использование схемы «селективного лазерного спекания» [24]. При этом способе на первом этапе формируют слой порошкового материала определенной толщины, затем выборочно оплавливают участок порошка, после чего формируют новый слой дисперсного материала и процесс повторяется до получения необходимой высоты наплавки. Использование такой схемы при ЭЛС может иметь ряд преимуществ, одно из которых — отсутствие транспортирующего порошок газа, что существенно в условиях высокого вакуума. Однако применение дисперсных материалов при ЭЛС может ограничиваться вследствие:

- сложности адаптации аппаратуры и прецизионной дозировки порошка в условиях вакуумной камеры;
- распыления порошка под воздействием электронного пучка;
- загрязнения металла шва кислородом и др. примесями в связи с развитой поверхностью составляющих порошка;

– высокой вероятности образования при кристаллизации ЗСО;

– высоких требований по однородности гранулометрического и химического состава, текучести, условиям производства и хранения порошка.

С целью ограничения указанных недостатков присадочных материалов при ЭЛС предложено использовать нормированные прутки, вырезанные из монокристаллических заготовок ЖНС. Апробация их при наплавке образцов сплава ЖС26 толщиной 2 мм показала положительный результат — достигается качественное формирование наплавов заданных размеров и структурного состава.

Особенности формирования наплавов, их структуры и кристаллографических характеристик. Сложное легирование монокристаллов ЖНС, высокое содержание упрочняющей γ' -фазы, отсутствие высокоугловых границ зерен — факторы, которые обеспечивают комплекс механических свойств и максимальный ресурс, однако, ухудшает их свариваемость. Это проявляется в склонности к образованию трещин, дефектов структуры, появлению ЗСО, отклонению кристаллографической ориентации от исходной, что, в конечном итоге, снижает технологическую и эксплуатационную прочность [11–15, 23]. Стоит задача получения качественных наплавов и сварных соединений монокристаллов ЖНС с учетом формирования заданного структурного состояния и кристаллографических характеристик металла шва. Комплекс выполненных исследований показал [11–15], что оптимальные параметры структурного совершенства сварного шва достигаются при соблюдении определенных температурно-временных и ориентационных условий сварки, которые обозначаются величиной и направлением температурного градиента G на фронте кристаллизации сварочной ванны, скоростью затвердевания

R , их соотношением G/R , кристаллографической ориентацией соединяемых кромок и направлением сварки. Была установлена связь между указанными параметрами кристаллизации и технологическими факторами [11]. Показана возможность получения монокристаллических швов даже при неблагоприятных кристаллографических условиях за счет управления температурно-временными параметрами кристаллизации сварочной ванны. Это особенно важно при сварке или наплавке лопаток, имеющих сложную пространственную форму. Важно учесть разные ориентационные характеристики потенциальных участков ремонта (рис. 1). Некоторые из этих участков отвечают ориентации [001], что соответствует симметричным условиям кристаллизации (входная и выходная кромка), а некоторые не совпадают с [001]. Такие сочетания условий сильно затрудняют обеспечение направленной кристаллизации и формирование монокристаллической структуры требуемого совершенства.

Под выражением «совершенство структуры» монокристалла принимаем ориентационную однородность металла шва, зоны термического влияния и основного металла при максимально допустимом отклонении до $5...8^\circ$; отсутствие зерен другой ориентации; однородность распределения дислокаций.

Возможность обеспечения направленной кристаллизации на фронте затвердевания сварочной ванны, формирования монокристаллической структуры шва в несимметричных условиях являлось ключевой задачей, решение которой позволило создать основные положения принципиальных технологий ремонта. Необходимо учитывать размерно-ориентационные особенности ремонтных участков, обеспечить физические условия направленной кристаллизации металла шва. Поэтому основная часть работы направлена на исследование влияния технологических факторов на температурно-временные и ориентационные параметры процесса наплавки, а следовательно и на совершенство структуры металла шва.

Техника электронно-лучевой наплавки. Наплавка поверхности пера лопатки. Часть исследований выполняли на плоских образцах и лопатках. Образцы вырезали электроискровым способом из заготовок $80 \times 60 \times 8$ мм сплава ЖС26. Толщина образцов $1,5...2,0$ мм была выбрана исходя из средней толщины сечения полок пера рабочей лопатки. Исходная кристаллографическая ориентация поверхности наплавки выбрана соответственно участкам возможного ремонта лопатки и отвечала как симметричным, так и

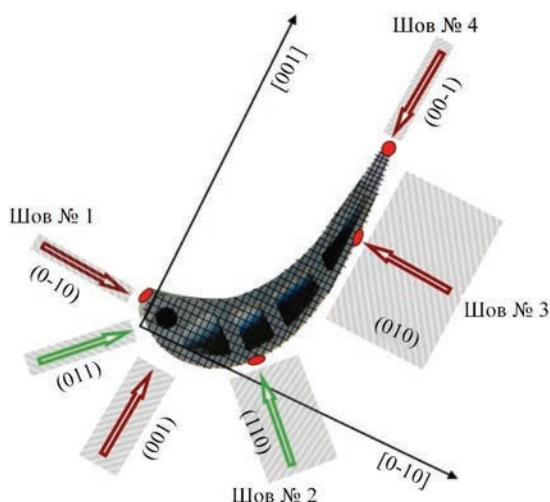


Рис. 1. Схема расположения кристаллографических зон и возможных ремонтных участков лопатки

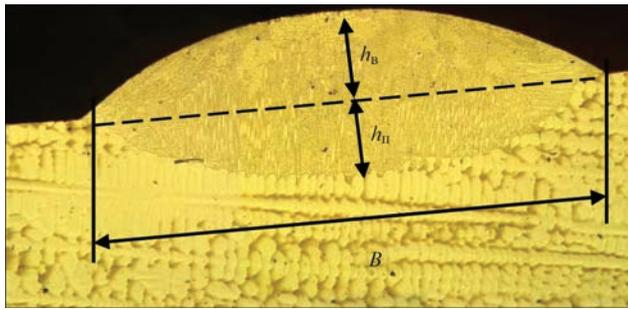


Рис. 2. Параметры геометрических характеристик наплавки: B — ширина наплавки; $h = h_b + h_n$ — общая высота наплавки, где h_b — высота валика; h_n — глубина проплавления основного металла ($\times 50$)

несимметричным ($(hkl) > 20^\circ$ от (100)) кристаллографическим условиям.

Исходили из положения [25], что скорость охлаждения металла шва, следовательно, и других температурно-временных параметров сварки определяется соотношением массы (объема) расплава сварочной ванны к основному металлу. По размерам наплавки (общая высота h и ширина B) устанавливаются температурно-временные условия кристаллизации. Использование метода ЭЛС позволяет в широком диапазоне осуществлять управление этими параметрами.

Результаты металлографических исследований показали, что при геометрических параметрах наплавки (рис. 2) $h \leq 0,6$ мм и $h/B \leq 0,2$, выполненных за один проход, обеспечивается повышение стабильности зоны направленной кристаллизации, формирование мелкодисперсной ($\lambda = 1,5 \dots 2,0$ мкм) ячеисто-дендритной структуры, что ограничивает образование зерен случайной ориентации (рис. 2, 3). Характеристики дислокационной структуры отвечают однородному распределению (рис. 4), о чем свидетельствует форма замкнутых плавных регулярных изоинтенсивных линий $I_{q\perp}$ рентгеновских отражений. В целом структура зон наплавки соответствует типовым требованиям монокристаллов ЖНС.

Увеличение высоты наплавки до 0,8 мм и соотношения $h/B = 0,25$ приводит к образованию одиночных ЗСО. Дальнейшее изменение геометри-

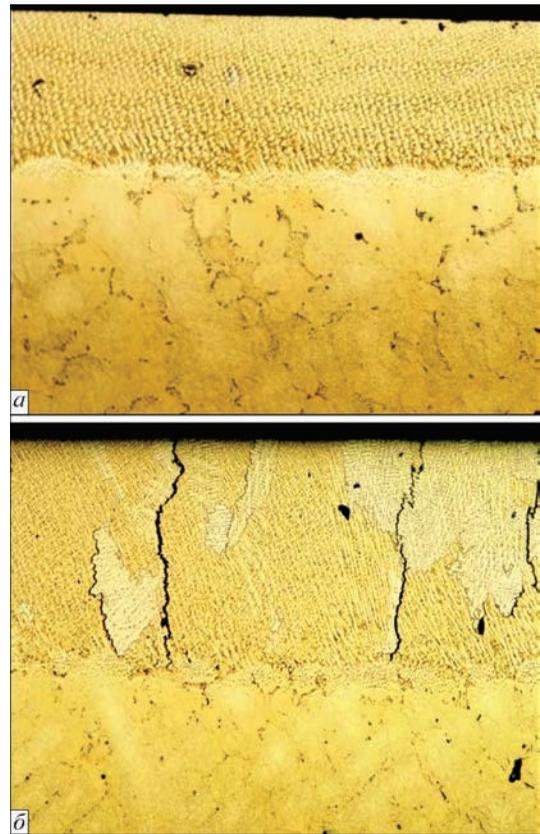


Рис. 3. Микроструктура ($\times 100$) наплавки монокристаллического сплава ЖС26 толщиной 2 мм в несимметричных кристаллографических ориентационных условиях при соотношении геометрических параметров шва: а — $h/B = 0,2$ и высота наплавки $h = 0,6$ мм; б — $h/B = 0,3$, $h = 0,9$ мм

ческих параметров наплавленного слоя приводит к увеличению числа ЗСО и образованию трещин (рис. 3, 5).

Следует подчеркнуть, что результаты расчетов, выполненных по методике, описанной в работе [11], с использованием известного соотношения Бруди–Флеминга показали, что температурно-временные характеристики кристаллизации наплавков (соотношение $G/R > 10^4$ с $^\circ$ С/мм 2), выполненных в несимметричной ориентации при $h/B \leq 0,2$ соответствуют условиям формирования монокристаллической структуры.

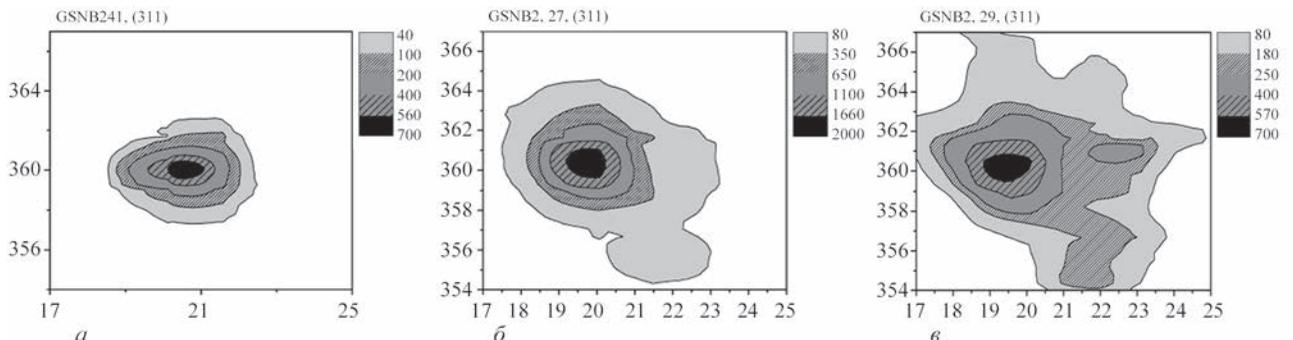


Рис. 4. Изоинтенсивные линии распределения $I_{q\perp}$ в основном металле (а), ЗТВ (б) и шве (в) отражения (311) для наплавков с соотношением $h/B = 0,8$

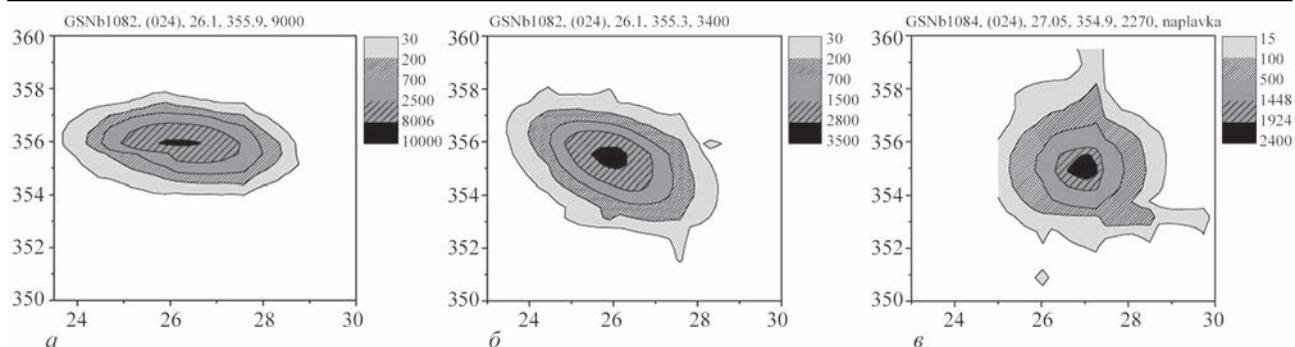


Рис. 5. Изоинтенсивные линии распределения I_{\perp} в основном металле (а), ЗТВ (б) и шве (в) отражения (311) для наплавки с соотношением $h/B = 0,4$

Наплавка кромки лопатки. В процессе эксплуатации ГТД повреждению подвергаются чаще всего входная атакующая кромка [1] шириной порядка 3...4 мм и более тонкая выходная порядка 2...5 мм. Отработка техники наплавки кромок проводилась на торцах монокристаллических пластин сплава ЖС26 толщиной 2...3 мм. Для оценки влияния температурно-временных характеристик процесса на изменения структуры использовались клиновые пластины толщиной 4...8 мм, которые определяли переменную ширину подложки, наплавка которой проводилась на постоянном режиме. Кристаллографическая ориентация пластин соответствовала [001] с отклонением до 15° . О соответствии физических условий G/R формированию монокристаллической структуры, как и при наплавке на плоскость оценивали по размерам наплавки (h, B) и величине их соотношения.

В процессе исследований установлена связь геометрического соотношения h/B наплавки на кромку с качеством ее формирования, сохранением монокристаллической структуры, образованием ЗСО и трещин (рис. 6). Отличия наблюдаются при геометрическом соотношении однопроходной наплавки — $h/B \geq 0,8$ (рис. 4, 6, 7). Разориентирование блочной дендритной структуры не превышает $5...8^\circ$. Оптимальным вариантом являются параметры геометрического соотношения $h/B \leq 0,4$ (рис. 5; 7, б; 8). Максимальное отклонение ориентации структурных составляющих $\Delta\alpha$ от кристаллографической ориентации исходного металла не превышает $1,5^\circ$. Характеристики дислокационной структуры отвечают однородному их распределению (рис. 5). В целом, структура зоны наплавки отвечает типовым требованиям к ростовой структуре монокристаллических лопаток из ЖНС.

Увеличение высоты наплавки повышает вероятность образования ЗСО и трещин в связи с накоплением дефектов структуры и напряжений. Тем не менее, путем последовательного наложения слоев наплавки, выполненных по соответствующим технологическим требованиям, высота мо-

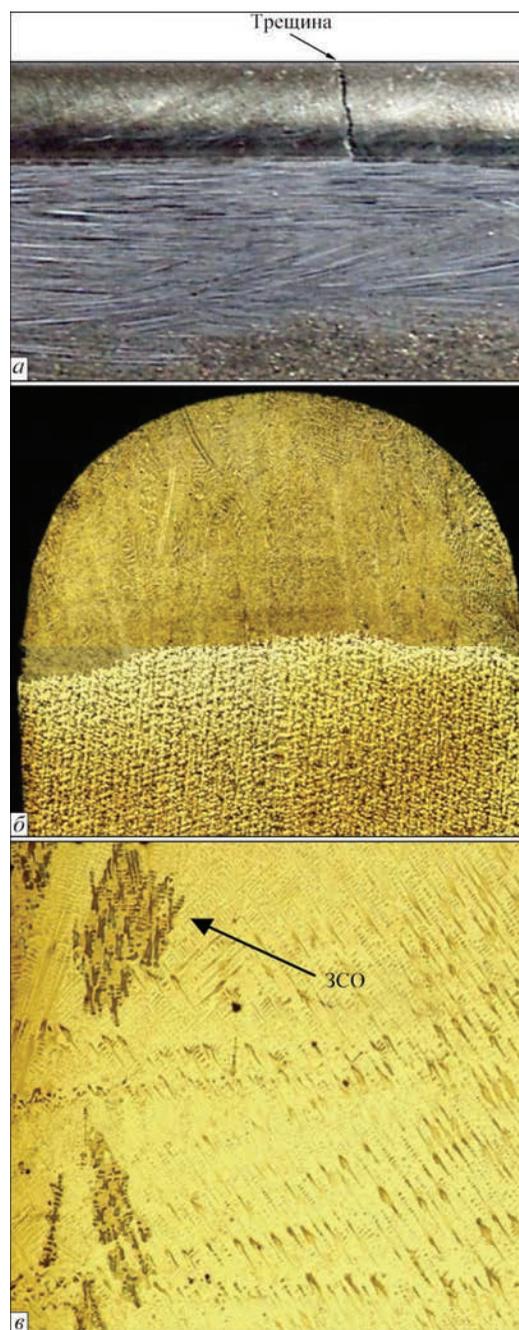


Рис. 6. Общий вид однопроходной наплавки (а) с дефектами формирования, трещинами и ЗСО (а–е), макро- и микроструктура (б, в). Геометрический параметр наплавки $h/B = 0,8$ (б — $\times 25$; в — $\times 100$)

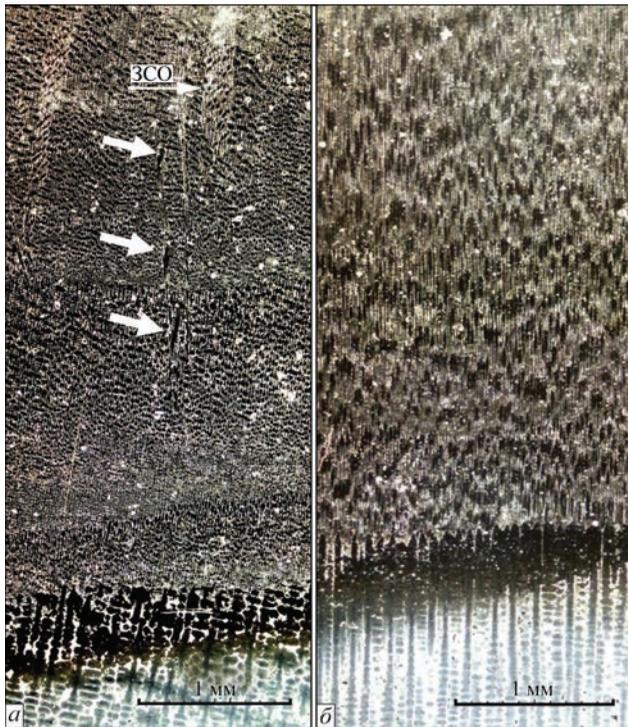


Рис. 7. Продольные микрошлифы ($\times 50$) (темное поле) наплавленных образцов: *a* — $h/B \geq 0,8$ (стрелками указаны микротрещины и ЗСО); *b* — $h/B = 0,4$

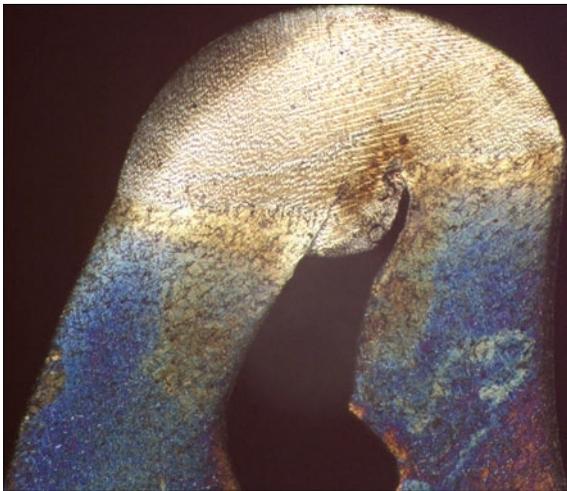


Рис. 8. Восстановленная входная кромка монокристаллической лопатки из сплава ЖС26 авиационного ГТД при наплавке электронным лучом с соотношением наплавки $h/B = 0,4$ ($\times 50$)

нокристаллических наплавов была доведена до 10 мм, при ширине исходных кромок 5...7 мм.

Результаты выполненных исследований и опытных наплавов позволяют рекомендовать ремонт участков разной кристаллографической ориентации монокристаллических лопаток из ЖНС с поверхностными дефектами (рис. 1) путем последовательного наложения наплавляемых слоев при использовании ЭЛС. Предложенная технология опробована при ремонте рабочих лопаток (рис. 8, 9) из сплавов ЖС26, ЖС32 [26].



Рис. 9. Внешний вид монокристаллических лопаток из сплава ЖС32 с ремонтными швами

Выводы

1. Основными задачами ремонта монокристаллических лопаток из ЖНС с производственными дефектами и эксплуатационными повреждениями является восстановление исходной геометрии, физической сплошности и кристаллографической однородности приповерхностных областей пера и кромок.

2. Реализация физических условий формирования монокристаллической структуры ремонтных швов достигается технологическими средствами ЭЛС, путем ограничения величины соотношения геометрических параметров наплавки h/B , с применением нормированного пруткового присадочного материала в соответствии с результатами исследований. Технология опробована как для однопроходной, так и многопроходной наплавки монокристаллических элементов горячего тракта ГТД.

Список литературы

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. (2006) *Газотурбинные двигатели*. Пермь, ОАО «Авиадвигатель».
2. Машошин О.Ф., Чичков Б.А. (2017) *Рабочие лопатки авиационных ГТД: конструкция, прочность, эксплуатация*. Учебное пособие для обучающихся по направлениям подготовки 25.03.01, 25.04.01. Москва, МГТУ ГА.
3. Смолин А.А., Спорягина Н.М. (1976) Оценка механической повреждаемости ротора компрессора в эксплуатации. *Ресурс и надежность ГТД*. Кн. 2, Москва, ЦИАМ, сс. 66–72.
4. Ильченко Г.А., Андреев В.И., Гусева Т.П. (1979) Анализ эксплуатационных дефектов и вопросы ремонта лопаток ГТД. *Материалы XI конференции молодых ученых НИИАТ*. Москва, ОНТИ, НИИАТ, сс. 49–52.
5. Е.Н. Каблов (ред.) (2006) *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. Научно-технический сборник к 100-летию со дня рождения С.Т. Кишкина. Москва, Наука.
6. Сорокин Л.И. (2004) Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное производство*, 7, 36–39.

7. Аржакин А.Н., Столяров И.И., Туров А.В. (2003) Разработка технологии восстановления рабочих лопаток 8 ступени КВД авиационного двигателя методом автоматической наплавки. *Сварщик*, **4**, 8–9.
8. Ющенко К.А., Савченко В.С., Червякова Л.В. и др. (2005) Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин. *Автоматическая сварка*, **6**, 3–6.
9. Тарасенко Ю.П. (2005) Постэксплуатационное состояние лопаток первой ступени ТВД двигателя ДЖ59 и особенности их восстановления. *Газотурбинные технологии*, **11-2**, 30–32.
10. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Беляев В.Е., Федотов Е.Н. (2005) Восстановительный ремонт – вторая жизнь авиационных лопаток. *Там же*, **4**, 32–34.
11. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С., Карасевская О.П. (2016) Формирование структуры металла шва при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **8**, 21–28.
12. Ющенко К.А., Гах И.С., Задерий Б.А., Звягинцева А.В., Карасевская О.П. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Там же*, **5**, 46–51.
13. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2013) О природе зерен случайной ориентации в сварных швах монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Металлофизика и новейшие технологии*, **35**, **0**, 1347–1357.
14. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Гах И.С. и др. (2009) О возможности наследования монокристаллической структуры сложнелегированных никелевых сплавов в неравновесных условиях сварки плавлением. *Там же*, **31**, **4**, 473–485.
15. Ющенко К.А., Задерий Б.А., Карасевская О.П., Гах И.С. (2008) Склонность к образованию трещин и структурные изменения при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, **2**, 10–19.
16. Шоршоров М.Х., Ерохин А.А., Чернышова Т.А. (1972) *Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
17. Сорокин Л. И. (2004) Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (Обзор). Ч.2. *Сварочное производство*, **0**, 8–16.
18. Сорокин Л.И. (1999) Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов. *Там же*, **2**, 11–17.
19. Шоршоров М.Х., Ерохин А.А., Чернышова Т.А. (1973) *Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
20. Сорокин Л. И. (2004) Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (Обзор). Ч.1. *Сварочное производство*, **9**, 3–7.
21. Yushchenko K.A., Zviagintseva A.V., Kapitanchuk L.M., Gakh I.S. (2018) The role of actively diffusing impurities of sulfur and oxygen in ductility-dip cracking susceptibility of Ni–Cr–Fe welds. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, **89**, **2**, 49–55.
22. Park J.-W., Baby S.S., Vitek J.M. et al. (2003) Stray grain formation in single crystal Ni-base superalloy welds. *J. of Applied Physics*, **94**, **6**, 4203–4209.
23. Pollock T.M., Murphy W.H. (1996) The Breakdown of Single-Crystal Solidification in High Refractory Nickel-Base Alloys. *Metal. Mater. Trans. A*, **27**, 1081–1094.
24. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. (2015) *Аддитивные технологии в машиностроении*. Пособие для инженеров. Москва, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».
25. Рыкалин Н.Н. (1951) *Расчеты тепловых процессов при сварке*. Москва, Машгиз.
26. Yushchenko K.A., Zadery B.A., Gakh I.S., Zviagintseva A.V. (2018) Prospects of development of welded single-crystal structures of heat-temperature nickel alloys. *The Paton Welding Journal*, **112**, 83–90.

References

1. Inozemtsev, A.A., Sandratsky, V.L. (2006) *Gas turbine engines*. Perm, Aviadvigatel [in Russian].
2. Mashoshin, O.F., Chichkov, B.A. (2017) *Blades of aircraft gas turbine engines: Design, strength, operation*. In: Manual for professions 25.03.01, 25.04.01. Moscow, BMSTU [in Russian].
3. Smolin, A.A., Sporyagina, N.M. (1976) *Evaluation of mechanical damage of compressor rotor in operation. Service life and reliability of gas turbine engines*. In: Book 2. Moscow, CIAM, 66-72 [in Russian].
4. Ilchenko, G.A., Andreev, V.I., Guseva, T.P. (1979) Analysis of operating defects and problems of repair of gas turbine engine blades. In: *Proc. of 11th Conf. of Young Scientists of NIAT*. Moscow, NIAT, 49-52.
5. (2006) Cast high-temperature alloys. S.T. Kishkin effect. Ed. by E.N. Kablov. In: *Techn.-Sci. Coll. to 100th Birth Anniversary of S.T.Kishkin*. Moscow, Nauka [in Russian].
6. Sorokin, L.I. (2004) Argon-arc surfacing of shroud platforms of high-temperature nickel alloy blades. *Svarochn. Proizvodstvo*, **7**, 36-39 [in Russian].
7. Arzhakin, A.N., Stolyarov, I.I., Turov, A.V. (2003) Development of technology for restoration of 8th stage blades of high-pressure compressor of aircraft engine by automatic surfacing method. *Svarshchik*, **4**, 8-9 [in Russian].
8. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Chervyakova, L.V. et al. (2005) Investigation of weldability of nickel superalloys and development of repair technology for gas turbine blades. *The Paton Welding J.*, **6**, 3-6.
9. Tarasenko, Yu.P. (2005) Postoperational state of blades of first stage of high-pressure turbine of DZh59 engine and peculiarities of their restoration. *Gazoturbinnye Tekhnologii*, **11 2**, 30-32 [in Russian].
10. Kuznetsov, V.P., Lesnikov, V.P., Belyaev, V.E., Fedotov, E.N. (2005) Restorative repair – second life of aircraft blades. *Ibid.*, **4**, 32-34 [in Russian].
11. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S., Karasevskaya, O.P. (2016) Formation of weld metal structure in electron beam welding of single crystals of high-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **8**, 15-22.
12. Yushchenko, K.A., Gakh, I.S., Zadery, B.A. et al. (2013) Influence of weld pool geometry on structure of metal of welds on high-temperature nickel alloy single crystals. *Ibid.*, **5**, 45-50.
13. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2013) On nature of grains of random orientation of single crystal welds of high-temperature nickel alloys. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, **35(0)**, 1347-1357 [in Russian].
14. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2009) About possibility of inheriting of single crystal structure of complexly-alloyed nickel alloys under nonequilibrium conditions of fusion welding. *Ibid.*, **31(4)**, 473-485 [in Russian].
15. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Karasevskaya, O.P., Gakh, I.S. (2008) Sensitivity to cracking and structural changes in EBW of single crystals of heat-resistant nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **2**, 6-13.
16. Shorshorov, M.Kh., Erokhin, A.A., Chernyshova, T.A. (1972) *Hot cracks in welding of heat-resistant alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
17. Sorokin, L.I. (2004) Weldability of high-temperature nickel alloys (Review). Pt 2. *Svarochn. Proizvodstvo*, **0**, 8-16 [in Russian].
18. Sorokin, L.I. (1999) Strains and cracks in welding and heat treatment of high-temperature nickel alloys. *Ibid.*, **2**, 11-17 [in Russian].
19. Shorshorov, M.Kh., Erokhin, A.A., Chernyshova, T.A. (1973) *Hot cracks in welding of heat-resistant alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
20. Sorokin, L.I. (2004) Weldability of high-temperature nickel alloys (Review). Pt 1. *Svarochn. Proizvodstvo*, **9**, 3-7 [in Russian].
21. Yushchenko, K.A., Zviagintseva, A.V., Kapitanchuk, L.M., Gakh, I.S. (2018) The role of actively diffusing impurities

- of sulfur and oxygen in ductility-dip cracking susceptibility of Ni-Cr-Fe welds. *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 89(2), 49-55.
22. Park, J.-W., Baby, S.S., Vitek, J.M. et al. (2003) Stray grain formation in single crystal Ni-base superalloy welds. *J. of Applied Physics*, 94(6), 4203-4209.
23. Pollock, T.M., Murphy, W.H. (1996) The breakdown of single-crystal solidification in high refractory nickel-base alloys. *Metal. Mater. Transact. A*, **27**, 1081-1094.
24. Zlenko, M.A., Nagajtsev, M.V., Dovbysh, V.M. (2015) *Additive technologies in mechanical engineering*. Moscow, NAMI [in Russian].
25. Rykalin, N.N. (1951) *Calculations of heat processes in welding*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
26. Yushchenko, K.A., Zaderiy, B.A., Gakh, I.S., Zvyagintseva, A.V. (2018) Prospects of development of welded single-crystal structures of high-temperature nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **14**, 83-90.

РЕМОНТНЕ НАПЛАВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ З ПОВЕРХНЕВИМИ ДЕФЕКТАМИ ТА ПОШКОДЖЕННЯМИ К.А. Ющенко¹, І.С. Гах¹, Б.О. Задерій¹, Г.В. Звягінцева¹, О.П. Карасевська²

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.
03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 36. E-mail: Karas@imp.kiev.ua

На основі вивчення натурних лопаток газових турбін після виготовлення та експлуатації визначено основні типи дефектів та пошкоджень. Велика частина дефектів розташована на поверхні. Показана можливість виконання операцій по їх усуненню шляхом електронно-променевого наплавлення з присадкою того ж складу, що і лопатка. Встановлено зв'язок температурно-часових параметрів формування ремонтних швів, їх розмірів і геометрії. Визначено технологічні схеми забезпечення температурно-часових і кристалографічних орієнтаційних умов збереження монокристалічної структури при ремонті лопаток з жароміцних нікелевих сплавів. Вивчено особливості формування зварних швів, їх структура в залежності від технологічних параметрів процесу електронно-променевого наплавлення. Розроблено та випробувано способи практичної реалізації отриманих результатів при ремонті ділянок лопаток різної кристалографічної орієнтації. Наведено приклади ремонту лопаток зі структурними дефектами поверхні пера і ушкодженнями крайок, при яких забезпечується відновлення вихідної геометрії, кристалографічної орієнтації та монокристалічної структури. Бібліогр. 26, рис. 9.

Ключові слова: електронно-променева наплавка, газові турбіни, лопатки, жароміцні нікелеві сплави, дефекти і пошкодження, відновлення, монокристалічна структура

RESTORATION SURFACING OF BLADES OF GAS TURBINES OF HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOYS WITH SURFACE DEFECTS AND DAMAGES

K.A. Yushchenko¹, I.S. Gakh¹, B.A. Zaderii¹, A.V. Zvyagintseva¹, O.P. Karasevskaya²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua
²G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the NAS of Ukraine.
36 Akademika Vernadskogo Blvd., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: Karas@imp.kiev.ua

The main types of defects and damages were determined based on investigation of full-scale gas turbine blades after manufacture and operation. The possibility is shown for performance of operations on their elimination by means of electron beam surfacing with filler of the same composition as in the blade. Temperature-time relationship of parameters of repair welds formation, their dimensions and geometry were stated. The technological schemes were determined for providing the temperature-time and crystallographic orientation conditions of preservation of single crystal structure in repair of high-temperature nickel alloy blades. The peculiarities of formation of welds, their structure depending on technological parameters of the process of electron beam surfacing were investigated. The methods of practical realization of obtained results in repair of blade areas of various crystallographic orientation were developed and tested. There are examples of repair of blades with structural defects of airfoil surface and damages of edges, at which restoration of initial geometry, crystallographic orientation and single crystal structure is provided. 26 Ref., 9 Fig.

Keywords: electron beam surfacing, gas turbines, blades, high-temperature nickel alloys, defects and damages, restoration, single crystal structure

Поступила в редакцію 15.04.2019