

# ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СВАРНЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

К. А. ЮЩЕНКО, Б. А. ЗАДЕРИЙ, И. С. ГАХ, А. В. ЗВЯГИНЦЕВА

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

Жаропрочные никелевые сплавы с монокристаллической структурой применяются в таких отраслях производства, как турбостроение, авиационно-космическая техника и энергетика. Однако их дальнейшее освоение сдерживается сложностью, а иногда — и невозможностью, получения элементов конструкций больших размеров и развитой геометрии. Производство, как и ремонт, традиционными способами монокристаллических изделий с развитой геометрией таких, например, как длинномерные или охлаждаемые лопатки газовых турбин и др., представляет собой сложную технологическую задачу. Изготовление узлов, деталей, конструкций подобного рода путем их сварки из отдельных элементов или наращивания часто представляется более рациональным и позволяет создавать изделия с монокристаллической структурой на принципиально новой основе. Целью представленной работы является развитие новых подходов применительно к производству монокристаллических сварных конструкций ответственного назначения с повышенными механическими характеристиками и эксплуатационными параметрами. Приведены результаты исследований и примеры опытных сварных конструкций такого рода, полученных в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Библиогр. 30, рис. 9.

*Ключевые слова:* жаропрочные никелевые сплавы, монокристаллы, сварные конструкции сложной геометрии, электронно-лучевая сварка, лопатки газовых турбин, условия формирования монокристаллической структуры

Развитие авиакосмической, энергогенерирующей и др. отраслей промышленности требует применения материалов, которые могут выдерживать комплекс высоких эксплуатационных нагрузок с увеличением сроков и надежности эксплуатации. Особенно высокие требования предъявляются к материалам деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) и установок по жаропрочности, пластичности, высокой сопротивляемости разрушению при термической и малоцикловой усталости, а также повышенной стойкости к воздействию рабочей среды [1, 2].

Этим требованиям, в определенной мере, отвечают жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) с поли- и монокристаллической структурой [3]. Однако заметное повышение механических и эксплуатационных характеристик за счет многокомпонентного легирования и формирования монокристаллической структуры приводит к ухудшению технологичности материалов, в том числе к снижению свариваемости [4–8].

Наиболее широко применяются ЖНС при изготовлении элементов горячего тракта ГТД — рабочих и сопловых лопаток турбин, в некоторой степени камер сгорания, створок поворотных сопел и др. Особо ответственными и термонагруженными из них являются рабочие лопатки турбины высокого давления. Использование ЖНС с монокристаллической структурой для их изготовления позволяет значительно повысить способность

выдержать весь комплекс нагрузок, эксплуатационные параметры ГТД, их работоспособность и надежность. Больше чем на 15 % возрастает при этом основная характеристика сплава — жаропрочность [9, 10].

Несмотря на успехи технологии выращивания монокристаллов [11 и др.] литьем по выплавляемым моделям, изготовление таких изделий представляет собой не совсем простую техническую задачу. Особенно остро встают проблемы изготовления таких деталей, как охлаждаемые монокристаллические лопатки со сложной системой внутренних каналов и выходом их на поверхность, а также длинномерных и разнотолщинных лопаток. Технология изготовления изделий подобного рода методом направленной кристаллизации характеризуется значительной сложностью, трудо- и энергоемкостью, невысоким процентом выхода готовой продукции.

Становится очевидным, что изготовление подобных изделий путем сварки или наращивания отдельных их составляющих является более рациональным, что позволит создавать принципиально новые конструкции. Так, например, компания Rolls-Royce производит пустотелые сварные поликристаллические титановые лопатки ГТД [12], что позволяет снизить массу лопатки, повысить ее аэродинамические характеристики и термодинамическую эффективность турбины в целом.

Замена роторов ГТД с замковым креплением лопаток на цельносварные типа «блиск» позволяет снизить до 25 % от исходного вес конструкции, повысить ресурс изделия [13].

Ставится вопрос разработки технологии изготовления, выращивания, формирования конструкций сложной геометрии из ЖНС с монокристаллической структурой с использованием способов сварки, наплавки, нанесения покрытий, как наиболее отработанных в технологическом плане.

Однако до настоящего времени неизвестны ни теоретические (формирование и сохранение монокристаллической структуры), ни практические (технология, конструкция) разработки и рекомендации по созданию именно такого типа сварных конструкций.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины активно ведутся работы в этом направлении [14–24]. Выполнены комплексные исследования свариваемости промышленных литейных сплавов ЖС26, ЖС32, ЖС36, ЦНК8 с монокристаллической структурой.

Основными критериями оценки качества сварных соединений являлись:

- ориентационная однородность металла шва и зоны термического влияния с основным металлом;
- отсутствие трещин и дефектов формирования шва;
- отсутствие зерен случайной ориентации (ЗСО);
- уровень механических свойств сварных соединений.

Оценка основных параметров кристаллизации на фронте затвердевания сварочной ванны — тем-

пературного градиента ( $G$ ) и скорости перемещения фронта ( $R$ ), ответственных за совершенство монокристаллической структуры, выполнялась с использованием методики локальной термометрии расплава сварочной ванны и анализа термикинетических кривых [14].

Исследование особенностей структуры сварных соединений в зависимости от температурно-временных условий формирования шва проводили с использованием микрорентгеноспектрального анализа, металлографии, рентгеновской дифрактометрии и EBSD-анализа.

Исходные кристаллографические параметры сборки сварного соединения задавались ориентированием с помощью рентгеновского метода. О кристаллографической ориентации металла шва, наличии и количестве ЗСО, их относительной площади судили, исходя из анализа полюсных фигур. Плотность дислокаций и их распределение оценивали по ширине, форме и однородности распределения интенсивности рентгеновских рефлексов  $I_{\varphi\perp}$ .

В результате комплексных исследований определены закономерности формирования монокристаллической структуры при сварке монокристаллов ЖНС толщиной 0,5...5,0 мм. Изучено влияние технологических факторов на кристаллографические и температурно-временные параметры процесса формирования структуры металла шва, которые определяют совершенство монокристаллической структуры.

Результаты влияния технологических факторов на кристаллографические параметры процесса формирования структуры металла шва иллюстрирует рис. 1–3. На рис. 1 показано образование ЗСО и изменение кристаллографической ориентации металла шва (рис.2) при несоответствии кри-

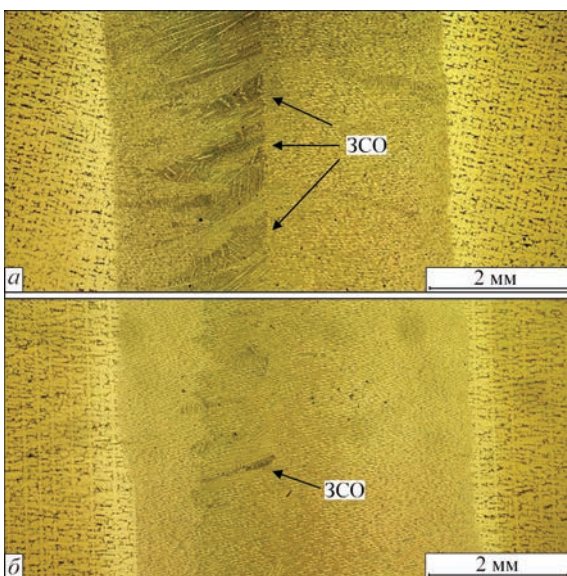


Рис. 1. Структура сварных соединений с разным отклонением кристаллографической ориентации поверхности кромок стыка от  $\{001\}$ :  $a$  —  $20^\circ$  (множественное формирование ЗСО);  $b$  —  $5^\circ$  (одиночные ЗСО)

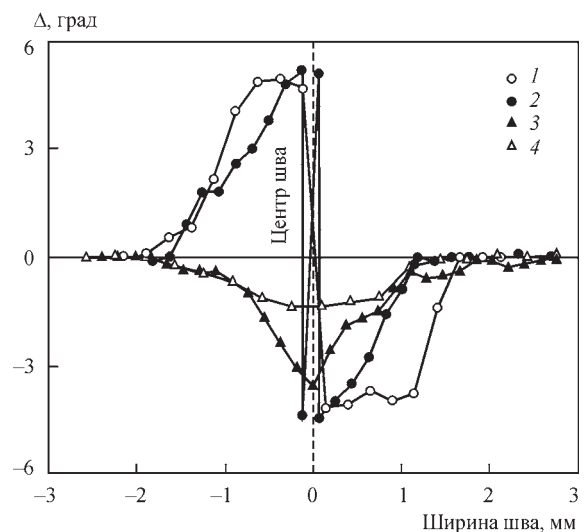


Рис. 2. Отклонение ориентации по сечению шва в зависимости от кристаллографической ориентации кромок стыка: 1 — кромка стыка  $\{111\}$ ; 2 —  $\{112\}$ ; 3 —  $\{011\}$ ; 4 —  $\{001\}$ . Ширина швов примерно 3,5...3,8 мм

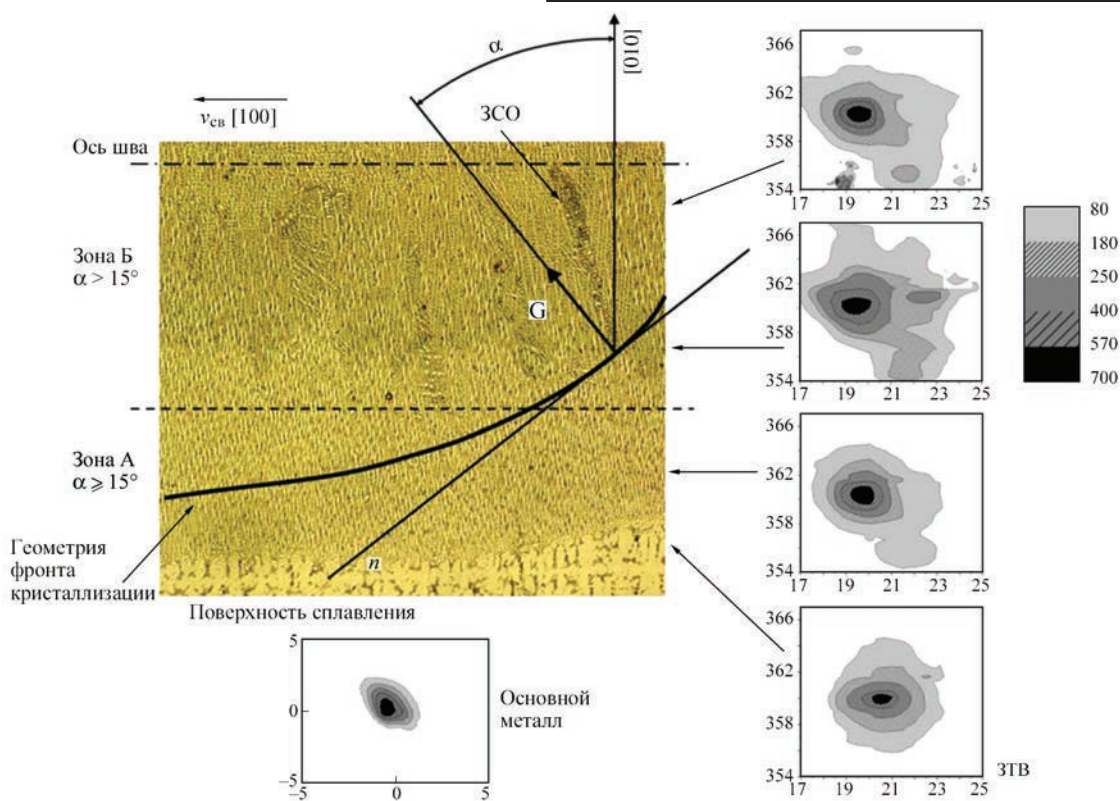


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 100$ ) и изоинтенсивные линии распределения  $I_{\perp}$  отдельных участков металла шва, отвечающих разному отклонению максимального температурного градиента по фронту кристаллизации сварочной ванны:  $\alpha$  — угол отклонения максимального температурного градиента  $G$  от направления преимущественной кристаллизации

сталлографической ориентации свариваемых кромок высокой симметрии. Установлено, что даже при строгом соблюдении указанных условий симметрии в шве возможно появление до 10 % зерен случайной ориентации. Такие нарушения монокристалличности сварного шва могут быть связаны с тем, что сварочная ванна имеет кривизну и поэтому по фронту кристаллизации направление максимального температурного градиента ( $G$ ) изменяется по отношению к направлению преимущественного роста кристаллов  $\langle 001 \rangle$  (рис. 3). Это влечет за собой нарушение одного из основных условий направленной кристаллизации, а именно, ориентационного влияния подложки на рост монокристалла. Нарушение кристаллографической ориентации и монокристаллической структуры в основном концентрируется на тех участках металла шва, где направление максимального температурного градиента на фронте кристаллизации сварочной ванны отклоняется от ориентации преимущественного роста на углы более  $15^\circ$  (зона Б) (рис. 3). Это позволило установить допустимую разориентацию, которая обеспечивает формирование шва с монокристаллической структурой.

Рис. 4 является обобщением комплекса исследований температурно-временных условий формирования структуры металла шва. Расчетно-экспериментальным путем [14] установлена зависимость между основными темпера-

турно-временными параметрами процесса  $G/R$  на фронте затвердевания жидкой ванны, характером формирующейся структуры и величиной отклонения кристаллографической ориентации сварного соединения от высокой симметрии кристалла. Показано, что формирование направленной ячеисто-дендритной и дендритной структуры с ограничением возникновения зерен другой ориентации при сварке монокристаллов ЖНС возможно при отклонении кристаллографической ориентации, превышающей установленные допуски.

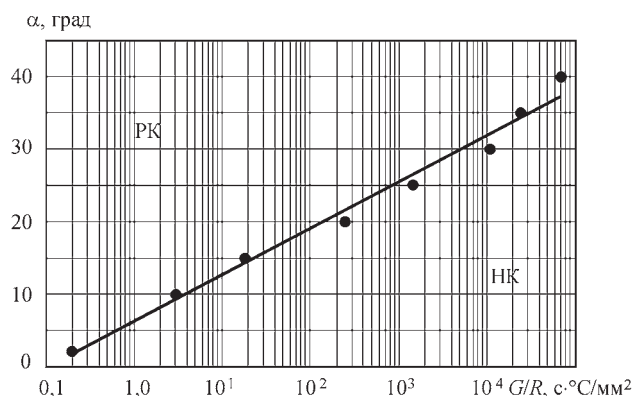


Рис. 4. Расчетно-экспериментальная зависимость допустимых отклонений  $\alpha$  направления максимального температурного градиента  $G$  от ориентации преимущественного роста кристалла  $\langle 001 \rangle$  по фронту затвердевания сварочной ванны при ЭЛС сплава ЖС26 от величины  $G/R$ : НК — область направленной кристаллизации; ПК — область нарушения направленной кристаллизации



Сложность технической реализации такого подхода заключается в необходимости ограничения сварочных напряжений, деформаций и выполнении общих требований, предъявляемых к качеству формирования бездефектных соединений. Особенно это проявляется при сварке конструкций сложной геометрии.

Таким образом, показано, что получение швов с совершенной монокристаллической структурой и кристаллографической ориентацией, соответствующей исходному металлу, достигается за счет:

- обеспечения исходной кристаллографической ориентации в месте соединения в пределах отклонения от направления осей высокой симметрии монокристалла не более пяти градусов (рис. 1, 2);

- поддержания соотношения направления максимального теплоотода по фронту кристаллизации сварочной ванны и направлением  $\langle 100 \rangle$  (легкого роста) с отклонением не более пятнадцати градусов (рис. 3);

- создания температурно-временных условий ( $G/R$ ) направленной кристаллизации согласно рис. 4 для разной исходной кристаллографической ориентации и режимов сварки. Контролируются  $G$  — температурный градиент на фронте кристаллизации сварочной ванны и  $R$  — скорость кристаллизации.

Несоблюдение одного из этих условий способствует образованию структурного дефекта сварного шва — ЗСО и, как следствие, трещин. Рис. 1–3 в обобщенном виде демонстрируют нарушение совершенства монокристаллической структуры в результате отступления от каждого из указанных условий при выполнении простых стыковых соединений пластин небольшой толщины.

Анализ промышленных конструкций из ЖНС свидетельствует о том, что при переходе к изготовлению их из монокристаллических заготовок с помощью сварки будут возникать проблемы с выполнением указанных условий, связанные с разной геометрией, произвольной кристаллографической ориентацией, разноименностью сплавов и др.

На основе анализа особенностей конструкции изделий из монокристаллов ЖНС и экспериментов по сварке модельных образцов, а также учитывая основные теоретические и принципиальные технологические условия получения совершенной монокристаллической структуры швов, был определен круг исследований, необходимых для создания таких конструкций. Основные из них заключались в изучении влияния технологических факторов на температурно-временные и кристаллографически-ориентационные характеристики

процесса формирования шва, и, соответственно, на качество монокристаллической структуры. По результатам исследований выбирали метод, схему, режимы и приемы сварки.

Основное внимание было уделено энергетическим и технологическим особенностям сварки. Принимая во внимание высокую удельную мощность, прецизионность, мобильность источника нагрева, наиболее перспективными в этом плане являются такие способы сварки, как электронно-лучевая и лазерная. При сварке электронным лучом в вакууме обеспечивается надежная защита металла шва от загрязнений примесями, которые не только вызывают ухудшение основных свойств ЖНС, но могут инициировать нарушение совершенства монокристаллической структуры.

Реализация установленных физических условий формирования монокристаллической структуры и сохранения исходной кристаллографической ориентации осуществляется путем управления параметрами режима, применением соответствующих схем и приемов сварки. При этом выполнялось регулирование температуры металла сварочной ванны и его градиента на фронте затвердевания, скорости кристаллизации и остывания, времени существования расплава, геометрии макрофронта кристаллизации сварочной ванны. В результате достигаются лучшие показатели структуры ЖНС — измельчение дендритов;  $\gamma'$ -фазы, карбидов, размера эвтектики и др. фаз, уменьшается химическая неоднородность. Это способствует улучшению как механических свойств, так и служебных характеристик [1, 3].

Следует заметить, что проблемы создания конструкций сложной геометрии, в том числе из ЖНС с привлечением сварочных технологий, в последние годы активно решаются методами трехмерной печати (3D) или аддитивного производства (АП) [25–29].

Сообщается [29], что фирма Siemens успешно провела стендовые испытания экспериментальных лопаток ГТД, напечатанных на 3D принтере. Испытания проводились в составе двигателя в условиях полной нагрузки при температуре выше 1250 °С. Материал лопаток — поликристаллический никелевый суперсплав. Фирма General Electric начала использование аддитивных технологий в производстве элементов газовых турбин [30] из поликристаллических ЖНС.

Несмотря на достоинства указанных технологий, следует обратить внимание на ряд недостатков, которые затрудняют их использование при изготовлении монокристаллических конструкций сложной геометрии из ЖНС.

Во-первых, для получения монокристаллического изделия понадобится наличие стартовой мо-

нокристаллической заготовки, отсутствие которой считается одним из преимуществ 3D-технологии. Во-вторых, очевидно, что на протяжении всего процесса осложняется поддержание необходимых для формирования монокристаллической структуры ЖНС сплавов условий, в том числе соотношение  $G/R$ . Необходимы порошки соответствующего состава, к которым предъявляются очень высокие требования по гранулометрическому и химическому составу, текучести, условиям производства и хранения. Уже незначительные отклонения от техпроцесса АП приводят к изменению геометрии объекта, неравномерности структуры, в том числе нарушению монокристалличности, неудовлетворительному качеству поверхности, частичным несплавлениям и наплывам, что в комплексе затрудняет изготовление конструкций сложной геометрии методом 3D-печати.

Альтернативной методу 3D-печати при производстве монокристаллических конструкций сложной геометрии может служить технология, основанная на дискретном и последовательном оплавлении заготовки определенного состава концентрированным источником энергии. В настоящее время технология находится на стадии доработки в части установления тепловых, деформационных и ориентационных условий и закономерностей формирования структуры.

При создании сварных конструкций сложной геометрии с монокристаллической структурой были предложены и опробованы технологические схемы, базирующиеся на:

– дозированном тепловложении при сварке элементов конструкции разных толщин или разного химического состава, осуществляемым за счет дискретного асимметричного сканирования с регулированием частоты, амплитуды, времени задержки луча;

– регулируемом тепловложении по глубине сварочной ванны при сварке элементов конструкции толщиной до 10 мм, осуществляемом, в основном, за счет дискретного сканирования луча в сочетании с высокой скоростью сварки;

– созданием температурной обстановки в месте последовательного локального оплавления и квазистационарного теплового поля, при которых будет проходить направленная кристаллизация и формирование монокристаллической структуры;

– обеспечении определенного соотношения  $G/R$  при соединении элементов разной кристаллографической ориентации (рис. 5), толщины и разных марок свариваемых сплавов в месте соединения за счет оптимального для каждого случая соотношения параметров режима сварки.

Рис. 6–9 иллюстрируют некоторые из результатов использования таких схем.

Рис. 6 иллюстрирует возможность создания крупноразмерных монокристаллов и конструкций путем ЭЛС заготовок, полученных методом направленной кристаллизации. Путем ориентиро-

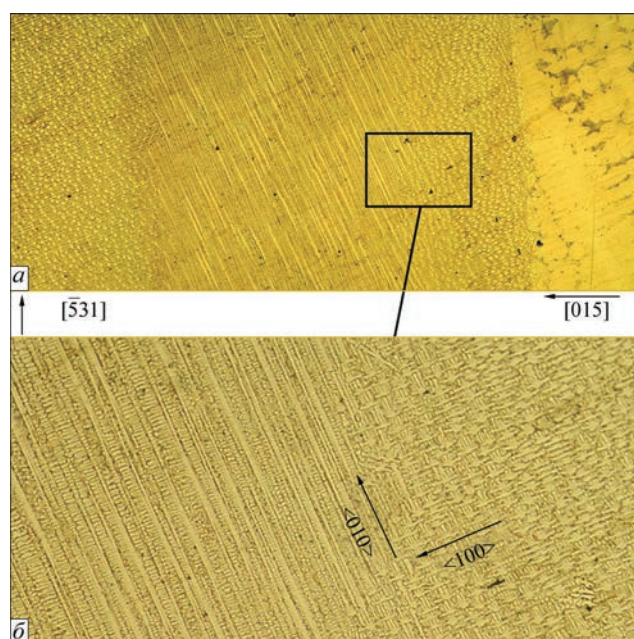


Рис. 5. Микроструктура металла шва с исходной несимметричной кристаллографической ориентацией сварного соединения, выполненного с управлением температурно-скоростными параметрами кристаллизации сварочной ванны: а —  $\times 30$ ; б —  $\times 50$

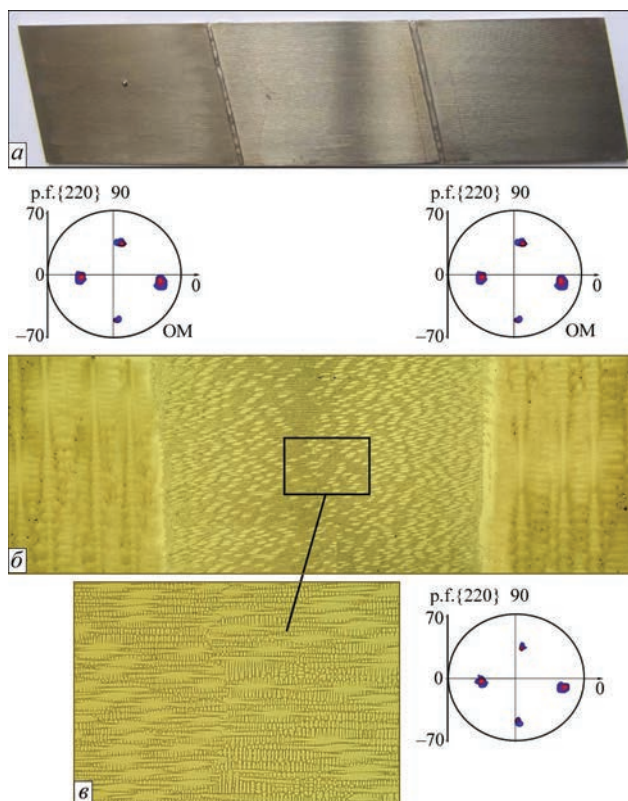


Рис. 6. Пример укрупнения монокристалла из заготовок сплава ЖС32 толщиной 2 мм путем ЭЛС. Общий вид (а), микроструктура (б —  $\times 50$ ; в —  $\times 100$ ) и полюсные фигуры  $\{220\}$  сварного соединения



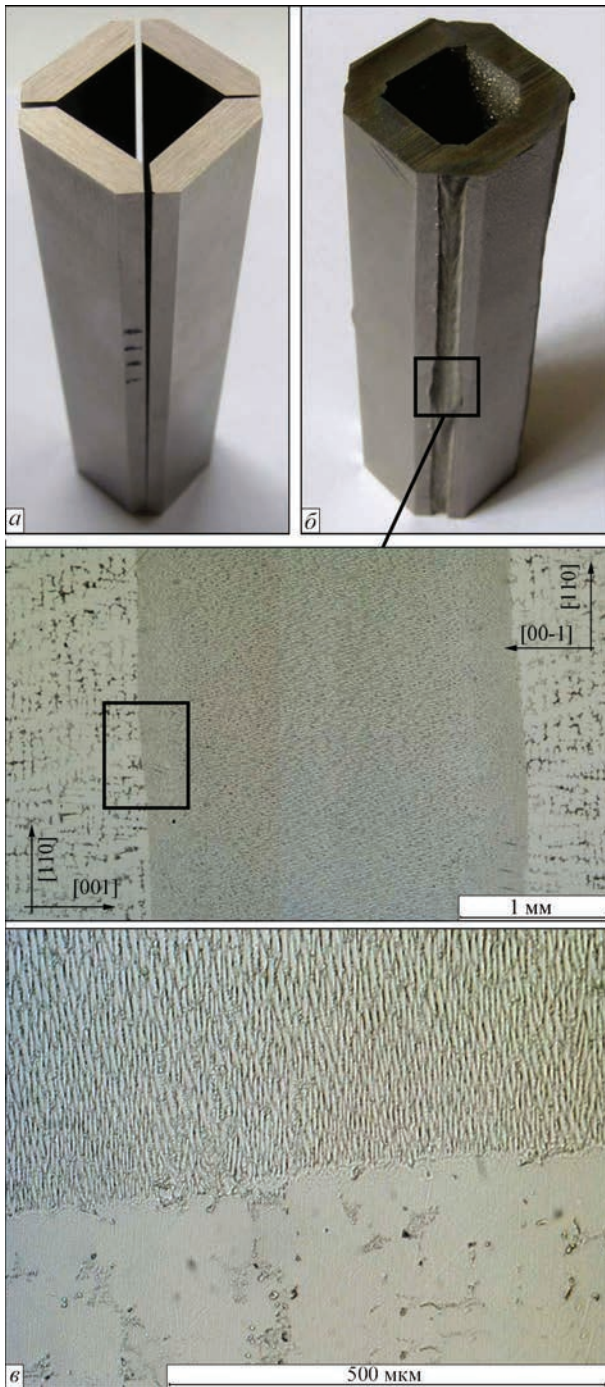


Рис. 7. Вариант сварной монокристаллической конструкции из заготовок сплава ЖС32, полученной с использованием ЭЛС: *a* — исходные монокристаллические заготовки толщиной 5 мм; *b* — сварной элемент; *в* — микроструктура соединения

ванной вырезки заготовок и сборки их под сварку обеспечивалось симметричное строение соединения с отклонением кристаллографической ориентации не более двух градусов. Кроме сохранения исходной кристаллографической ориентации, разработанная технология позволяет избежать деформации протяженного сварного соединения.

На рис. 7 показана монокристаллическая полая заготовка квадратного сечения, сваренная электронным лучом из монокристаллических пластин

толщиной 5 мм. Как показали рентгеновские и металлографические исследования соединений, отсутствие ЗСО, ориентационная однородность металла шва и зоны термического влияния с основным металлом, не превышающая пяти градусов, свидетельствуют о монокристалличности сварной конструкции в целом. Высокая кристаллографическая однородность соединений достигается за счет установленных величин и сочетаний технологических параметров, режимов, техники ЭЛС и обеспечения кристаллографической симметричности соединений стыка при изготовлении исходных заготовок и их сборке. При этом обеспечивается выполнение условий направленной кристаллизации: температурных (соотношение  $G/R$  примерно  $600 \text{ с} \cdot \text{°C}/\text{мм}^2$  при отклонении кромок соединения от высокой симметрии до 20 градусов) и ориентационных (формирование макроплоского фронта затвердевания ванны при сквозном проваре с параллельными кромками сплавления).

Рис. 8 иллюстрирует вариант ремонта наплавкой наиболее нагруженной входной кромки рабочей монокристаллической лопатки турбины высокого давления из сплава ЖС32. Металл наплавки наследует исходную кристаллографическую ориентацию подложки лопатки с отклонением, не превышающим двух градусов. Высота одного слоя наплавки задавалась в пределах  $0,7 \dots 0,8$  мм. При многопроходной наплавке суммарная высота может достигать 3 мм и больше. Присадочный материал соответствовал химическому составу наплавляемой лопатки. Анализ результатов рентгеновских исследований по форме и уширению изоинтенсивных линий распределения  $I_{q\perp}$  говорит об однородности распределения дислокаций и отсутствии ЗСО с формированием субструктуры с малоугловой разоориентацией.

На рис. 9 представлен вариант составной конструкции охлаждаемой лопатки, полученной с использованием ЭЛС. Подобное решение позволяет кроме упрощения технологии изготовления при меньших затратах получить оптимальную инновационную геометрию внутренних каналов, что обеспечивает максимальный коэффициент внутреннего охлаждения лопатки.

На основе результатов исследований разработана принципиальная технология сварки, позволяющая обеспечить сохранение монокристаллической структуры с разориентацией структурных составляющих, не превышающей  $5^\circ$ , отсутствие трещин и зерен случайной ориентации. Кроме известных технологических мероприятий по ремонту поликристаллических лопаток, технология включает следующие базовые операции:

- определение кристаллографической ориентации дефектной зоны;

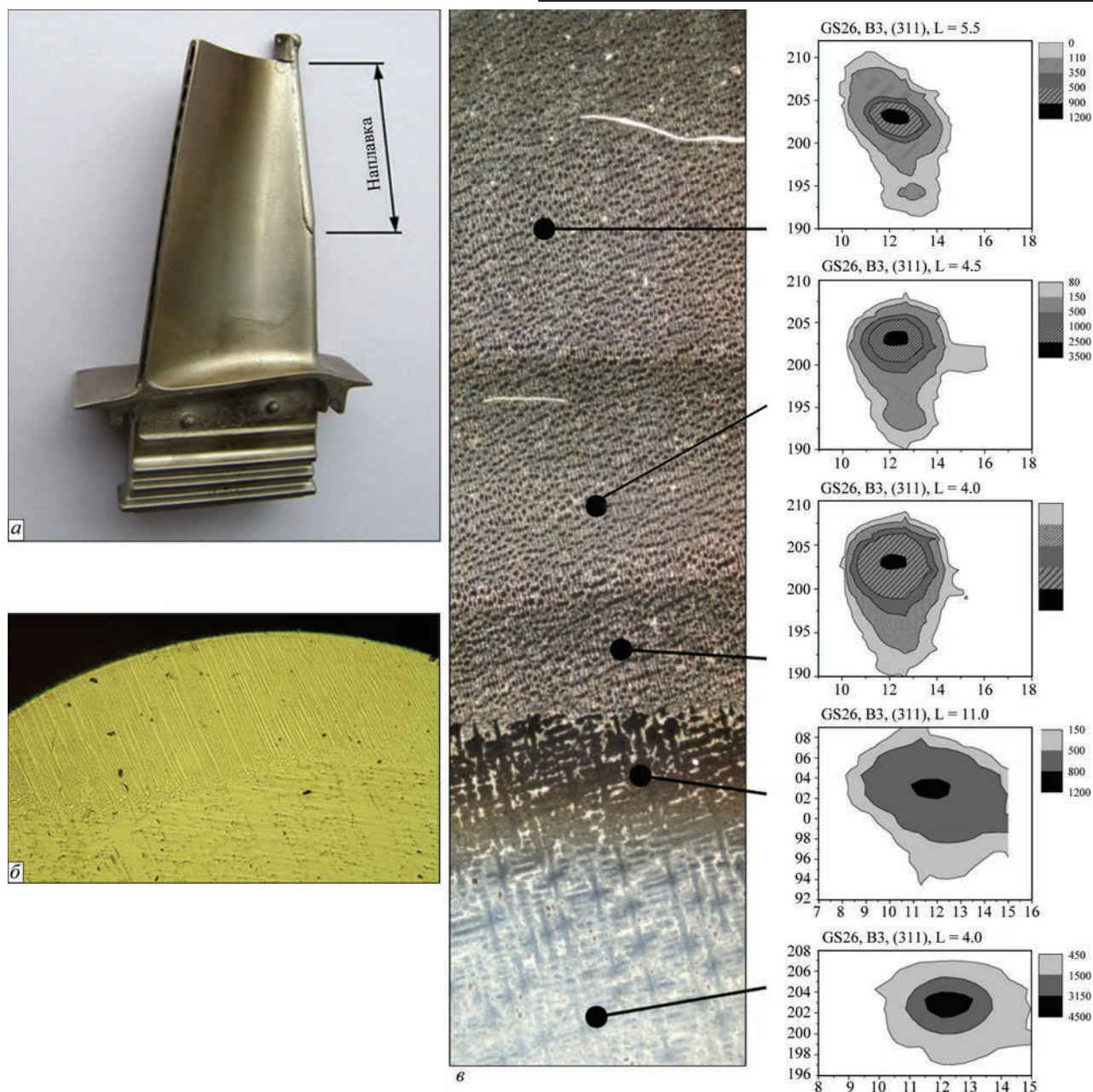


Рис. 8. Внешний вид (а) и структура (б —  $\times 100$ ; в —  $\times 50$ ) монокристаллической лопатки из сплава ЖС32 турбины высокого давления авиационного ГТД с восстановленной входной кромкой путем однопроходной (б) и многопроходной (в) наплавки электронным лучом

- оптимизацию формы сварочной ванны;
- выбор параметров режима и техники электронно-лучевой сварки, которые обеспечивают требуемую геометрию сварочной ванны и температурно-временные параметры на фронте кристаллизации.

Технология реализована при ремонте рабочих лопаток сплава ЖС26 и ЖС32. Выполнены экспериментальные работы по укрупнению монокристаллических заготовок толщиной 1,5...5,0 мм.

Уровень механических свойств соединений монокристаллического сплава ЖС26 составляет:

- кратковременные механические свойства сварных соединений сплава в диапазоне температур 500...1000 °С не ниже уровня свойств исход-

ного монокристалла во всем исследованном температурном диапазоне;

- длительная прочность сварного соединения на базе 100 ч при 900 °С достигает  $\sigma_{100} \geq 240$  МПа, что составляет примерно 75 % от основного металла.

Приведенные результаты показывают возможность формирования сварных соединений сложной геометрии и наплавов с монокристаллической структурой, что потенциально позволяет использовать сварку плавлением при ремонте и производстве монокристаллических деталей. Отсутствие зерен в таком изделии, а соответственно, и большеугловых границ дает основание ожидать высоких эксплуатационных параметров и работоспособности сварных конструкций.



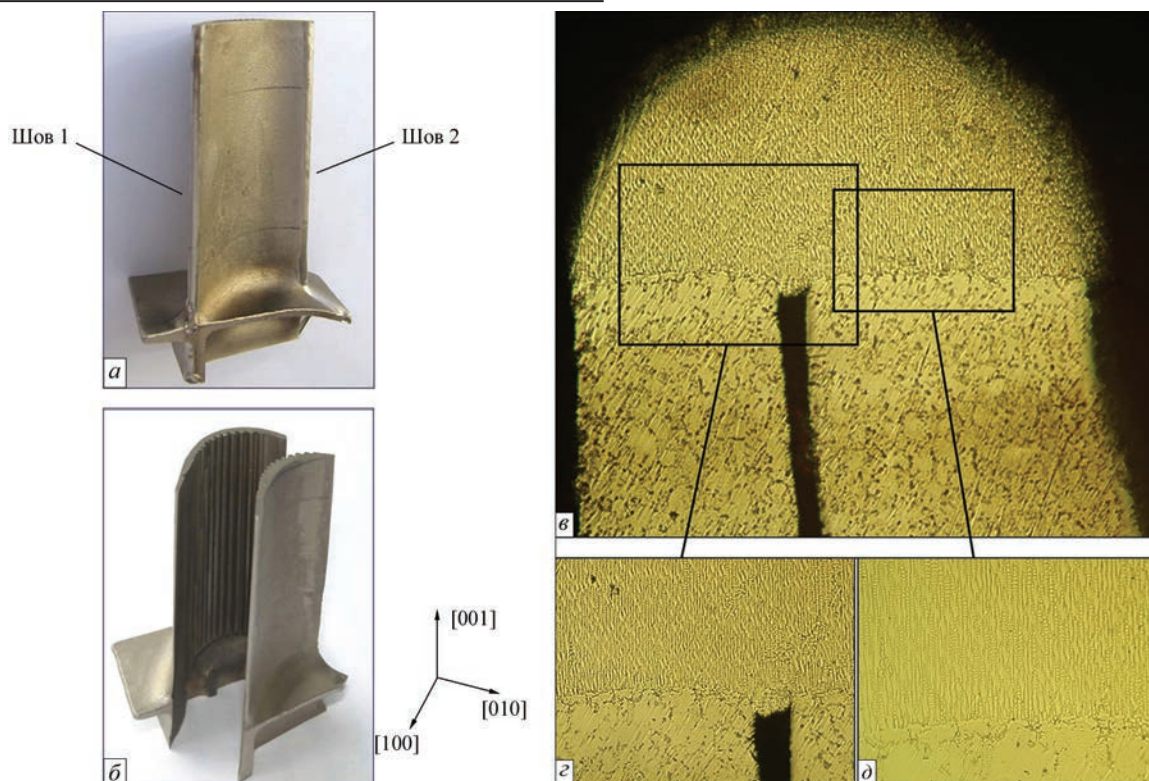


Рис. 9. Макет цельносварной монокристаллической охлаждаемой рабочей лопатки из сплава ЖС26 (а), полученной при ЭЛС заготовок (б) с типовым кристаллографическим строением, и микроструктура (в —  $\times 50$ ; г —  $\times 100$ ; д —  $\times 200$ ) металла соединения

Очевидно, что использование этих технологий позволит:

- обеспечить создание инновационной продукции на принципиально новой основе с повышенными механическими характеристиками и эксплуатационными параметрами;
- снизить трудоемкость и стоимость изготовления;
- уменьшить расход материалов;
- обеспечить экономию энергоресурсов;
- повысить конкурентоспособность продукции на международном рынке.

Естественно, что предлагаемые решения требуют дальнейшего развития в плане конструкторской и технологической доработки совместно с разработчиками и изготовителями продукции.

Учитывая изложенные фундаментальные и прикладные наработки, можно заключить, что привлечение сварочных технологий может служить в настоящее время наиболее рациональным, если не единственным в некоторых случаях, решением проблемы создания изделий сложной геометрии из ЖНС с монокристаллической структурой.

### Список литературы

1. Строганов Г. Б., Чепкин В. М. (2000) *Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин*. Москва, ОНТИ МАТИ.
2. Петухов А. Н. (1993) *Сопротивление усталости деталей ГТД*. Москва, Машиностроение.
3. Каблов Е. Н. (2001) *Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия)* Москва, МИСИС.
4. Сорокин Л. И. (2004) Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (Обзор). Ч. 2. *Сварочное производство*, **10**, 8–16.
5. Сорокин Л. И. (2004) Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (Обзор). Ч. 1. *Там же*, **9**, 3–7.
6. John C. Lippold, Damian J. Cotecki (2005) *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley interscience A J. Wile&sons inc. Publication.
7. Pollock T. M., Murphy W. H. (1996) The Breakdown of Single-Crystal Solidification in High Refractory Nickel-Base Alloys. *Mettall. Mater. Trans. A* **27A**, 1081–1094.
8. 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 Physisc*, **94**, **6**, 4203–4209.
9. Czyrska-Filemonowicz A., Dubiel B., Zietara M., Cetel A. (2007) Development of single crystal Ni-based superalloys for advanced aircraft turbine blades. *In yineria Materialowa*, **3-4**, 128–133.
10. Reed R. C. (2006) *The Superalloys: Fundamentals and Application*. Cambridge University Press, Cambridge.
11. (2004) *Авиационные материалы*. Науч.-техн. сб. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». Москва, ВИАМ.
12. Fitzpatrick G. A., Broughton T. (1986) «Rolls-Royce Wide Chord Fan Blade» international Conference on Titanium Products and Applications. San Francisco, California, USA, October 1986.
13. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. (2008) *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. Учебник для ВУЗов. Москва, Машиностроение.
14. 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.
15. Ющенко К. А., Гах И. С., Задерий Б. А. и др. (2013) Основные теоретические предпосылки сварки металлических монокристаллов. *Физико-технические проблемы современного материаловедения*. Т. 1. Академперіодика, сс. 148–176.
  16. Ющенко К. А., Гах И. С., Задерий Б. А. и др. (2013) Влияние геометрии сварочной ванны на структуру металла швов монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **5**, 46–51.
  17. 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**, **10**, 1347–1357.
  18. Ющенко К. А., Задерий Б. А., Звягинцева А. В. (2009) Особенности структуры металла торцевых наплавов монокристаллических лопаток из никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, **8**, 46–53.
  19. Ющенко К. А., Задерий Б. А., Гах И. С. и др. (2009) О возможности наследования монокристаллической структуры сложнорегированных никелевых сплавов в неравновесных условиях сварки плавлением. *Металлофизика и новейшие технологии*, **31**, **4**, 473–485.
  20. Ющенко К. А., Задерий Б. А., Котенко С. С. и др. (2008) Склонность к образованию трещин и структурные изменения при ЭЛС монокристаллов жаропрочных никелевых суперсплавов. *Автоматическая сварка*, **2**, 10–19.
  21. Ющенко К. А., Задерий Б. А., Карасевская О. П. и др. (2006) Структурные изменения в процессе кристаллизации никелевых суперсплавов при кристаллографически асимметричном расположении сварочной ванны. *Металлофизика и новейшие технологии*, **28**, **11**, 1509–1527.
  22. Ющенко К. А., Задерий Б. А., Карасевская О. П. и др. (2006) Структура сварных соединений монокристаллов вольфрама. *Автоматическая сварка*, **8**, 5–12.
  23. Ющенко К. А., Карасевская О. П., Котенко С. С. и др. (2005) К вопросу наследования сварными соединениями структурно-ориентированного состояния металлических материалов. *Там же*, **9**, 3–11.
  24. Задерий Б. А., Котенко С. С., Полищук Е. П. и др. (2003) Особенности кристаллического строения сварных соединений монокристаллов. *Там же*, **5**, 14–21.
  25. Clark D., Bache M. R., Whittaker M. T. (2008) Shaped metal deposition of nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 439–448.
  26. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. (2015) Wire-feed additive manufacturing of components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **81**(1-4), 465–481.
  27. Frazier W. E. (2014) Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **23**(6), 1917–1928.
  28. Brandla E., Baufeld B., Leyens C., Gault R. (2010) Additive manufactured Ti–6Al–4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace materials specification. *Proceedings of the Laser Assisted Net Shape Engineering*, **5**, Part B, 595–606.
  29. *Additive Manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines*. Press – Siemens Global Website. Munich, Mar 19, 2018. [www.siemens.com/press/en/](http://www.siemens.com/press/en/)
  30. Rockstroh T., Abbott D., Hix K., Mook J. (2013) Lessons learned from development cycle. *Additive manufacturing at GE Aviation – Industrial Laser Solutions*, 1–6. [www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html](http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html)
  4. Sorokin, L.I. (2004) Weldability of high-temperature nickel alloys (Review). Pt 2. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 8-16 [in Russian].
  5. Sorokin, L.I. (2004) Weldability of high-temperature nickel alloys (Review). Pt 1. *Ibid.*, **9**, 3-7 [in Russian].
  6. Lippold, J., C., Cotecki, D.J. (2005) *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Wiley Interscience. A J.Wiley&sons inc. Publication.
  7. Pollock, T.M., Murphy, W.H. (1996) The breakdown of single-crystal solidification in high refractory nickel-base alloys. *Metall. Mater. Transact. A.*, **27A**, 1081-1094.
  8. 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.
  9. Czyrska-Filemonowicz, A., Dubiel, B., Zietara, M., Cetel, A. (2007) Development of single crystal Ni-based superalloys for advanced aircraft turbine blades. *Ingnieria Materialowa*, **3-4**, 128-133.
  10. Reed, R.C. (2006) *The superalloys: Fundamentals and application*. Cambridge, Cambridge University Press.
  11. (2004) *Aviation materials*. In: Sci.-Techn. Coll.: High-temperature high-temperature alloys, technology and equipment for production of alloys and casting of single crystal GTE blades. Moscow, VIAM [in Russian].
  12. Fitzpatrick, G.A., Broughton, T. (1986) Rolls-Royce wide chord fan blade. In: Proc. of Int. Conf. on Titanium Products and Applications (San, Francisco, California, USA, October 1986).
  13. Inozemtsev, A.A., Nikhamkin, M.A., Sandratsky, V.L. (2008) Principles of design of aircraft engines and power units. Vol. 2: Compressors. Combustion chambers. Afterburners. Turbines. Output devices. In: Manual for higher education institutes. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
  14. 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.
  15. Yushchenko, K.A., Gakh, I.S., Zadery, B.A. et al. (2013) Main theoretical backgrounds of welding of metal single crystals. In: Physical and technical problems of modern materials science. Vol. 1. *Akademperіodika*, 148-176 [in Russian].
  16. 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. *The Paton Welding J.*, **5**, 45-50.
  17. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S., et al. (2013) On nature of grains of random orientation in welds of single-crystal high-temperature nickel alloys. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, **35**(10), 1347-1357 [in Russian].
  18. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Zvyagintseva, A.V. et al. (2009) Peculiarities of structure of metal deposited on edges of single-crystal blades made from nickel superalloys. *The Paton Welding J.*, **8**, 36-42.
  19. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Gakh, I.S. et al. (2009) On possibility of inheritance of single-crystal complexly-alloyed nickel alloys under nonequilibrium conditions of fusion welding. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, **31**(4), 473-485 [in Russian].
  20. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Kotenko, S.S. et al. (2008) Sensitivity to cracking and structural changes in EBW of single crystals of heat-resistant nickel alloys. *The Paton Welding J.*, **2**, 6-13.
  21. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Karasevskaya, O.P. et al. (2006) Structural changes in crystallization process of nickel superalloys in crystallography-asymmetric location of welding pool. *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, **28**(11), 1509-1527 [in Russian].
  22. Yushchenko, K.A., Zadery, B.A., Karasevskaya, O.P. et al. (2006) Structure of welded joints in tungsten single crystals. *The Paton Welding J.*, **8**, 29-36.
  23. Yushchenko, K.A., Karasevskaya, O.P., Kotenko, S.S. et al. (2005) Inheritance of structure-oriented state of metallic materials by welded joints. *Ibid.*, **9**, 2-9.

## References

1. Stroganov, G.B., Chepkin, V.M. (2000) *Cast high-temperature alloys for gas turbines*. Moscow, ONTI MATI [in Russian].
2. Petukhov, A.N. (1993) *Fatigue resistance of GTE parts*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Kablov, E.N. (2001) *Cast blades of gas-turbine engines (alloys, technology, coatings)*. Moscow, MISIS [in Russian].

24. Zadery, B.A., Kotenko, S.S., Polishchuk, E.P. et al. (2003) Peculiarities of crystalline structure of welded joints in single crystals. *Ibid.*, **5**, 13-20.
25. Clark, D., Bache, M.R., Whittaker, M.T. (2008) Shaped metal deposition of nickel alloy for aero engine applications. *J. Materials Proc. Technology*, **203**, 439-448.
26. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. (2015) Wire-feed additive manufacturing of components: technologies, developments and future interests. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **81(1-4)**, 465-481.
27. Frazier, W.E. (2014) Metal additive manufacturing (Review). *J. Mater. Eng. and Performance*, **23(6)**, 1917-1928.
28. Brandla, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R. (2010) Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace materials specification. *Proc. of the Laser Assisted Net Shape Engineering*, **5**, Pt B, 595-606.
29. (2018) Additive manufacturing: Siemens uses innovative technology to produce gas turbines. Press-Siemens Global Website, Munich, Mar 19. [www.siemens.com/press/en/](http://www.siemens.com/press/en/)
30. Rockstroh, T., Abbott, D., Hix, K., Mook, J. (2013) Lessons learned from development cycle. Additive manufacturing at GE Aviation – Industrial Laser Solutions, 1-6. [www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html](http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-28/issue-6/features/additive-manufacturing-at-ge-aviation.html)

## ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ЗВАРНИХ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

**К. А. ЮЩЕНКО, Б. О. ЗАДЕРІЙ, І. С. ГАХ, Г. В. ЗВЯГІНЦЕВА**

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Жароміцні нікелеві сплави з монокристалічною структурою застосовуються в таких галузях виробництва, як турбобудування, авіаційно-космічна техніка і енергетика. Однак їх подальше освоєння стримується складністю, а іноді — і неможливістю отримання елементів конструкцій великих розмірів і розвиненої геометрії. Виробництво, як і ремонт, традиційними способами монокристалічних виробів з розвиненою геометрією таких, наприклад, як довгомірні або охолоджувальні лопатки газових турбін і ін., являють собою складне технологічне завдання. Виготовлення вузлів, деталей, конструкцій подібного роду шляхом їх зварювання з окремих елементів або нарощування, часто видається більш раціональним і дозволяє створювати вироби з монокристалічною структурою на принципово новій основі. Метою представленої роботи є розвиток нових підходів стосовно виробництва монокристалічних зварних конструкцій відповідального призначення з підвищеними механічними характеристиками і експлуатаційними параметрами. Наведено результати досліджень і приклади дослідних зварних конструкцій такого роду, отриманих в Інституті електрозварювання ім. С. О. Патона НАН України. Бібліогр. 30, рис. 9.

*Ключові слова:* жароміцні нікелеві сплави, монокристали, зварні конструкції складної геометрії, електронно-променево зварювання, лопатки газових турбін, умови формування монокристалічної структури

## PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF WELDED SINGLE-CRYSTAL STRUCTURES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS

**K.A. YUSHCHENKO, B.A. ZADERII, I.S. GAKH, A.V. ZVYAGINTSEVA**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., Kyiv, 03150.  
E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Heat-resistant nickel alloys with single-crystal structure are used in such branches of industry as turbine manufacture, aerospace engineering and power engineering. However, their further mastering is restrained by complexity, and sometimes impossibility of production of structure elements of large size and developed geometry. Production as well as repair using traditional methods of single-crystal products with developed geometry such as, for example, long or cooled gas turbine blades etc., represent a complex technological and expensive problem. Manufacture of assemblies, parts, structures of such type by means of their welding from separate elements or building-up often seems to be more reasonable and allows developing products with single-crystal structure on virtually new basis. The aim of the presented work is development of new approaches applicable to manufacture of the single-crystal welded structures of critical designation with increased mechanical characteristics and service parameters. The results of investigations and examples of pilot welded structures of such type, produced at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, are presented. 30 Ref., 9 Fig.

*Keywords:* heat-resistant nickel alloys, single-crystals, welded structures of complex geometry, electron-beam welding, gas turbine blades, conditions of formation of single-crystal structure

Поступила в редакцію 13.07.2018