

## ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ РЕМОНТ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**В. М. НЕСТЕРЕНКОВ<sup>1</sup>, Ю. В. ОРСА<sup>1</sup>, К. С. ХРИПКО<sup>1</sup>, Ю. В. ГУСЕВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ГП «ЛРЗ «Мотор». 43006, г. Луцк, Волынская обл., ул. Киверцовская, 3. E-mail: info@motor-lutsk.com.ua

Восстановление газотурбинных двигателей является весьма актуальной и одновременно сложной задачей, решение которой обеспечивает значительную экономию средств. В работе отражены результаты разработки эффективного и надежного способа ремонта лопаток газотурбинных двигателей с использованием электронно-лучевой сварки. Отработана технология ремонта трех типов дефектов пера лопатки с использованием «вварышей». Показано, что электронно-лучевая сварка идеально подходит для решения задачи замены отдельных элементов неразъемно собранных узлов газотурбинных двигателей. Библиогр. 4, рис. 14.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, газотурбинные двигатели, восстановительный ремонт, замена узлов, технологические приемы, точечные и протяженные дефекты, «вварыши»

Целесообразность восстановительного ремонта дорогостоящих частей газотурбинных двигателей (ГТД) не вызывает сомнения [1].

Например, при эксплуатации авиационных ГТД одной из основных причин их досрочной замены является повреждение титановых лопаток вентилятора и компрессора в результате попадания в двигатель посторонних предметов. Обычно эксплуатация двигателя допускается при незначительных дефектах входной и выходной кромок пера лопатки без надрывов. Часть аналогичных (т. е. без надрывов), но немного больших, дефектов допускается ремонтировать непосредственно на двигателе. Так, например, зачищают приподнятости материала у забоин, погнутости лопаток устраняют правкой. Затем исправленные места полируют. Иногда допускается устранение забоин за счет плавного скругления кромки радиусом до 10...12 мм. Напротив, исправление местных повреждений лопаток, превышающих допустимые нормы, уже требует демонтажа поврежденной лопатки и ремонта в производственных условиях. Обычно такой ремонт заключается в механическом удалении дефектной области до границ заведомо неповрежденного металла лопатки с последующим прикреплением (сварка, пайка) вместо нее вкладыша из того же металла соответствующего размера и с технологическим припуском по толщине для получения последующей механической обработкой нужного профиля ремонтного участка лопатки [2–4].

Вообще решение о допустимости ремонта каждого конкретного дефекта лопатки принимает аккредитованная ремонтная организация, исходя из следующих аспектов: принадлежность лопатки к компрессору низкого давления (КНД) или же к

компрессору высокого давления (КВД), тип лопатки (т. е. рабочая или направляющая), номер ступени компрессора, входная это кромка пера или выходная, и наконец – оценивая непосредственно размеры самих дефектов, их количество и расположение относительно мест максимальных эксплуатационных напряжений (в том числе резонансных).

Наша же задача заключалась исключительно в разработке эффективного и надежного способа, принципиально позволяющего такой ремонт с использованием электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в отечественных производственных условиях. В качестве объектов для отработки технологических приемов ремонта были выбраны точечные и протяженные дефекты входной кромки пера титановых лопаток различного размера, а именно: вентиляторных лопаток и лопаток КНД ГТД.

Была разработана следующая схема сварного соединения ремонтного «вварыша» и пера лопатки, принципиально независимая от того, точечный это или протяженный дефект (рис. 1).

Во всех случаях соединение выполняется однопроводной ЭЛС, а плавный (без подрезов) переход от поверхности «вварыша» к основному металлу обеспечивается как за счет умеренной концентрации электронного пучка, так и за счет достаточного количества дополнительного металла — благодаря примененной конструкции сварного соединения с «нависающим буртиком». При этом такой плавный переход достигается как на участках достаточно большой толщины пера, так и в самых тонких местах, прилегающих к кромке (рис. 2).

Отработана технология ремонта трех типов дефектов пера лопатки: точечного повреждения угла

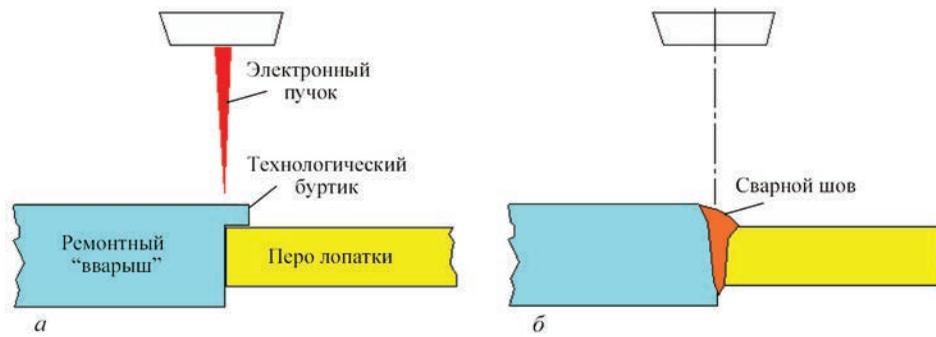


Рис. 1. Схема ремонтного ЭЛС-соединения «вварыша» и пера лопатки: а — до сварки; б — после



Рис. 2. Макрошлифы ремонтного ЭЛС-соединения «вварыша» и пера лопатки

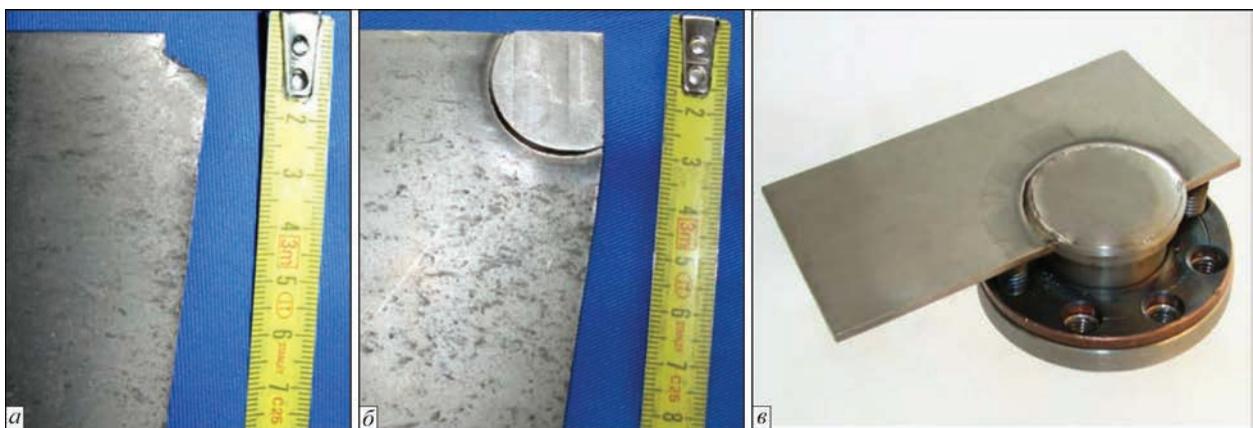


Рис. 3. Ремонт точечных дефектов угла пера лопатки с применением цилиндрических ремонтных «вварышей»: а — поврежденный угол лопатки до ремонта; б — отремонтированный угол (края «вварыша» обрезаны после ЭЛС); в — сборочно-сварочная оснастка для ЭЛС цилиндрических «вварышей» (имитатор лопатки)

лопатки, точечного повреждения кромки основной части пера лопатки, а также протяженных локальных дефектов кромки, начинающихся от угла лопатки.

Ремонт обоих типов точечных дефектов осуществляется с использованием цилиндрических «вварышей» (рис. 3 и 4), нескольких типоразмеров диаметров в зависимости от размеров дефекта кромки пера.

Подобная конструкция выгодна тем, что при совпадении диаметров вырезанного в лопатке «окна» и «вварыша» сама обеспечивает фиксацию и плотный контакт стыкуемых деталей в радиальном направлении. Поэтому достаточно простому сборочно-сварочному приспособлению (рис. 3, в) остается лишь обеспечивать прижим кромки вы-

резанного «окна» к вышеупомянутому «нависающему буртику», а также удерживание всей сборки в пространстве во время выполнения электронно-лучевого прохода вдоль дуги соответствующей окружности.

Работы проведены вначале на образцах, имитирующих реальные изделия. Затем результаты успешно опробованы на опытных партиях дефектных лопаток, предоставленных ГП «Ивченко-Прогресс» (рис. 4, б).

Для протяженных дефектов различных участков кромки пера лопатки используются соответственно протяженные «вварыши», форма которых может видоизменяться в зависимости от ширины и формы поврежденной зоны кромки пера лопатки. В частности, это может быть как узкая полоса,



Рис. 4. Ремонт точечных дефектов основной части кромки пера лопатки с применением цилиндрических ремонтных «вварышей»: *a* — цилиндрический ремонтный «вварыш» на кромке пера (его край обрезан при первичной механической обработке после ЭЛС); *б* — опытная партия лопаток КНД ГТД с цилиндрическими «вварышами» на кромке пера (до финишной механической обработки)

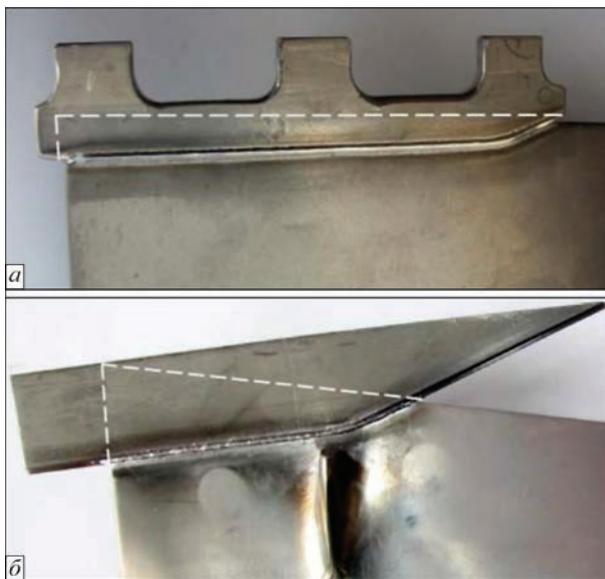


Рис. 5. Ремонт протяженных дефектов кромки пера лопатки: восстановление узкой зоны, граничной с кромкой пера (*a*); восстановление более широкой зоны с сильно поврежденным углом пера (*б*)

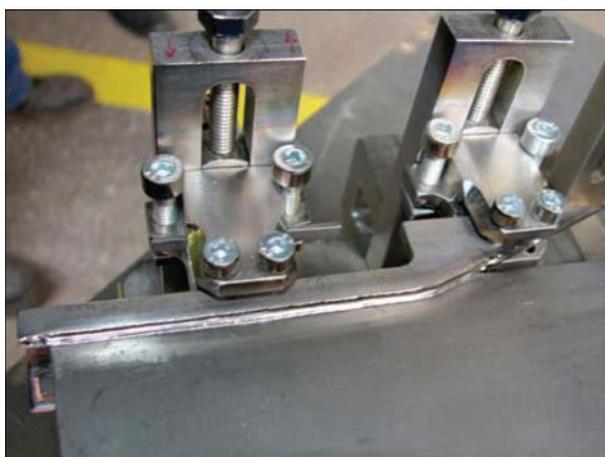


Рис. 6. Электронно-лучевое соединение пера лопатки с протяженным ремонтным «вварышем» в сборочно-сварочной оснастке

заменяющая только поврежденную часть кромки пера (рис. 5, *a*), так и «вварыш», ширина которого сильно расширяется к углу – для случая сильного



Рис. 7. Примеры реализации разработанной ремонтной технологии для различных типоразмеров лопаток (большие — вентиляторного тракта, меньшие — КНД), а также формы и протяженности дефектов кромки пера

повреждения не только самой кромки, но и угла (рис. 5, *б*).

Соответственно, для равномерного прижатия таких «вварышей» по всей длине криволинейного стыка с пером используются уже другие, более сложные, сборочно-сварочные приспособления (рис. 6).

Разработанная ремонтная технология опробована на кромках пера лопаток различных трактов и, соответственно, типоразмеров при ремонте дефектов различного размера и формы (рис. 7).

Кроме ремонта локальных дефектов лопаток, не менее важной задачей является замена отдельных элементов неразъемно собранных узлов газотурбинного двигателя. В частности, подобная задача поставлена Луцким ремонтным заводом «Мотор».

Направляющие аппараты 3...8 ступеней статора компрессора высокого давления газотурбинного двигателя состоят из полуколец с набором впадных в них консольных лопаток (рис. 8). Лопатки 3...6 ступеней изготовлены из сплава ЭП-866 (15X16K5H2МФАБ-ш), а лопатки 7, 8 ступеней –

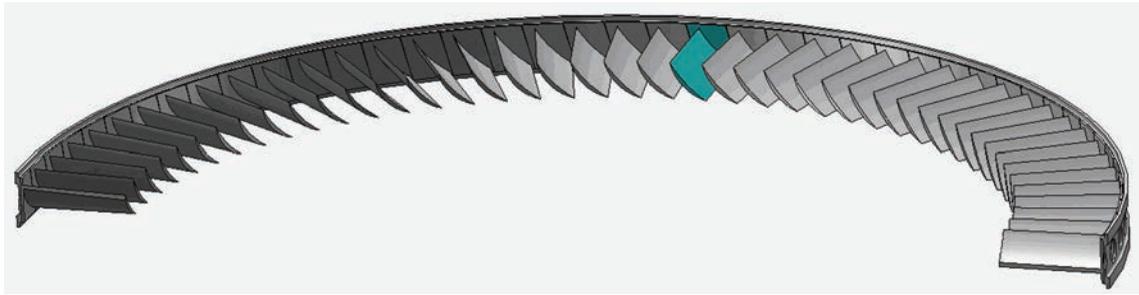


Рис. 8. Схема полукольца направляющего аппарата статора с набором впаянных в него консольных лопаток

из сплава ЭП-718-ИД (ХН45МВТЮБР-ИД); рабочая температура узлов составляет 300...500 °С.

При эксплуатации таких двигателей также имеют место случаи появления забоин и трещин на лопатках, а также их отрыва по причине локального непрочая их со стенкой полукольца.

Согласно «Руководству по капитальному ремонту двигателей» допускается замена дефектных лопаток. При этом дефектную лопатку удаляют фрезерованием из полукольца до самой его стенки, включая и весь удерживающий ранее лопатку припой, а на ее место подбирают неповрежденную лопатку-донор (рис. 9). Иными словами в по-

лукольце делается полностью очищенная площадка для установки лопатки-донора. Очевидно, что повторить исходный процесс пайки невозможно, не затронув соседние, еще годные лопатки. Поэтому необходим способ крепления с локальным и концентрированным температурным воздействием на весь собранный узел. Существующая ранее технология фиксации лопатки-донора предполагала использование аргонодуговой сварки с последующей зачисткой усиления шва для восстановления геометрии торца полукольца направляющего аппарата. Недостатками такой технологии являлись значительное искажение формы изделия, а также малая глубина провара и, вследствие этого, недостаточная площадь зоны соединения, остающаяся после обработки усиления шва, а значит и высокая вероятность отрыва замененной лопатки при эксплуатации двигателя.

Способ ЭЛС идеально подходит в данном случае, позволяя получить надежное сварное соединение достаточной глубины при сравнительно небольшом тепловложении в свариваемое изделие.

Была разработана следующая схема сварного соединения лопатки-донора и стенки полукольца направляющего аппарата (рис. 10). Соединение лопатки со стенкой выполняется двусторонней ЭЛС с промежуточным переворотом изделия на 180°. Конструктивной прочности двух подобных швов вполне достаточно для надежного крепления лопатки, не уступающего соседним паянным.

Учитывая то, что это статорная (т.е. неподвижная) часть двигателя, чрезмерно высоких требова-



Рис. 9. Полукольцо с подготовленной площадкой для установки консольной лопатки-донора

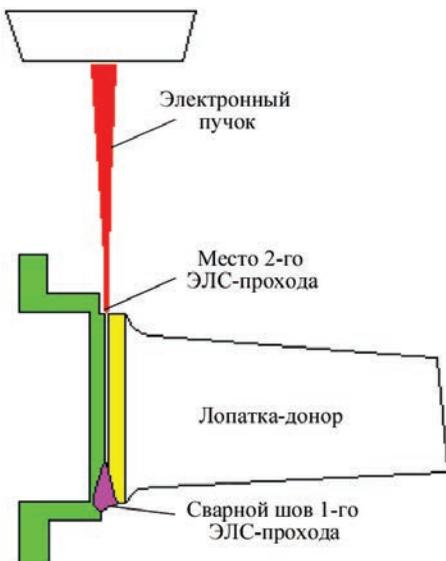


Рис. 10. Схема двусторонней ЭЛС лопатки-донора со стенкой полукольца направляющего аппарата

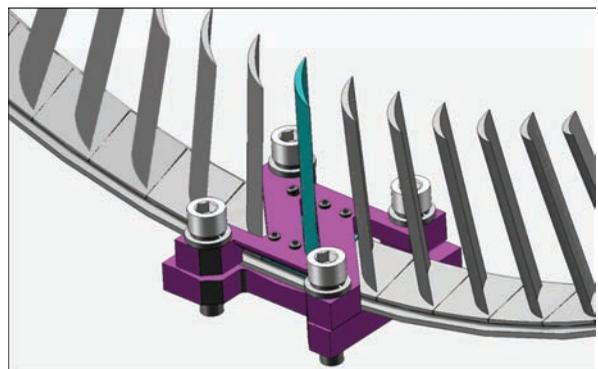


Рис. 11. Модель сборочно-сварочного приспособления для ЭЛС консольной лопатки-донора с полукольцом направляющего аппарата

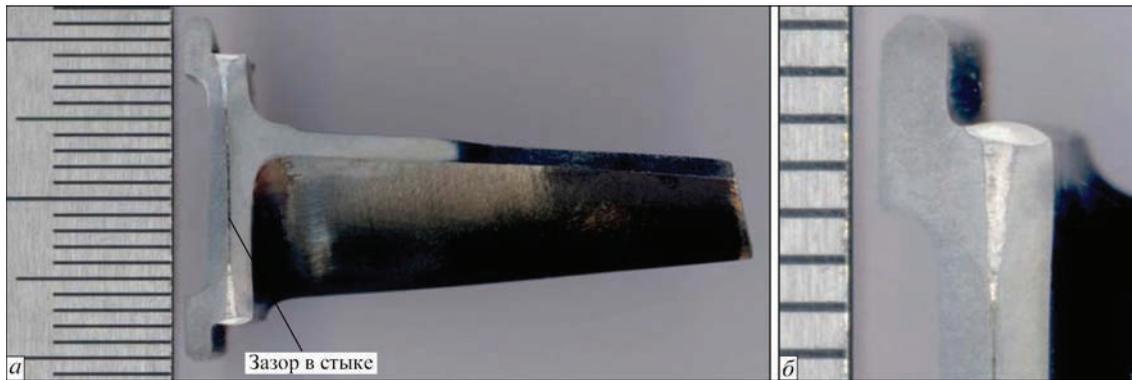


Рис. 12. Макрошлиф поперечного сечения ЭЛ-соединения лопатки с полукольцом направляющего аппарата, полученного при зазоре в стыке до 0,1 мм (а) и область сечения, содержащая сам сварной шов (б)



Рис. 13. Вид ремонтного соединения с торца полукольца направляющего аппарата



Рис. 14. Отремонтированные полукольца направляющих аппаратов различных ступеней статора КВД

ний к геометрической точности установки лопатки-донора не требуется. Поэтому и не требуется особо сложная сборочно-сварочная оснастка, что обычно является самой затратной частью при использовании ЭЛС. Разработанная лабораторная оснастка (рис. 11) обеспечила достаточно точную регулировку пространственной ориентации лопатки-донора и ее надежную фиксацию при последующей сварке. Позднее разработана и передана Заказчику конструкторская документация на промышленный вариант подобной оснастки для ремонта полуколец направляющего аппарата на имеющейся у него установке для ЭЛС типа КЛ-188.

Главной технологической проблемой, связанной, в частности, с особенностями самого спосо-

ба ЭЛС, были возможные зазоры в стыке между стенкой полукольца и основанием лопатки-донора, получающиеся в результате сложности локального механического удаления поврежденной лопатки и формирования площадки под лопатку-донора. Такие зазоры весьма критичны, поскольку сама толщина стенки, к которой приваривается лопатка, составляет в некоторых местах всего 0,5 мм.

В результате экспериментов, проведенных на образцах-имитаторах, был найден оптимальный компромисс между энергетическими параметрами электронного пучка и возможностью формирования достаточно глубокого шва в тонкостенном соединении при наличии зазора в стыке. При этом для улучшения формирования шва и уменьшения общего тепловложения применен импульсный режим ЭЛС, что позволило получать качественное соединение деталей при локальных зазорах в стыке до 0,1 мм. Затем подобранные режимы ЭЛС были скорректированы уже на реальных соединениях лопаток с полукольцом направляющего аппарата (рис. 12 и 13).

Технология успешно опробована при ремонте партии реальных полуколец направляющих аппаратов различных ступеней статора КВД — вначале в лабораторных условиях в ИЭС (рис. 14), а позднее на Луцком ремонтном заводе «Мотор».

### Список литературы

1. Безъязычный В. Ф., Стризов А. Н. (2010) Повышение эффективности ремонта газотурбинных двигателей на основе его локализации. *Справочник. Инженерный журнал с приложениями*, **8**, 52-56.
2. Елисеев Ю. С., Крымов В. В., Малиновский К. А., Попов В. Г. (2002) *Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей*. Москва, Высшая школа.
3. Крымов В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. (2002) *Производство лопаток газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение.
4. Мошкин Ю. Б., Елисеев Ю. С., Поклад В. А., Гейкин В. А., Редчин В. В. (2002) *Способ восстановления лопаток турбомашин*. РФ, Пат. 2185945, МПК8 В23Р6/00.

References

1. Beziyazychny, V.F., Strizhov, A.N. (2010) Increase in efficiency of repair of gas turbine engines on the base of its localization: *Refer. book. Ingenerny J. s Prilozheniem*, **8**, 52-56 [in Russian].
2. Eliseev, Yu.S., Krymov, V.V., Malinovsky, K.A. et al. (2002) *Technology of service, diagnostics and repair of gas turbine engines*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
3. Krymov, V.V., Eliseev, Yu.S., Zudin, K.I. (2002) *Production of blades of gas turbine engines*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Moshkin, Yu.B., Eliseev, Yu.S., Poklad, V.A. et al. (2002) *Method of restoration of blades of turbomachines*. Pat. RF 2185945, Int. Cl. 8 B 23P6/00 [in Russian].

V. M. Нестеренков<sup>1</sup>, Ю. В. Орса<sup>1</sup>,  
К. С. Хрипко<sup>1</sup>, Ю. В. Гусев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.

03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>ДП «ЛРЗ «Мотор». 43006, м. Луцьк, Волинська обл., вул. Ківерцівська, 3. E-mail: info@motor-lutsk.com.ua

ВІДНОВЛЮВАЛЬНИЙ РЕМОНТ ЕЛЕМЕНТІВ  
ТА ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Відновлення газотурбінних двигунів є досить актуальним і одночасно складним завданням, рішення якого забезпечує значну економію коштів. У роботі відображені результати розробки ефективного і надійного способу ремонту лопаток газотурбінних двигунів з використанням електронно-променевого зварювання. Відпрацьовано технологію ремонту трьох типів дефектів пера лопатки з використанням «зваривів». Показано, що елек-

тронно-променево зварювання ідеально підходить при вирішенні завдання заміни окремих елементів нероз'ємно зібраних вузлів газотурбінних двигунів. Бібліогр. 4, рис. 14.

*Ключові слова:* електронно-променево зварювання, газотурбінні двигуни, відновлювальний ремонт, заміна вузлів, технологічні прийоми, точкові і протяжні дефекти, «звариві»

V. M. Nesterenkov<sup>1</sup>, YU. V. Orsa<sup>1</sup>,  
K.S. Khripko<sup>1</sup>, YU.V. Gusev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.  
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>SE Lutsk Repair Plant «LRZ «Motor». 3, Kivertsovskaya,  
43006, Lutsk, Volyn region. E-mail: info@motor-lutsk.com.ua

RESTORATION REPAIR OF ELEMENTS  
AND UNITS OF GAS TURBINE ENGINES

Restoration of gas turbine engines is very urgent and at the same time difficult task, the solution of which provides significant cost savings. The work reflects the results of developing an efficient and reliable method for repairing gas turbine engine blades using electron beam welding. The technology of repairing three types of blade airfoil defects was mastered using welding-in pieces. It is shown that electron beam welding is ideally suited for solution of the problem of replacing individual elements of permanently assembled units of gas turbine engines. 4 Ref., 14 Fig.

*Key words:* electron beam welding, gas turbine engines, restoration repair, replacement of units, technological methods, spot and extended defects, welding-in pieces

Поступила в редакцію 06.10.2017



**18-я международная специализированная выставка**

Беларусь, Минск, проспект Победителей, 20/2

Организатор: ЗАО «МинскЭкспо»

**Направления экспозиций:**

- ◆ материалы для сварки, наплавки и пайки
- ◆ оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- ◆ источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- ◆ оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- ◆ электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- ◆ автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- ◆ автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- ◆ приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- ◆ научное информационное обеспечение сварки
- ◆ система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- ◆ охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- ◆ сертификация сварочного оборудования