

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕМОНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК\*

Л. В. КРАВЧУК, Б. А. ЛЯШЕНКО, Г. В. ЦЫБАНЕВ, доктора техн. наук,  
Р. И. КУРИАТ, К. П. БУЙСКИХ, Ю. С. НАЛИМОВ, кандидаты техн. наук  
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины)

Рассмотрены тенденции развития ремонтных технологий в практике эксплуатации газотурбинных двигателей. Разработана методика количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов их деталей на комплекс механических характеристик материала-основы в зоне ремонта. Эффективность технологии определяется изменением механических свойств.

*Ключевые слова:* энергетические установки, ремонтные технологии, детали газотурбинных двигателей, механические свойства

Современные тенденции развития газотурбостроения заключаются в одновременном создании системы обслуживания с разработкой новых двигателей [1]. Наиболее эффективным элементом этой системы является внедрение передовых технологий восстановительного ремонта для продления эксплуатации с организацией специализированных центров ремонта двигателей. В США ремонтом авиационной техники занимаются фирмы-производители двигателей, крупные независимые ремонтные компании, а также подразделения крупнейших авиакомпаний [2]. По прогнозам сумма продаж новых самолетов компании «Boeing» в ближайшие 20 лет составит 1,7 трлн дол. США, а доходы от обслуживания — 3,1 трлн дол. США. Причем половина этой суммы будет получена в результате ремонта. В 2000 г. доходы от ремонта составили 44,6 млрд дол. США, а к 2020 г. они возрастут до 110 млрд дол. США [2].

В настоящее время происходит расширение участка фирм-производителей газотурбинных двигателей (ГТД) в сфере сервисного обслуживания и ремонта двигателей. Фирма «Rolls-Royce» имеет 300 крупных заказчиков в 50 странах [3, 4], стимулирует организацию дочерних фирм, специализирующихся в области ремонта. Ежегодные контракты фирмы достигают 9 млрд дол. США.

Фирма GE разрабатывает новые ремонтные технологии [5], в том числе и для США [6], фирма «Alstom» — систему CLE, предусматривающую использование новых ремонтных технологий для увеличения межремонтных интервалов ГТУ [7].

Ведущие фирмы строят предприятия по ремонту энергетического оборудования в различных регионах мира [8]. Патентуется схема организации процесса ремонта промышленных ГТУ [9]. С 2000 г. фирма «Trans Canada Turbines» производит полное ремонтное обслуживание ГТУ. В ближайшие 10 лет сумма заказов на ремонт ГТУ типа RB 211 превысит 250 млн дол. США [10]. Все большее внимание уделяется разработке ремонтных технологий и подготовке ремонтного персонала [11] при прогнозировании экономических затрат на ремонт [12].

Ключевым вопросом ремонтных технологий остается оценка остаточного ресурса и его повышение, поэтому ряд работ посвящен созданию методик и математических моделей механики поврежденной среды для теоретического анализа процессов исчерпания ресурса материалов конструктивных элементов с учетом развивающихся в эксплуатационных условиях деградиационных процессов [13, 14]. Сопоставление результатов расчета на прочность со структурными изменениями металла, происходящими в процессе эксплуатации при высоких температурах, позволяет обнаруживать расчетным путем места наиболее вероятного накопления поврежденности [15].

Практика ремонта и восстановления деталей энергетического оборудования использует широкий спектр современных технологий. Для ремонта лопаток ГТУ фирма «MTU Aero Engines GmbH» запатентовала сочетание методов порошковой металлургии, сварки и механической обработки области шва [16], а также ремонтную технологию пайки припоями на основе никелевого сплава [17]. Приведены способы эффективного и рационального применения пайки для ремонта дефектных лопаток горячей ступени ГТУ и основные технологии, разработанные для этих целей [18, 19]. Разделанные дефектные места заполняют расплавленным порошковым материалом, состоящим из припоя и на-

\* Статья подготовлена по результатам выполнения целевой комплексной программы НАН Украины «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации конструкций, сооружений и машин» (2007–2009 гг.).



полнителя, путем напыления аргоновой микроплазмой [20]. Все более широкое распространение в практике находят методы лазерной сварки дефектов и лазерной наплавки для ремонта точечных дефектов в различных сочетаниях термической и финишной обработки [21–27].

Детали из жаропрочного никелевого сплава с высоким содержанием алюминия и титана трудно ремонтировать обычными способами сварки. Поэтому перспективным для ремонта несвариваемых сплавов является метод электроискрового легирования с использованием высокопрочного наполнителя. Отмечают [28], что механические свойства отремонтированного участка вполне удовлетворительны, но для внедрения технологии электроискрового легирования в промышленность требуются определенные усилия в будущем. Фирмы INI и «Mitsubishi» разработали новый метод электроискрового легирования — MSC (Micro Spark Coating) [29] для ремонта лопаток ГТД, который использует энергию высокочастотных микроэлектрических разрядов и может заменить в ряде случаев традиционные методы ремонта — сварочные, гальванические, газотермические. Фирма «Toshiba» для восстановления лопаток ГТД разработала метод HIP (Hot Iso-static Pressing) [30]. Увеличение ресурса детали, имеющей некоторое усталостное повреждение, достигают технологией ионного азотирования [31].

Находят применение новые интегрированные технологические процессы ремонта деталей ГТД, сочетающие различные операции. Эффективные процессы сварки и последующей локальной термической обработки электронным лучом [32]. Фирма «Snecma Moteurs SA» после сварки дефектного участка пера лопатки подвергает зону сварного шва холодной вальцовке. Этим в пера лопатки наводятся остаточные напряжения сжатия, которые компенсируют остаточные напряжения растяжения в сварном шве, чем достигается упрочнение восстановленной конструкции. Этот способ эффективен для ремонта моноблочных дисков с лопатками, где отдельные лопатки не могут быть сняты для замены или восстановления [33].

Большинство ремонтных технологий следует рассматривать как альтернативные. В связи с этим необходима разработка методик оценки и выбора технологий.

Эффективность ремонтных технологий прежде всего может быть оценена по изменению комплекса механических свойств зоны отремонтированного дефекта в сравнении со свойствами зоны, не подверженной ремонту [34].

Цель настоящей работы — создание методики количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов на служебные характеристики материала-основы в зоне ремонта.

**Методика исследований.** На образцах из неповрежденного материала и образцах с отремонтированными дефектами — имитаторами реальных повреждений, изготовленных из моделей лопаток ГТД из сплава ЭК-9, проведен комплекс исследований влияния особенностей технологии ремонта на характеристики кратковременной и длительной статической прочности, а также многоциклового усталости. Использовали ремонтные технологии способов дуговой сварки, наплавки и микроплазменной порошковой наплавки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. Образцы изготовлены электроэрозионным методом. После цикла наплавки образцы подвергали термообработке по принятой ремонтной технологии. На боковых поверхностях плоского образца для испытаний на растяжение выполняли двусторонние надрезы  $10 \times 0,5$  мм как имитаторы повреждений.

Особенностью испытаний было то, что измеряли деформацию не всего образца, а только в области повреждения с помощью экстензометра с базой измерений 12 мм. В аналогичной области ее измеряли и на неповрежденном образце. Регистрировали диаграммы деформирования таких образцов при температурах 20 и 800 °С. Исследования проведены на испытательном комплексе «INSTRON». В автоматическом режиме обеспечены программное нагружение, управление термическим состоянием и обработка информации в численном и графическом виде.

Для испытаний на многоцикловую усталость изготовлены образцы из сплава ЭК-9 двух видов: цилиндрические гладкие для определения в исходном состоянии и с концентратором глубиной 1 мм и длиной по образующей образца 2 мм. Концентратор имитировал дефект, подлежащий ремонту. Консольно закрепленный образец устанавливали на электродинамический стенд. В процессе испытаний устанавливали размах колебаний свободного конца консольного образца, который соответствует необходимому уровню амплитуды напряжений. Размах контролировали оптическим микроскопом МБС-2, количество циклов и частоту нагружения — электронно-счетными частотомерами ЧЗ-34.

Оценка влияния ремонтной технологии на термонапряженное и деформированное состояние проведена расчетно-экспериментальным методом. Исследования проведены на клиновидных образцах, имитирующих кромку лопатки. Для ремонта поврежденной кромки применено снятие поврежденной зоны механическим способом и последующее нанесение ремонтной микроплазменной порошковой наплавки. Для оценки уровня термонапряженного состояния кромки клиновидного образца после ремонта в зависимости от технологических режимов испытания оценивали на газодинамическом стенде в соответствии со

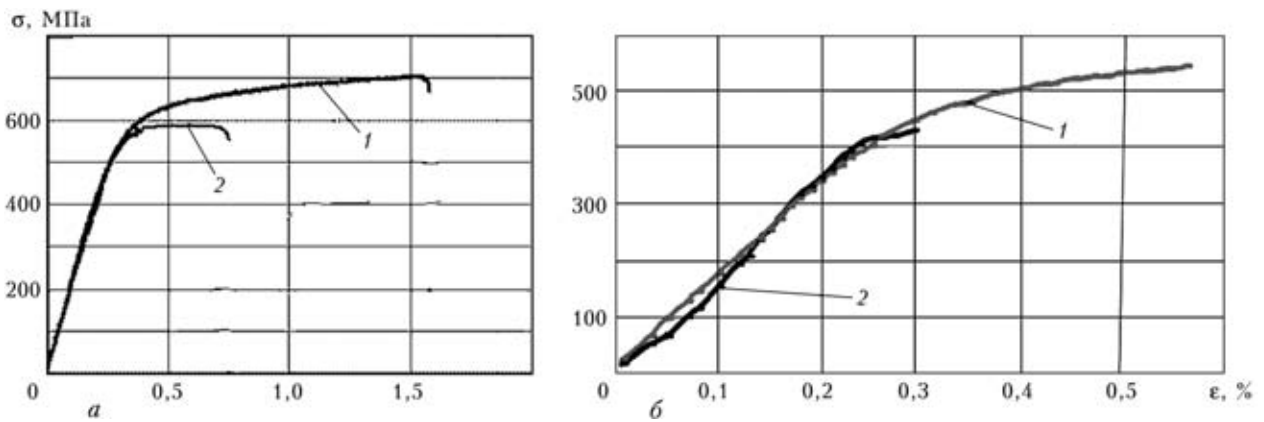


Рис. 1. Диаграммы кратковременного деформирования бездефектного (1) и образца с отремонтированным дефектом (2) при температуре 20 (а) и 800 °С (б)

стандартом [35]. Расчеты термического и напряженно-деформированного состояния (НДС) отремонтированных образцов проведены с использованием пакета прикладных программ «SPACE» [36]. В расчетах использовали характеристики сплавов ЭК-9 (основной металл) и ЭП-539 (металл наплавки). Рассмотрена стадия повреждения, когда на кромке возникают трещины термической усталости длиной до 0,5 мм и необходимо восстановление кромки на глубину до 0,7 мм, что соответствует радиусу закругления кромки. Основой для анализа кинетики теплового и НДС материала были результаты термометрирования образцов в стендовых условиях по фиксированным режимам термоциклирования. Использовали наиболее жесткий режим эксплуатации лопатки ГТД: 60 с нагрев и 60 с охлаждение в интервале температур 350...1100 °С.

**Результаты и их обсуждение.** *Кратковременная и длительная статическая прочность.* Анализ результатов исследований позволяет констатировать следующее.

Диаграммы деформирования, полученные на образцах без повреждений (рис. 1, кривая 1), лежат несколько ниже (≈ 10 %) от паспортных характеристик сплава ЭК-9. Это свидетельствует о влиянии процессов изготовления образцов моделей лопаток, которые обусловили определенные отклонения механических характеристик. Дополнительное влияние может оказывать технология электроэрозионной обработки образцов.

Анализ кривых деформирования рабочего участка образца в зоне отремонтированного дефекта

(рис. 1, а, кривая 2) показывает на 15%-е снижение предельных характеристик прочности и существенное (более 50 %) снижение ресурса пластичности. Однако разрушение образца при растяжении происходит вне зоны отремонтированного дефекта. Поэтому можно утверждать, что разработанная ремонтная технология обеспечивает восстановление прочности материала не ниже бездефектной области.

Результаты испытаний на длительную прочность, представленные на рис. 2, показывают, что характер разрушения бездефектных образцов и отремонтированных практически идентичны приведенным на рис. 1 результатам кратковременных статических испытаний. Как и при кратковременных испытаниях, ремонтная зона в отремонтированном образце не является слабым звеном.

Для прогнозирования работоспособности по критерию сопротивления длительному нагружению использовали метод базовых диаграмм (МБД), предложенный В. В. Кривенюком [37]. Для этого необходимы: информация о поведении материала-аналога в определенном диапазоне времени прогнозирования; результаты статических испытаний (рис. 1); ограниченная информация о поведении исследуемого материала при длительном нагружении на ограниченной базе испытаний (рис. 2). При наличии информации используются также другие данные о подобных материалах по химическому составу и свойствам.

Исходя из данных о характере изменения свойств с учетом реального разброса данных найдены коэффициенты уравнения базовых диаграмм в виде

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - (3,6 - \lg \sigma_1)(\lg t + 0,11g^2t)/12,$$

где  $\sigma'_t$  — текущее значение напряжения по базовой диаграмме, МПа;  $\sigma_1$  — напряжение, приводящее к разрушению в течение 1 ч;  $t$  — время до разрушения, ч.

**Механические свойства сплава ЭК-9**

Температура, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , МПа
20	704,2	637,3	1,3	180,00
	597,0	570,0	0,5	180,00
800	630,8	536,0	0,6	153,19
	460,0	450,0	0,3	153,19

Примечание. В числителе приведены исходные значения, в знаменателе — после ремонта.

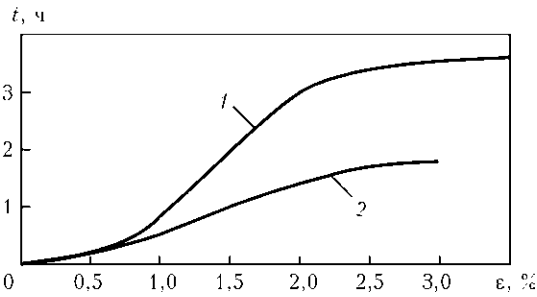


Рис. 2. Диаграммы ползучести бездефектных образцов (1) и образцов с отремонтированным дефектом (2) при температуре 800 °С

Особенности отдельных участков диаграмм длительной прочности конкретизируются с помощью экспериментальных характеристик. Принципиальным в использовании методики прогнозирования МБД является определение поправочных коэффициентов, которые учитывают кинетику изменений пластичности. Ориентировочные расчеты по методике МБД показывают снижение характеристик длительной прочности на значительных базах времени на уровне около 30 % исходных.

**Многоцикловая усталость.** Испытание исходных образцов провели при резонансной частоте 850...900 Гц по первой форме колебаний. Предел выносливости определяли на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов. При испытаниях фиксировали количество циклов нагружения. Критерием предельного состояния принято: начало снижения резонансной частоты (1); снижение резонансной частоты на 1 % (2). Первое из них принимали за долговечность, которая отвечает моменту зарождения усталостной трещины, после чего длится процесс развития трещины до момента снижения резонансной частоты на 1 %. Последнюю долговечность принимали как конечное разрушение образца. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

Анализ кривых свидетельствует о том, что процесс развития усталостных трещин по количеству циклов в 3...4 раза больше, чем до зарождения трещины. Особенностью усталостного разруше-

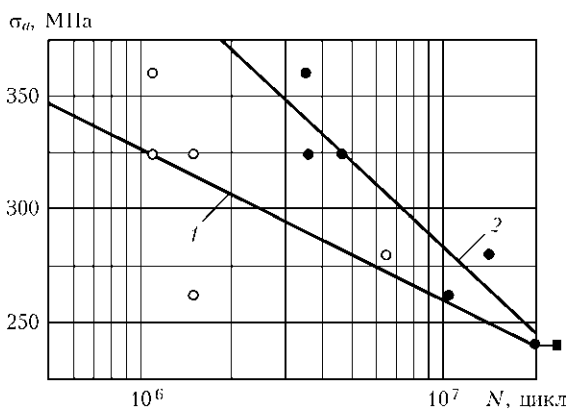


Рис. 3. Кривые усталости образцов из сплава ЭК-9 в исходном состоянии: 1 — начало снижения резонансной частоты; 2 — снижение резонансной частоты на 1 %

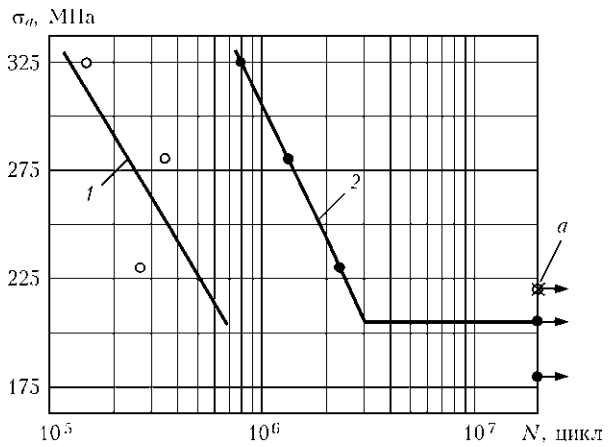


Рис. 4. Кривые усталости образцов из сплава ЭК-9 после ремонта: 1 — начало снижения резонансной частоты; 2 — начало снижения резонансной частоты на 1 % (a — образец, прошедший испытания ( $N = 2 \cdot 10^7$  цикл) сначала при  $\sigma_a = 205$ , а затем при  $\sigma_a = 220$  МПа)

ния является наличие на поверхности рабочей части образца нескольких трещин.

Образцы после ремонтной технологии были шлифованы. Резонансная частота составляла 720 Гц. Кривые усталости после ремонтной технологии приведены на рис. 4. Сравнение результатов испытаний показывает, что образцы после ремонта имеют характеристики усталости меньше, чем исходные ( $\sigma_{-1} = 240$  МПа — исходные,  $\sigma_{-1}^{REM} = 205$  МПа — образцы после ремонта). Кроме того, если кривая усталости исходных образцов имеет вид наклонной прямой до базы  $2 \cdot 10^7$  циклов, то кривая для отремонтированных образцов имеет более крутой наклон и физический предел усталости на базе  $2 \cdot 10^7$  циклов с абсциссой излома кривой на уровне  $3 \cdot 10^6$  циклов. Усталостные трещины в образцах после ремонта возникали не в зоне сварного шва, а в металле ЗТВ.

Полученные результаты трактовали с позиций предельного исчерпания пластичности в соответствии с моделью, предложенной в работах [38, 39].

**Термонапряженное состояние материалов в зоне ремонта.** Основной целью работ по данному направлению была оценка влияния различия свойств основного и наплавленного металлов на уровень остаточных технологических напряжений и кинетики их изменения в условиях переменных температурных изменений.

Преимущественное внимание уделено двум реализуемым на практике вариантам. В первой модельной задаче принято допущение, что ремонтная технология обеспечивает отсутствие остаточных напряжений при температуре 20 °С, т. е. при этой температуре отсутствуют начальные напряжения в клине. Во второй модельной задаче исходили из предположения, что ремонтную наплавку наносили при температуре 1200 °С и при этой температуре и однородном тепловом состо-

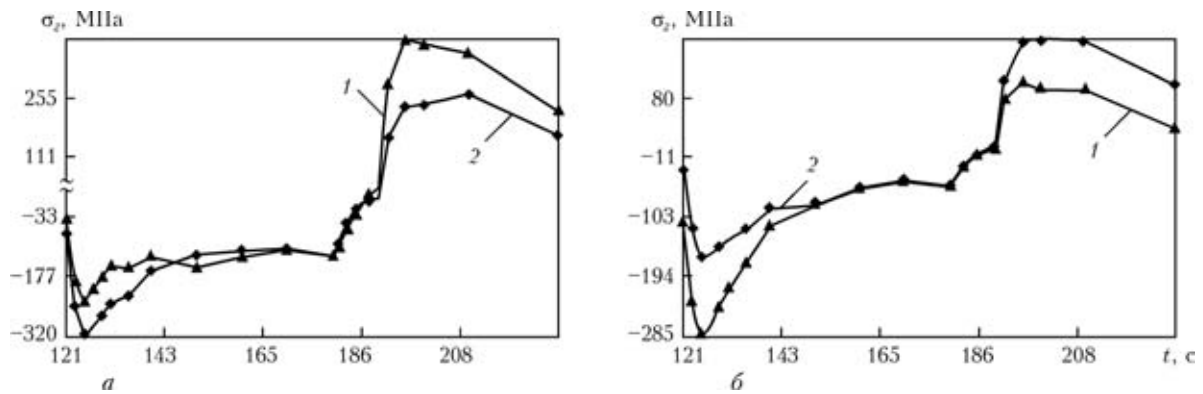


Рис. 5. Изменение напряжений  $\sigma_z$  в точке контакта материала наплавки (1) и основного металла (2) в цикле тепловой нагрузки по условию 1 (а) и 2 (б)

янии отсутствуют начальные напряжения. Обобщенные результаты такого анализа представлены на рис. 5.

Сравнив термонапряженные состояния клиновидного образца в цикле тепловой нагрузки двух вариантов исходного состояния материалов в зоне наплавки, можно отметить следующее. Более высокие напряжения как сжимающие, так и растягивающие, возникают в случае варианта 1. Однако если сжимающие напряжения в двух вариантах близки по абсолютным значениями, то растягивающие, являющиеся особенно опасными для возникновения и развития трещин термической усталости, для случая 2, который более адекватно отображает реальную картину, значительно меньше. Эти напряжения составляют для варианта 1 — 400 (на кромке), 380 (металл наплавки) и 245 (основной металл), а для варианта 2 — соответственно 145, 110 и 171 МПа.

В заключении следует отметить, что в практике эксплуатации энергетических установок, в том числе АГТД, наметилась тенденция, когда объемы ремонтных и восстановительных работ начинают превышать объемы продажи новой техники. Эти «ножницы» со временем будут увеличиваться.

Практика ремонтных и восстановительных работ использует широкий спектр современных технологий. Большой эффект по обеспечению необходимого уровня свойств достигается при использовании многооперационных интегрированных технологий. Их эффективность определяется уровнем снижения комплекса механических свойств восстанавливаемых деталей.

## Выводы

1. Предложена методика количественной оценки влияния технологических ремонтных процессов на служебные характеристики материала-основы в зоне ремонта. Методика использует лабораторные, стендовые и численные методы, определяющие характеристики кратковременной и длительной статической прочности, многоциклового усталости,

а также оценку термонапряженного состояния ремонтной зоны.

2. Необходимы дальнейшие исследования по многофакторному эксперименту для определения оптимальных технологических режимов ремонтных технологий. Комплекс критериев оптимизации должен включать экономические показатели. Оценка и прогноз ресурса восстанавливаемых деталей проводится расчетными методами на основе экспериментальных лабораторных испытаний.

3. Необходима разработка нормативных документов, регламентирующих внедрение на ремонтных предприятиях методик определения комплекса механических свойств в зависимости от технологических режимов.

1. Марчуков Е. Новые возможности эксплуатации двигателей // Авианепанорама. — 1997. — № 5/6. — С. 53–55.
2. Shifrin C. Taking wind // Airline Bus. — 2001. — 17, N 10. — P. 61, 63–64.
3. Phillips E.H. Rolls-Royce bullish on MRO opportunities // Aviat. Week and Space Technol. — 1999. — 150, N 13. — P. 78–80.
4. Velocci A.L. Engine makers target greater MRO share // Ibid. — 1999. — 151, N 13. — P. 27–28.
5. Repair technology breeds success // Mod. Power Syst. — 1997. — 17, N 11. — P. 69, 71.
6. Kandebo S.W. USAF GE develop F110 engine plan // Aviat. Week and Space Technol. — 1994. — 141, N 24. — P. 22–23.
7. Longer engine life with upgrade kits // Gas Turbine World. — 1999. — 29, N 2. — P. 46, 48.
8. Jeffs E. ESCO wood set up repair shop in Thailand // Turbomach. Int. — 1999. — 40, N 1. — P. 32–34.
9. Pat. 5575145 USA; F02C 7/00. Gas turbine repair. — Оpubл. 19.11.96.
10. RB211 gas turbine repair and overhaul // Gas Turbine World. — 2000. — 30, N 3. — P. 30.
11. Pyle A.S., Rudisel D.A. Efficient turbomachinery turnaround // Chem. Eng. (USA). — 1997. — 104, N 5. — P. 132–141.
12. Прогнозирование экономических затрат на техническое обслуживание и ремонт авиационного комплекса / А.А. Авакян, А.В. Блинов, Н.Н. Новиков и др. // Метрология. — 2001. — № 8. — С. 3–14.
13. Математическое моделирование процессов исчерпания ресурса элементов конструкций на базе механики поврежденной среды / В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов и др. // 9-й Всерос. съезд по теор. и прикл. мех., Нижн. Новгород, 22–28 авг. 2006: Аннотации докладов. — Т. 3. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. — С. 104.



14. *Chandra Murthy R. A., Palani G. S., Iyer Nagesh R.* Remaining life prediction of cracked stiffened palens under constant and variable amplitude loading // *Int. J. Fatigue*. — 2007. — **29**, N 6. — P. 1125–1139.
15. *Оценка остаточного ресурса с учетом микроповрежденности / И. А. Данюшевский, Е. Б. Куприй, М. Р. Малкин и др.* // *Теплоэнергетика*. — 2008. — № 2. — С. 17–20.
16. *Заявка 102005019077 Германия, В22F 5/04.* Процесс изготовления и (или) ремонта лопаток газотурбинного двигателя. — Оpubл. 26.10.2006.
17. *Заявка 10356562 Германия, В23К 35/28.* Припой, способ его применения и способ обработки, в частности, ремонта деталей, в особенности лопаток газовых турбин. — Оpubл. 30.06.2005.
18. *Корниенко А. Н., Жадкевич А. М.* Состояние и проблемы внедрения пайки для ремонта лопаток газотурбинных двигателей // *Загот. пр-ва в машиностр.* — 2000. — № 10. — С. 9–12.
19. *Zhadkevich A.M.* Brazing of defects of aircraft and ship turbine blades — challenging technology of extension of their life // *Advances in Electrometallurgy*. — 2005. — N 1. — P. 33–39.
20. *Пат. 2310551 Россия, В23P 6/00, С23С 14/40.* Способ ремонта поверхностных дефектов деталей машин. — Оpubл. 20.11.2007.
21. *Юркевич С.Н., Фомихина И.В.* Лазерная наплавка локальных поверхностных дефектов деталей из стали 30ХГСН2А // *Инструм. и технол.* — 2004. — № 19/20. — С. 122–126.
22. *Попов В.Н., Попова М.В., Волошин Д.Е.* Исследование эффективности применения лазерной техники при восстановлении изношенных деталей в ремонтном производстве // *Тр. Брат. гос. техн. ун-та*. — 2007. — № 2. — С. 238–242.
23. *Заявка 10337866 Германия, С23С 24/10.* Способ изготовления и (или) ремонта деталей газовых турбин. — Оpubл. 24.03.2005.
24. *Юркевич С.Н., Томашевич А.В., Юркевич А.С.* Восстановление деталей авиатехники методом лазерной наплавки // *Ремонт, восстановление, модернизация*. — 2006. — № 3. — С. 31–33.
25. *Заявка 102004002551 Германия, В23К 26/34.* Способ и устройство для ремонта деталей конструкции. — Оpubл. 18.08.2005.
26. *Юркевич С.Н.* Ремонт без расхромирования точечных и локальных дефектов на деталях авиатехники из высокопрочных сталей 30ХГСН2А и 30ХГСА с хромовым покрытием // *Металлообработка*. — 2005. — № 3. — С. 39–41.
27. *Blackshire J.L., Dosser L., Hix Ken.* Laser processing of micro-cracks for structural life extension // *Proc. SPIE*. — 2004. — 5392. — P. 168–178.
28. *Xie Yu-jiang, Wang Mao-cai.* Unweldable superalloy component repair using electro-spark deposition with high strength filler material // *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, 2005. — 15, Spec. Issue 3. — P. 359–364.
29. *Разработка технологии нанесения покрытий и плакирования методом MSC с использованием энергии электрических разрядов / Н. Ochiai, М. Watanabe, М. Arai et al.* // *Ishikawajima — Harima Eng. Rev.* — 2005. — **45**, N 2. — P. 72–79.
30. *Study on the HIP technology for the life extension of gas turbine buckets / D. Saito, Y. Yoshika, K. Ishibashi et al.* // *Schiff und Hafen*. — 2004. — **56**, N 4. — S. 42.
31. *A repair process for fatigue damage using plasma nitriding / A. Alsarani, I. Kaymaz, A. Celik et al.* // *Surface and Coat. Technol.* — 2004. — **186**, N 3. — P. 333–338.
32. *Шаронова Н.И.* Технология восстановления роторных и корпусных конструкций газотурбинных двигателей электронно-лучевой обработкой: Автореф. дис. ... канд. техн. наук МАТИ. — М.: Рос. гос. технол. ун-т, 2006. — 23 с.
33. *Заявка 2871399 Франция, В23P 6/04, В23P 15/02.* Способ восстановления поврежденного пера лопатки авиационного ТРД. — Оpubл. 16.12.2005.
34. *Технологические процессы ремонта лопаточного аппарата ГТД с разными видами повреждений / К.А. Ющенко, Л.В. Кравчук, Б.А. Ляшенко и др.* // *Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф.*, 25–29 мая 2009, Ялта. — Киев: АТМ Украины, 2009. — С. 246–248.
35. *ДСТУ 2367–94.* Єдина система захисту від корозії та старіння. Метали, сплави, покриття жаростійкі. Метод випробувань на високотемпературну корозію та термовтому в потоці продуктів горіння палива.
36. *Программное обеспечение «Трёхмерное конечно-элементное моделирование теплового и термонапряженного состояния элементов в машиностроительных конструкциях (SPACE)» // Система сертификации УкрСЕПРО.*
37. *Кривенюк В.В.* Прогнозирование длительной прочности тугоплавких металлов и сплавов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 248 с.
38. *Цыбанев Г.В., Цыбанев М.В.* Модель предельного упрочнения материала как критерия зарождения трещины при многоцикловом нагружении // *Динаміка, міцність і ресурс машин та конструкцій: Тез. доп. міжнарод. наук.-техн. конф.* — Т. 2. — К.: Ін-т проблем міцності НАН України, 2005. — С. 361–362.
39. *Цыбанев Г.В., Новиков А.И.* Применение модели предельного упрочнения для оценки усталостной долговечности материалов при переменных режимах циклического нагружения // *Материалы и механизмы морского транспорта. Методы исследования и упрочнения. Технология производства: Материалы международ. науч.-техн. конф.* — Севастополь: Укр. мор. ин-т, 2008. — С. 149–160.

Tendencies in development of repair technologies in service of gas turbine engines are considered. A procedure is developed for quantitative assessment of the influence of part repair technologies on the set of mechanical characteristics of base material in the repair zone. The effectiveness of the technology is determined by the change of mechanical properties.

Поступила в редакцию 10.09.2009