

УДК 62-226.2.004.67:621.165

М. К. СМЫСЛОВА, А. Н. ИСАНБЕРДИН

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТИТАНОВЫХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Одна из актуальных проблем эксплуатации паровых турбин — повреждения рабочих лопаток в результате капельной эрозии. Описаны основные подходы к восстановлению титановых рабочих лопаток, приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают обеспечение требуемого уровня свойств материала при применении предложенной технологии. Ремонт лопаток; паровые турбины; сварка титановых сплавов

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем эксплуатации паровых турбин (ПТ) является повреждение входных кромок рабочих лопаток (РЛ) ступеней низкого давления в результате капельной эрозии (КЭ) [1, 2]. Несмотря на применение различных способов снижения эрозионного износа, актуальность этой проблемы со временем только возрастает. Эрозионный износ РЛ ступеней низкого давления остается главной причиной, ограничивающей их ресурс, и одной из основных, снижающих надежность и экономичность ПТ.

Традиционным решением является замена изношенных РЛ. Однако, очевидно, неразумно заменять очень дорогостоящее изделие новым только потому, что на трети его длины образовались узкие поврежденные участки, в то время как вся РЛ находится в хорошем состоянии. Поэтому еще в 1970-х годах в нашей стране начали разрабатывать технологии восстановления изношенных РЛ. В последние годы это направление интенсивно развивается как в России, так и за рубежом. В частности, в 2002 г. в УГАТУ совместно с «Ленинградским металлическим заводом», ДООО «Энергоремонт» ОАО «Башкирэнерго», ООО «НПП Уралавиаспецтехнология» (Уфа) была разработана и внедрена в серийное производство технология восстановления РЛ ПТ из сталей 20X13 и 15X11МФ [3].

Однако широкое распространение процессов восстановления касается только РЛ из сталей, в то время как для титановых РЛ, которые широко используют в современных мощных ПТ, надежных технологий восстановления на сегодняшний день не существу-

ет, главным образом из-за технической сложности этой задачи. В то же время титановые РЛ значительно дороже стальных, и рентабельность их восстановления выше в несколько раз. Из титановых сплавов изготавливают наиболее крупные (соответственно, наиболее нагруженные) РЛ, особенно широко их применяют в ПТ АЭС. В настоящее время проблема замены титановых РЛ остро стоит на многих электростанциях России и Украины.

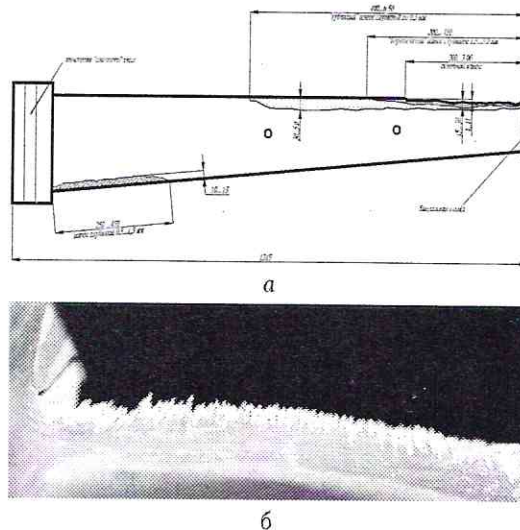


Рис. 1. Износ входных кромок титановых РЛ ПТ: а — схема износа РЛ, снимаемой с эксплуатации; б — входная кромка РЛ с наработкой 21 тыс. ч

Характер повреждений (рис. 1) примерно соответствует стальным РЛ. После 10–12 лет эксплуатации возникает необходимость их замены по причине уменьшения хорды пера, не допустимого по техническим условиям — на отдельных РЛ оно достигает 7–11 мм. На этой стадии эрозионные повреждения имеют

глубину до 3 мм на ширине до 30 мм от входной кромки и на длине до 450 мм от периферийного конца РЛ. Достаточно обширные но неглубокие повреждения по входной («губчатый» износ) и по выходной кромке практически не снижают экономичности и надежности РЛ.

Крупнейший отечественный производитель ПТ «Ленинградский металлический завод» поставил задачу разработать технологию восстановления титановых РЛ ПТ с поврежденными кромками, обеспечивающую высокую надежность и ресурс изделий. Для решения этой задачи нами на основании анализа существующих технологий восстановления, с учетом технологических особенностей титановых сплавов, условий эксплуатации и требований к свойствам РЛ, формы и размера деталей, характера повреждений были разработаны основные подходы к восстановлению РЛ из титановых сплавов и выбраны параметры технологического процесса. Теоретически обоснованные положения подвергались экспериментальной проверке.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Материал изделия. Для исследования выбран сплав ВТ6, так как в настоящее время именно его применяют для изготовления РЛ ПТ (зарубежные производители используют его аналог сплав Ti-6Al-4V). Основные результаты работы могут быть адаптированы к изделиям из других титановых сплавов.

Выбор технологической схемы процесса восстановления. Известные в настоящее время технологии восстановления РЛ с поврежденными входными кромками используют сварочные методы. В общем виде они укладываются в схему, показанную на рис. 2. Данная схема была принята нами за базовую применительно к восстановлению РЛ из титановых сплавов.

Задачей, требующей проведения исследований, является обеспечение высокого уровня механических и эксплуатационных свойств материала РЛ на этапе сварки и термической обработки (ТО). Для этого необходимо выбрать способ восполнения и состав восполняющего материала, режимы сварки и ТО. Также важной задачей является дополнительное продление ресурса деталей за счет выбора эффективного способа защиты от КЭ.

Выбор способа восполнения материала зависит от объема восстанавливаемого материала, технических возможностей предпри-

ятия, серийности производства. Приварка вставки позволяет восстанавливать большие объемы материала, имеет больше возможностей с точки зрения унификации и автоматизации. Наплавка технологичнее с точки зрения организации производства и механической обработки. С учетом типичного характера повреждений, сложности организации производства, а также на опыте внедренной в ДОО «Энергоремонт» технологии восстановления стальных РЛ ПТ предпочтительным способом является наплавка. Очевидно, что, при прочих равных условиях, наплавка оказывает такое же или большее воздействие на характеристики материала изделия. Поэтому при необходимости возможен переход на схему с приваркой вставки без проведения дополнительных исследований.

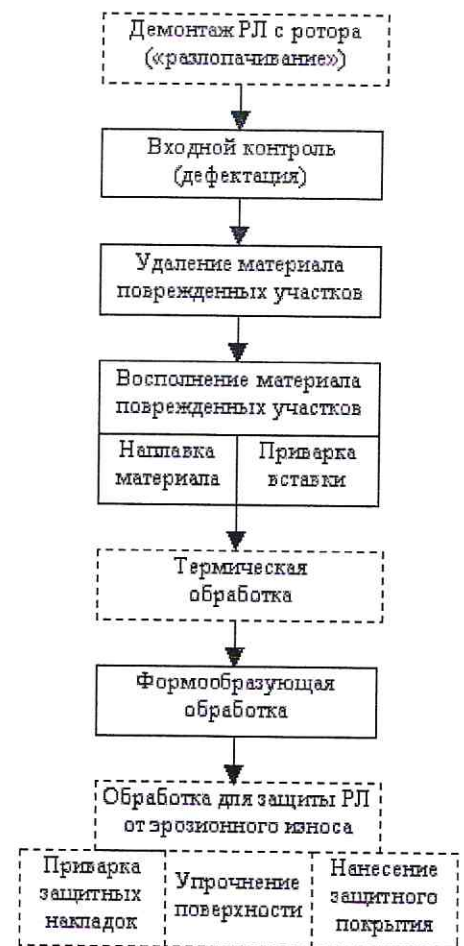


Рис. 2. Схема технологического процесса восстановления РЛ (пунктиром показаны этапы, которые могут отсутствовать)

Выбор способа наплавки производился с учетом геометрии восстанавливаемых участков, размера изделий, сложности организации производства. Наиболее целесообразным способом наплавки является ручная дуговая

наплавка неплавящимся электродом с присадочной проволокой.

Качество сварных соединений титановых сплавов определяется, главным образом, надежностью защиты зоны сварки и чистой инертного газа. В связи с высокой химической активностью титана при повышенных температурах и особенно в расплавленном состоянии необходимо обеспечение надежной защиты от атмосферы не только сварочной ванны, но и всех участков металла, нагретых выше 400°C , т. е. до температур, при которых начинается заметное взаимодействие титана с газами атмосферы [4].

В зависимости от конфигурации и размеров свариваемых изделий, возможностей производства и требований к качеству применяют три типа защиты зоны сварки инертным газом: 1) струйная защита, осуществляемая непрерывным обдувом зоны сварки, при этом используют специальные насадки на сопло и приспособления для поддува инертного газа; 2) использование местных камер, защищающих зону сварки; 3) общая защита изделия в камерах с инертным газом, в частности камерах с контролируемой атмосферой. Камеры с контролируемой атмосферой обеспечивают наиболее надежную и стабильную защиту не только сварочной ванны, но и всех нагретых участков материала. Поэтому применение таких камер наиболее целесообразно в серийном производстве и для изделий с высокими требованиями по качеству сварки. Так как РЛ ПТ являются ответственными деталями с высокими требованиями по надежности, выносливости, трещиностойкости, то для них необходимо применение наиболее надежного способа защиты — общей защиты в камере.

Выбор присадочного материала определяется следующим. Наплавленный металл должен иметь высокую работоспособность при статических и, особенно, циклических нагрузках. Следовательно, он должен оставаться в отожженном состоянии с достаточно высоким запасом пластичности [4]. Получение достаточной пластичности сварного соединения — основная проблема свариваемости титановых сплавов.

Легирующие элементы сплава ВТ6 — алюминий и ванадий — существенно снижают пластичность [5]. Поэтому при выборе систем легирования и разработке присадочных проволок для сварки двухфазных $\alpha + \beta$ -сплавов основываются на том, что суммарное количество содержания β -стабилизаторов в шве должно быть снижено по сравнению с основ-

ным материалом (ОМ). Применение присадочного металла, уменьшающего степень легирования швов по сравнению с ОМ снижает степень насыщения α' -фазы в швах и таким путем позволяет повысить пластичность сварных соединений.

Весьма благоприятным легирующим элементом в титановых швах является цирконий. Он снижает склонность металла шва к задержанному разрушению и повышает пластичность, обеспечивая высокую работоспособность сварных соединений. Цирконий является нейтральным упрочителем, не изменяет фазового состава, однако благоприятно сказывается на структуре, снижая отрицательное влияние кислорода в металле шва. Это объясняют тем, что в присутствии циркония атомы кислорода, оставаясь в виде атомов внедрения, занимают в кристаллической решетке такое положение, что эффективность блокировки ими дислокаций резко снижается [4]. Определенную роль здесь может играть повышение растворимости кислорода в титане, легированном цирконием, за счет увеличения параметров решетки α - и β -фаз. Кроме того, цирконий, так же как, например, рений, обладает модифицирующим действием на литой титан, измельчая его структуру [6].

Таким образом, основными предпосылками для выбора присадочной проволоки для сварки/наплавки РЛ из сплава ВТ6, с учетом требований к механическим и эксплуатационным свойствам, являются следующие: 1) присадочный материал на основе титана должен иметь меньшую степень легирования, чем ОМ для достижения высокой пластичности наплавленного материала, однако достаточную для обеспечения необходимой прочности; 2) с целью повышения пластичности, снижения вредного влияния примесей, измельчения структуры целесообразно легирование присадочного материала цирконием. Из серийно выпускаемых присадочных материалов на основе титана наиболее полно удовлетворяет вышеописанным требованиям проволока марки СПТ2 (табл. 1).

Таблица 1

Содержание легирующих элементов в сплаве ВТ6 и проволоках ВТ6_{св} и СПТ2 [7]

	Al	V	Zr
ВТ6	5,3–6,8	3,5–5,3	0,3
ВТ6 _{св}	3,5–4,5	2,5–3,5	—
СПТ2	3,5–4,5	2,5–3,5	1,0–2,0

Улучшение микроструктуры и механических свойств швов, сваренных с проволо-

кой СПТ2, по сравнению с проволокой ВТ6_{СВ} подтверждают исследования [6]. В частности, при испытаниях на трещиностойкость металл шва, выполненный проволокой СПТ2, независимо от вида сварки и последующей обработки, на всех исследованных сплавах имеет достаточный запас пластичности и не склонен к быстрому развитию трещин.

Выбор режима наплавки. Как правило, сварку титановых сплавов неплавящимся электродом ведут на постоянном токе прямой полярности, с использованием типовых источников питания постоянного тока (типа ВД, ВСВУ). Во избежание перегрева изделий и их коробления целесообразно вести наплавку при низких значениях сварочного тока. С учетом производственного опыта оптимальным уровнем сварочного тока является $I_{СВ} = 60-75$ А.

Оптимальный диаметр проволоки для данной задачи (с учетом объема наплавки, требований к режиму сварки) составляет 1,6–2,0 мм.

Выбор режима термической обработки. Сварные соединения титановых сплавов требуют обязательной ТО, восстанавливающей пластичность сварного соединения и стабилизирующей структуру, а также снимающей остаточные напряжения [5]. Сварные соединения двухфазных ($\alpha + \beta$)-сплавов титана, как правило, подвергают одному из двух видов ТО: отжигу или упрочняющей ТО, состоящей из закалки и старения [4]. Упрочняющая ТО при оптимальных режимах может существенно повысить прочность сварных соединений без падения (или даже с повышением) пластичности. Однако она неприемлема для процесса восстановления РЛ, так как при закалке неизбежно газонасыщение поверхности РЛ, в том числе участков, не подвергаемых последующему снятию материала. Газонасыщение поверхности приводит к охрупчиванию и может стать причиной разрушения деталей.

Необходимость отжига сварных конструкций из ($\alpha + \beta$)-сплавов обусловлена прежде всего возникновением в соединениях метастабильных фаз, склонных к распаду при последующих нагревах, а в некоторых случаях и при приложении внешних нагрузок. В сварных соединениях сплава ВТ6 такой метастабильной фазой является мартенситная α' -фаза [4]. Одновременно со стабилизацией структуры и свойств сварных соединений отжиг снижает или устраняет (в зависимости от температуры) остаточные напряжения, возникающие в процессе сварки. Иногда непол-

ный отжиг сварных соединений, применяемый для снятия внутренних напряжений, позволяет также повысить их пластичность и стабилизировать свойства. Это наблюдалось для сплава ВТ6 при 600°C [4].

Во избежание газонасыщения поверхностного слоя ТО необходимо проводить в вакууме. Таким образом, ТО РЛ после наплавки следует проводить по режиму: вакуум $p = 1 \cdot 10^{-2}$ Па, $\theta = 600_{-10}^{\circ}\text{C}$, $\tau = 60$ мин.

Выбор способа защиты от КЭ. В промышленности имеется опыт применения различных способов защиты титановых РЛ ПТ: припайка нитиноловых пластинок, накладок из твердого титанового сплава, лазерное азотирование, наплавка твердого сплава. Они либо проявили себя как ненадежные или неэффективные, либо оказывают побочное вредное воздействие на характеристики материала (охрупчивание, снижение сопротивления усталости). В настоящее время единственным способом пассивной защиты от КЭ, не только не снижающим надежность РЛ, но и повышающим их характеристики, является комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка (КВИПО). Она включает ионную очистку, упрочнение поверхности (путем ионной имплантации, азотирования в тлеющем разряде или в плазме дугового разряда) и нанесение ионно-плазменного покрытия в едином цикле обработки в вакууме. КВИПО показала свою эффективность как в лабораторных испытаниях, так и в эксплуатации [8]. Учитывая наш положительный опыт, в качестве основного способа защиты РЛ от КЭ нами выбрана КВИПО, включающая упрочнение поверхности путем азотирования в тлеющем разряде и нанесение многослойного покрытия, состоящего из слоев титана и нитрида титана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Методика. Для оценки влияния предложенного процесса на механические свойства образцов из сплава ВТ6 проводили следующие испытания образцов:

- испытания на статическое растяжение (ГОСТ 1497-84) — определяли предел прочности σ_b и относительное удлинение δ ;
- испытания на ударный изгиб образцов с V-образным концентратором — определяли ударную вязкость KCV (ГОСТ 9454-78, ГОСТ 6996-66);
- испытания на ударный изгиб образцов с концентратором в виде трещины — опреде-

ляли ударную вязкость КСТ (ГОСТ 9454-78, ГОСТ 6996-66);

• испытания на усталость при симметричном цикле нагружения — строили кривые усталости и определяли предел выносливости σ_{-1} .

Каждому виду испытаний подвергали образцы в четырех состояниях: основной материал (ОМ) (сплав ВТ6 в исходном состоянии), наплавка, ОМ + КВИПО, наплавка + КВИПО. При испытаниях образцов с наплавкой на статическое растяжение и усталость определяли характеристики комплекса наплавка — прилегающие участки материала; при испытаниях на ударный изгиб — характеристики наплавленного металла. Испытаниям на статическое растяжение подвергали не менее трех образцов каждого вида, испытаниям на КСВ и КСТ — по пять образцов каждого вида. Усталостные испытания на изгиб проводили при симметричном цикле нагружения на базе $N = 20 \cdot 10^6$ циклов.

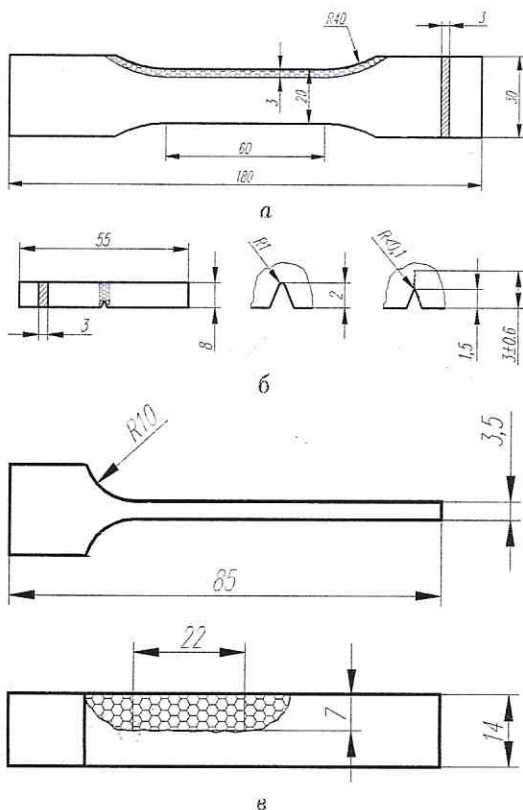


Рис. 3. Образцы с наплавкой для испытаний (заштрихован наплавленный металл): а — на статическое растяжение, б — на ударный изгиб (КСВ, КСТ), в — на усталость

Эскизы образцов приведены на рис. 3. Усталостные образцы изготавливали из деформированных заготовок с глобулярно-пластинчатой микроструктурой, образцы на растяжение и ударный изгиб — из листа сплава

ВТ6 по схеме: предварительная ТО; фрезерование; наплавка; послесварочная ТО, фрезерование, полирование до шероховатости $R_a = 0,63$ мкм. Наплавку производили неплавящимся электродом с присадочной проволокой в камере, наполненной аргоном при $I_{св} = 60-75$ А. Предварительную ТО проводили в вакуумной печи по режиму: вакуум $1 \cdot 10^{-2}$ Па, $\theta = 780^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ ч. Послесварочную ТО проводили в вакуумной печи по режиму неполного отжига: вакуум $1 \cdot 10^{-2}$ Па, $\theta = 600^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ ч. КВИПО проводили на установке «Виктория» с протяженными электродуговыми испарителями по схеме: ионная очистка Аг в тлеющем разряде 15 мин; азотирование в тлеющем разряде 20 мин; нанесение многослойного покрытия толщиной 10–11 мкм из чередующихся слоев титана и нитрида титана.

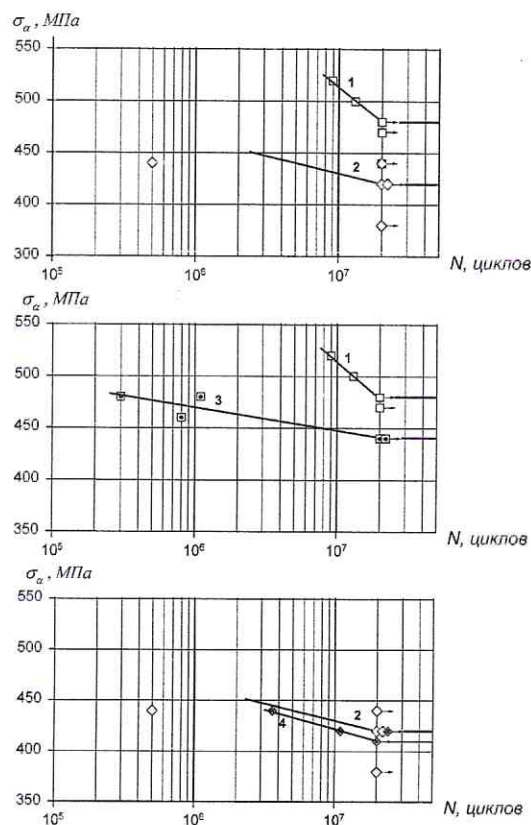


Рис. 4. Кривые усталости образцов из основного материала и после наплавки: 1 (□) — ОМ (исходное); 2 (◇) — наплавка; 3 (■) — ОМ + КВИПО; 4 (◆) — наплавка + КВИПО

Результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 4. Снижение механических свойств в результате наплавки невелико, и материал образцов с наплавкой обладает достаточным запасом прочности и пластичности. Полученные значения ударной вязкости

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов

	ОМ	Наплавка	ОМ + КВИПО	Наплавка + КВИПО
σ_b , МПа	885	841	877	839
δ , %	15,3	14,6	13,5	11,8
КСV, Дж/см ²	45	36*	48	36*
КСТ, Дж/см ²	80	94*	78	102*
σ_{-1} , МПа	480	420	440	410

*Полученные значения занижены из-за сварочного дефекта — несплавления

образцов с наплавкой занижены из-за сварочного дефекта — частичного несплавления наплавленного металла с ОМ. Однако даже при этом характеристика КСТ наплавки выше, чем ОМ, что очень важно с точки зрения живучести восстановленных РЛ. Высокий уровень ударной вязкости наплавленного металла объясняется тем, что крупнозернистая литая структура затрудняет развитие трещины.

Как и следовало ожидать, КВИПО не оказывает существенного влияния на прочность и пластичность, хотя можно отметить тенденцию к снижению относительного растяжения δ . Одинаковые значения ударной вязкости показывают образцы, прошедшие КВИПО и без нее.

Результаты усталостных испытаний несколько выше полученных нами ранее [9]. Предел выносливости образцов с наплавкой равен 440 МПа, что составляет более 90% от уровня основного материала. Так, аналогичные испытания стальных образцов, проведенные нами ранее, показали падение предела выносливости более чем в 2 раза (с 320 до 140 МПа) [3]. При этом на усталостных образцах (см. рис. 3, в) половину сечения составляет наплавленный металл, а оставшуюся — зона термического влияния, в то время как для РЛ на каждую из этих зон будет приходиться не более чем по 10–15% сечения пера.

Снижение выносливости в результате КВИПО вполне объяснимо: как правило, при нанесении покрытий, в том числе вакуумных ионно-плазменных, сопротивление усталости снижается тем больше, чем толще покрытие. Известны случаи, когда нанесение толстых вакуумных ионно-плазменных покрытий приводило к падению предела выносливости почти в 2 раза. Относительно небольшое падение σ_{-1} в нашем случае объясняется упрочнением поверхностного слоя перед нанесением покрытия.

Интерес представляет тот факт, что на образцах с наплавкой КВИПО приводит к меньшему падению σ_{-1} , чем на образцах из ОМ

(на 2,4% против 8%). Это может объясняться более высокой склонностью материала наплавки к упрочнению поверхности при КВИПО. Предварительные исследования по ионному азотированию образцов подтверждают это предположение.

Как показывает фрактографический анализ (рис. 5), на усталостных образцах с наплавкой разрушение начиналось в зоне наплавленного металла (а не в зоне термического влияния, как можно было бы предположить). Изломы образцов из основного металла характеризуются однородностью, мелкозернистой структурой. Изломы образцов с наплавкой имеют крупнозернистую структуру с наличием множества фасеток, что свидетельствует о более хрупком характере разрушения с развитием усталостных трещин по различным плоскостям.

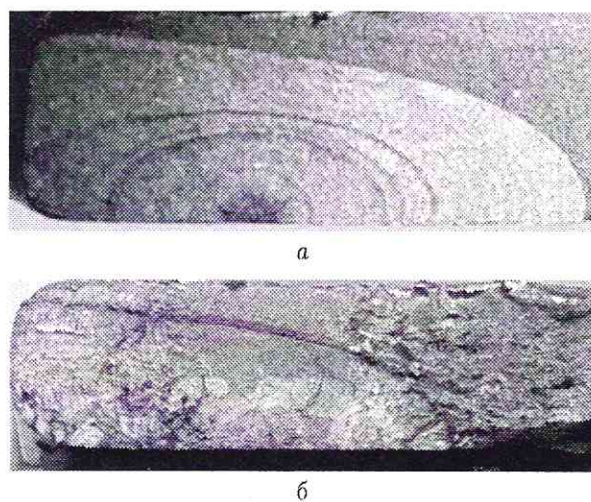


Рис. 5. Изломы по вскрытым усталостным трещинам: а — ОМ (сплав ВТ6); б — наплавка

ВЫВОДЫ

Результаты механических испытаний подтвердили правильность выбранных технологических решений. Материал после наплавки по предложенной технологии имеет достаточный запас по прочности, пластичности

и выносливости. Высокое значение работы развития трещины определяет живучесть РЛ. КВИПО не приводит к существенному ухудшению механических свойств образцов. Это позволяет рекомендовать данную технологию для восстановления титановых РЛ паровых турбин из сплава ВТ6. При необходимости она также может быть адаптирована для РЛ из других титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фаддеев, И. П.** Эрозия влажнопаровых турбин / И. П. Фаддеев. Л. : Машиностроение, 1974. 206 с.
2. **Амелюшкин, В. Н.** Эрозия титановых рабочих лопаток паровых турбин / В. Н. Амелюшкин // Тяжелое машиностроение. 1992. № 11. С. 25–26.
3. **Смылова, М. К.** Восстановление рабочих лопаток паровых турбин из сталей и титановых сплавов / М. К. Смылова, А. Н. Исанбердин, В. Ю. Гордеев // Надежность и ремонт машин: Сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. Орел : Изд-во ОрелГАУ, 2004. С. 16–20.
4. **Металлургия** и технология сварки титана и его сплавов / Под ред. В. Н. Замкова. Киев : Наукова думка, 1986. 240 с.
5. **Глазунов, С. Г.** Конструкционные титановые сплавы / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев. М. : Metallurgy, 1974. 368 с.
6. **Сварка высокопрочных титановых сплавов** / С. М. Гуревич [и др.] М. : Машиностроение, 1975. 150 с.
7. **ГОСТ 27265-87.** Проволока сварочная из титана и титановых сплавов. Техн. условия. Введ. 1989-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1989.

8. **Смылова, М. К.** Состояние титановых паротурбинных лопаток с защитным покрытием после эксплуатации / М. К. Смылова, А. Н. Исанбердин, М. Ю. Дыбленко // Сварка. Контроль. Реновация – 2003: Тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф. Уфа : Гилем, 2003. С. 255–256.
9. **Исанбердин, А. Н.** Влияние наплавки на механические свойства сплава ВТ6 / А. Н. Исанбердин, М. К. Смылова // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Матер. 7-й Междунар. практ. конф.-выст. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. С. 53–56.

ОБ АВТОРАХ



Смылова Марина Константиновна, доц. каф. оборуд. и технол. сварочн. пр-ва. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1978). Канд. техн. наук по техн., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. повышения прочн., долговечн. и надежн. деталей.



Исанбердин Анур Наилевич, аспирант каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по реновации средств материальн. производства (УГАТУ, 2002). Работает над дис. по восстановл. титановых лопаток паровых турбин.