

2. Isida M., Noguchi H. A circular inclusion and an arbitrary array of cracks in infinite body under in-planes loads / Trans. Jap. Mech. Eng. 1983. Vol. A49. N 438. P. 147 – 155.
3. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semi-elliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
4. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semielliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
5. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie razvitiya poverkhnostnykh poluellipticheskikh naklonnykh malotsiklovyykh treshchin [Numerical and experimental study of developing semi-elliptical inclined low-cycle surface cracks] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 11. P. 39 – 44 [in Russian].
6. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Tensely — deformed conditions in conditions of complex circuits loading and non-uniform properties at top of the crack / Abstracts of the 5th International Conference «Problems of dynamics and strength in gas-turbine construction» / Ed. A. P. Zinkovskyy. — Kyiv. 27 – 31 May, 2014) G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine, 2014. — 314 p.
7. ANSYS, 2010. Structural Analysis Guide. 660578.
8. Newman J. C. Fracture analysis of surface and through-cracked sheets and plates / Eng. Fract. Mech. 1973. Vol. 4. P. 667 – 689.
9. Rice J. R., Levy N. Part-through surface in an elastic plate / J. of Appl. Mech. 1972. Vol. 39. N 1. P. 185 – 200.
10. Makhutov N. A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Constructional durability, a resource and technogenic safety]. In two parts. — Novosibirsk: Science, 2005. — 1110 p. [in Russian].
11. Shlyannikov V. N., Tumanov A. V. An inclined surface crack subject to biaxial loading / Int. J. Solids Struct. 2011. Vol. 48. P. 1778 – 1790.

УДК 620.191.33:620.198

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

© В. Н. Шляnnиков, Р. Р. Яруллин, А. П. Захаров¹

Статья поступила 13 февраля 2015 г.

Исследованы образцы, изготовленные из рабочих лопаток паровых турбин после эксплуатации, с исходным состоянием поверхности и с нанесенным защитным покрытием. Для оценки влияния глубины эрозионного повреждения на характеристики долговечности материала рабочих лопаток и для проведения испытаний на циклическую трещиностойкость использованы цилиндрические образцы с односторонним боковым надрезом различной глубины. Приращение длины трещины на поверхности образца фиксировали с помощью оптического инструментального микроскопа, а визуально недоступные приращения глубины трещины определяли путем установленной взаимосвязи между длиной трещины на поверхности и раскрытием берегов трещины. Получены оценки влияния защитных покрытий на характеристики статической прочности, долговечности и циклической трещиностойкости материала рабочих лопаток.

Ключевые слова: лопатки паровых турбин; защитные покрытия; прочность; долговечность; циклическая трещиностойкость.

Опыт эксплуатации последних ступеней мощных конденсационных и теплофикационных паровых турбин свидетельствует о том, что одним из основных повреждающих факторов, приводящих к снижению надежности рабочих лопаток, является капельная эрозия [1, 2]. Она приводит к износу входных и выходных кромок рабочих лопаток под действием капель жидкости, натекающих на поверхность с большой скоростью, появлению концентрации напряжений и снижению конструкционной прочности и долговечности лопаток (рис. 1). Вследствие эрозионного износа рабочих лопаток потери мощности турбоагрегатов могут составлять более 6 %. Степень эрозионного износа лопаток зависит от конструкции турбины, условий ее

эксплуатации, материала лопаток и способов защиты поверхности.

Для защиты от эрозии рабочих лопаток первых ступеней компрессоров газотурбинных двигателей и последних ступеней цилиндров низкого давления мощных паровых турбин разработаны различные противозерозионные мероприятия пассивного типа [3 – 9].

В ООО «Технологические системы защитных покрытий» предложена технология нанесения защитных покрытий на рабочие лопатки по методу высокоскоростного газопламенного напыления (High Velocity Air Fuel (HVAF)) [10].

Высокоскоростное газопламенное напыление порошков твердых сплавов металлов на поверхность детали — один из наиболее эффективных методов увеличения срока жизни детали, обеспечивающих полное

¹ Казанский научный центр РАН, г. Казань, Россия;
e-mail: shlyannikov@mail.ru



Рис. 1. Виды эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин

восстановление геометрии и работоспособности большинства изношенных деталей. С использованием современных оборудования, материалов и технологий газотермического напыления стало возможным значительно снизить или исключить влияние на изнашивание рабочих лопаток паровых турбин тепловых электростанций таких факторов, как эрозия, коррозия, кавитация и др. [11 – 13].

К ограничениям метода HVAF, не позволяющим использовать его для защиты лопаток турбин от высокотемпературной газовой коррозии, относятся: сопутствующая пористость, низкая адгезия покрытия с подложкой, наличие оксидных включений в защитном слое в результате возможного окисления отдельных частиц [14].

Известно, что на сопротивление усталости образцов и лопаток с защитными покрытиями оказывают влияние следующие факторы: размеры, форма испытываемых образцов и конструкция лопаток; химический и фазовый составы покрытия; механические и физические свойства материала покрытия; структура покрытия; термические напряжения в покрытии [15 – 17].

Согласно работе [14] при аттестации защитных покрытий для лопаток турбин необходимо располагать перечнем свойств, включающим в себя несколько групп характеристик. Одна из групп объединяет характеристики механических свойств, полученные при испытаниях образцов с нанесенными на них покрытиями в условиях, когда коррозионные эффекты исключены из рассмотрения. Они позволяют выявить влияние адгезии покрытия и структур, образованных в поверхностных слоях металла, на возникновение очагов разрушения — микротрещин при различном нагружении (статическом, вибрационном, термоциклическом). Условия разрушения выявляют методами, позволяющими наблюдать за возникновением и распространением трещин. Полученные экспериментальные зависимости для образцов с покрытиями сопоставляют с аналогичными зависимостями для основного металла.



Рис. 2. Гладкие цилиндрические образцы диаметром $d = 10$ мм: *a* и *б* — в исходном состоянии и с покрытием HVAF

Цель данной работы — оценка влияния защитных покрытий на характеристики статической прочности, долговечности и циклической трещиностойкости материала рабочих лопаток паровых турбин.

Исследовали рабочие лопатки 27-й ступени турбины К-200-130 Заинской ГРЭС с наработкой 92 245 ч. Заготовки для образцов вырезали непосредственно из пера лопатки. Направление и зону вырезки выбирали таким образом, чтобы максимальные действующие напряжения располагались по нормали к поперечному сечению образцов.

Испытания проводили на образцах двух типов. Первый тип — гладкие цилиндрические образцы диаметром $d = 10$ мм, изготовленные согласно ГОСТ 1497–84 [18], использовали для проведения статических и усталостных испытаний (рис. 2). Для оценки влияния глубины эрозионного повреждения на характеристики долговечности материала рабочих лопаток и проведения испытаний на циклическую трещиностойкость применяли второй тип образцов — цилиндрические образцы с односторонним боковым надрезом различной глубины. Надрезы шириной 0,2 мм, глубиной 0,5 и 1 мм наносили электроискровым способом (рис. 3).

Для проведения сравнительной оценки на рабочую поверхность одной партии образцов наносили защитное покрытие методом HVAF. Материал покрытия — $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{NiCr}$, толщина — 0,25 – 0,3 мм. Покрытие наносили на предприятии ООО «Технологические системы защитных покрытий» способом, идентичным технологии напыления рабочих лопаток паровых турбин на Заинской ГРЭС (см. рис. 2, 3).

Начальный этап экспериментальных исследований состоял в оценке влияния защитных покрытий на характеристики статической прочности материала лопаток. Результаты испытаний при статическом растяжении образцов с нанесенным защитным покрытием методом HVAF и образцов с исходным состоянием поверхности представлены в табл. 1.

Сравнение полученных результатов показало, что после нанесения на поверхность образцов защитного покрытия происходит незначительное изменение прочностных характеристик. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ образцов с покрытием на 7 % выше, чем образцов с исходным состоянием поверхности. При этом пре-

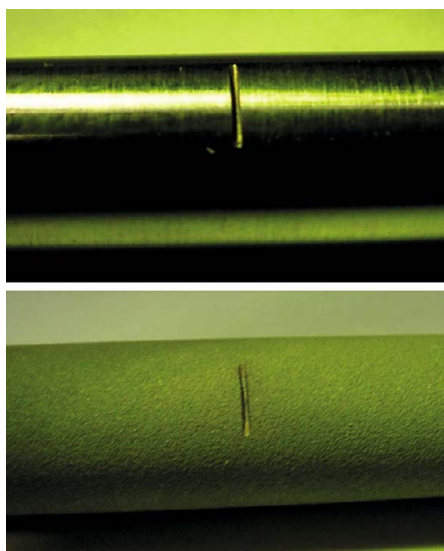


Рис. 3. Образцы с односторонним боковым надрезом

дел прочности σ_b и деформационные характеристики различаются незначительно.

Приведенные выше экспериментальные данные о сопротивлении упругопластическому деформированию и разрушению при статическом нагружении использовали для формирования программы мало- и многоцикловых усталостных испытаний [19].

Для построения кривых усталости в полном диапазоне изменения долговечностей образцы испытывали при различных уровнях номинальных напряжений. Всю серию циклических испытаний проводили с постоянной амплитудой напряжений при гармоническом синусоидальном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1$ и частотой $f = 10$ Гц. По результатам испытаний были построены кривые усталости в полулогарифмических координатах $\sigma_{\max} - \lg N$ (рис. 4).

Экспериментальные зависимости между номинальными напряжениями и количеством циклов до разрушения были аппроксимированы кривыми с использованием стандартного степенного уравнения

$$\sigma = BN^k, \quad (1)$$

где σ — уровень номинальных напряжений; N — количество циклов нагружения; B и k — экспериментальные константы уравнений кривых усталости (табл. 2). Сравнение полученных результатов показало, что наблюдается традиционное влияние размеров исходного надреза на характеристики долговечности исследуемого материала.

Таблица 1. Основные механические свойства стали 2Х13

Состояние поверхности образца	Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
Исходное	2Х13	646	803	16	60
С покрытием	2Х13	697	813	17	58

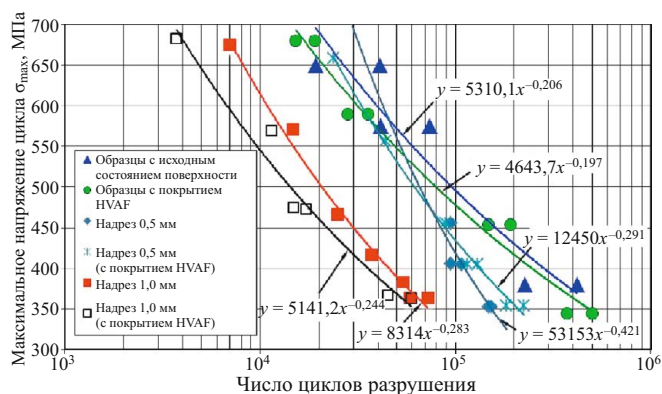


Рис. 4. Кривые усталости образцов с исходным состоянием поверхности и образцов с покрытием HVOF

Из рис. 4 можно сделать вывод о влиянии покрытий HVOF на характеристики долговечности образцов с нанесенными повреждениями различной глубины. Как и в случае образцов без повреждений, значительное влияние на долговечность материала лопаток защитные покрытия не оказывают. Характеристики долговечности образцов с повреждениями и нанесенными HVOF покрытиями укладываются в узкую полосу разброса. Покрытие незначительно влияет на долговечность образцов с глубиной повреждения 1,0 мм только в случае высоких амплитуд напряжений.

Следующий этап экспериментальных исследований состоял в оценке влияния защитных покрытий HVOF на характеристики сопротивления циклическому разрушению образцов с односторонними боковыми надрезами различной глубины. Надрезы рассматривали как эксплуатационные повреждения, возникающие на входной кромке лопатки от воздействия потока, содержащего взвесь абразивных частиц. Методика определения характеристики циклической трещиностойкости образцов с исходными повреждениями в виде односторонних боковых надрезов для различного состояния поверхности состояла в следующем [20].

Определяли зависимости раскрытия берегов трещины от длины трещины на поверхности. Рассматриваемый вид повреждений относится к поверхностным дефектам, особенность развития которых состоит в одновременном увеличении размеров в глубину и по свободной поверхности цилиндрического образца. Поэтому последовательно измеряли приращения этих

Таблица 2. Экспериментальные константы уравнений кривых усталости

Глубина надреза, мм	Образцы с исходным состоянием поверхности		Образцы с покрытием HVOF	
	B	k	B	k
Без надреза	5310,1	−0,2059	4643,7	−0,1975
0,5	53153	−0,421	12450	−0,291
1,0	8314	−0,283	5141,2	−0,244

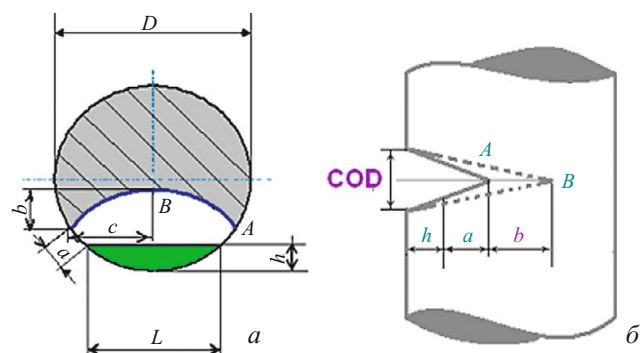


Рис. 5. Регистрируемые параметры роста трещины

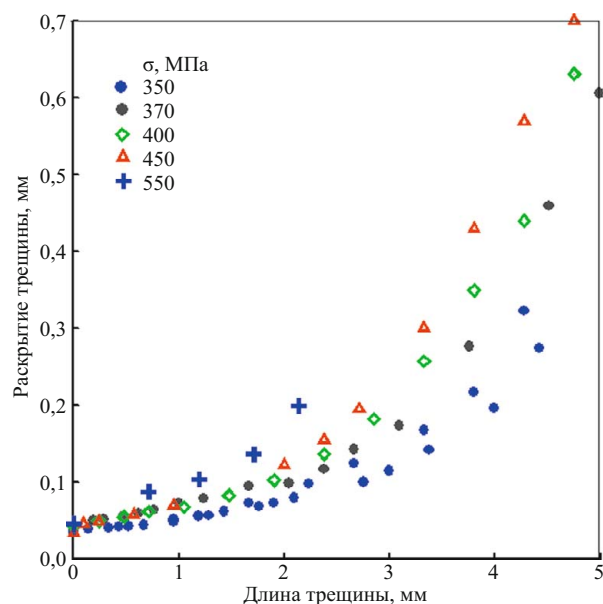


Рис. 6. Зависимость раскрытия трещины от ее длины

размеров как функции накопленного количества циклов нагружения.

Существующие средства измерения позволяют с помощью оптического инструментального микроскопа замерять приращение длины трещины на поверхности образца (рис. 5, а). Для визуально недоступных измерений приращений глубины трещины используют экспериментально установленную зависимость между длиной трещины на поверхности a , раскрытием трещины (COD) и глубиной трещины b (рис. 5, б). Раскрытие берегов трещины на внешней поверхности

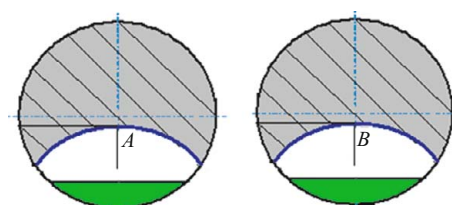


Рис. 7. Основные точки измерения по фронту трещины

образца в месте расположения исходного надреза измеряют с помощью соответствующего датчика.

Экспериментально установленные зависимости между длиной трещины на поверхности образца и ее раскрытием в центральном сечении исходного надреза длиной $a_0 \approx 1,0$ мм для различных амплитуд циклического нагружения показаны на рис. 6.

В экспериментальных исследованиях контрольными являлись две точки фронта развивающейся несквозной поверхностной трещины: точка A на боковой поверхности образца, определенная с помощью оптического микроскопа, и точка B в середине фронта трещины, полученная пересчетом автоматической записи раскрытия трещины на поверхности образца в размер глубины трещины (рис. 7). Именно для положения этих двух точек представлялись данные по кинетике поверхностных несквозных трещин с криволинейным фронтом.

Далее определяли длину трещины для образцов с защитными покрытиями. Поверхность образцов с нанесенными покрытиями HVAF недоступна для корректного наблюдения за развитием трещины. Однако раскрытие трещины на боковой поверхности образца в месте расположения исходного надреза фиксируется (записывается) автоматически. Поэтому для образцов с защитными покрытиями длины трещин определяли на основе экспериментально установленных корреляционных зависимостей от раскрытия трещины на боковой поверхности цилиндрического образца (см. рис. 6).

В табл. 3 приведены уравнения, связывающие длину и раскрытие трещины для различных амплитуд напряжений и размеров исходного надреза для образцов без покрытия. Можно приближенно принять, что подобные зависимости имеют место и для образцов с покрытиями HVAF, так как толщина покрытия,

Таблица 3. Уравнения взаимосвязи между длиной и раскрытием трещины

Номер образца	σ , МПа	$a_0 = 0,5$ мм	Номер образца	σ , МПа	$a_0 = 1,0$ мм
1	350	$a = 2,381642 \ln(\text{COD}) + 8,349139$	4	350	$a = 2,078855 \ln(\text{COD}) + 7,162323$
3	350		5	350	
21	450	$a = 2,108170 \ln(\text{COD}) + 6,825881$	10	370	$a = 1,933642 \ln(\text{COD}) + 6,204486$
			13	400	$a = 1,764368 \ln(\text{COD}) + 5,728356$
			14	450	$a = 1,608518 \ln(\text{COD}) + 5,262222$
			16	550	$a = 1,495611 \ln(\text{COD}) + 4,567326$
			17	650	$a = 0,877143 \ln(\text{COD}) + 2,109622$

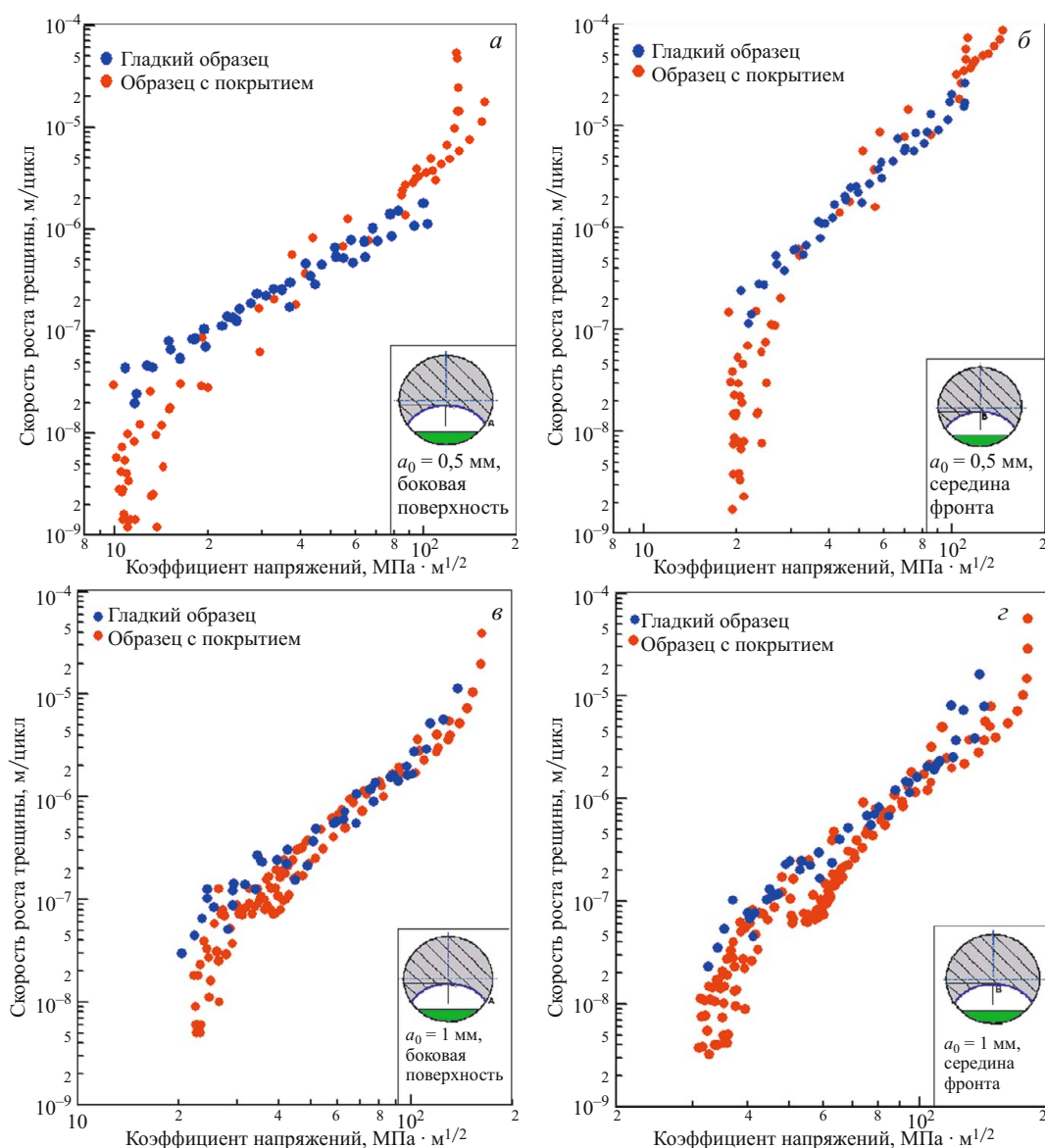


Рис. 8. Диаграммы усталостного разрушения

равная 250 мкм, не влияет на изменение податливости образца.

Следующий этап состоял в определении характеристик циклической трещиностойкости материала согласно уравнениям

$$\frac{da}{dN} = CK_{1, \max}^m, \quad (2)$$

$$\log C = am + b, \quad (a, b < 0), \quad (3)$$

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)^* \left(\frac{K_{1, \max}}{K_1^*} \right)^m, \quad (4)$$

где C , m — константы материала; K^* — значение коэффициента интенсивности напряжений на среднем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при скорости роста трещины $(da/dN)^* = 10^{-7}$ м/цикл. Параметр K^* имеет четкий

физический смысл: чем выше величина K^* при $da/dN^* = 10^{-7}$ м/цикл, тем больше материал оказывает сопротивление развитию трещин [21].

Между параметрами C и K^* существует взаимосвязь:

$$C = \left(\frac{da}{dN} \right)^* (K_1^*)^{-m}. \quad (5)$$

На рис. 8 представлены КДУР образцов с исходной поверхностью и защитным покрытием для различных размеров инициирующего надреза, а в табл. 4 — константы материала сопротивления разрушению, полученные в результате статистической обработки результатов испытаний.

По результатам испытаний на циклическую трещиностойкость можно сделать вывод о том, что нанесение покрытия HVAF не оказывает отрицательного воздействия на сопротивление материала циклическо-

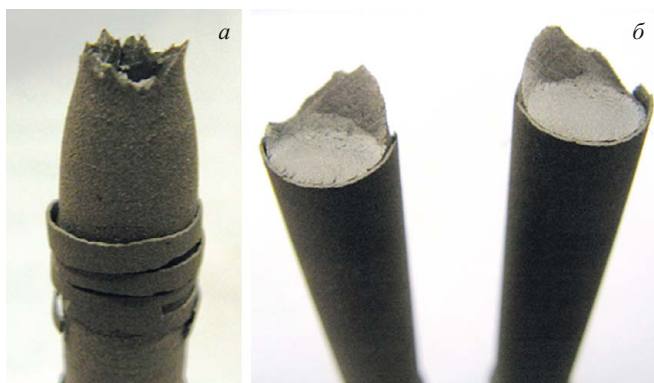


Рис. 9. Состояние покрытия после статических (а) и усталостных (б) испытаний образцов

му разрушению. Для малых длин развивающихся трещин в диапазоне от начального до среднего участка КДУР скорость их роста в образцах с покрытием ниже, чем в исходных образцах. Наибольшие различия в скоростях развития трещин для исходного и защищенного состояний поверхностей наблюдаются у образцов с надрезом глубиной $a_0 \approx 0,5$ мм.

Из табл. 4 видно, что во всех рассмотренных случаях состояния поверхности образцов и при разных исходных надрезах несквозная трещина наиболее быстро развивается по боковой поверхности образцов, чем от середины фронта. Это необходимо учитывать при проведении регламентных ремонтных работ на станции при визуальном контроле состояния боковых поверхностей лопаток, в то время как доступ к внутренним точкам фронта развивающейся в элементе конструкции трещины затруднен для соответствующих измерений.

Необходимо отметить удовлетворительную прочность сцепления покрытия HVOF с основным металлом лопаток при испытаниях. Растрескивание покрытия происходит лишь при статических испытаниях на растяжение, когда образец значительно деформируется вплоть до разрушения (рис. 9, а). В остальных случаях усталостных испытаний при уровнях напряжений, близких к эксплуатационным, покрытие HVOF прочно связано с основой в течение всего времени испытаний (рис. 9, б).

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что нанесение защитных покрытий HVOF не снижает характеристики статической прочности, долговечности и циклической трещиностойкости материала рабочих лопаток. Незначительное изме-

нение величины предела усталости при нанесении покрытий можно считать вполне допустимым, поскольку главное назначение покрытий — защита материала лопаток от коррозии и эрозии. Эти основные функции реализованы в рассматриваемой технологии нанесения защитных покрытий без отрицательных последствий для параметров сопротивления деформированию и разрушению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поздышев А. А., Рабенко В. С. О повреждениях паровых турбин ТЭС / Вестник ИГЭУ. 2004. Вып. 2.
2. Сорокин. А. Ю. Систематизация и анализ эксплуатационных повреждений элементов теплогенерирующего оборудования / Труды Академэнерго. 2009. № 3. С. 84 – 90.
3. Аверкина Н. В., Долгопоск Е. Б., Качуринер Ю. Я., Орлик В. Г. Особенности эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней турбин мощностью 300 МВт и выше / Теплоэнергетика. 2001. № 11. С. 34 – 40.
4. Левченко Е. В., Сухинин В. П., Аркадьев Б. А. Разработка последних ступеней паровых турбин НПО «Турбоатом» / Теплоэнергетика. 1994. № 4. С. 7 – 11.
5. Явельский М. Б. Исследование методов антиэрозионной защиты рабочих лопаток паровых турбин: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Л., 1971. — 19 с.
6. Беляков А. В., Шапин В. И., Горбачев А. Н. Практика формирования электроискровых покрытий для упрочнения и восстановления лопаточного аппарата проточной части паровых турбин тепловых и атомных электростанций / Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 4.
7. Красновский С. Я. Разработка технологии повышения износостойкости рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин методом электроискрового легирования / Вестник ИГЭУ. 2009. Вып. 2.
8. Johnson R. N. Electro-Spark Deposited Coatings for High Temperature Wear and Corrosion Applications. Elevated Temperature Coatings: Science and Technology 1. Ed. by N. B. Dahotre, J. M. Hampikian and J. J. Stiglich / The Minerals, Metals, and Materials Society, Warrendale, PA, 1995.
9. ОАО «ВТИ»: Технология упрочнения и восстановления рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин тепловых и атомных электростанций без разлопачивания / Обзор инноваций и научно-технических разработок. 2009. № 5. С. 23 – 25.
10. Балдаев Л. Х., Шестеркин Н. Г., Селезнев Г. М. Перспективы использования метода газотермического напыления при ремонтах и производстве оборудования в энергетической, химической и нефтегазовой промышленности / Химическая техника. 2002. № 8. С. 14 – 15.
11. Балдаев Л. Х. Газотермическое напыление порошковых материалов для получения защитных покрытий с заданными свойствами: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Курск, 2010. — 32 с.
12. Mann B. S., Arya V. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades / Wear. 2003. Vol. 254. P. 652 – 667.
13. Gorlach I. A. The application of high velocity air fuel process for the deposition coatings / R. & D. Journal. 2008. Vol. 24. N 3. P. 9 – 16.
14. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. В двух книгах. Кн. 1. — Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. — 611 с.
15. Качанов Е. Б., Тамарин Ю. А. Расчет на прочность защитных покрытий на лопатках турбин / Технология легких сплавов. 2011. № 2. С. 86 – 94.

Таблица 4. Параметры уравнений циклической трещиностойкости

Состояние поверхности	Точка фронта трещины	$a_0 = 0,5$ мм			$a_0 = 1,0$ мм		
		C	m	K^* , МПа · м ^{1/2}	C	m	K^* , МПа · м ^{1/2}
Исходное	А, боковая поверхность	$5,745 \cdot 10^{-7}$	1,7143	20,281	$2,3089 \cdot 10^{-11}$	2,4932	30,910
	В, середина фронта	$3,845 \cdot 10^{-9}$	2,8079	37,358	$3,8127 \cdot 10^{-10}$	3,3101	43,357
С покрытием HVOF	А, боковая поверхность	$3,917 \cdot 10^{-9}$	2,9818	30,060	$1,9052 \cdot 10^{-9}$	3,0409	40,060
	В, середина фронта	$2,2087 \cdot 10^{-11}$	3,9942	46,385	$1,1948 \cdot 10^{-11}$	4,0048	53,532

16. Качанов Е. Б., Тамарин Ю. А. Пути повышения сопротивления усталости лопаток турбины из жаропрочных сплавов / Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 40 – 46.
17. Гецов Л. Б., Рыбников А. И., Малашенко И. С. Сопротивление усталости жаропрочных сплавов с покрытиями / Проблемы прочности. 1990. № 5. С. 51 – 56.
18. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 27 с.
19. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 34 с.
20. Shlyannikov V. N., Yarullin R. R., Zakharov A. P. Fatigue of steam turbine blades with damage on the leading edge / Proceedings of ECF20. 2014. P. 1 – 6.
21. Panasiuk V. V., Yarema S. A. General Features of Fatigue Fracture Diagrams of Metals / Strength of materials. 1996. N 1. P. 30 – 35.

REFERENCES

1. Pozdyshev A. A., Rabenko V. S. O povrezhdeniyakh parovykh turbin TES [About damages of TPP steam turbines] / Vestnik IGÉU. 2004. Issue 2 [in Russian].
2. Sorokin. A. Yu. Sistematizatsiya i analiz éksploatatsionnykh povrezhdenii élementov teplogeneriruyushchego oborudovaniya [Systematization and analysis of operational damages of elements heat generating equipment] / Trudy Akademénergo. 2009. N 3. P. 84 – 90 [in Russian].
3. Averkina N. V., Dolgoplosk E. B., Kachuriner Yu. Ya., Orlik V. G. Osobennosti érozionnogo iznosa rabochikh lopatok poslednikh stupenei turbin moshchnost'yu 300 MVt i vyshe [Feature's erosive wear of rotor blades of the last stages of turbines with a capacity of 300 MW and above] / Teploénérgetika. 2001. N 11. P. 34 – 40 [in Russian].
4. Levchenko E. V., Sukhinin V. P., Arkad'ev B. A. Razrabotka poslednikh stupenei parovykh turbin NPO "Turboatom" [The development of the last stages of steam turbines NGO "Turboatom"] / Teploénérgetika. 1994. N 4. P. 7 – 11 [in Russian].
5. Yavel'skii M. B. Issledovanie metodov antiérozionnoi zashchity rabochikh lopatok parovykh turbin [Investigation anti-erosion protection methods of rotor blades of steam turbines]. Author's Abstract of Candidate's Thesis. — Leningrad, 1971. — 19 p. [in Russian].
6. Belyakov A. V., Shapin V. I., Gorbachev A. N. Praktika formirovaniya élektroiskrovnykh pokrytii dlya uprochneniya i vosstanovleniya lopatochnogo apparata protochnoi chasti parovykh turbin teplovykh i atomnykh élektrostantsii [Experience in electric-spark coatings for hardening and restoring the flow of the blading of steam turbines of thermal and nuclear power plants] / Vestnik IGÉU. 2008. Issue 4 [in Russian].
7. Krasnovskii S. Ya. Razrabotka tekhnologii povysheniya iznosostoikosti rabochikh lopatok poslednikh stupenei parovykh turbin metodom élektroiskrovovogo legirovaniya [Development of technology for improving the wear resistance of rotor blades of the last stages of steam turbines by spark alloying] / Vestnik IGÉU. 2009. Issue 2 [in Russian].
8. Johnson R. N. Electro-Spark Deposited Coatings for High Temperature Wear and Corrosion Applications. Elevated Temperature Coatings: Science and Technology 1. Ed. by N. B. Dahotre, J. M. Hampikian and J. J. Stiglich / The Minerals, Metals, and Materials Society, Warrendale, PA, 1995.
9. ОАО "VTI": Tekhnologiya uprochneniya i vosstanovleniya rabochikh lopatok poslednikh stupenei parovykh turbin teplovykh i atomnykh élektrostantsii bez razlopachivaniya [JSC "VTI". Technology hardening and recovery of rotor blades of the last stages of steam turbines of thermal and nuclear power plants without removal of blades] / Obzor Innov. Nauch.-Tekhn. Razrab. 2009. N 5. P. 23 – 25 [in Russian].
10. Baldaev L. Kh., Shesterkin N. G., Seleznev G. M. Perspektivy ispol'zovaniya metoda gazotermicheskogo napyleniya pri remontakh i proizvodstve oborudovaniya v énergeticheskoi, khimicheskoi i neftegazovoi promyshlennosti [Prospects for the use of the method of thermal spraying in the repair and manufacture of equipment in the energy, chemical and petroleum industry] / Khim. Tekhnika. 2002. N 8. P. 14 – 15 [in Russian].
11. Baldaev L. Kh. Gazotermicheskoe napylenie poroshkovykh materialov dlya polucheniya zashchitnykh pokrytii s zadannymi svoystvami [Gas thermal spraying powder materials for protective coatings with desired properties]. Author's Abstract of Doctoral Thesis. — Kursk: KGTU, 2010. — 32 p. [in Russian].
12. Mann B. S., Arya V. HVOF coating and surface treatment for enhancing thermal erosion resistance of steam turbine blades / Wear. 2003. Vol. 254. P. 652 – 667.
13. Gorlach I. A. The application of high velocity air fuel process for the deposition coatings / R. & D. Journal. 2008. Vol. 24. N 3. P. 9 – 16.
14. Getsov L. B. Materialy i prochnost' detalei gazovykh turbin [Materials and strength of gas turbine parts]. V dvukh knigakh. Book 1 — Rybinsk: Izdatel'skiy dom "Gazoturbinnyye tekhnologii," 2010. — 611 p. [in Russian].
15. Kachanov E. B., Tamarin Yu. A. Raschet na prochnost' zashchitnykh pokrytii na lopatkakh turbin [Calculation of the strength of protective coatings on turbine blades] / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2011. N 2. P. 86 – 94 [in Russian].
16. Kachanov E. B., Tamarin Yu. A. Puti povysheniya soprotivleniya ustalosti lopatok turbiny iz zharoprochnykh spлавov [Ways to improve the fatigue resistance of the turbine blades of superalloys] / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2009. N 2. P. 40 – 46.
17. Getsov L. B., Rybnikov A. I., Malashenko I. S. Soprotivlenie ustalosti zharoprochnykh spлавov s pokrytiyami [Fatigue resistance of coated superalloys] / Problemy Prochnosti. 1990. N 5. P. 51 – 56.
18. RF State Standard GOST 1497–84. Metally. Metody ispytaniya na rastyazhenie [Metals. Test Methods Tensile]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1984. — 27 p. [in Russian].
19. RF State Standard GOST 25.502–79. Raschety i ispytaniya na prochnost' v mashinostroenii. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Metody ispytaniya na ustalost' [Calculations and tests of strength in mechanical engineering. Methods of mechanical testing of metals. Test methods for fatigue]. — Moscow: Izd-vo standartov, 1981. — 34 p. [in Russian].
20. Shlyannikov V. N., Yarullin R. R., Zakharov A. P. Fatigue of steam turbine blades with damage on the leading edge / Proceedings of ECF20. 2014. P. 1 – 6.
21. Panasiuk V. V., Yarema S. A. General Features of Fatigue Fracture Diagrams of Metals / Strength of materials. 1996. N 1. P. 30 – 35.