



## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ГАЗОВАЯ КОРРОЗИЯ ЛОПАТОК ТУРБИН ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**Л. В. ЧЕРВЯКОВА**, **А. В. ЗВЯГИНЦЕВА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследован характер газовой коррозии рабочих лопаток энергетической установки из никелевого сплава инконель 738. Показано, что в узкой зоне, примыкающей к поверхности трещины, происходит перераспределение легирующих элементов. Оценка микротвердости показала наличие разупрочнения в этой же зоне.

*Ключевые слова:* жаропрочные никелевые сплавы, газовая коррозия, микротвердость, граница зерна, диффузия, локальная трещина

Лопатки газовых турбин, длительно эксплуатирующиеся при высоких температурах и сложном нагружении, претерпевают структурные изменения, вызванные температурой, условиями эксплуатации, коррозионной средой и другими факторами [1]. В ряде случаев комплексное воздействие указанных факторов на материал лопаток приводит к ускоренному разрушению материала в результате локализации процессов в определенных зонах [2]. В настоящей работе исследован характер газовой коррозии рабочих лопаток энергетической установки, изготовленных из никелевого сплава In738, химический состав которого следующий, мас. %: 0,17 С; 8,5 Со; 16,1 Сг; 1,8 Мо; 3,4 Аl; 3,4 Тi; 2,6 W; 1,8 Та; 0,8 Nb; Ni — основа.

Срок наработки исследуемых лопаток составил около 15000 ч. Визуальный контроль поверхности позволил выявить сетку трещин в средней части пера лопатки в районе максимальных температур металла. Проведение металлографических исследований позволило установить, что разрушение (до 0,6 мм) проходит по границам аустенитных зерен (рис. 1, а). Кроме того, перед трещиной по границам зерен наблюдается выделение избыточных фаз (рис. 1, б), глубина которых составляет до

полностью 0,6...0,8 мм. Таким образом, общая глубина структурных изменений составляла около 1,2...1,4 мм.

Сделано предположение, что межзеренные выделения и последующее разрушение вызвано газовой коррозией. Оценку микротвердости различных структурных зон в районе образования трещин выполняли при нагрузке 0,1 Н. Исследования показали наличие разупрочнения в узкой зоне металла, примыкающей к поверхности трещины (рис. 2). Так, микротвердость матрицы составляла HV 550 в отличие от микротвердости в узкой зоне рядом с трещиной HV 290. Растворяющий отжиг (аустенизация) металла по стандартным режимам не позволил выполнить растворение избыточных фаз, образовавшихся по границам зерен перед фронтом трещины. Это подтверждает высокую термодинамическую стабильность выделений и гипотезу об избирательном окислении границ зерен металла в процессе эксплуатации.

Исследования химического состава структурных зон металла в районе трещины выполнены на анализаторе Camebax, позволяющем количественно определить содержание ряда элементов, в том числе кислорода. Установлено, что содержание элементов с ограниченной диффузионной подвижностью (ниобия, вольфрама, никеля, молибдена) по исследуемому сечению практически не менялось

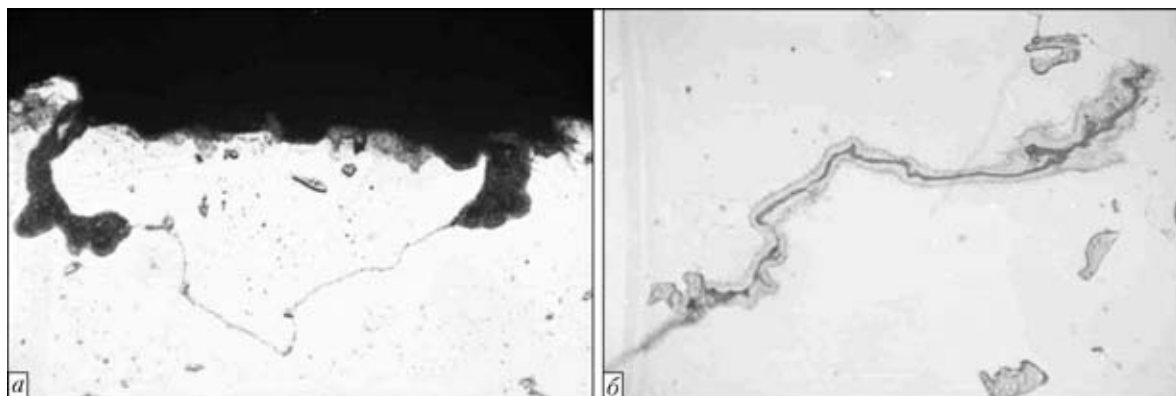


Рис. 1. Микроструктура пера лопатки из сплава In738 после эксплуатации,  $\times 200$ : а — начало коррозионного разрушения; б — деградация границ зерен

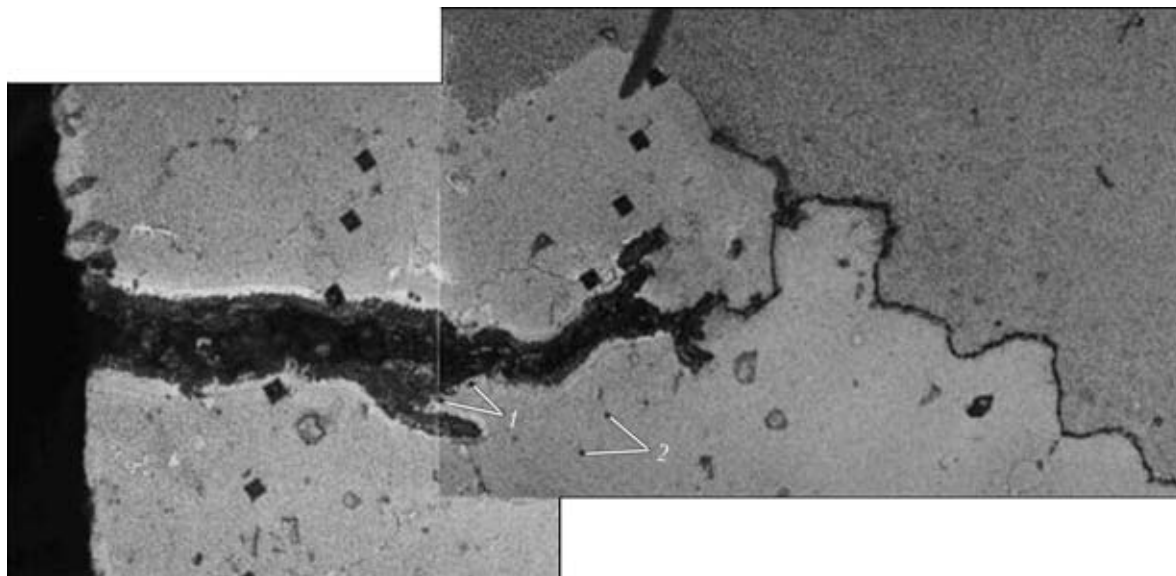


Рис. 2. Микротвердость структурных составляющих в металле лопатки из сплава In738 после газовой коррозии в процессе эксплуатации,  $\times 200$ : 1 – отпечатки алмазной пирамиды приграничной зоны; 2 – отпечатки на теле зерна

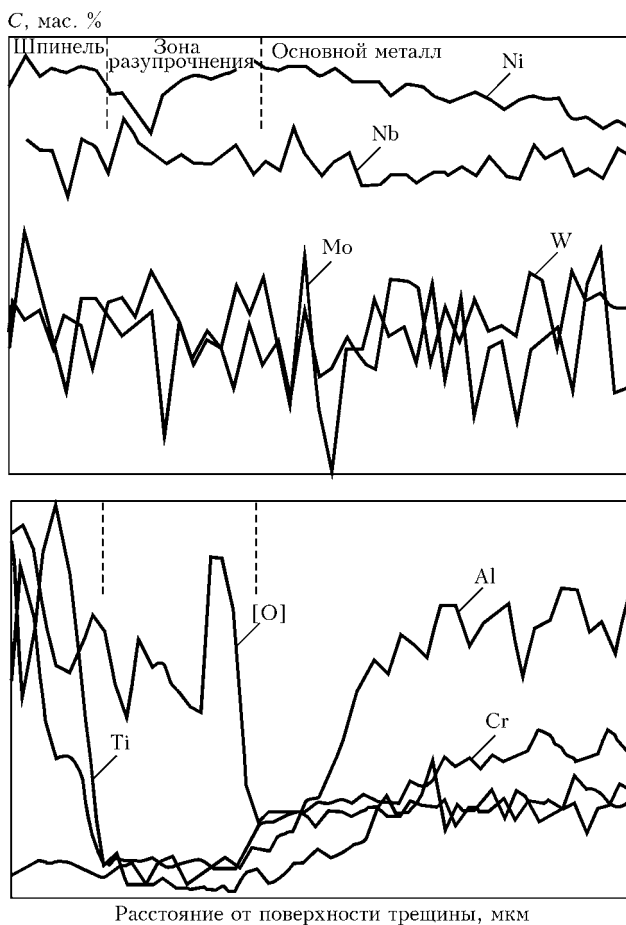


Рис. 3. Качественное распределение химических элементов в приграничной зоне участка лопатки, подверженного газовой коррозии

(рис. 3). При этом в узкой зоне с пониженной твердостью наблюдается снижение содержания алюминия, титана и хрома. Наряду с этим в указанной зоне наблюдается повышенное содержание кислорода.

В результате выполненных исследований можно предположить следующий механизм коррозионно-

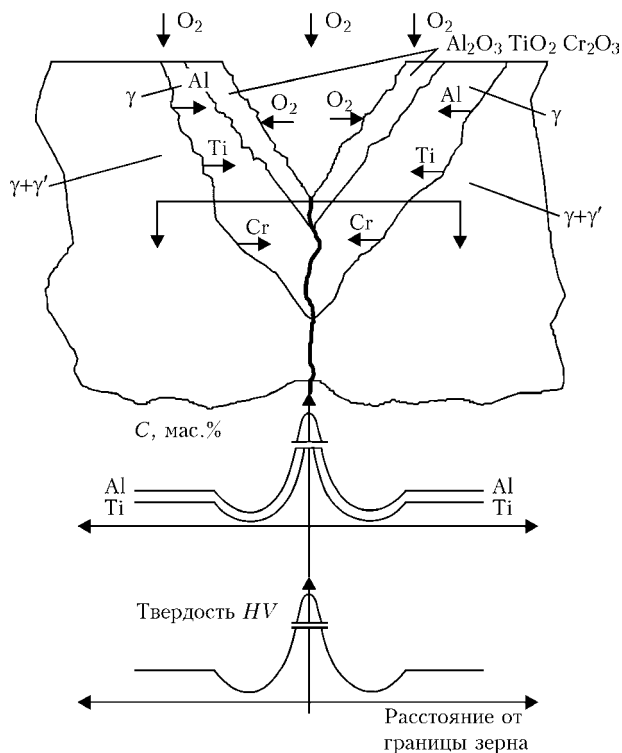


Рис. 4. Схема развития коррозионного разрушения поверхности пера лопатки из сплава In738 после длительной эксплуатации

го разрушения (рис. 4). Первоначально, несмотря на наличие защитных покрытий, при определенных условиях наблюдается пограничная диффузия кислорода по границам зерен литого металла лопаток. Упругие либо локальные пластические деформации способствуют реализации процесса диффузии. Кислород как активный элемент, соединяясь с алюминием, титаном, хромом, образует по границам зерен оксиды типа шпинелей. При этом твердый раствор металла зон, прилегающий к границе, обедняется этими элементами. Поскольку алюминий и титан являются элементами, способствующими образованию упрочняющей дисперсной  $\gamma'$ -фазы,



уменьшение содержания указанных элементов в локальных зонах приводит к растворению  $\gamma$ -фазы и разупрочнению металла, что подтверждается металлографически, а также измерением микротвердости. В результате образуется разупрочненная пограничная зона, в которой под действием эксплуатационных нагрузок в зоне разупрочнения возникает локальная трещина. Процесс периодически повторяется, приводя к образованию макротрещины. Высокотемпературное коррозионное воздействие на поверхность лопаток значительно уменьшается благодаря эффективным защитным покрытиям, что позволяет увеличить срок эксплуатации энергетического оборудования в несколько раз.

В заключение можно отметить, что детали из никелевых жаропрочных сплавов с  $\gamma$ -упрочнением в процессе эксплуатации подвержены высокотемпературному избирательному межкристаллитному коррозионному разрушению. Основным механиз-

The character of gas corrosion of power plant blades made from nickel alloys Inconel 738 has been studied. It is shown that redistribution of alloying elements occurs in a narrow zone adjoining the crack surface. Evaluation of microhardness showed the loss of strength taking place in this zone.

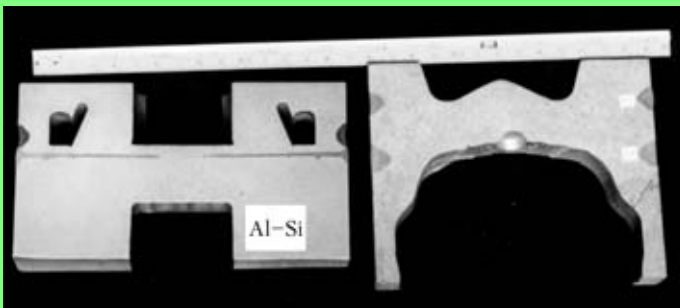
мом последнего является взаимодействие кислорода газовой среды с алюминием и титаном, которые имеют, с одной стороны, высокое сродство к кислороду, с другой, являются элементами-упрочнителями металла благодаря образованию упрочняющей  $\gamma$ -фазы. Образование оксидов указанных элементов преимущественно по границам зерен приводит к обеднению ими приповерхностных слоев и разупрочнению металла, что способствует локальному продвижению трещины по границам зерен. Процесс многократно повторяется, приводя в итоге к макроразрушению.

1. Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД / Б. А. Грязнов, С. С. Городецкий, Ю. С. Налимов и др. — Киев: Наук. думка, 1992. — 264 с.
2. Keiji S., Jukio T. Cracking by elevated temperature embrittlement in the HAZ of alloy 800H // Trans. of the Jap. Weld. Soc. — 1991. — 22, № 1. — P. 10–15.

Поступила в редакцию 25.05.2004

## ТЕХНОЛОГИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ НАПЛАВКИ С ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ ЗОНЫ КОМПРЕССИОННЫХ КАНАВОК АЛЮМИНИЕВЫХ ПОРШНЕЙ

*В настоящее время усовершенствование двигателей внутреннего сгорания, в частности, дизелей, идет в направлении повышения их мощности, снижения металлоемкости и увеличения долговечности. В этой связи особое значение приобретают проблемы увеличения срока службы поршней, поскольку с повышением мощности двигателей существенно возрастают тепловые и динамические нагрузки на поршень.*



*Для повышения износостойкости и срока эксплуатации алюминиевых поршней разработана технология износостойкой упрочняющей наплавки поршней в зоне верхней компрессионной канавки с использованием легирующих присадок и высококонцентрированного нагрева электронным пучком.*

*Применение легирующего материала дает возможность получить необходимую твердость зоны упрочнения в пределах HB 150...180. Горячая твердость упрочненного слоя в интервале температур 100...360 °C в 2...3 раза выше по сравнению с основным металлом поршня.*

*Разработанная технология упрочнения поршней позволяет отказаться от нирезиновой вставки и повысить моторесурс поршневой группы двигателей в 1,5...2 раза.*

*Предложения по сотрудничеству: разработка технической документации, передача «ноу-хау» по технологии, технические консультации и инженерные услуги при освоении технологии в производстве.*

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины  
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 7  
Тел.: (38044) 287 44 06, факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30