

УДК 621.791.019: 658.562

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ЛОПАТОК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА АГРЕГАТА ГТК-25И

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук,
Л. В. ЧЕРВЯКОВА, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. ИЗБАШ, **В. Г. СОЛЯНИК**, кандидаты техн. наук (НАК «Нефтегаз Украины» ГК Укртрансгаз, г. Киев)

Исследованы причины разрушения лопаток из мартенситно-ферритной стали входного поворотного направляющего аппарата осевого компрессора газоперекачивающего агрегата. Разрушение лопаток происходит в несколько стадий: образование очагов коррозии — появление и развитие трещин в зоне коррозионного разрушения при циклической нагрузке — разрушение. На начальной стадии происходит коррозионное повреждение на границе раздела мартенсит-феррит, переходящее от межзеренного к внутризеренному коррозионному разрушению по мартенситным иглам, а затем к усталостному разрушению по телу зерна.

Ключевые слова: газотурбинные установки, лопатки, высоколегированная сталь, коррозионно-усталостные повреждения

На газотурбинных установках ГТК-25И, широко применяемых для транспортировки газа, используется входной поворотный направляющий аппарат осевого компрессора, который комплектуется поворотными стационарными лопатками из стали 14X17H2.

В соответствии со структурной диаграммой Потака и Сагалевича [1] сталь 14X17H2 относится к высоколегированным сталям мартенситно-ферритного класса с содержанием около 70 % мартенсита, менее 20 % феррита и следов остаточного аустенита. Структурно свободный феррит выделяется в виде полос [2].

Сталь 14X17H2 относится к закаливающимся нержавеющей хромистым сталям, в которых повышенное содержание хрома обеспечивает достаточную коррозионную стойкость в ряде слабоагрессивных сред [3, 4], однако в связи с возможным выделением избыточных карбидных фаз стали подобной системы легирования [1, 3] проявляют пониженную коррозионную стойкость при нагреве выше 500 °С.

В процессе эксплуатации стационарных поворотных лопаток в составе компрессора установки ГТК-25И произошло разрушение пера лопатки.

Цветовая дефектоскопия поверхности пера и металлографические исследования позволили выявить локальные микротрещины в зоне выкружек в местах перехода цилиндрической части верхней и нижней цапф к перу (рис. 1) (наличие выкружек, по мнению проектировщиков, должно было уменьшить концентрацию напряжений в этих местах); микротрещины в местах забоин на входной кромке пера лопатки; локальные (язвенные) кор-

розионные повреждения поверхности пера лопатки, в том числе в районе выкружек (рис. 2).

Анализ состояния верхней цапфы лопатки показал односторонний износ ее цилиндрической части со стороны «спинки» пера лопатки, что связано, очевидно, с наличием значительных знакопеременных нагрузок пера поворотной лопатки (по-видимому, одностороннего действия).

Кроме того, визуальным осмотром обнаружены многочисленные локальные вспучивания поверхности пера лопатки диаметром 0,5...1,2 мм и глубиной 0,5 мм с характерным коррозионным растрескиванием (рис. 3).

Металлографическими исследованиями установлен структурный состав металла, состоящий из блочного мартенсита (М) и строчечных выделений δ -феррита (δ -Ф), сформировавшегося, очевидно, в результате термомеханической обработки при высоких температурах. По границам мартенситных блоков внутри бывших аустенитных



Рис. 1. Коррозионно-усталостное разрушение (1) поверхности лопатки из стали 14X17H2 в процессе эксплуатации и хрупкое разрушение в районе забоин (2) при аварийном разрушении

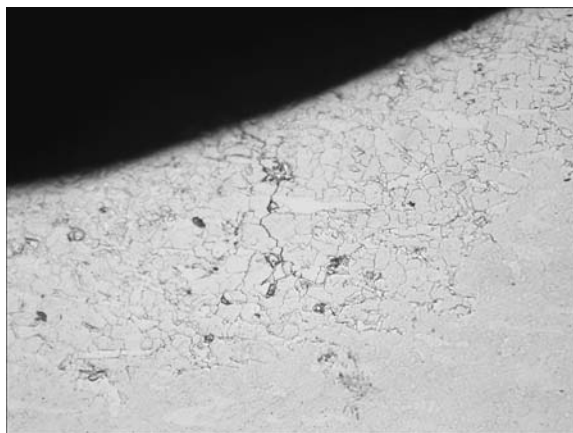


Рис. 2. Микроструктура (X200) с характерным коррозионно-усталостным разрушением пера лопатки из стали 14X17H2 в районе выкружки (фрагмент 1 на рис. 1)

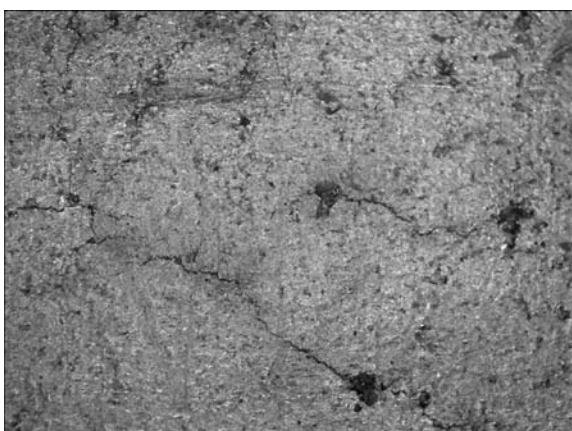


Рис. 3. Фрагмент внешнего вида поверхности пера поворотной лопатки из стали 14X17H2 (X50) с характерным коррозионным растрескиванием

зерен и границам между δ -ферритом и мартенситной структурными составляющими наблюдаются выделения карбидов типа $Me_{23}C_6$ (рис. 4).

Химический состав металла поворотной лопатки из стали 14X17H2 после эксплуатации следующий, мас. %: 0,14 C; 0,46...0,58 Si; 17,85...20,3 Cr; 78,12...79,66 Fe; 1,01...2,03 Ni. В связи с различной растворимостью хрома и никеля при высоких температурах в γ -аустените и δ -феррите наблюдается некоторое перераспределение этих элементов между мартенситной и ферритной составляющими структуры.

Исследования поверхности лопаток в состоянии после эксплуатации с использованием оптического микроскопа «Neophot-32» позволили детально оценить характер разрушения пера лопатки в процессе эксплуатации. Прежде всего подтверждается наличие коррозионно-усталостного разрушения от выкружек в местах перехода от верхней и нижней цапфы к перу лопатки.

Металлографические исследования полированных, но нетравленных шлифов позволяют судить о глубине коррозионного проникновения в



Рис. 4. Смещение локальных участков металла (указаны стрелками), подтверждающих причины вспучивания поверхности в местах образования вздутий, X100

металл и характер коррозии. Можно сделать вывод, что в процессе эксплуатации имеет место межзеренное разрушение металла по границам бывших аустенитных зерен, сформировавшихся при высоких температурах при закалке металла. Исследованиями установлено, что язвенные разрушения поверхности пера лопатки в результате коррозионного воздействия имеют произвольное расположение.

Механические характеристики металла на образцах, свободных от повреждений, соответствовали данным, приведенным в работе [5] (таблица). Твердость металла поворотной лопатки из стали 14X17H2 следующая: у пера — *HB* 255, у верхней цапфы — *HB* 262, нижней — *HB* 251.

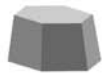
Исходя из полученных результатов, следует сделать вывод, что первоначально происходит разрушение по границам бывших аустенитных зерен. Впоследствии имеет место также избирательная коррозия от границ зерен вглубь зерна преимущественно по мартенситным иглам. Некоторые локальные язвенные разрушения соединяются трещинами, формируя таким образом макроразрушение.

Как уже отмечалось ранее, значительный объем коррозионных повреждений связан также с возникновением локальных вздутий на поверхности пера лопатки из стали 14X17H2.

Существуют предположения, что такие вздутия предшествуют появлению «язвенных» разрушений. Для выяснения механизма возникновения

Механические свойства стали 14X17H2 [5]

Сортамент	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²	<i>HB</i>
Сортовой прокат	835	1080	10	30	49	≤ 285
Поковки	539	686	13	35	54	248...293



таких локальных нарушений поверхности разработали специальную методику подготовки шлифов, гарантирующую адресное сечение плоскостью шлифа середины такого вздутия. Исследования проводили с использованием оптической микроскопии в светлом и темном поле, а также сканирующей электронной микроскопии. Для облегчения идентификации и оценки характеристик типов коррозии анализ строения поверхности шлифа в месте коррозионного разрушения проводили без ее предварительного травления.

Установлено, что усталостные разрушения в районе выкружек имеют межзеренный характер. Усталостные трещины распространяются по границам бывших аустенитных зерен и находятся в поле напряжений, создаваемых выкружками. Распространение усталостных трещин облегчается наличием коррозионных язв в районе выкружек.

Локальные вспучивания возникают в результате подповерхностного расслаивания металла благодаря процессам коррозии. На начальной стадии происходит коррозионное повреждение на границах зерен и границе мартенсит – феррит, переходящее во внутризеренное разрушение по мартенситным иглам.

Сделанные предположения о развитии локальных коррозионно-усталостных повреждений основываются на известных фактах [6], в соответ-

ствии с которыми в атмосферных условиях скорость коррозии сильно зависит от влажности воздуха и присутствия в нем агрессивных примесей, например SO_2 , H_2S и др.

В заключение следует отметить, что основной причиной коррозии является изменение структурного состояния металла, при котором в результате выделения карбидов хрома по структурным составляющим и термообработки, имеет место обеднение металла хромом ниже порога пассивации. При этом на тыльной стороне происходит избыточное (локальное) коррозионное разрушение под влиянием напряжений и влажного воздуха, обогащенного агрессивными примесями, такими, как SO_2 , H_2S и др.

1. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. А. С. Зубченко. — М.: Машиностроение, 2003. — 783 с.
2. *Потак Я. М.* Высокопрочные стали. — М.: Металлургия, 1972. — 208 с.
3. *Чигал В.* Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей. — М.: Химия, 1969. — 232 с.
4. *Ланская К. А.* Высокохромистые жаропрочные стали. — М.: Металлургия, 1976. — 216 с.
5. *Ульянин Е. А., Свистунова Т. В., Левин Ф. Л.* Высоколегированные коррозионностойкие сплавы. — М.: Металлургия, 1987. — 88 с.
6. *Мелехов Р. К., Похмурский В. И.* Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. — К.: Наук. думка, 2003. — 382 с.

The causes of fracture of martensite-ferrite steel blades in inlet rotary guide vane of axial-flow compressor of the gas-pumping unit were studied. Blade fracture occurs in several stages, namely formation of corrosion sites — appearance and development of cracks in the corrosion fracture zone at cyclic load — fracture. At the initial stage, corrosion damage on martensite-ferrite interface takes place, which develops from intergranular into intragranular fracture along the martensite needles, and then into fatigue fracture through the grain bulk.

Поступила в редакцию 13.03.2008

ИЗОБРЕТЕНИЯ СТРАН МИРА*

Способ диффузионной сварки. Свариваемые заготовки стыкуют, фиксируют плитами и помещают полученную сборку в оболочку. Затем оболочку и находящуюся в ней сборку вакуумируют, нагревают до температуры диффузионной сварки и подвергают сжатию по технологии горячего изостатического прессования. Поверхности фиксирующих плит покрывают разделительным материалом типа нитрида бора, предотвращая приваривание плит к заготовкам. Для усиления сварки между заготовками размещают металлический порошок. Способ позволяет изготавливать детали газотурбинного двигателя, состоящие из титана или сплава с алюминидом титана. Патент Великобритании 2419835. W. E. Voice, X. Wu, M. Loretto (Rolls-Royce Plc).

Способ сварки металлических листов, имеющих покрытие. Предложен способ обработки имеющих покрытие металлических листов сваркой, согласно которому по меньшей мере на одной стороне по меньшей мере одного листа изменяют структуру поверхности, причем для изменения струк-

туры применяют материал, температура плавления которого равна или выше температуры плавления имеющего покрытие металлического листа, обрабатываемого сваркой. Способ отличается тем, что изменение структуры осуществляют методом термического напыления. Патент Германии 10344072. W. Becker, K. Goth, N. Paelmer, C.-D. Reiniger, D. Zauner (Daimlerchrysler Ag).

Способ соединения деталей, в частности, деталей автомобильных кузовов пайкой. Предложен способ соединения деталей, в частности, деталей автомобильных кузовов с помощью пруткового или проволочного припоя, который размещают между соединяемыми деталями и расплавляют, в результате чего происходит соединение деталей. Целью изобретения является обеспечение технологически эффективной и быстрой пайки даже в местах, не имеющих прямого доступа. Для этого прутковый или проволочный припой дополняют стекловолокном, на поверхности которого путем целенаправленного повреждения создают зоны разъединения. На торцевой поверхности стекловолокно припоя, расположенного между деталями, соединяют излучением лазера и припой, окружающий поверхность стекловолокна, расплавляют,

* Приведены сведения о патентах, опубликованных в реферативном журнале «Изобретения стран мира» № 5 за 2007 г.