

УДК 621.793.6:669.245

**Г. И. Пейчев, канд. техн. наук** **В. Е. Замковой**, **Н. В. Андрейченко***Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье*

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЖАРСТОЙКИХ ЛИТЫХ СПЛАВОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

*В статье приведены особенности разрушения хвостовиков рабочих лопаток турбины во время эксплуатации в составе энергетических установок и результаты исследования продуктов коррозии, выявленных в зоне развития трещин.*

**Ключевые слова:** рабочие лопатки, разрушение хвостовиков, энергетические установки, трещины, коррозия.

### Введение

На предприятии ЗМКБ «Прогресс» использование разработок авиационной техники применительно к другим отраслям промышленности всегда было приоритетным. Так, модернизации авиационных двигателей нашли применение на буровых установках, на кораблях и т. д. Более десяти лет назад наше предприятие открыло новое направление технических разработок — это создание энергетических установок для газоперекачивающих станций на базе существующих авиационных двигателей разработки нашего предприятия.

Поскольку условия эксплуатации энергетических установок имеют много отличий от работы авиационных двигателей, всем специалистам пришлось приложить много усилий при разработке данного проекта. Так, металлургам пришлось пойти на замену ряда материалов и защитных покрытий, более адаптированных к требованиям эксплуатации энергетических установок. В частности, очень важное отличие работы лопаток турбины на этих установках по сравнению с авиационными двигателями — это безотказная работа в течение очень длительного времени (при достаточно большом межремонтном ресурсе) в жестких коррозионных условиях. В отличие от авиационных двигателей, установки ГПС (газоперекачивающие станции) работают на газе, который содержит агрессивные компоненты, по отношению к никелевым сплавам. Являясь стационарными установками на земле, они также могут подвергаться воздействию абразивных частиц типа песка и влаги, в худшем случае — морской воды.

При разработке авиационных двигателей, их доводке или сопровождению в эксплуатации, происходили разрушения на хвостовиках рабочих лопаток турбины различных ступеней, из

различных литых жаропрочных материалов типа ЖС, отлитых методом равноосной кристаллизации и высокоскоростной направленной кристаллизации. Имели место различные факторы, которые в той или иной мере провоцировали или способствовали разрушению лопаток, но, тем не менее, как правило, мы довольно успешно диагностировали характер разрушения по микроструктурным признакам развития микротрещин или фрактографии изломов.

При выходе энергетических установок для газоперекачивающих станций на большие ресурсы мы столкнулись с особым типом разрушения хвостовиков рабочих лопаток, которого не наблюдали на лопатках авиационных двигателей.

### 1 Формулирование проблемы

В настоящей статье приведены особенности разрушения хвостовиков рабочих лопаток турбин при эксплуатации в составе энергетических установок и результаты исследования продуктов коррозии, обнаруженных в зоне развития трещин.

### 2 Материалы и методика исследования

В качестве объекта исследования была выбрана рабочая лопатка ТНД с ГТП (газотурбинный привод) после эксплуатации в течение 17599 ч, на хвостовике которой при контроле ЛЮМ1-ОВ была выявлена трещина у подножия первого, считая от пера, зуба. Аналогичные трещины были выявлены на большом количестве других лопаток этого моторокомплекта. Материал лопаток — сплав ЖС26-ВИ отливки ВСНК (высокоскоростная кристаллизация).

В исследовании использовались следующие методы:

- микроанализ трещины на оптическом микроскопе OLYMPUS IX70. Микроанализ проводился на микрошлифе, изготовленном по поверхно-

сти торца хвостовика со стороны выходной кромки (место выхода трещины на торец), поперек развития трещины вдоль паза. Исследовались шлифы в нетравленном состоянии и после травления в электролите № 18;

- фрактография излома вскрытой трещины на микроскопе OLYMPUS IX70 и на электронном микроскопе JSM-T300;

- исследование продуктов коррозии во всех конструкциях трещины и матрицы вокруг нее на микрорентгеновском анализаторе суперпроба JXA-8200 (компания Токуо Воеки CIS производитель компания JEOL). Исследование производилось на микрошлифе, выполненном на поверхности торца хвостовика со стороны выходной кромки по месту выхода трещины на торец. Исследовался шлиф в нетравленном состоянии.

### 3 Результаты исследования

#### 3.1 Микроанализ

На рис. 1, 2 приведены внешний вид исследуемой трещины на хвостовике рабочей лопатки и микрошлиф, выполненный по поверхности торца хвостовика.

Микроанализ установил следующие особенности развития трещины:

- в основном, трещина развивается по плоскостям семейства {001};

- в очаге трещина раскрыта, удаляясь к периферии она становится более тонкая, имеет множество ответвлений и на острие своего развития

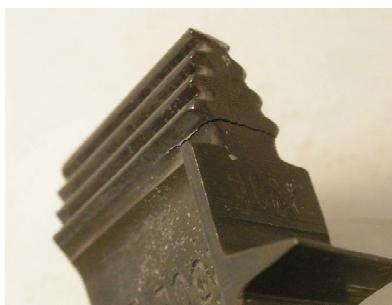


Рис. 1. Внешний вид трещины

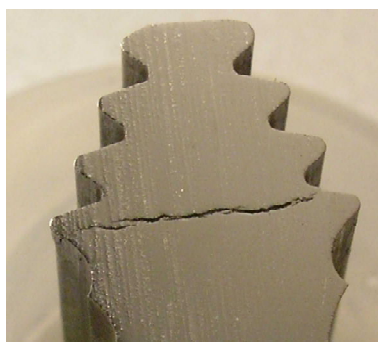


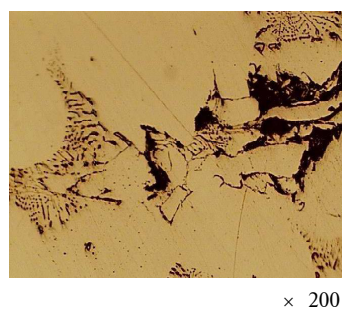
Рис. 2. Вид трещины на микрошлифе

превращается в пучок разнонаправленных несплошностей (паутинок), заполненных веществом серого цвета аморфного вида;

- на пути своего развития в трещине отмечаются участки с образованием сгустков продуктов коррозии серого цвета аморфного вида, при полном отсутствии обезлегирования берегов трещины;

- окисление карбидов в колониях типа «китайского шрифта». Эти карбиды, выделяясь в лопатках, отливаемых методом ВСНК, по плоскостям семейства {001}, образуют каркас материала по плоскостям, взаимно перпендикулярным друг другу.

Вид трещин на микрошлифе проиллюстрирован на рис. 3.



× 200



× 500

Рис. 3. Вид микротрещины на острие развития

#### 3.2 Фрактография излома вскрытой трещины

При исследовании излома по вскрытой трещине обнаружены следующие особенности:

- многоочаговый характер разрушения, направление развития от острого угла по диагонали (рис. 4);

- сильное окисление очаговой зоны до черного цвета и окисление до соломенного цвета на периферии;

- специфика излома — это чередование участков статического отрыва по колониям карбидов в плоскостях семейства {001} и фасетки с ручьистым узором (рис. 5). Такой излом можно достоверно отнести к хрупкому типу разрушения, но однозначно указать механизм разрушения — затруднительно. При электронной фрактографии признаки многоциклового разрушения выявлены только на границе с доломом, в целом по излому они отсутствуют (рис. 5).

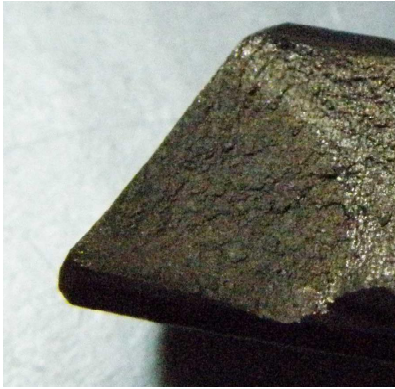


Рис. 4. Излом по трещине

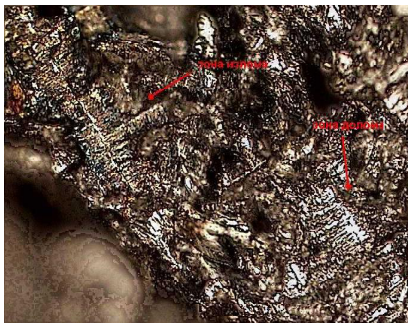


Рис. 5. Фрагмент излома в очаге

### 3.3 Исследование продуктов коррозии в конструкциях трещины

Исследование продуктов коррозии в трещине производилось по шлифу на микрорентгеновском анализаторе суперпроба JXA-8200. Результаты анализа показали следующее:

- кроме элементов, входящих в состав лопаток, в зоне исследования обнаружены такие элементы как O, S, Na;
- сера сконцентрирована, в основном, в русле трещины и в матрице в очаговой зоне;
- в микроструктурных образованиях, заполненных аморфными продуктами, были выявлены кислород, натрий, повышенное содержание титана, вольфрама и существенно никеля.

Результаты исследования продуктов коррозии показали, что в самой трещине и в зонах, прилегающих к ней, имеются элементы, которые не только вызывают и ускоряют коррозионные процессы, но и могут вызывать коррозионное растрескивание в условиях действия высоких нагрузок.

По результатам исследования однозначно можно сказать, что в данном случае разрушение хвостовиков произошло по типу коррозионного растрескивания. Под коррозионным растрескиванием [1] обычно понимают самопроизволь-

ное разрушение металла при одновременном воздействии на него некоторых коррозионных средств и статических (независимо, внутренних или приложенных извне) растягивающих напряжений. Опасность коррозионного растрескивания — в непредсказуемости момента разрушения. Если при общей коррозии, которая наблюдается на пере лопаток при повреждении защитных покрытий, происходит разрушение конструкции вследствие уменьшения ее «живого» сечения, что визуально можно обнаружить, то при коррозионном растрескивании никаких внешних признаков разрушения может не быть, как в нашем случае, поскольку трещины развиваются обычно без видимых продуктов коррозии на поверхности металла.

Несмотря на все большее внимание, которое мы уделяем исследованию коррозионного растрескивания, полное понимание сущности этого явления не достигнуто. Это объясняется огромной сложностью процесса, множества влияющих отдельных факторов, поэтому предположения строятся из теоретических предпосылок на основе химических реакций.

Просматривается версия, так называемого, сульфидного растрескивания, или «сероводородная хрупкость». Растрескивание наблюдается в сероводородных средах в присутствии влаги. Считается, что причина сероводородной хрупкости — проникновение в металл водорода, образующегося в протонном виде, в результате электрохимической коррозии в водных растворах сероводорода. Атомарный водород способен диффундировать в кристаллической решетке металла, достигая микротрещин, пустот, где он накапливается, образует молекулярный водород, создающий по мере накопления огромное давление. Такое давление в сочетании с приложенными растягивающими напряжениями приводит к внезапным разрушениям. Подобный процесс называют водородным охрупчиванием и мы столкнулись с ним при отработке техпроцесса изготовления лопаток, отливаемых методом ВСНК из сплавов ЖС32-ВИ и ЖС26-ВИ. Разрушение происходило также по плоскостям семейства {001} и излом имел специфический плоский рельеф по колониям карбидов, располагающихся в междендритных пространствах. Аналогичные топографические конструкции излома присутствуют и при разрушении хвостовиков в эксплуатации, что и наводит на аналогию механизма разрушения по типу водородного охрупчивания.

В настоящий момент проводятся мероприятия по замене материалов для рабочих лопаток на более коррозионностойкие с повторным упрочнением зубьев хвостовика, что по литературным источникам благотворно противостоит разрушению.

**Перечень ссылок**

1. Идельчик Б. М. Защита от коррозии компрессорных машин / Б. М. Идельчик, А. Е. Лященко. — Ленинград : Машиностроение, 1984. — 120 с.

2. Никитин В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / Ленинград : Машиностроение, 1987. — 272 с.

*Поступила в редакцию 17.05.2010*

**Пейчев Г.І., Замковий В.Є., Андрійченко Н.В. Особливості руйнування робочих лопаток турбіни з високоміцних жаростійких литих сплавів на енергетичних установках**

*В статті наведено особливості руйнування хвостовиків робочих лопаток турбіни під час експлуатації у складі енергетичних установок та результати дослідження продуктів корозії, виявлених в зоні розповсюдження тріщин.*

**Ключові слова:** *робочі лопатки, руйнування хвостовиків, енергетичні установки, тріщини, корозія.*

**Peuchev G., Zamkovoy V., Andreychenko N. Features of fracture of the working blades turbine from high-strength cast alloys heat-resistant to power plants**

*The article describes peculiarities of destruction occurred with blade roots of the turbine when operated as integrated in power units, and the results of investigations conducted with a corrosion detected at a zone of crack development.*

**Key words:** *blades, blade root breakdown, power generating systems, cracks, corrosion.*