

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИТЫХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

© 2003 Д.С. Еленевский², С.Ф. Жданов¹, К.Г. Святышев², А.З. Шайхутдинов¹

¹ ОАО “Газпром” г. Москва

² Самарский научно-инженерный центр автоматизированных прочностных испытаний
и диагностики машин

Рассматриваются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности литых лопаток турбины стационарных газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов. Приводятся данные исследований сопротивления усталости натуральных литых лопаток агрегата ГТК-10. Показано, что низкий уровень предела выносливости поставленных в эксплуатацию литых лопаток явился причиной многочисленных аварий указанных агрегатов. Предложены технические решения, направленные на повышение и обеспечение требуемой надежности и ресурса литых лопаток турбины. Приведены результаты исследования характеристик, сопротивления усталости и результаты успешной опытной эксплуатации в составе газоперекачивающих агрегатов литых лопаток турбины изготовленных с учетом предложенных решений.

Эффективность, функциональная устойчивость и ресурс стационарных газоперекачивающих агрегатов (ГПА), которые составляют основную часть ГПА магистральных газопроводов страны, во многом определяется конструкционной прочностью и надежностью лопаток турбин, поставляемых для периодической замены в процессе эксплуатации.

Поскольку в целом ресурс стационарных ГПА составляет более 100000 часов, а ресурс лопаток турбины в среднем 40000 часов, то для обеспечения нормального функционирования ГПА с учетом их общей численности в расчете на год требуется заменять около 20000 лопаток.

При проектировании отечественных стационарных ГПА, за исключением последних конструкций, предусмотрено применение в штатной компоновке штампованных лопаток турбины.

Однако тенденция современного газотурбостроения и требование сокращения затрат на эксплуатацию обусловила необходимость перехода от штампованных к литым лопаткам турбины, производство которых является более экономичным. На ряде специализированных предприятий для наиболее

применяемых в газоперекачивающей отрасли стационарных агрегатов ГТК-10 было организовано массовое производство таких лопаток турбины ВД и НД (рис.1) методом литья с равноосной структурой из жаропрочных сплавов ЗМИ-ЗУ и ЦНК-7П.

Однако уже в начальный период эксплуатации стали возникать массовые случаи преждевременных разрушений литых лопаток при наработке от 200 часов до 5000 часов. Это нарушало функционирование системы газоперекачки и приводило к большим потерям поскольку затраты на восстановление одного ГПА после аварии, вызванной разрушением лопаток турбины, составляют

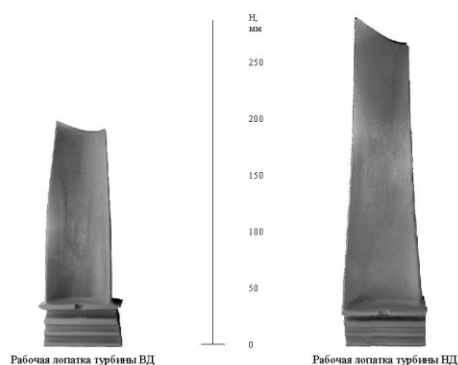


Рис.1. Объекты исследования

в среднем 5 млн.руб.

Результаты исследований большого числа аварийных лопаток показали, что все разрушения являются усталостными (рис.2) и преимущественно расположены в зонах действия максимальных переменных напряжений в пере, возникающих при колебаниях лопаток в работе, а также в верхнем пазе хвостовика (рис.3 и 4).

Была разработана методика натурных усталостных испытаний лопаток на автоматизированном стенде с целью оценки предела

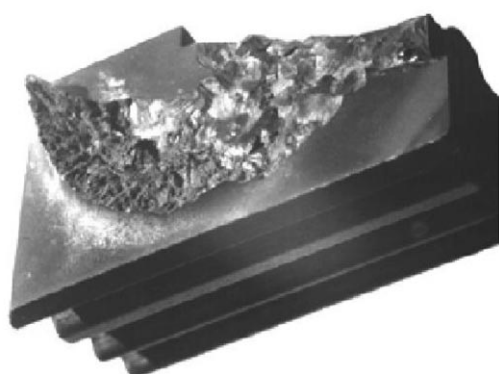


Рис.2. Усталостный излом лопатки в эксплуатации

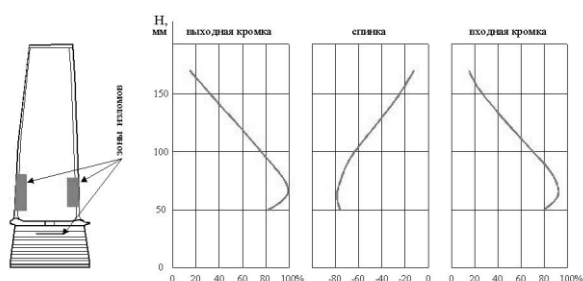


Рис.3. Распределение динамических напряжений и зоны изломов лопаток ТВД

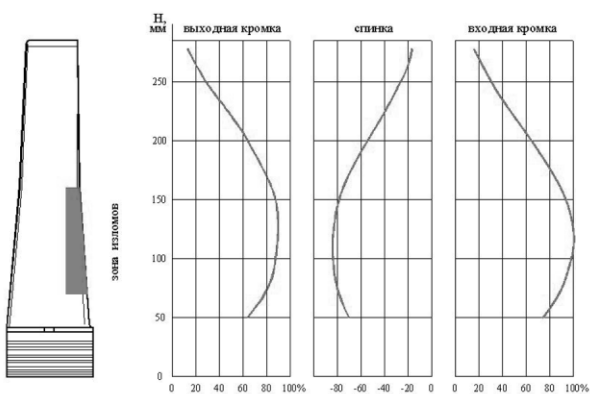


Рис.4. Распределение динамических напряжений и зона изломов лопаток ТНД

выносливости и воспроизведения эксплуатационных разрушений. Для этого использовалась специальная схема крепления лопатки на вибраторе, которая обеспечивала динамическое нагружение при резонансе первой изгибной формы как пера, так и верхнего паза хвостовика (рис.5).

Диагностические испытания на усталость ряда партий лопаток как из аварийных комплектов, так и неработавших комплектов, сходственных с аварийными по технологическим признакам, которые были изготовлены различными производителями из сплавов ЗМИ-3У и ЦНК-7П, выявили неудовлетворительный уровень и большой разброс предела выносливости с нижней границей до 91 МПа на базе 2×10^7 циклов (рис.6). Предел выносливости образцов, вырезанных из хвостовиков, оборвавшихся в эксплуатации лопаток, составил всего 66 МПа на базе 2×10^7 циклов. Такое низкое сопротивление усталости не обеспечивало работоспособность литых лопаток в составе ГПА.

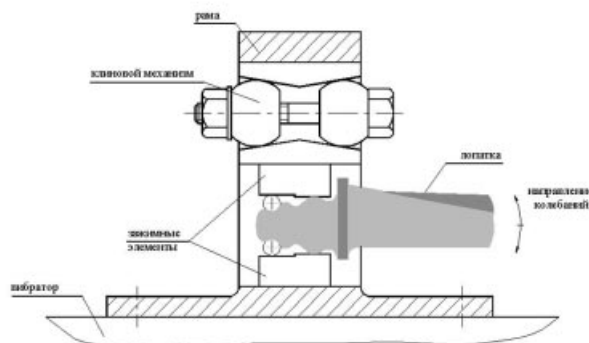


Рис.5. Схема крепления лопаток при усталостных испытаниях

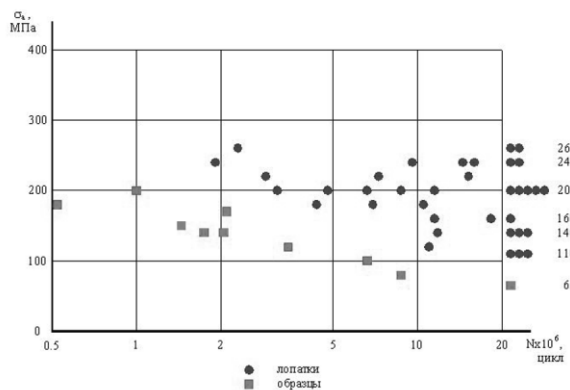


Рис.6. Сопротивление усталости литых лопаток ГТК-10-4, поставленных в эксплуатацию

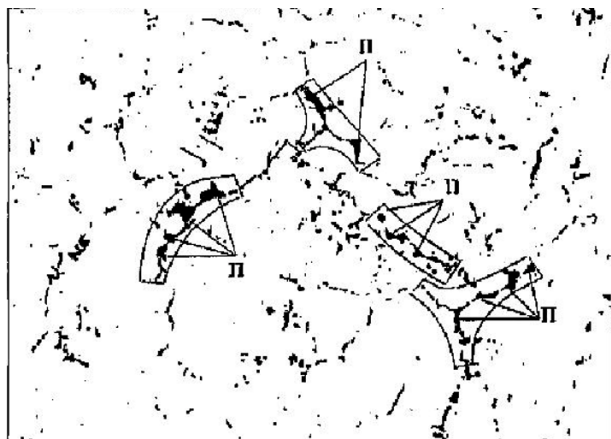


Рис. 7. Трещинообразные дефекты в литой лопатке с равноосной структурой

Металлографические и фрактографические исследования аварийных и испытанных на усталость литых лопаток показали, что очагами усталостных разрушений являются исходные литейные дефекты микроструктуры материала в виде скоплений микропор, растрескивания эвтектики, трещиноподобных несплошностей и хрупких транскристаллитных сколов (фасеток) (рис.7 и 8).

На рис. 7 видны протяженные скопления микропор, которые образуют трещино-подобный дефект. На рис. 8 при большом увеличении представлена картина хрупких транскристаллитных сколов. В ряде случаев при большой плотности и грубом характере таких дефектов у лопаток в эксплуатации возникали усталостные повреждения, имевшие множественный характер и располагавшиеся в различных зонах пера и хвостовика (рис.9).

Таким образом, была выявлена причин-



Рис.8. Объекты исследования

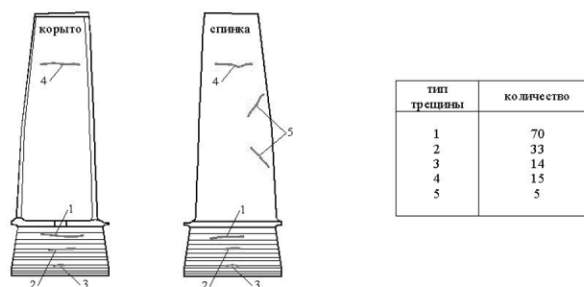


Рис. 9. Топография эксплуатационных усталостных повреждений литых лопаток ТВД из сплава ЗМИ-3У

ная связь низкого уровня сопротивления усталости и преждевременных разрушений в эксплуатации литых лопаток с дефектами микроструктуры литого материала лопаток.

Как показал анализ производственного процесса на предприятиях-изготовителях, возникновение указанных дефектов микроструктуры было связано с неотработанностью и нестабильностью технологии литья. Кроме того, перед началом массового производства и промышленной эксплуатации литых лопаток на стационарных ГПА не было изучено влияние таких дефектов на их динамическую прочность и долговечность и поэтому этим дефектам не придавали серьезного значения.

Негативно также сказалось несовершенство методов металлургического контроля качества, методики контроля уровня предела выносливости натуральных лопаток, поставлявшихся в эксплуатацию, отсутствие обоснованного нормированного уровня сопротивления усталости лопаток турбины стационарных ГПА, а также отсутствие единой централизованной системы входного контроля качества при поставке лопаток различными производителями во все газотранспортные предприятия ОАО "Газпром".

Имея в виду большое количество изготовленных и поставленных в эксплуатацию литых лопаток, была исследована возможность повысить их сопротивление усталости за счет наведения остаточных сжимающих напряжений методом поверхностного пластического упрочнения с помощью гидродробеструйной обработки.

Усталостные испытания лопаток из сплава ЦНК-7П (рис.10) показали, что

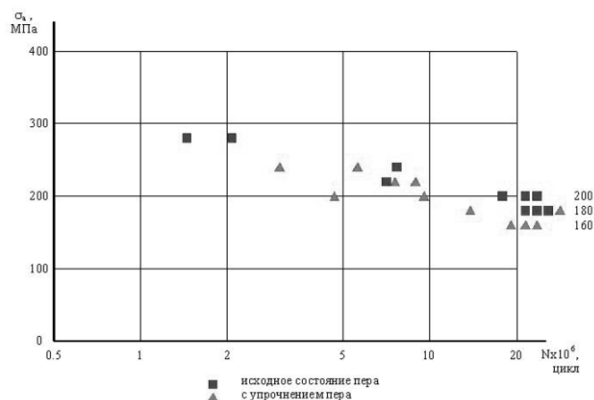


Рис. 10. Влияние гидродробеструйного упрочнения пера на сопротивление усталости литых лопаток из материала ЦНК-7П

поверхностное упрочнение при наличии рассеянных по объему исходных литейных дефектов практически не влияет на значение предела выносливости литых лопаток с равноосной структурой.

В связи с низкой эксплуатационной надежностью производство литых лопаток первого поколения для наиболее многочисленных стационарных ГПА типа ГТК-10 было прекращено и они были отозваны из эксплуатации.

Для обеспечения эксплуатации пришлось восстановить производство штампованных лопаток, что потребовало значительных средств.

Однако опыт современного газотурбостроения и авиадвигателестроения свидетельствовал о том, что литые лопатки турбины ГТД с равноосной структурой могут успешно работать на заданный ресурс.

Поэтому была исследована возможность обеспечить необходимую динамическую прочность и надежность литых лопаток с равноосной структурой для стационарных ГТУ за счет более совершенной технологии изготовления без изменения конструкции.

Анализ массива данных по наработке лопаток в эксплуатации до разрушения и массива характеристик сопротивления усталости лопаток из аварийных комплектов, полученных в результате натуральных усталостных испытаний, позволил установить, что для обеспечения назначенного ресурса литых лопаток турбины стационарных ГПА их предел выносливости должен составлять не ме-

нее 218 МПа на базе 2×10^7 циклов.

Этот уровень для литых лопаток является достаточно высоким, поскольку согласно паспортным данным предел выносливости гладких лабораторных образцов из сплавов ЗМИ-3У и ЦНК-7П составляет 240-260 МПа. В то же время с учетом достижений современной технологии он представлялся вполне достижимым, что в частности подтверждалось тем, что полученный при усталостных испытаниях предел выносливости литых лопаток турбины с равноосной структурой ГПА конструкции фирмы Джeneral Электрик из сплава Инканель 718, аналогичного по составу сплавам ЗМИ-3У и ЦНК-7П, имевших наработку в эксплуатации около 70000 часов, составил 264 МПа на базе 2×10^7 циклов. Задача состояла не только в получении высокого уровня предела выносливости натуральных литых лопаток, но и в обеспечении его стабильности в условиях массового производства. В качестве кардинального способа повышения качества и сопротивления усталости было использовано газоизостатическое прессование отливок лопаток с целью устранения исходных микронесплошностей.

Испытания на усталость представительных групп опытных лопаток показали, что применение этой операции позволяет устойчиво получить предел выносливости 218-255 МПа на базе 2×10^7 циклов, что соответствует его нормированному значению (рис. 11).

С целью уменьшения вероятности попадания в эксплуатацию лопаток с возможными выпадами по характеристикам сопротивления усталости была предложена и внедре-

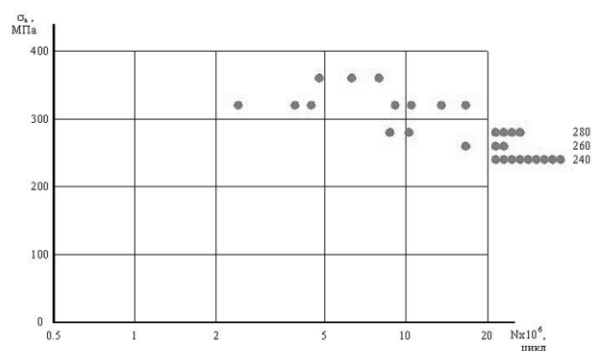


Рис. 11. Объекты исследования

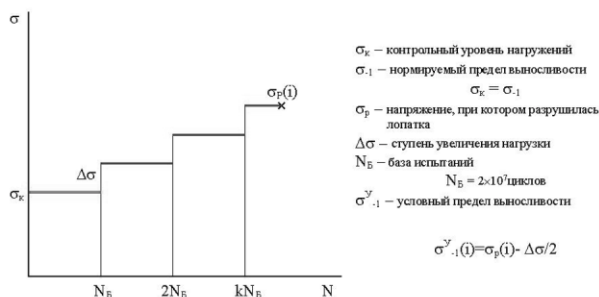


Рис.12. Программа периодических контрольных испытаний литых лопаток на усталость

на методика централизованных контрольных натурных испытаний на усталость поставляемых изготовителями лопаток, предусматривающая как непосредственно контрольные испытания на заданном уровне напряжений, так и факультативные испытания при ступенчатом увеличении нагрузки до разрушения с определением условного предела выносливости каждой испытываемой лопатки (рис. 12). По результатам этих испытаний проводился анализ тренда этой характеристики лопаток каждого предприятия-изготовителя с целью интегральной оценки стабильности технологии.

Обобщение большого числа кривых усталости литых лопаток с равноосной структу-

рой выявило их особенность, которая заключалась в увеличенном угле наклона кривой усталости. Это свидетельствует о том, что при меньшем числе циклов литейные дефекты микроструктуры в меньшей степени влияют на сопротивление усталости лопаток.

С учетом этой особенности были ужесточены параметры входных контрольных испытаний на усталость литых лопаток - по базе испытаний с $0,2 \times 10^7$ до $2,0 \times 10^7$ циклов и по уровню нагружения с 0,8 предела выносливости до его полного значения.

Проведенные исследования и предварительные результаты ведущейся в настоящее время опытно-промышленной эксплуатации литых лопаток второго поколения изготовленных по усовершенствованной технологии с успешной наработкой лидерных комплектов до 15000 часов, свидетельствуют о том, что предложенные технические решения могут решить задачу обеспечения надежности и широкого применения литых лопаток турбины для стационарных ГПА. Есть основания полагать, что промышленная эксплуатация этих лопаток также будет успешной.

PROBLEMS OF GAS PUMPING ASSEMBLY CAST TURBINE BLADE OPERATIONAL RELIABILITY

© 2003. D.S. Yelenevsky², S.F. Zhdanov¹, K.G Svyatyshev², A.Z Shaikhutdinov¹

¹ JSC Gasprom, Moscow

² APIDM Samara Scientific and Engineering Center, Samara

The present paper considers the items connected with providing operational reliability of cast turbine blades installed in stationary gas-pumping assemblies of gas main pipelines. It provides data of GTK-10 assembly full-scale cast blade fatigue strength investigation. It is demonstrated that low level of fatigue strength demonstrated by the cast blades delivered for service operation caused multiple damages and breakdowns of the above-mentioned assemblies. The suggested technical solutions are aimed at providing and improvement of cast turbine blade required reliability and service life. The paper provides the results of performance and fatigue strength investigation as well as the results of GPA successful experimental operation of cast turbine blades that were manufactured basing upon the proposed solutions.