

УДК 621.892

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛОПАТОК И ДИСКОВ ГТД ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ

© 2016 В.Г. Круцило, Н.Б. Кротинов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

Приведена технология восстановления работоспособности лопаток и дисков газотурбинных двигателей. Показаны сравнительные экспериментальные данные об усталостной прочности и износе лопаток и дисков газотурбинных двигателей. Выполнен анализ причин, влияющих на усталостную прочность и износостойкость лопаток и дисков.

**Ключевые слова:** предел выносливости, износ верхних кромок лопаток газотурбинных двигателей, технология восстановления, ультразвуковое упрочнение стальными шариками, термопластическое упрочнение.

В современных газоперекачивающих станциях широко используются газотурбинные двигатели, приводящие в действие компрессор. Наиболее сложными с точки зрения геометрии и технологии изготовления в этих двигателях являются лопатки, что определяет их высокую стоимость. К тому же они имеют весьма ограниченный ресурс. Связано это с широким спектром приходящихся на них нагрузок: воздействие повышенных температур, знакопеременных напряжений, центробежных сил, абразивного износа. Поэтому чрезвычайно актуальной является технология восстановления работоспособности лопаток и дисков, которая не только обеспечит длительный межремонтный цикл, но и сохранение высоких показателей качества.

В газоперекачивающем комплексе ГТК10-4 через шесть тысяч часов работы двигатель останавливается на плановый ремонт и техническое обслуживание. Лопатки снимаются с ротора и производится их полная дефектация. Так как газоперекачивающая станция работает в полевых условиях, частички песка и мелких камней попадают в двигатель вместе с воздухом, не смотря на его фильтрацию. В результате на лопатках появляются забоины, происходит абразивный износ. Забоины концентрируют циклические напряжения, перерастая в трещины. Использование пластичных материалов и штамповки заготовок лишь частично решают эту проблему. Абразивный износ верхней кромки лопатки (см. рис. 1) снижает компрессию и, как следствие, КПД двигателя.

При обнаружении трещин лопатки выбраковывают. А вот при вмятинах и небольших сколах их восстанавливают путём наплавки, при износе

*Круцило Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы». E-mail: ask@samgtu.ru*  
*Кротинов Николай Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

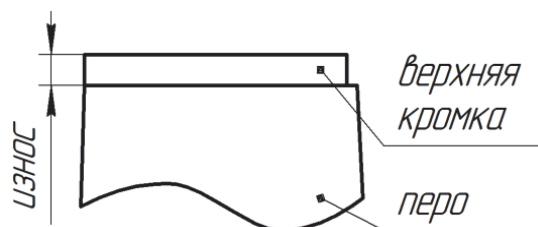


Рис. 1. Фрагмент лопатки

верхней кромки, её восстанавливают путём приварки ленты. Затем лопатки термообработывают с целью снятия термических напряжений и полируют. После этого производится упрочняющая обработка поверхности. В ПТП «Самарагазэнергоремонт» с этой целью ранее использовалось ультразвуковое упрочнение металлическими шариками (УЗУ). Этот способ позволяет сформировать в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, способствующие увеличению усталостной прочности. Однако из-за значительных остаточных деформаций (8...15%), сопутствующих процессу, в металл закладывается энергия искажений, приводящая к термодинамической нестабильности. Наблюдается коагуляция упрочняющих фаз, усиливающая рекристаллизационные процессы. Увеличивается плотность активных дислокаций, которые под воздействием высоких температур способствуют увеличению скорости ползучести и разупрочнению металла [1]. Материал таким образом стремится к восстановлению. Благоприятные остаточные напряжения сжатия релаксируют.

Установка для термопластического упрочнения деталей работает следующим образом: лопатка 1 устанавливается в направляющие 33. Толкателем 2 при открытой задвижке 32 деталь перемещается на направляющей 30 внутри электрической муфельной печи тоннельного типа 31, после чего задвижка 32 закрывается. Электропечь оснащена термопарой 28 и темпе-

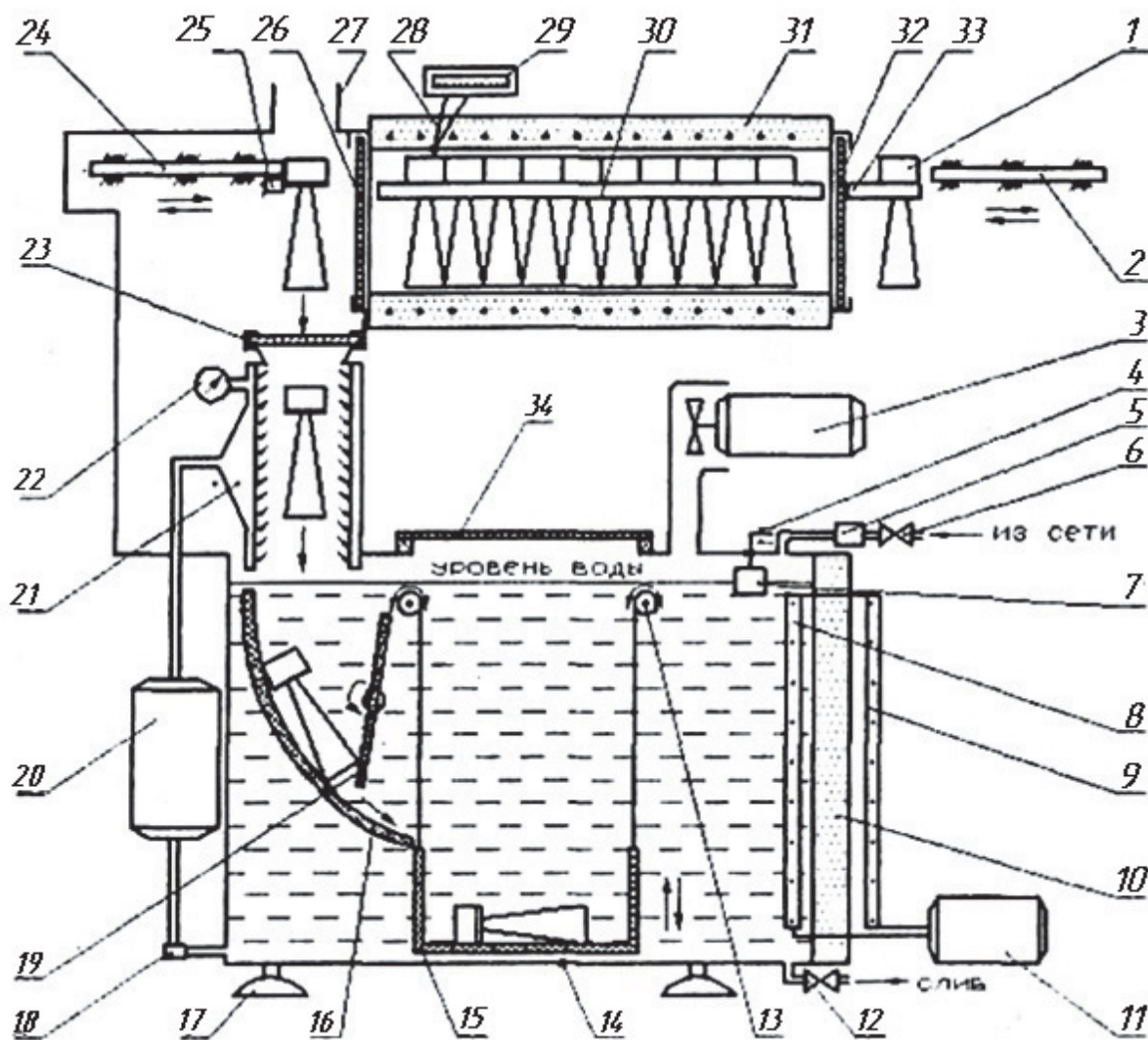


Рис. 2. Схема установки для ТПУ лопаток:

1 – лопатка; 2 – толкатель; 3 – вентилятор; 4 – конечный выключатель; 5 – фильтр; 6, 12 – кран; 7 – поплавок; 8 – испаритель, 9 – конденсатор, 10 – теплоизоляция, 11 – компрессор, 13 – блок, 14 – емкость, 15 – контейнер; 16 – эластичный склиз; 17 – виброопора; 18 – фильтр; 19 – эластичный толкатель; 20 – насос высокого давления; 21 – кольцевой спрейер; 22 – манометр; 23 – задвижка; 24 – захват; 25 – неподвижный упор; 26, 32 – задвижка; 27 – отводная труба; 28 – термопара; 29 – температурное реле; 30, 33 – направляющая; 31 – электропечь, 34 – крышка люка

ратурным реле 29. При достижении необходимой температуры автоматически открывается задвижка 26 и захватом 24 деталь перемещается до неподвижного упора 25. Деталь при этом освобождается от захвата 24 и свободно падает вниз под действием собственного веса. При этом закрывается задвижка 26 и открывается задвижка 23 на входе в кольцевой спрейер 21. В кольцевой спрейер 21 во время свободного падения детали подается охлаждающая жидкость из емкости 14 через фильтр 18 насосом высокого давления 20. Давление охлаждающей жидкости составляет 0,8-1 МПа и регулируется автоматически. Для визуального контроля давления охлаждающей жидкости служит манометр 22.

Для подачи охлаждающей жидкости и кольцевой спрейер 21 вместо насоса высокого давления 20 можно использовать комплекс, состоящий из

компрессора, ресивера, трубопроводной и запорной арматуры и системы управления. В отличие от плоских нерегулируемых и регулируемых спрейером в установках для термопластического упрочнения спрейер представляет собой полюю регулирующую конструкцию, выполненную в виде кольца, которая позволяет равномерно охладить все поверхности упрочняемой детали. В кольцевом спрейере 21 отверстия расположены таким образом, чтобы струи охлаждающей жидкости задерживали движение упрочняемой детали и сбивали паровую рубашку. Для предотвращения парового удара при упрочнении в кольцевом спрейере служит отводная труба 27. Угол наклона струй в кольцевом спрейере а составляет от 0 до 45° и определяется в зависимости от размера и конфигурации детали опытным путем. Упрочнение в кольцевом спрейере 21 при свободном

падении детали позволяет более качественно и равномерно упрочнить все поверхности детали, за счет свободного доступа струй охлаждающей жидкости ко всем поверхностям детали и более высокого давления. Процесс термомеханического упрочнения весьма скоротечен [2]. Деталь после упрочнения в процессе свободного падения внутри кольцевого спрейера 21 попадает на эластичный склиз 16, после чего эластичным толкателем 19 перемещается в контейнер 15. В этом контейнере происходит окончательное охлаждение детали. Затем деталь в контейнере с помощью блоков 13 автоматически поднимается к крышке люка 34. Крышка люка при этом также автоматически открывается. Упрочненная деталь эвакуируется оператором, после чего контейнер 15 опускается вниз и закрывается крышка люка 34. По этому цикл упрочнения детали заканчивается.

Для замкнутого цикла процесса служит система фильтрации, охлаждения и контроля уровня охлаждающей жидкости. Она состоит из крана 6. и фильтра 5, поплавка 7 и конечных выключателей 4. при этом автоматически поддерживается необходимый уровень охлаждающей жидкости. Фильтр 18. установленный на входе насоса высокого давления 20 предотвращает загрязнение охлаждающей жидкости при подаче в кольцевой спрейер 21.

Для охлаждения жидкости служит вентилятор 3 и криогенная установка, состоящая из компрессора 11, испарителя 8 и конденсатора 9, разделенных теплоизоляцией 10. При температуре окружающей среды ниже 20°C для охлаждения жидкости может быть достаточно работы вентилятора 3. При температуре окружающей среды выше 20°C автоматически включается криогенная установка, снижающая температуру охлаждающей жидкости до 20°C.

В двигателях ГТД самым напряженным является место [3] сочленения замка лопатки и паза диска. Поэтому упрочнение пазов диска и замка лопатки является актуальной задачей.

Диск ГТД является крупногабаритной деталью и поэтому одновременное упрочнение всех деталей технологически трудноосуществимо

На рис. 3 показана конструкция установки для локального упрочнения пазов диска, где: 1 – спрейер, 2 – гидроаккумулятор, 3 – печь, 4 – емкость гидравлическая, 5 – шкаф управления, 6 – компьютер, 7 – редуктор, 8 – датчик температуры воды, 9 – манометр, 10 – клапан избыточного давления, 11 – клапан соленоидный, 12 – датчик давления, 13 – клапан обратный, 14 – насосный агрегат, 15 – фильтр сетчатый, 16 – сигнализатор уровня жидкости, 18 – кожух, 19 – датчик бесконтактный, 20 – электродвигатель, 21 – пирометр, 22 – заслонка.

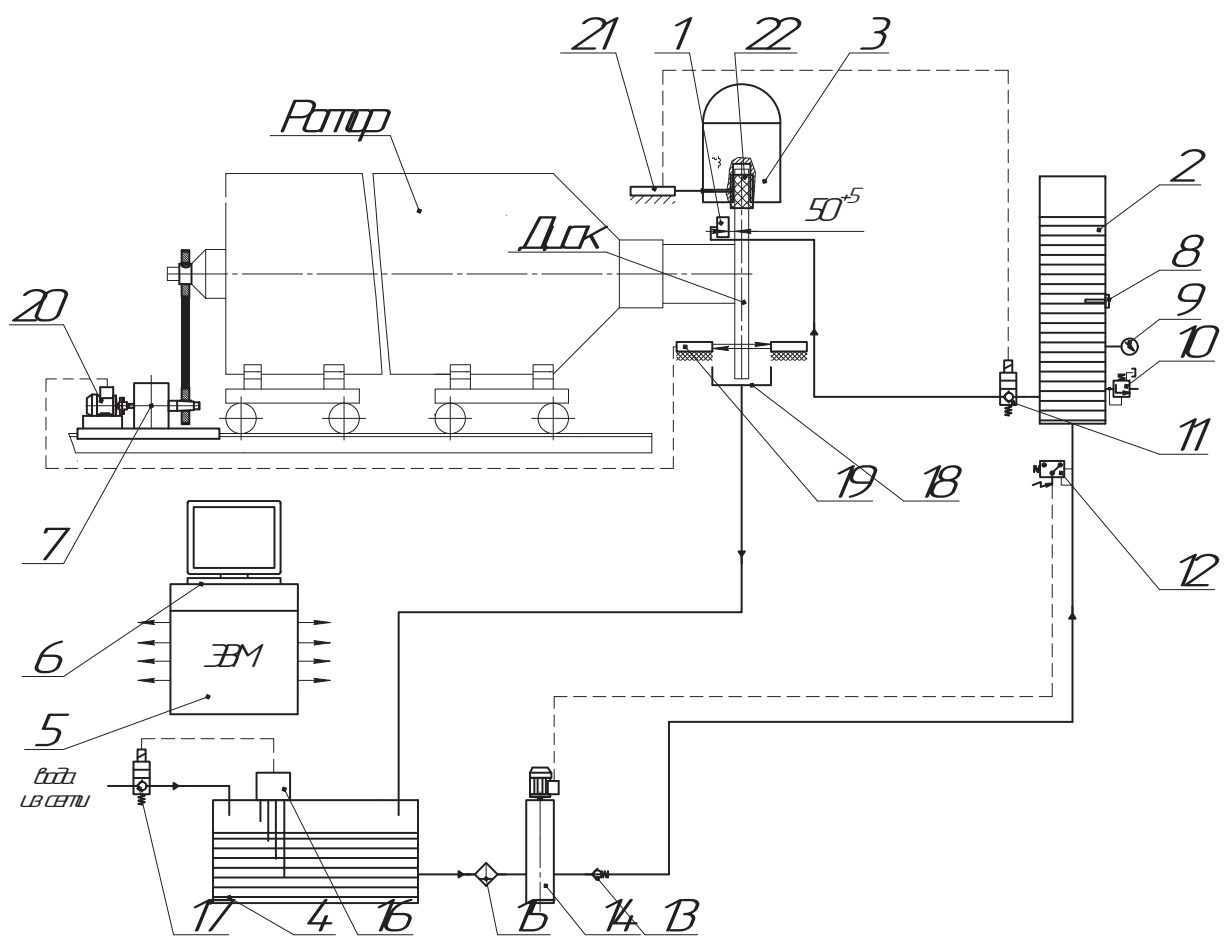


Рис. 3. Схема установки для ТПУ дисков

Установка имеет две основные системы: систему нагрева и систему спрейерного охлаждения. Контролируемыми параметрами являются: давление воды, температура нагрева упрочняемой детали, время охлаждения, температура охлаждающей жидкости.

Составными частями изделия являются:

- упрочняющий модуль (электрическая муфельная печь и спрейер);
- система спрейерного охлаждения;
- система автоматизированного управления процессом;
- устройство дискретного поворота ротора;
- пульт управления;
- защитный кожух, ёмкость для слива;
- приспособление для контроля прогиба;
- силовое электрооборудование;
- контрольные пластины.

Упрочняющий модуль, состоящий из муфельной печи и спрейера, крепится над упрочняемым диском на направляющих. Соответствующие трубопроводы соединяют аккумулятор гидравлический и спрейер. Управление установкой осуществляется с пульта с помощью ЭВМ. Смена упрочняемого сектора диска после его нагрева до заданной технологией температуры [4] производится с помощью устройства дискретного поворота ротора, состоящего из электродвигателя, редуктора и бесконтактного датчика частоты вращения. Контроль температуры охлаждающей жидкости осуществляется датчиком. Температура диска контролируется пирометром. Контроль уровня жидкости осуществляется датчиком.

Вода на охлаждение подается высокопроизводительным насосом, обеспечивающим ее давление в охлаждающей камере не менее 6 кгс/см<sup>2</sup> согласно технологии обработки.

После интенсивного охлаждения сектора диска, в зону нагрева перемещается неупрочненный сектор.

Таким образом, цикл обработки замыкается.

Совокупность связей позволяет полностью автоматизировать процесс обработки, что значительно увеличивает производительность. Полная автоматизация работы установки и всех сервисных устройств обеспечивается применением системы микропроцессорного управления.

Производится настройка приборов и устройств. Осуществляется проверка работы установки в ручном режиме управления. Далее производится термопластическое упрочнение. В емкости гидравлической 4 в автоматическом режиме поддерживается необходимый уровень воды. Гидроаккумулятор 2 системы спрейерного охлаждения наполняется водой с помощью вертикального многоступенчатого насосного агрегата 14, создается давление 8 атм. Нагрев диска и последующее охлаждение осуществляется методически. В печи 3 одновременно находятся 9 упрочняемых зубьев диска. Интервал нагрева

завершается командой на поворот диска, при разрешающем сигнале от пирометра 21 (температура нагрева диска 650±20°С). По 9 зубьев одновременно выходят в положение для охлаждения. Время поворота определяется экспериментально и составляет примерно 5 секунд. По сигналу от бесконтактного датчика 19 осуществляется торможение электродвигателя 20 и фиксация ротора в заданном положении с помощью специального тормоза. От попадания воды и пара печь защищена механической заслонкой 22. После фиксации ротора в заданном положении происходит команда на включение охлаждения нагретого сектора. При этом открывается соленоидный клапан 11, и вода под давлением из гидроаккумулятора 2 поступает в спрейер 1. Происходит охлаждение. Эта процедура занимает 3..5 секунд. На этом цикл «нагрев-поворот-охлаждение» завершен. Далее осуществляется поворот ротора в обратную сторону для возврата в зону нагрева неупрочненных зубьев и цикл работы «нагрев-поворот-охлаждение» повторяется.

Через определенное количество циклов упрочнения отработанная охлаждающая жидкость сливается через кран 12 и обновляется из сети через кран 6 и фильтр 5. Для предотвращения вибраций установки служат четыре виброопоры 17. В силу вышеперечисленных причин лопатки, упрочнённые УЗУ, не обеспечивали релаксационную устойчивость усталостной прочности на необходимом уровне и выходили из строя преждевременно, приводя к большим экономическим потерям. Кроме того, износ верхней кромки лопатки был практически стопроцентным, что также не добавляло рентабельности газоперекачке. Всё это заставило руководство ПТП «Самарагазэнергоремонт» искать новые технологии, и исследователи СамГТУ во главе с профессором Б.А. Кравченко, предложили использовать на финишной операции восстановления лопаток новый способ – термопластическое упрочнение (ТПУ).

В отличие от УЗУ, термопластическое упрочнение не вносит в металл дополнительный разрушающий фактор в виде высоких деформаций. Они составляют не более 0,5%. Тем не менее, этого достаточно, чтобы сформировать остаточные напряжения сжатия равной с УЗУ величины – около 600 МПа (сплав ЭИ893). В результате скорость ползучести и релаксация усталостной прочности в процессе эксплуатации лопаток не велика.

Использование ТПУ позволило резко повысить надёжность лопаток. Выход из строя ГТД до планового останова по причине усталостного разрушения лопаток прекратился. После повторного восстановления лопатки снова устанавливаются на ротор и работают ещё не менее трёх плановых останова. Кроме того, выяснилось, что износ верхней кромки пера лопатки настолько незначителен, что в ряде случаев позволяет исключить достаточно трудоёмкую операцию наплавки и термообработки.

Причиной пониженной износостойкости лопаток, упрочнённых УЗУ по сравнению с ТПУ, по всей видимости, являются всё те же пластические деформации, разрушительно воздействующие на металл.

Таким образом, термопластическое упрочнение показало высокую эффективность при упрочнении лопаток, как с точки зрения усталостной прочности, так и с точки зрения износостойкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М.: Metallurgy, 1978. 256 с.
2. Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Гутман Г.Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин: Монография. Самара: Самарский ГТУ, 2000. 216 с.
3. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. М.: Машиностроение. 2002. 328 с.

## INCREASE IN FATIGUE STRENGTH AND WEAR RESISTANCE OF GTE BLADES AND DISKES THERMOPLASTIC HARDENING

© 2016 V.G. Krutsilo, N.B. Krotinov

Samara State Technical University

The technology of the recovery efficiency of the blades and diskets of gas turbine engines. Illustrates the comparative experimental data of fatigue resistance and wear of the blades and diskets of turbine engines. The analysis of the factors that influence the fatigue strength and wear resistance of the blades and diskets. *Keywords:* endurance limit, wear the upper edges of the blades of gas turbine engines, recovery technology, ultrasonic hardening steel balls, thermoplastic hardening.