УДК 621.438

ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

© 2014 А.В. Карпов

Самарский государственный технический университет

В статье рассмотрен перспективный метод упрочняющей обработки, способствующий повышению сопротивления усталости поверхностного слоя лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), такой как термопластическое упрочнение (ТПУ). Показаны схемы установок для реализации процесса упрочняющей обработки. Подобраны наиболее рациональные режимы проведения упрочняющей обработки лопаток ГТД на рассмотренных установках для ТПУ. Изложен принцип работы установок для ТПУ и показаны их основные конструктивные особенности. Рассмотрены некоторые виды оборудования для проведения исследования остаточных напряжений и сопротивления усталости. Получены результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений и сопротивления усталости на рассмотренных установках для ТПУ. По результатам работы сделаны основные выводы: наибольшее влияние на формирование остаточных напряжений при термопластическом упрочнении оказывает интенсивность охлаждения, с увеличением которой величина остаточных напряжений возрастает; оптимальная температура нагрева при ТПУ составляет 700^{+50} °С, а давление охлаждающей жидкости на установке с регулируемой системой охлаждения (1 – 1,5) МПа, на установке с нерегулируемой системой охлаждения 0,54 – 0,6 МПа; упрочнение на установке с регулируемой системой охлаждения, по сравнению с упрочнением на установке с нерегулируемой системой охлаждения, увеличивает предел выносливости на 3,5-5%, что продлевает долговечность работы на 700-1000 часов.

Термопластическое упрочнение; остаточные напряжения; сопротивление усталости; сплав ЭИ893.

Проблема изнашивания лопаток газотурбинных двигателей в процессе их эксплуатации является общепризнанной. Так, например, перо лопатки подвержено эрозии, замковые соединения лопаток ГТД, изготовленные из жаропрочных сплавов и сталей, наиболее подвержены повреждению фреттингом - именно фреттингом определяется несущая способность замковых соединений при действии знакопеременных и циклических изменяющихся нагрузок [1].

Для уменьшения негативного воздействия от изнашивания необходимо увеличить сопротивление усталости и износостойкость поверхностного слоя лопаток ГТД. Для повышения сопротивления усталости лопаток всё более широкое применение получили различные виды комплексных технологий — нанесение плазменных покрытий в сочетании с различными отделочно-упрочняющими методами, а также методы упрочняющей обработки. Одним из таких методов упрочняющей обработки является термопластическое упрочнение.

Основа метода ТПУ заключается в нагреве детали до температуры начала термопластических деформаций с последующим резким душевым (спрейерным) охлаждением.

Объектом исследования являются рабочие лопатки второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10, которые обладают следующими геометрическими параметрами: рабочая длина 243,4 мм, ширина лопатки в корневом сечении – 70 мм. Масса порядка 1,5 кг. Для повышения сопротивления усталости лопаток турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10 на предприятии ДОАО «ЦЕНТРЭНЕРГОГАЗ» филиал «Самарский» ОАО «ГАЗПРОМ» применяется ТПУ, которое производится на установке [2], показанной на рис. 1.

Для реализации процесса ТПУ на установке необходимо, чтобы давление воды в камерах охлаждения было $P_{ном}$

=0,48..0,54МПа, а давление воздуха в баллоне $P_{бал}$ = 0,54… 0,60МПа. Отклонения указанных величин должны находиться в диапазоне ±0,025МПа. Температура нагрева может устанавливаться в зависимости от материала детали в пределах 600…800°С при отклонении +20°С. Для контроля давления применяются манометры, а для контроля температуры – термопары.

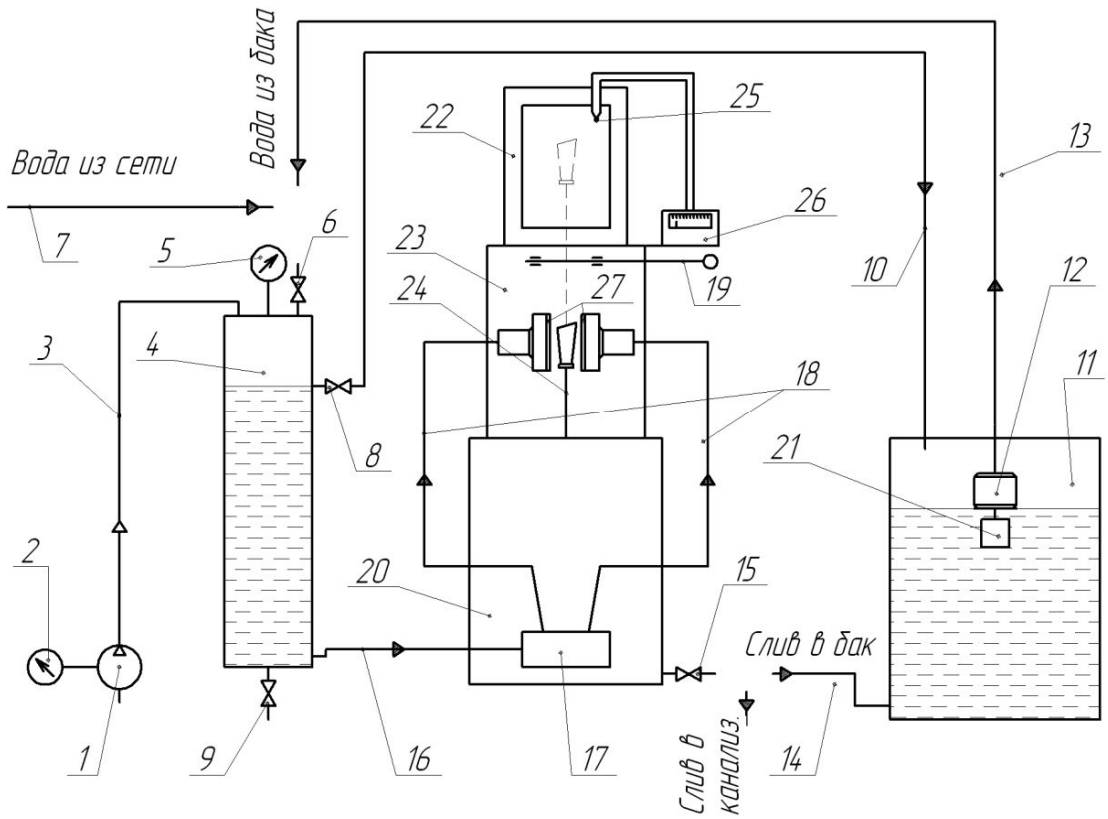


Рис. 1. Принципиальная схема установки для ТПУ

Термопластическое упрочнение лопатки начинается с заполнения баллона водой и последующей установкой лопатки в печь для нагрева.

Заполнение ёмкости водой происходит переводом крана *6* в положение «открыт». После этого вода самотёком из центральной системы начинает поступать в баллон. Во избежание засорения спрейерных решёток *27*, предназначенных для более интенсивного охлаждения детали, вода для охлаждения очищается от механических примесей путём установки сетчатого фильтра.

Одновременно с этим необходимо открыть кран *8* в боковой части баллона, чтобы вода беспрепятственно заполняла его и не создавалась воздушная пробка.

Гидрораспределитель *17* должен быть открыт, чтобы вода при заполнении баллона *4* на заданный уровень имела возможность по шлангам *16*, *18*, соединённым между собой гидрораспределителем кранового типа *17*, вытекать через отверстия в решетках *27* камеры охлаждения *23*. Прохождение воды через отверстия в решётках *27* камеры охлаждения *23* свидетельствует о требуемом заполнении водой системы охлаждения установки, поэтому подачу воды следует прекратить переводом гидрораспределителя кранового типа *17* в положение «закрыт». Проходное сечение гидрораспределителя *17* должно быть не меньше сечения трубопровода, на котором он установлен. Площадь проходного сечения каждого трубопровода, подводящего воду к камере охлаждения, должна в *4* и более раз превышать суммарную площадь всех выходных отверстий ($d_{отв}$=0,8мм) на соответствующей спрейерной решётке *27* камеры охлаждения.

При отсутствии центральной магистрали *7* снабжение водой ресивера *4* возможно с применением насоса *12* с подачей воды из ёмкости *11*. Для контроля давления в баллоне *4* и компрессоре *1* установлены манометры *5* и *2* (Ф160-10-1). После достижения необходимого давления компрессор *1* отключается. При этом распределитель кранового типа *17*, установленный на выходном из баллона шланге *16*, переведён в положение «закрыт».

Для перемещения лопатки в зону нагрева необходимо установить её в специальный держатель, расположенный в верхней части подвижного штока *24* и поднять шток в соответствующее для нагрева лопатки положение. Перед установкой лопатки в печь специальная задвижка *19*, установленная в нижней части муфельной печи, отодвигается до фиксации. Задвижка устраняет охлаждение нижней части печи, которое возможно в случае её отсутствия и предохраняет печь от попадания в неё воды в момент охлаждения нагретой лопатки.

Перед окончанием времени нагрева краны *6* и *8* закрываются, и включается компрессор *1* для создания в верхней части баллона *4* с водой соответствующего давления. Манометр *5* установлен в верхней части баллона *4*. Давление воздуха в баллоне 0,54…0,60 МПа. По достижении указанного давления компрессор выключается. Объём сжатого воздуха над уровнем воды в баллоне должен обеспечить длительность охлаждения при заданном давлении на входе в решётки камеры охлаждения в течении 2..3 сек. По окончании времени нагрева открывается кран *17*, стоящий на выходе из ёмкости с водой. Вода под давлением поступает в камеру охлаждения и через отверстия в спрейерных решётках *27* попадает в зону охлаждения. Одновременно с этим фиксатор *19* выводится из отверстия в штоке, который вместе с нагретой деталью под собственным весом быстро опускается в охладительную камеру *23*, где лопатка попадает под струи воды, выходящие под давлением из отверстий решёток. Через 1..3 сек. процесс охлаждения заканчивается, и лопатка через специальное окно с дверцей на лицевой стороне установки вынимается из держателя на штоке. Затем устанавливается другая лопатка, и процесс термопластического упрочнения повторяется.

К недостаткам данной установки следует отнести невысокую производительность (цикл упрочнения одной лопатки составляет 0,5 - 0,6 часа), а также нерегулируемую систему охлаждения, которая не обеспечивает равномерного упрочнения всей поверхности лопаток, в большей степени замковой части, находящейся в зацеплении со специальным держателем, расположенным в верхней части подвижного штока *24* (рис. 1).

Поэтому авторами [3] была предложена новая конструкция установки с регулируемой системой охлаждения, показанная на рис. 2, которая подходит для упрочнения таких деталей, как лопатки второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10.

Основной особенностью установки ТПУ с регулируемой системой охлаждения является камера охлаждения, которая включает четыре спрейерных решётки охлаждения.

В зависимости от формы и размеров упрочняемой детали спрейерные решётки охлаждения *24* можно регулировать, верхние с помощью салазок для горизонтального перемещения *25*, нижние – направляющих для фиксации угла наклона *23*. Для эффективного удаления паровой рубашки охлаждающей жидкостью с упрочняемой поверхности детали необходимо достичь эффекта задержки детали (0,5 – 1,5 секунды) между спрейерными решётками охлаждения *24*. Для достижения этого нижние спрейерные решётки охлаждения с помощью направляющих для фиксации угла наклона 23 способны изменять угол наклона относительно траектории падения лопатки от 0° до 75°, что определяется в зависимости от размеров и конфигурации детали эмпирическим путём.

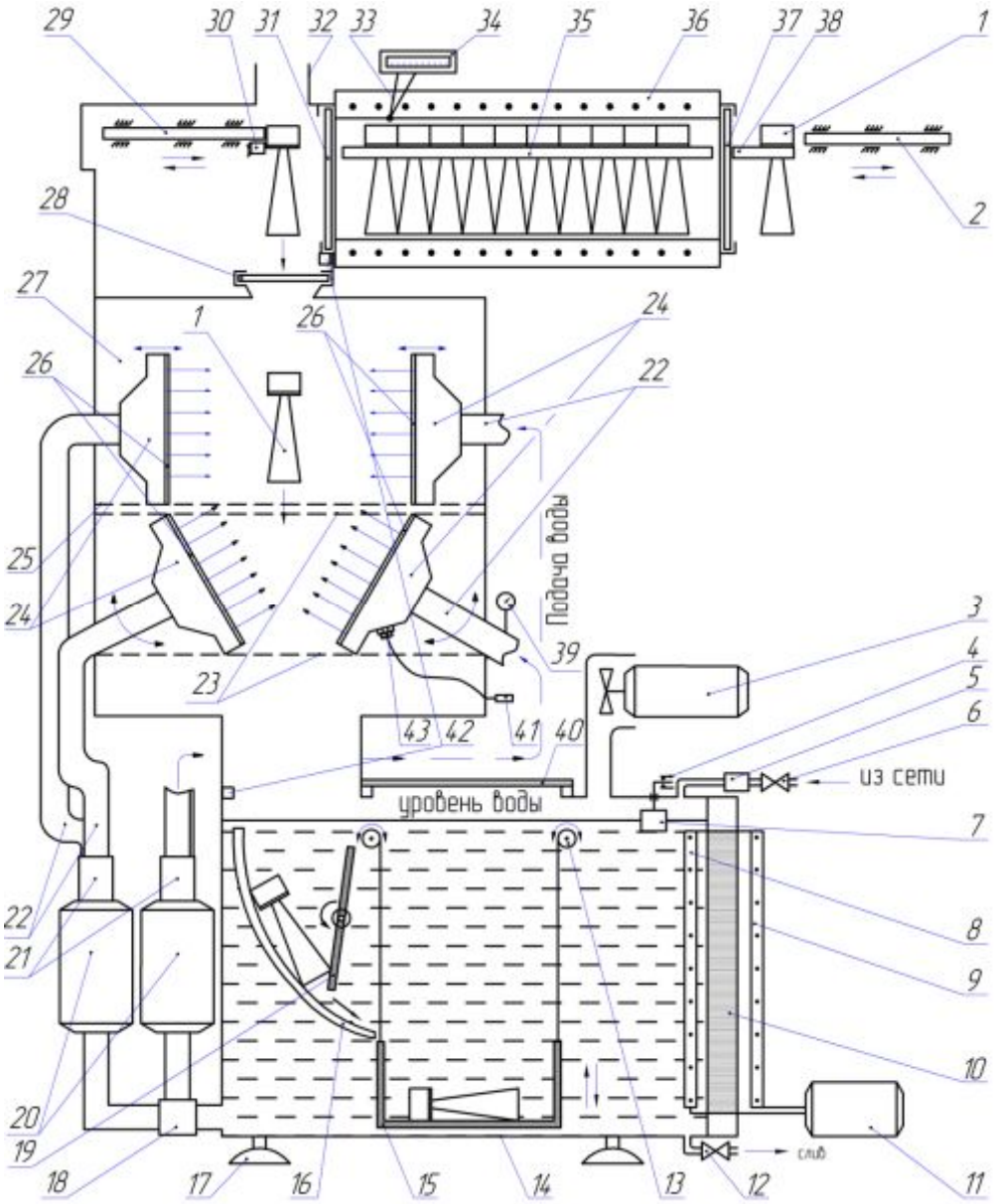


Рис. 2. Схема установки ТПУ с регулируемой системой охлаждения:
1 - деталь, 2 - толкатель, 3 - вентилятор, 4 - конечный выключатель, 5 - фильтр, 6, 12 - кран, 7 - поплавок, 8 - испаритель, 9 - конденсатор, 10 - теплоизоляция, 11 - компрессор, 13 - блок, 14 - ёмкость, 15 - контейнер, 16 - эластичный склиз, 17 – виброопора, 18 - фильтр, 19 - эластичный толкатель, 20 - насосы высокого давления (НВД), 21 – переходник для шлангов, 22 – шланги для подачи воды, 23 – направляющие для фиксации угла наклона нижних спрейерных решёток охлаждения, 24 – спрейерные решётки охлаждения, 25 - салазки для горизонтального перемещения верхних спрейерных решёток охлаждения, 26 - насадки, регулирующие размеры отверстий спрейерных решёток охлаждения, 27 – камера охлаждения, 28 – задвижка камеры охлаждения, 29 – захват, 30 - неподвижный упор, 31, 37 – задвижка печи, 32 - отводная труба, 33 - термопара, 34 - температурное реле, 35, 38 - направляющая, 36 – электропечь, 39 – манометр, 40 – крышка люка, 41 - прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости, 42 – изолированный провод, соединяющий датчик температуры охлаждающей жидкости и прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости, 43 - датчик температуры охлаждающей жидкости

В конструкцию спрейерных решёток охлаждения входят насадки, регулирующие размеры отверстий решёток охлаждения – *26*, с помощью которых регулируется объём подаваемой охлаждающей жидкости. Отверстия спрейерных решёток охлаждения могут иметь различную форму, наиболее технологична форма равно-

стороннего треугольника. Размеры проходных сечений отверстий спрейерных решёток охлаждения, регулируемые насадкой *3*, изображённой на рис. 3, изменяются в зависимости от формы, габаритных размеров, массы упрочняемых деталей. Температура охлаждающей жидкости фиксируется с помощью прибора *41*, регистрирующего температуру охлаждающей жидкости, посредством датчика *43*.

Режим упрочнения лопаток определялся исходя из опыта предыдущих работ [1, 4, 5] и с учётом конструктивных требований спроектированной установки для ТПУ, а также формы и размеров упрочняемых деталей. Таким образом, был обоснован выбор температуры нагрева упрочняемых лопаток второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10, изготовленных из сплава ЭИ893. При ТПУ оптимальная температура нагрева составляет 700^{+50} °С, а давление охлаждающей жидкости, в вихревой поток которой падает лопатка, необходимо увеличить до 1 – 1,5 МПа [3].

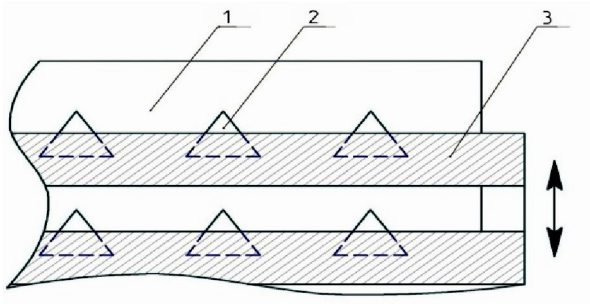


Рис. 3. Регулировка размеров отверстий спрейерных решёток охлаждения:
1-спрейерная решетка охлаждения, 2-отверстия спрейерной решётки охлаждения, 3-насадка, регулирующая размеры отверстий

Из средней части пера упрочнённых лопаток электроискровым способом на электроэрозионном станке модели 4В721 (рис.4) вырезали образцы в зоне выходной кромки лопатки, являющейся самым слабым местом, и определяли величину и знак остаточных напряжений в осевом направлении образца σ_z^{res}. После этого проводилось исследование остаточных напряжений на образцах из сплава ЭИ893 толщиной ~ 4 мм.



Рис. 4. Электроискровой способ вырезки образцов для испытаний на сопротивление усталости

Остаточные напряжения определялись на установке ПИОН-2 методом академика Давиденкова Н.Н. Результаты исследования приведены на рис. 5.

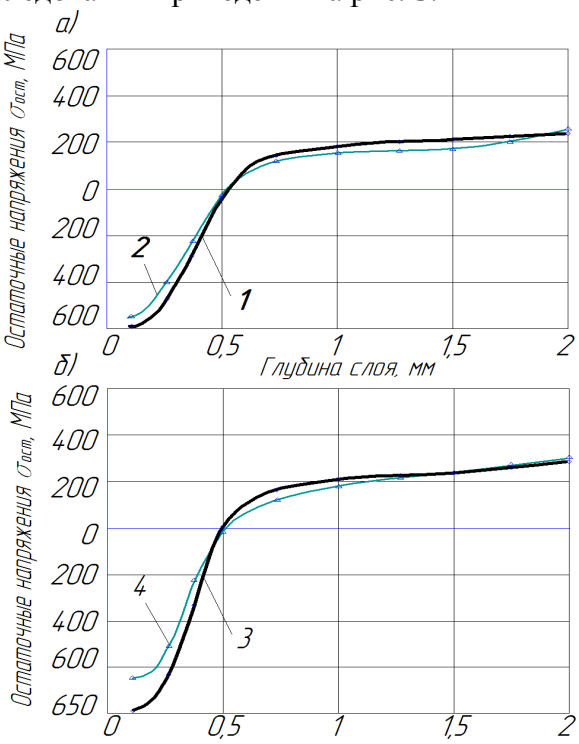


Рис. 5. Исследование динамики напряженного состояния в образцах из сплава ЭИ893 толщиной h=4мм при ТПУ:
а) – давление в системе охлаждения 0,6 МПа;
б) – давление в системе охлаждения 1,5 МПа;
1, 3 - ТПУ на установке с регулируемой системой охлаждения [3];
2, 4 - ТПУ на установке с нерегулируемой системой охлаждения [2]

Усталостные испытания упрочнённых лопаток проводились в соответствии с "Едиными техническими условиями на усталостные испытания лопаток газотурбинных установок" НД 631.301.0216-03-98 на электромагнитном вибростенде ЭМВС-1 с наработкой 1,5; 5 и 10 тыс. часов. База $N=10^7$ циклов, температура 20°С [6].

Результаты сопротивления усталости лопаток, упрочнённых на установках с регулируемой и с нерегулируемой системой охлаждения [6] и без упрочнения, приведены на рис. 6.

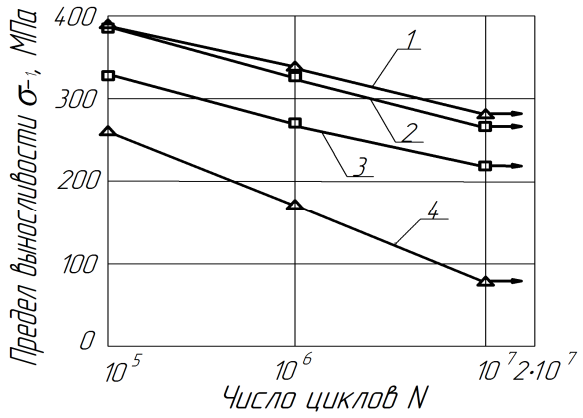


Рис. 6. Результаты исследования сопротивления усталости:
1 - ТПУ на установке с регулируемой системой охлаждения; 2 - ТПУ на установке с нерегулируемой системой охлаждения; 3 – ультразвуковое упрочнение; 4 – упрочнение по базовой технологии

Упрочнение на установке с регулируемой системой охлаждения, по сравнению с упрочнением на установке с нерегулируемой системой охлаждения, увеличивает предел выносливости турбинных лопаток второй ступени агрегата ГТК-10 на 3,5-5%, что увеличивает долговечность их работы на 700-1000 часов.

Основные выводы:

1. Экспериментально установлены оптимальные режимы упрочнения на установке с регулируемой системой охлаждения. Оптимальная температура нагрева составляет 700^{+50} °С, а давление охлаждающей жидкости (1 – 1,5) МПа.

2. Представлены результаты исследования остаточных напряжений, которые показывают, что наибольшее влияние на формирование остаточных напряжений при термопластическом упрочнении оказывает интенсивность охлаждения, с увеличением которой величина остаточных напряжений возрастает.

3. Приведены результаты усталостных испытаний образцов из сплава ЭИ893. Упрочнение на установке с регулируемой системой охлаждения, по сравнению с упрочнением на установке с нерегулируемой системой охлаждения, увеличивает предел выносливости на 3,5-5%, что продлевает долговечность работы на 700-1000 часов.

Библиографический список

1. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1973. 296 с.

2. Кравченко Б.А., Россеев Н.И., Круцило В.Г., Медведев С.Д., Монахов А.В. Установка для термопластического упрочнения лопаток. Пат. РФ № 2170272; опубл. 10.07.2001; бюл. № 19.

3. Карпов А.В., Папчихин С.А. Установка для термопластического упрочнения деталей. Пат. РФ № 101447; опубл. 20.01.2011; бюл. № 2.

4. Кравченко Б.А. Способ повышения циклической прочности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе никеля. Пат. РФ № 2143011; опубл. 20.12.1999.

5. Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Гутман Г.Н. Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надёжности деталей машин. Самара: СамГТУ, 2000. 216 с.

6. Карпов А.В. Совершенствование технологии термопластического упрочнения лопаток газотурбинных комплексов на основе регулируемой системы охлаждения. Дис. канд. техн. наук. Самара, 2012. 204 с.

Информация об авторах

Карпов Александр Вячеславович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы», Самарский государственный технический университет. E-mail: Rusalexa@mail.ru. Область научных интересов – технология машиностроения (упрочнение деталей машин).

INCREASING WEAR RESISTANCE OF GAS TURBINE ENGINE BLADES ON THE BASIS OF IMPROVING THE PROCESS OF THERMOPLASTIC HARDENING

© 2014 A.V. Karpov

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

The article describes a promising method for hardening treatment that improves the fatigue resistance of the surface layer of the blades of gas turbine engines (GTE), such as the thermoplastic hardening (TPH). It is shown the diagrams of a process for setting a hardening treatment. It is chosen the most rational modes of gas turbine engine blades hardening treatment plants for consideration for TPH. It is presented the principle of operation of installations for TPH and shown their basic design features. It is considered some types of equipment for the study of residual stresses and fatigue resistance. It is obtained the results of experimental studies of residual stresses and fatigue resistance for the consideration of plants for TPH. The results of the main conclusions are made: the greatest impact on the formation of residual stresses at thermoplastic hardening has the intensity of cooling, with an increase in which the value of residual stress increases; the optimum heating temperature is TPH 700 + 50 ° C and the pressure at the facility coolant cooling system with a controlled (1 - 1.5) MPa, the facility with the cooling system unregulated 0.54 - 0.6 MPa; hardening apparatus with controlled cooling system, as compared with hardening apparatus with irregular cooling system that increases the endurance limit at 3.5-5%, which prolongs the service life of the at 700-1000 hours.

Thermoplastic hardening, residual stress, fatigue tests, the alloy EI893.

References

1. Getsov L.B. Materialy i prochnost' detalei gazovykh turbin [Materials and strength for gas turbine parts]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1973. 296 p.

2. Kravchenko B.A., Rosseev N.I., Cruz V.G., Medvedev S.D., Monakhov A.V. Ustanovka dlya termoplasticheskogo uprochneniya lopatok [Installation for blades thermoplastic hardening]. Pat. RF no. 2170272, 2001. (Publ. 10.07.2001, bull. no. 19).

3. Karpov A.V., Papchihin S.A. Ustanovka dlya termoplasticheskogo uprochneniya detalei [Installation for parts thermoplastic hardening]. Pat. RF, no. 101447, 2011. (Publ. 20.01.2011, bull. no. 2).

4. Kravchenko B.A. Sposob povysheniya tsiklicheskoi prochnosti detalei gazoturbinnykh dvigatelei iz zharoprochnykh splavov na osnove nikelya [Method of increasing the cyclic strength of parts of gas turbine engines of superalloys based on nickel]. Pat. RF no. 2143011, 1999. (Publ. 20.12.1999).

5. Kravchenko B.A., Krucilo V.G., Gutman G.N. Termoplasticheskoe uprochnenie – rezerv povysheniya prochnosti i nadezhnosti detalei mashin [Thermoplastic hardening - reserve for increasing the strength and reliability of machine parts]. Samara: Samara State Technical University Publ., 2000. 216 p.

6. Karpov A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii termoplasticheskogo

uprochneniya lopatok gazoturbinnykh kompleksov na osnove reguliruemoy sistemy okhlazhdeniya. Dis. kand. tekhn. nauk [Improving technology thermoplastic hardening turbine blades based complexes controlled cooling system. Cand. eng. sciences diss.]. Samara, 2012. 204 p.

About the author

Karpov Alexander Vyacheslavovich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor in transport processes and technological complexes, Samara State Technical University. E-mail: Rusalexa@mail.ru. Area of Research: Engineering Technology (hardening of machine parts).