

## **Применение упрочняющих технологий для увеличения послеремонтного ресурса лопаток авиационных двигателей**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Рассмотрены упрочняющие технологии, применяемые для увеличения послеремонтного ресурса лопаток. Проанализировано влияние упрочняющих технологий на эксплуатационные характеристики лопаток после ремонта. Приведены рекомендации по применению дробеструйной обработки, ультразвукового упрочнения, пневмодробеструйного упрочнения, метода магнитно-абразивного полирования и ионно-плазменных методов нанесения покрытий при обработке лопаток, изготовленных из титановых сплавов.

**Ключевые слова:** *поверхностно-пластическое деформирование, лопатка, упрочняющие технологии, ресурс*

### **Введение**

Для повышения эффективности ремонта газотурбинных двигателей большое значение имеет увеличение послеремонтного ресурса лопаток за счет упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) поверхности пера лопатки. Так как ресурс новых лопаток устанавливается с учетом упрочняющей обработки профиля пера, то требования к способу и возможностям такой обработки лопаток определяются характером повреждений поверхности пера лопатки и технологией их ремонта.

Основные повреждения профиля пера в процессе эксплуатации: эрозионно-коррозионный износ профиля, в основном по корыту и в зоне входной кромки по спинке, забоины и вмятины, а также износ по торцу пера. При этом в пределах ремонтных размеров производятся зачистка и заполировка повреждений, что ведет к съему упрочненного слоя материала, и соответственно, к снижению прочностных характеристик лопаток. Наличие на поверхности пера лопатки упрочненных и неупрочненных заполированных зон не позволяет производить упрочняющую обработку всей поверхности пера во избежание перенаклепа уже упрочненных участков. Для повышения послеремонтного ресурса таких лопаток необходимо упрочнение именно заполированных участков с плавным переходом по интенсивности упрочнения при выходе на упрочненные участки.

С учетом актуальности описанной задачи необходимо проанализировать упрочняющие технологии, которые являются эффективными при упрочнении как упрочненных зон лопаток, так и неупрочненных заполированных зон.

### **Постановка задачи и цель исследования**

Целью данной статьи является изучение упрочняющих технологий, применяемых для увеличения послеремонтного ресурса лопаток.

Для достижения поставленной цели рассмотрены возможности дробеструйной обработки, ультразвукового упрочнения, пневмодробеструйного упрочнения, метода магнитно-абразивного полирования и повышения эрозионной стойкости деталей ионно-плазменными методами нанесения покрытий.

### **Результаты исследования**

Способ дробеструйной обработки [1] дает возможность управлять процессом упрочняющей обработки и упрочнять отдельные участки пера лопатки именно в местах заполировки дефектов.

Исследования процесса упрочнения на различных лопатках показали, что

широкие возможности варьирования режимов обработки позволяют навести в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения до 800 МПа с глубиной залегания от 0,05 до 0,2 мм и шероховатостью поверхности до Ra 0,63 и менее. Это повышает предел выносливости крупногабаритных лопаток на 30 МПа.

Опыт применения мощного ультразвука для осуществления процессов ППД на деталях газотурбинных двигателей в условиях крупносерийного и массового производства и ремонта [2] показывает, что этот способ обработки достаточно универсален и имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными способами ППД. Этот способ позволяет со значительно меньшими затратами и более высоким качеством выполнять операции ППД на деталях различной жесткости и сложной пространственной конфигурации.

Процесс упрочнения деталей сложной геометрической формы ультразвуком [2] основан на сообщении кинетической энергии рабочим телам с помощью ультразвукового поля, возникающего в замкнутом объеме при возбуждении в нем упругих колебаний ультразвуковой частоты. Детали, помещенные в рабочую камеру (озвученный объем), подвергаются обработке шариками. Это позволяет значительно, в десятки раз, повысить производительность и получать благоприятные характеристики поверхностного слоя деталей газотурбинных двигателей.

Оптимальный режим ППД в ультразвуковом поле, обеспечивающий получение заданного, с учетом условий эксплуатации детали, качества поверхностного слоя, осуществляется регулированием основных параметров процесса: энергии и частоты ударов шариков; размера и качества применяемых шариков; продолжительности процесса упрочнения.

В качестве рабочих тел используются стальные шарики из материала ШХ15 или нержавеющей стали диаметром 0,4...3 мм. Размер применяемых шариков определяется из условия возможности обработки всех радиусов перехода от одной поверхности детали к другой, а также возможности получения оптимальной степени деформации обрабатываемых поверхностей и выполнения требований к шероховатости.

С увеличением диаметра шариков качество поверхности ухудшается, глубина залегания остаточных сжимающих напряжений увеличивается. Для обработки лопаток с тонкими кромками  $R < 0,2$  мм рекомендуется применять шарики диаметром 1,0...1,3 мм, для лопаток с кромками  $R > 0,2$  мм - шарики диаметром 1,5...2,5 мм или смесь их в зависимости от типоразмеров обрабатываемых деталей.

На формирование качества поверхностного слоя лопаток наиболее существенное влияние оказывает продолжительность процесса упрочнения. При ее увеличении качество поверхности улучшается, а величина и глубина залегания введенных остаточных напряжений увеличиваются. Рекомендуемое время упрочнения по перу одной партии при перпендикулярном расположении лопаток составляет 4...10 мин, при радиальном - увеличивается до 15 мин; оптимальное время упрочнения по замку находится в пределах 20...45 с.

С целью интенсификации процесса и исключения явления сухого трения при ударах шариков об обрабатываемую поверхность детали применяется смачивающая жидкость - вода с антикоррозионными добавками.

Продолжительность обработки в ультразвуковом поле в зависимости от размеров обрабатываемых поверхностей детали находится в пределах от 20 секунд до 30 минут.

Контроль качества упрочнения в ультразвуковом поле осуществляется по измерению и сохранению основных параметров поверхностного слоя: шерохова-

тости поверхности; глубины и степени деформации; величины и глубины залегания остаточных сжимающих напряжений; отсутствия изменения размеров обрабатываемых деталей.

Такая финишная обработка, как ультразвуковое упрочнение, не позволяет в отдельных случаях полностью достигнуть высоких показателей параметров выносливости. Это связано с тем, что после ультразвукового упрочнения в результате перенаклепа при соударении шариков с тонкими кромками на них образуются заусенцы, для устранения которых применяется ручное полирование. Ручное полирование кромок значительно увеличивает трудоемкость изготовления лопаток, приводит к перераспределению остаточных напряжений и созданию на кромках поперечных рисок - технологических концентраторов напряжений. Следствием этого в конечном итоге является снижение эффективности ультразвукового упрочнения и в отдельных случаях – разупрочнение отдельных участков кромок лопаток.

В качестве альтернативного поверхностно-пластического метода ультразвукового упрочнения применяется пневмодробеструйное упрочнение шариками, которое отличается скользящим соударением шариков с поверхности пера лопатки [3].

Упрочнение лопаток компрессоров производится шариками из стали ШХ15 диаметром 1,3...1,6 мм. Размеры шариков подбираются, исходя из требуемого уровня сжимающих остаточных напряжений и недопущения искажения геометрических параметров пера лопаток.

Для повышения эрозионной стойкости деталей в настоящее время применяют диффузионные покрытия в плазме тлеющего разряда с получением на поверхности нитридных и карбидных фаз [4].

Характерная особенность ионно-плазменных методов создания покрытий заключается в том, что при сравнительно низких температурах подложки становится возможным протекание плазмохимических реакций образования нитридов и карбидов тугоплавких металлов - соединений, требующих длительного времени и высоких традиционных методов.

Свойства и работоспособность плазменных покрытий в значительной мере определяются остаточными внутренними напряжениями, которые возникают в покрытиях в процессе их формирования [5].

В отличие от термических методов нанесения покрытий ионно-плазменные методы [6 – 8] характеризуются высокоэнергетичными потоками конденсирующих частиц.

Вследствие высокой энергоемкости конденсирующих частиц при ионно-плазменных процессах нанесения в покрытиях может возникнуть ряд структурно-фазовых явлений, способных в той или иной степени влиять на формирование остаточных напряжений.

Процесс проникновения ионов в поверхностные слои является неравновесным и не требует высоких температур. Однако из-за существенно неравновесных условий вследствие быстрого ( $t \approx 10^{-10} - 10^{-11}$ ) нетермического возбуждения решетки в локальных областях возникают очень высокие давления и температуры [9, 10].

Таким образом, при ионно-плазменном нанесении покрытий на поверхности материала могут наблюдаться эффекты: поверхностное ионное легирование на глубину порядка 10 нм и более; образование радиационных дефектов; локальное возникновение высоких температур и давлений вдоль трека ионов.

Указанные факторы в значительной мере определяют характер и уровень остаточных напряжений в приповерхностных слоях материала.

При ионно-плазменных методах нанесения покрытий, как и в других методах, значительный вклад в величину остаточных напряжений вносит термическая компонента [11].

Одними из перспективных методов отделочно-упрочняющей обработки является обработка поверхности деталей машин с применением мощных ионных и электронных пучков [12], а также метод магнитно-абразивного полирования (МАП).

Отличительные черты МАП заключаются в следующем: универсальность абразивного инструмента позволяет обрабатывать детали из различных материалов и конфигураций с формированием поверхности деталей с благоприятными характеристиками; сочетание в одном процессе отделочной и упрочняющей операций; возможность механизировать обработку практически любой детали [13].

Важнейшим фактором, влияющим на показатели МАП наряду с технологическими параметрами и материалом, является исходное состояние поверхности обрабатываемого изделия.

Титановые сплавы обладают при высоких температурах повышенной химической активностью к кислороду, азоту, водороду, находящимся в воздухе. Это приводит при шлифовании к наводороживанию, появлению гибридных пленок и слоев, которые являются причиной появления растягивающих напряжений, хрупкости поверхности и образования микротрещин.

Исследования влияния МАП на тонкую кристаллическую структуру титанового сплава показали, что после МАП относительное физическое уширение у сплава BT5 снижается с  $\beta = 1,63 - 10^{-3}$ , имевшего место после шлифования, до  $\beta = 0,79 - 10^{-4}$ .

Уменьшение физического уширения показывает, что происходят увеличение степени неоднородности распределения микронапряжений (2-го рода) и уменьшение размеров областей когерентного рассеивания. Уменьшение размеров блоков увеличивает сопротивление пластической деформации металлов вследствие уменьшения областей, через которые скольжение происходит.

Результаты измерения микротвердости титанового сплава BT5 после шлифования и после МАП представлены на рис. 1.

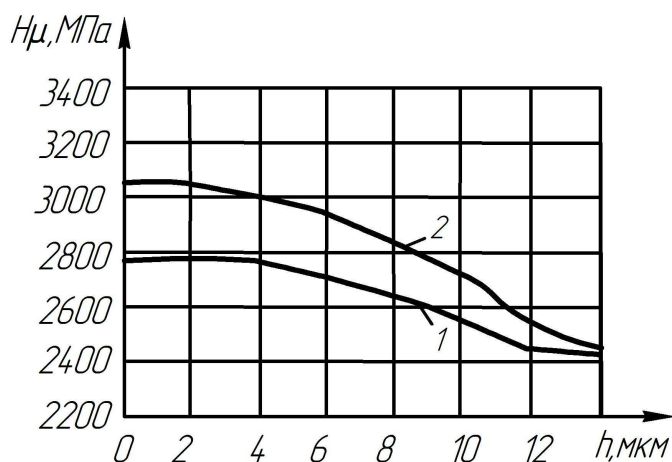


Рис. 1. Изменение микротвердости титанового сплава BT5 после: 1 - шлифования; 2 – МАП

Как видно из рис. 1, микротвердость образцов после МАП больше, чем шлифованных образцов, при одинаковой глубине (например, при  $h = 2$  мкм после МАП  $H_{\mu} = 3080$  МПа, после шлифования  $H_{\mu} = 2800$  МПа).

Шероховатость образцов после шлифования и точения составляла  $Ra = 0,7 \dots 0,8$  мкм, шероховатость образцов после МАП -  $Ra = 0,6$  мкм.

Износ шлифованных образцов за 32600 циклов составил 31,6 Мг, точеных - 26 Мг, образцов, обработанных МАП: 19,2 Мг и 16,0 Мг (рис. 2).

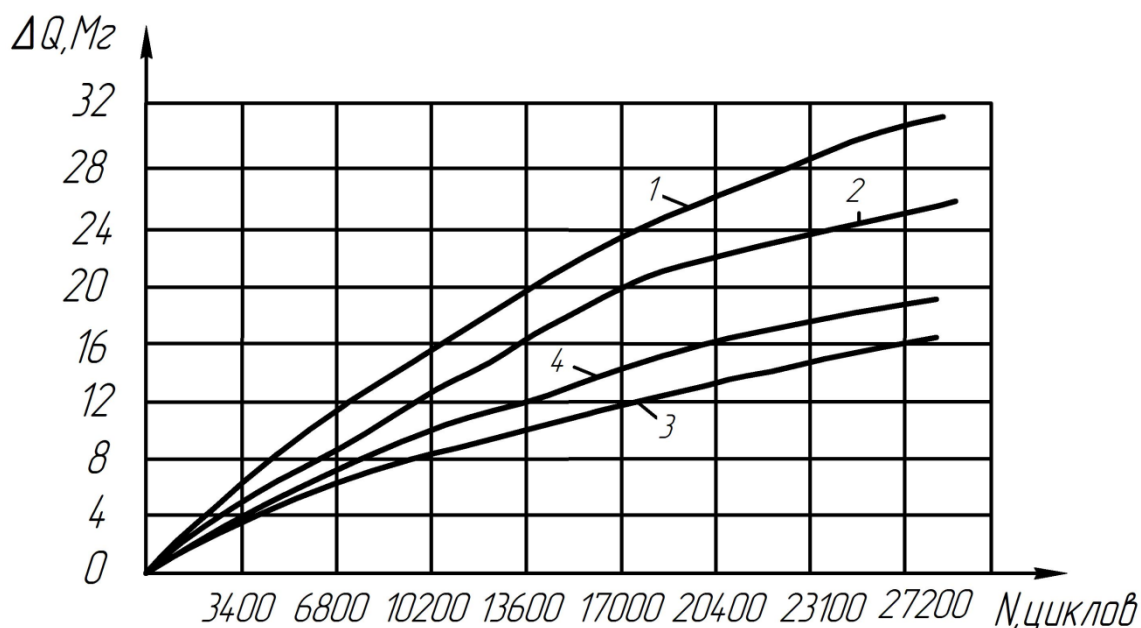


Рис. 2. Графики износа титанового сплава ВТ5 в зависимости от числа циклов истирания: 1 – шлифование; 2 – точение; 3 – МАП при  $N_i=1,24$ ; 4 – МАП при  $N_i=17,5$

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что МАП повышает эксплуатационные характеристики поверхностного слоя титановых сплавов.

Исследования магнитно-абразивного полирования лопаток 6-й ступени компрессора двигателя ТВЗ-117 из сплава ВТ8 [14] показали: наблюдается заметный разброс исходных значений геометрических параметров лопаток; заметного изменения размеров пера лопатки под действием МАП не произошло; недостаточно обрабатывается прикомлевой участок пера, что связано с трудностью доступа режущего инструмента в зону перехода пера лопатки к замку.

В результате МАП лопаток шероховатость снижается и достигает средних значений:  $Ra = 0,3 \dots 0,45$  мкм. При этом разброс значений шероховатости пера лопаток после МАП меньше, чем лопаток, изготовленных по серийной технологии.

Положительные результаты, полученные при магнитно-абразивном полировании стальных лопаток при их ремонте, особенно в сочетании с нанесением тонких ионно-плазменных покрытий типа TiN, делают технологию МАП очень привлекательной не только для получения высоких классов шероховатости рабочих поверхностей лопаток, а и с целью повышения эксплуатационной надежности. Исследования [15] показали, что наилучшие результаты можно получить за счет ис-

пользования магнитно-абразивного инструмента (МАИ) со специфичными свойствами, какие позволяют регулярно влиять на микрогеометрию поверхности пера и на состояние поверхностного слоя лопаток за счет пластического деформирования микронеровностей.

### Выводы

Проанализировано влияние упрочняющих технологий на эксплуатационные характеристики лопаток после ремонта. Приведены рекомендации по применению дробеструйной обработки, ультразвукового упрочнения, пневмодробеструйного упрочнения, метода магнитно-абразивного полирования и ионно-плазменных методов нанесения покрытий при обработке лопаток, изготовленных из титановых сплавов.

### Список литературы

1. Патент №12528 Україна. Спосіб дробоструминного зміцнення профіля пера лопаток турбомашин / В. И. Благовещенский, В. Ф. Притченко, В. К. Яценко, В. А. Богуслаев. – Оpubл. 28.02.97 ; Бюл. № 1.
2. А. с. 456704 СССР. Способ упрочнения деталей / И. А. Стебельков. – Оpubл. 1975 ; Бюл. № 2.
3. Богуслаев, В. А. Пневмодробеструйное упрочнение лопаток ГТД [Текст] / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, А. К. Гармаш // Проблемы прочности. – 1995. – С. 91–94.
4. Каплун, В. Г. Ионные технологии нанесения покрытий в плазме тлеющего разряда [Текст] / В. Г. Каплун, И. М. Пастух // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2001. – № 2. – С.73–75.
5. Развитие представлений о механизме возникновения остаточных напряжений в покрытиях, полученных методом физического вакуумного осаждения : (обзор) [Текст] / Г. П. Ковтун, А. Г. Шепелев, Л. В. Пантеенко и др. // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. IV Междунар. конф. – Х., 2003. – Ч. II. С. 89–95.
6. Kostyuk G. I. Scientific basis of layer succession selection in multilayer plasma-ionic coating on steels, working in the dynamic and stationary regime / G. I. Kostyuk , V. N. Pavlenko // Компьютерные и информационные технологии при моделировании в управлении и экономике : сб. науч. тр. / М-во образования науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т ім. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – Вып. 2. – С.11–20.
7. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий [Текст] / В. А. Барвинок. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
8. Ion bombardment modifier of surfaces : fundamentals and application / edited by Orlando Auciello, Roger Kelly. – Amsterdam ; New York : Elsevier Science Publishers, 1984. – 466 p.
9. Каминский, М. А. Атомные и ионные столкновения на поверхности металлов [Текст] / М. А. Каминский. – М. : Мир, 1987. – 506 с.
10. King H. W. Stress, Hardness and Chemical – Stability of TiN Coatings / H. W. King, T. A. Caughlin, D. R. Nagy // J. of Advanced Materials. – 2001. – V. 33, is.1. – P. 63–68.
11. Температурные напряжения в зоне действия ионов различных энергий, сортов и зарядов, а также капель жидкого металла [Текст] / Г. И. Костюк, В. Н. Павленко, К. П. Исяк, О. М. Мелкозерова // Вісн. інж. акад. України. – 2011. –

№ 3. – С. 202–207.

12. Перспективы технологии обработки поверхности деталей машин с применением мощных импульсных ионных и электронных пучков [Текст] / В. А. Шулов, А. Н. Петухов, А. Г. Пайкин и др. // Конверсия в машиностроении. – 2005. – №1/2. – С.59–70.

13. Изготовление деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов / В. А. Богуслаев и др. – Запорожье : Мотор Сич, 1997. – 287 с.

14. Технологическое обеспечение несущей способности деталей ГТД после длительной наработки в эксплуатации [Текст] / П. Д. Жеманюк [и др.] // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий». – Запорожье, 1995. – С. 72–73.

15. Влияние комплексной магнитно-абразивной обработки и композиционных покрытий на характеристики усталости рабочих лопаток ГТД [Текст] / Б. А. Грязнов, В. С. Майборода, Ю. С. Налимов, и др. // Вибрация в технике и технологиях. – 2001. – № 3 (21). – С. 80–83.

**Рецензент:** д.т.н., профессор Долматов А.И., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина

Поступила в редакцию 09.09.11

## **Застосування зміцнювальних технологій для збільшення післяремонтного ресурсу лопаток авіаційних двигунів**

Розглянуто зміцнювальні технології, що застосовуються для збільшення післяремонтного ресурсу лопаток. Наведено рекомендації щодо застосування дроборунної обробки, ультразвукового зміцнення, пневмодробоструминного зміцнення, методу магнітно-абразивного полірування і іонно-плазмових методів нанесення покриттів при обробці лопаток, виготовлених з титанових сплавів.

**Ключові слова:** поверхнево-пластичне деформування, лопатка, зміцнювальні технології деформування, лопатка, зміцнювальні технології, ресурс.

## **Application of strengthening technologies with the purpose to increase the post-repair service life of blades of aviation engines**

Strengthening technologies are considered, which are used for increasing the post-repair service life of blades. The impact of strengthening technologies on the post-repair blade application requirements is analyzed. The guidance on the application of bead-blasting processing, ultrasonic strengthening, compressed-air bead-blasting strengthening, the method of magnetic and abrasive polishing and ion-plasmas coating techniques while processing the blades that are made of titanium alloys is provided.

**Keywords:** surface-plastic forming, blade, strengthening technologies, service life.