

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД

©2011 М. К. Александров, Н. Д. Папшева, О. М. Акушская

Самарский государственный технический университет

Приведены результаты исследования ультразвукового упрочнения свободными шариками лопаток ГТД из титановых сплавов. Показано влияние ультразвука на физико-механические и эксплуатационные характеристики.

Ультразвук, упрочнение, остаточные напряжения, усталостная прочность.

Эффективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деталей ГТД (лопаток компрессорной турбины) является поверхностное пластическое деформирование, осуществляемое различными методами, к числу которых относятся гидродробеструйное и пневмодробеструйное упрочнение, упрочнение микрошариками. Данные методы характеризуются отсутствием жесткой связи деформирующих элементов с обрабатываемой поверхностью, имеют невысокую производительность и создают неблагоприятные условия на рабочих местах. Более эффективным способом повышения эксплуатационных характеристик изделий является ультразвуковое упрочнение (УЗУ) свободными шариками, которое производится в специальной рабочей камере, где под действием ультразвукового поля хаотично перемещаются под действием ультразвука шарики [1]. Особенностью ультразвукового упрочнения является то, что положительный эффект достигается за счет многократности микросоударений при отсутствии заданной траектории, что позволяет упрочнять тонкостенные детали сложной конфигурации и обеспечивает более равномерный характер поверхностной деформации [2].

Определены оптимальные режимы упрочнения, которые находятся в пределах: амплитуда колебаний $\xi=10\text{...}30\text{ мкм}$, диаметр шариков $d_{ш}=1,5\text{...}3\text{ мм}$, время обработки $t=100\text{...}200\text{ с}$.

Ультразвуковое упрочнение свободными шариками приводит к формированию в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений в образцах из титановых сплавов ВТ 9 от 4 до 450...500 МПа с глуби-

ной залегания 250...350 мкм. Увеличение продолжительности обработки до 150с ведет к росту σ_r . При этом область максимальных напряжений располагается на некотором расстоянии от поверхности (рис. 1).

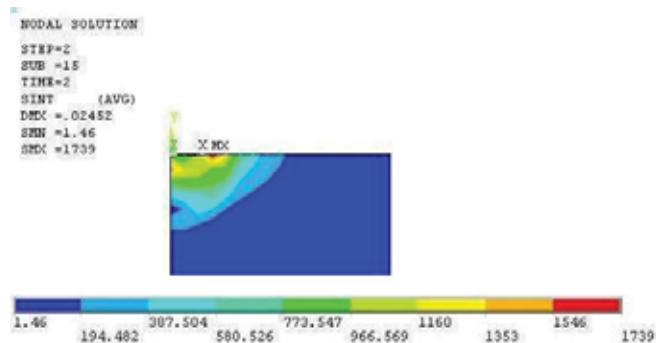


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений после ультразвукового упрочнения сплава ВТ9

Изучение особенностей влияния ультразвукового упрочнения и накатывания шариком на тонкую кристаллическую структуру титановых сплавов ВТ3-1, ВТ9, ОТ4 проводилось на образцах после точения, шлифования, а также в отожженном состоянии [3].

Исследования показали, что ультразвуковое упрочнение вызывает дополнительное уширение рентгеновских интерференционных линий после всех видов обработки. При этом увеличение деформационного упрочнения, определяемое относительным уширением рентгеновских линий на отожженных образцах, происходит более интенсивно. На это, в частности, указывает тот факт, что уровень размытия рентгеновских интерференционных линий в образцах, упрочненных после отжига, ниже, чем в упрочненных после точения. Это связано с тем, что при уп-

рочнении образцов после точения реализуется субструктурное состояние с более мелкими блоками и большими микроискажениями кристаллической решетки.

Известно, что прохождение ультразвуковых волн через кристалл вызывает активацию дислокаций. При пластическом деформировании в ультразвуковом поле часть активированных дислокаций становится подвижной, что вызывает локализованную пластическую деформацию. В предварительно точеных образцах доля подвижных дислокаций меньше вследствие большого количества препятствий. Это вызывает своеобразное субструктурное упрочнение за счет более мелких блоков с наибольшими микроискажениями внутри них. При УЗУ отожженных образцов движение активированных ультразвуком дислокаций не тормозится препятствиями, в связи с чем длина их свободного пробега больше и, следовательно, степень упрочнения ниже.

Анализ распределения уширений линий по глубине показал, что в отожженных образцах наиболее интенсивное деформационное упрочнение после ультразвуковой обработки распространяется до глубины 150...200 мкм, а в точеных – до 80...100 мкм.

Проведенные исследования позволили установить, что ультразвуковое упрочнение свободными шариками титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9 и ОТ4 сопровождается дроблением блоков мозаики, значительным развитием микроискажений и увеличением плотности дислокаций.

Изменение размеров блоков, а также уменьшение микроискажений и плотности дислокаций при ультразвуковом упрочнении связаны с поглощением акустической энергии в местах элементарных пластических сдвигов, что приводит к локальному нагреву, снятию напряжений, разблокировке дислокаций, увеличению их подвижности. Все эти факторы, характеризующие в общем разупрочняющее действие ультразвука, способствуют также более равномерной пластической деформации в процессе упрочнения. Эффект разупрочнения подтверждается измерением микротвердости поверхностного слоя образцов из сплава ВТ9. Результаты этих исследований показали, что степень

деформационного упрочнения при ультразвуковом упрочнении свободными шариками примерно на 10% меньше, чем при накатывании шариком, хотя остаточные напряжения имеют близкие значения.

Исследование влияния ультразвукового упрочнения и накатывания шариком на фазовый состав поверхностного слоя титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ9, ОТ4 показало, что наибольшие фазовые превращения при упрочнении происходят в отожженных образцах. Так, при ультразвуковом упрочнении и накатывании шариком образцов из сплава ВТЗ-1 в отожженном состоянии содержание β -фазы на поверхности уменьшилось с 20 до 12% и глубина фазовых превращений при этом составляла 100...150 мкм. При упрочнении точеных образцов количество β -фазы уменьшилось с 10 до 4...5%.

Сплав ВТ9 в отожженном состоянии содержал 17% β -фазы, в результате накатывания шариком и ультразвукового упрочнения количество β -фазы на поверхности уменьшилось до 8-9% и фазовые превращения наблюдались до глубины 100 мкм. Анализ интегральных интенсивностей линий α и β -фаз отожженного сплава ОТ4 показывает, что ультразвуковое упрочнение сопровождается $\beta \rightarrow \alpha$ превращениями. Исследования показали, что основной причиной этих превращений является силовой фактор, это относится и к другим видам механической обработки.

Распад метастабильной β -фазы под воздействием пластической деформации приводит к изменению характера эпюр остаточных напряжений, что объясняется различной плотностью фаз. Поскольку плотность β -фазы меньше плотности α -фазы, $\beta \rightarrow \alpha$ превращения вследствие уменьшения объема в поверхностном слое должны способствовать смещению эпюры остаточных напряжений в сторону положительного знака. У сплава ОТ4 величина тангенциальных и осевых сжимающих остаточных напряжений на 100...150 МПа выше, чем у сплавов ВТЗ-1, ВТ9, а количество свободной β -фазы в исходном состоянии не превышает 4...5%.

При ультразвуковом упрочнении под действием внешних сил происходит интенсивная пластическая деформация, которая

определяется его физико-механическими характеристиками. Исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта проводили в программном комплексе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Результаты определения интенсивности деформаций ε_i в зависимости от усилия упрочнения показали, что с увеличением последнего при накатывании шариком ε_i возрастает до 0,12 при УЗУ и до 0,096 при накатывании шариком. Это связано с тем, что скорость деформирования при УЗУ значительно выше, что является следствием быстрого распространения фронта давления, локализованного в небольшом объеме. Как известно, высокоскоростная и квазистатическая деформации по-разному воздействуют на кристаллическую решетку. При высокоскоростной деформации имеет место перераспределение влияния отдельных факторов на физико-механические характеристики материала. Поэтому ультразвуковое упрочнение характеризуется более мелкозернистой структурой и высокой плотностью дислокаций. Наибольшие значения интенсивности напряжений и деформаций находятся на некотором расстоянии от поверхности, что связано с локализацией в этой области максимальных касательных напряжений.

Электронно-микроскопические исследования показали, что максимальный распад β -фазы наблюдается на поверхности образца и достигает глубины 100 мкм.

Как видно из представленных снимков (рис. 2,а) у образцов в исходном состоянии четко различаются две фазы: светлая α -фаза и темная, в виде полос, β -фаза. В результате ультразвукового упрочнения на поверхности наблюдаются интенсивные фазовые превращения, о чем свидетельствует значительное дробление и расслоение границ β -фазы (рис. 2,б).

Аналогичная картина наблюдается и на глубине 50 мкм (рис. 2,в). На расстоянии 100 мкм от поверхности интенсивность фазовых превращений, как и в случае рентгенографического анализа, незначительна (рис. 2,г).

Таким образом, электронно-микроскопические исследования подтвердили данные рентгенографического анализа и свидетель-

ствуют о наличии $\beta \rightarrow \alpha$ превращений в поверхностном слое.

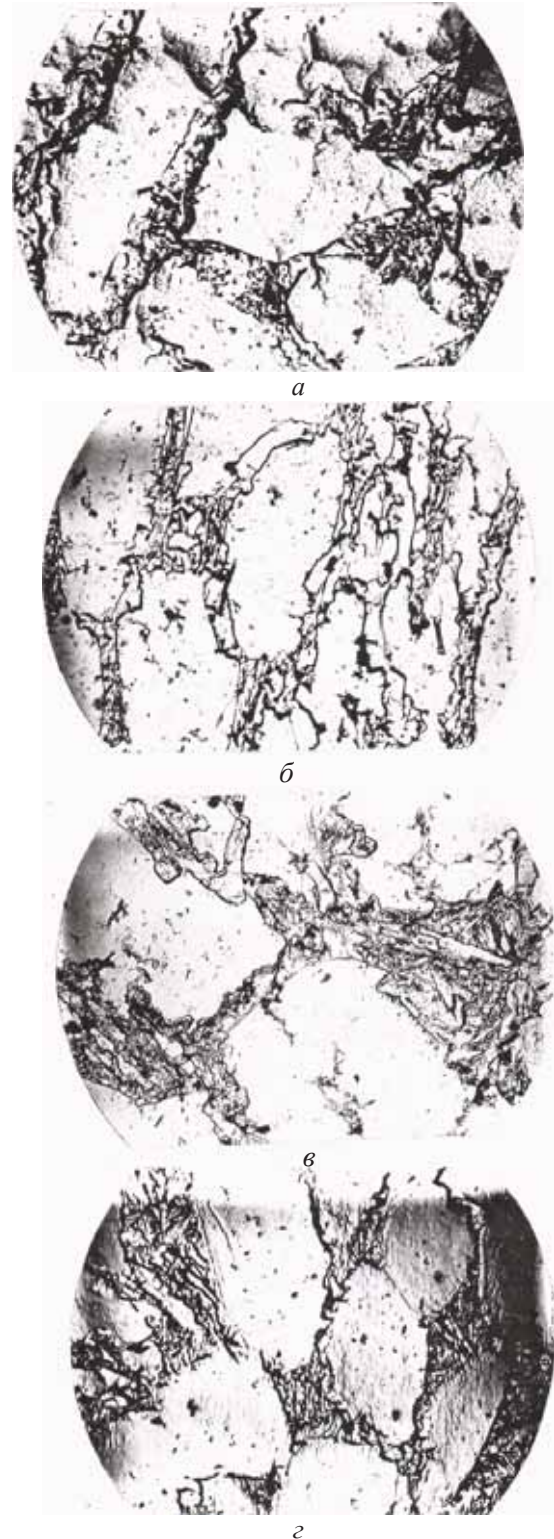


Рис. 2. Фазовые превращения в образцах из сплава ВТ9: а – поверхность в исходном состоянии; б – после УУ; в – после УУ на глубине 50 мкм; г – после УУ на глубине 100 мкм

Одним из показателей, характеризующих долговечность деталей ГТД, является усталостная прочность.

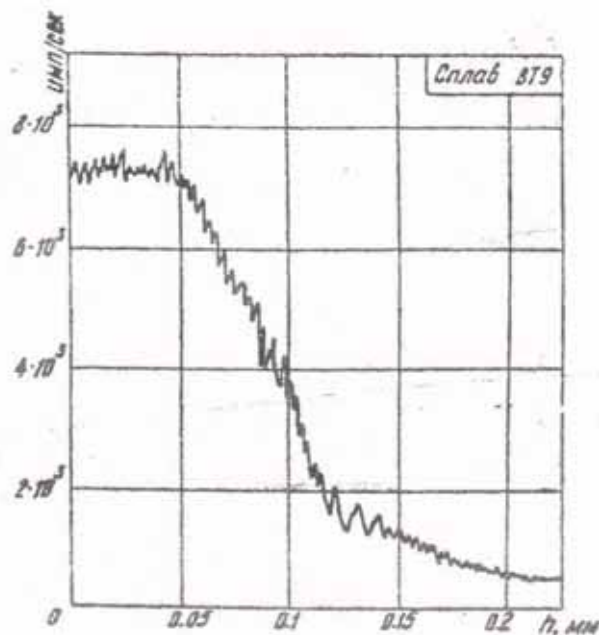
Как известно, усталостная прочность металлов в значительной степени определяется уровнем энергии, которую способны аккумулировать микрообъемы поверхностных слоев до насыщения. Оптимальным структурным состоянием материала является наличие такой структуры, которая обеспечивает наибольшую равномерность поглощения энергии кристаллической решетки в процессе деформирования. При этом необходимо также учитывать характер распределения дислокаций и их плотность. Равномерное распределение дислокаций по объему металла обеспечивает однородное поглощение механической энергии в процессе деформирования, а увеличение плотности дислокаций приводит к возрастанию средней величины поглощенной энергии. Этому, в частности, способствует ультразвуковое упрочнение, приводящее к повышению общей энергоемкости поверхностного слоя и, как следствие, увеличению циклической прочности.

Исследования энергетического состояния поверхностного слоя методом экзоэлектронной эмиссии (ЭЭЭ) позволили установить, что ультразвуковое упрочнение приводит к значительным изменениям энергоемкости поверхностного слоя.

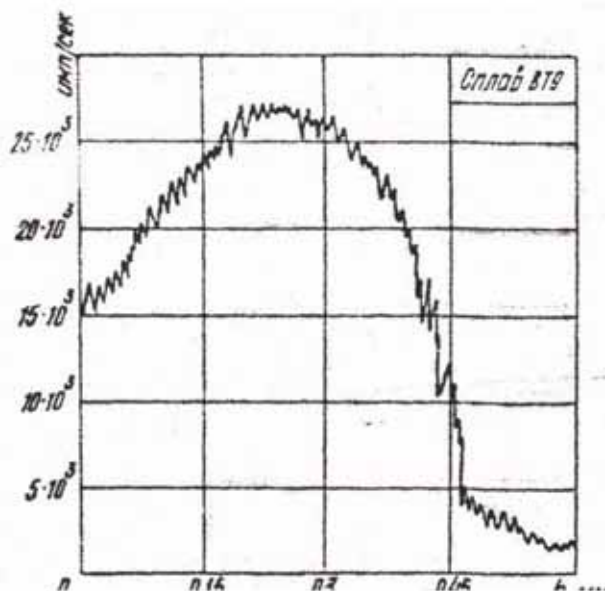
Сканограммы косых шлифов на исходных образцах, приведенные на рис. 3,а показывают, что наибольшая эмиссия зафиксирована на поверхности образцов.

По мере перемещения светового зонда по шлифу эмиссия уменьшается и на глубине 0,05...0,1 мм наблюдается её резкий спад. Повышенная эмиссия на поверхности обуславливается тем, что в процессе изготовления образцов поверхностный слой был деформирован, и при отжиге, по-видимому, произошла частичная рекристаллизация этого слоя.

Иной характер имеют сканограммы образцов после ультразвукового упрочнения свободными шариками. В частности, здесь наблюдается значительное увеличение ЭЭЭ до $2,7 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^4$ имп/с (рис. 3,б).



а



б

Рис. 3. Распределение экзоэлектронной эмиссии по глубине поверхностного слоя: а – образец после отжига; б – образец после ультразвукового упрочнения ($f=20$ кГц, $\xi=20$ мкм, $t=150$ с, $d_{ш}=2,5$ мм)

Для сравнения, ЭЭЭ неупрочненных образцов составляет $7 \cdot 10^3 \dots 8 \cdot 10^3$ имп/с. Кроме того, максимум экзоэмиссии проявляется на глубине 150...200 мкм и совпадает с глубиной залегания максимальных значений остаточных сжимающих напряжений. Общая глубина, где регистрируется экзоэмиссия после ультразвукового упрочнения, превышает глубину распространения остаточ-

ных напряжений, что связано с более высокой чувствительностью данного метода.

Центрами эмиссии являются скопления дефектов и области с повышенной плотностью дислокаций, зависящие от поля напряжений, создаваемого внешней нагрузкой. Таким образом, можно с достаточной достоверностью утверждать, что увеличение эмиссионной активности на глубине 150...200 мкм свидетельствует о возникновении здесь зоны с максимальной концентрацией остаточных напряжений и наибольшей степенью пластической деформации.

Исследование усталостных изломов шлифованных и упрочненных образцов позволили определить характерные зоны разрушения: зону зарождения трещины, зону перехода, которая характеризуется признаками смешанного разрушения, и зону долома. Существенным отличием неупрочненных и упрочненных образцов является то, что в первом случае зарождение трещины начинается с поверхности, а в упрочненных образцах зона зарождения трещины находится на некоторой глубине и характеризуется наличием усталостных макросколов (рис. 4).



Рис. 4. Усталостный излом упрочненного образца из сплава VT9

В зависимости от режимов упрочнения предел выносливости титановых сплавов повышается до 450 МПа (рис. 5).

При ультразвуковом упрочнении повышение предела выносливости определяется не только остаточными напряжениями и степенью пластической деформации, но и особенностями физического состояния по-

верхностного слоя в условиях высокочастотного циклического воздействия ультразвуковых колебаний. К этим особенностям

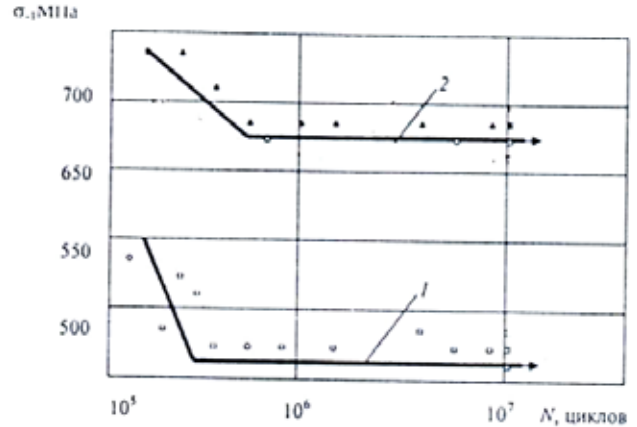


Рис. 5. Влияние ультразвукового упрочнения на усталостную прочность титанового сплава VT9: 1-шлифование; 2- ультразвуковое упрочнение свободными шариками

Относятся: повышенная плотность дислокаций, значительные микроискажения, интенсивное торможение различных структурных дефектов, изменение энергетического состояния, фазовые превращения и др.

При этом положительное влияние упрочнения заключается также и в том, что упрочненный слой ограничивает выход дислокаций на поверхность при циклическом деформировании, обуславливая этим повышение общей энергоемкости материала и, как следствие, рост усталостной прочности.

Таким образом, ультразвуковое упрочнение приводит к значительному повышению усталостной прочности титановых сплавов (до 48%). При этом зона зарождения усталостной трещины смещается под поверхность.

Библиографический список

1. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке [Текст]/ М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай [и др.] - М.: Машиностроение, 2002. -264с.
2. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов[Текст] /А.И. Марков - М.: Машиностроение, 1989. -237с.
3. Горелик, С.С. Рентгенографический и электрографический анализ [Текст]/ С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков - М.: Металлургия, 1985.-182с.

ULTRASONIC HARDENING OF PARTS GTE

© 2011 M.K. Alexandrov, N.D. Papsheva, O.M. Akushskaya

Samara State Technical University

The results of the study of ultrasonic hardening of free samples from the balls of titanium alloys. Shows the effect of ultrasound on the physical, mechanical and operational characteristics.

Ultrasound, hardening, residual stresses, fatigue strength

Информация об авторах

Александров Михаил Кузьмич, кандидат технических наук, доцент кафедры ИССА Самарского государственного технического университета. E-mail: isap@samgtu.ru. Область научных интересов: ультразвуковая интенсификация технологических процессов.

Папшева Нина Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент кафедры ИССА Самарского государственного технического университета. E-mail: isap@samgtu.ru. Область научных интересов: ультразвуковая интенсификация технологических процессов.

Акушская Ольга Мордуховна, старший преподаватель кафедры ИССА Самарского государственного технического университета. E-mail: Olgaaku@gmail.com. Область научных интересов: ультразвуковая интенсификация технологических процессов.

Alexandrov Mikhail Kuzmich, candidate of technical science, associate professor of Samara State Technical University. E-mail: isap@samgtu.ru. Area of research: Ultrasonic intensification of technological processes.

Papsheva Nina Dmitrievna, candidate of technical science, associate professor of Samara State Technical University. E-mail: isap@samgtu.ru. Area of research: Ultrasonic intensification of technological processes.

Akushskaia Olga Morduhovna, senior lecturer of Samara State Technical University. E-mail: Olgaaku@gmail.com. Area of research: Ultrasonic intensification of technological processes.