

УДК 621.789:669.295

Е. К. Березовский*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

В работе установлена эффективность технологических методов упрочняющей обработки плоских образцов из титанового сплава ВТ6 после чистового фрезерования. Эффективность технологических методов устанавливалась посредством определения коэффициента повышения долговечности образцов на основе экспериментальных данных. Показано распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя после упрочнения различными технологическими методами. Выявлены наиболее эффективные технологические методы упрочнения с учетом влияния исходной шероховатости поверхности образцов после чистового фрезерования. Даны рекомендации по их применению при изготовлении лопаток ГТД.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, остаточные напряжения, поверхностный слой, долговечность, технологические методы упрочнения, микронеровности.

Введение

Одним из важных и перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик наиболее ответственных деталей ГТД (лопаток компрессора и турбины, дисков, роторных валов, зубчатых колес) является разработка и внедрение в их производство прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих высокое качество изготовления [1].

В настоящее время при изготовлении рабочих лопаток компрессора и вентилятора широкое применение получили методы пластического деформирования и механической обработки, а также упрочняющие технологии на заключительных финишных операциях [2].

Упрочнение рабочих лопаток компрессора и вентилятора производят, применяя методы: ультразвукового упрочнения стальными шариками (УЗУ); пневмодробеструйного упрочнения стальными шариками (ПДУ); дробеударного упрочнения стальной дробью (ДУ); виброударного упрочнения стальными шариками (ВУ) и др. [3, 4].

Эффективность указанных методов упрочнения деталей определяется режимами и технологическими условиями обработки, а также величиной исходной шероховатости обрабатываемой поверхности после предыдущей технологической операции (точения, фрезерования, шлифования).

Поэтому, актуальным является установление

влияния шероховатости поверхности детали после предыдущей технологической операции на эффективность последующего упрочнения данной поверхности различными технологическими методами.

Цель работы – установить влияние технологических методов упрочняющей обработки на долговечность образцов из титанового сплава ВТ6 с учетом технологической наследственности после предыдущей технологической операции чистового фрезерования.

Объект исследования – плоские образцы из титанового сплава ВТ6 после чистового фрезерования.

Методы и методика проведения исследований

Исследование проводилось на стандартных образцах, применяемых для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей ГТД в серийном производстве.

Образцы изготавливались из титанового деформируемого сплава ВТ6, химический состав которого представлен в табл. 1.

Микроструктура титанового сплава ВТ6 образцов проверена на макротемплетах, изготовленных по сечению штамповок в продольном направлении. Микроструктура соответствует 2а типу, при норме 1 – 6а тип шкалы №1 ОСТ 1 90002-86 (рис. 1).

Таблица 1 – Химический состав ВТ6, %

| Fe | C | Si | V | N | Ti | Al | Zr | O | H | Примесей |
|--------|--------|---------|-----------|---------|---------------|-----------|--------|--------|----------|---------------|
| до 0,3 | до 0,1 | до 0,15 | 3,5...5,3 | до 0,05 | 86,485...91,2 | 5,3...6,8 | до 0,3 | до 0,2 | до 0,015 | прочих 0,3 |

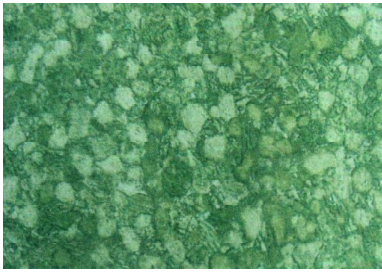


Рис. 1. Микроструктура титанового сплава ВТ6 перед упрочняющей обработкой

Технологические методы и режимы обработки:

Ультразвуковое упрочнение:

рабочая среда – стальные шарики диаметром 1,3...1,6 мм;
 время упрочнения – 10 мин;
 интенсивность обработки – 4,1...4,2 мВ;
 суммарная масса шариков – 400 г;
 конструкция волнового концентратора – концентратор типа «стакан».

Дробеударная обработка:

рабочая среда – стальная дробь диаметром 0,9...1,2 мм;
 давление воздуха – 0,2...0,25 МПа;
 продольная подача сопла – 200...390 мм/мин.

Пневмодробеструйная обработка:

рабочая среда – стальные шарики диаметром 2,5 мм;
 давление воздуха – 0,4...0,45 МПа;
 продольная подача – 200...240 мм/мин.

Виброударное упрочнение:

рабочая среда – стальные шарики диаметром 4...6 мм;
 амплитуда – 3,5...4,0 мм;
 частота – 24 Гц;
 время обработки – 20 мин;
 схема обработки – свободное перемещение в U-образном контейнере.

Результаты исследований:

Экспериментально установлено, что упрочнение поверхности образцов после чистового фрезерования различными технологическими методами по-разному деформируют микронеровности в зависимости от их исходной высоты.

Ультразвуковое упрочнение – величина шероховатости поверхности образцов зависит от исходной твердости и высоты микронеровностей на поверхности образцов и режимов ультразвуковой обработки.

Для получения более низких значений величины шероховатости необходимо уменьшать интенсивность процесса.

Дробеударная обработка – высота микронеровностей не зависит от исходной величины и находится в диапазоне $R_z = 10...20$ мкм. После упрочнения на поверхности образуется новый микрорельеф.

Пневмодробеструйная обработка – образуется новый профиль микронеровностей в диапазоне R_z от 6,0 до 40 мкм. Расположение микронеровностей является случайным.

Виброударное упрочнение – сглаживает вершины исходных микронеровностей после чистового фрезерования, не изменяя характер расположения и форму их впадин. Высота микронеровностей уменьшается в 1,5...2,0 раза.

Величина шероховатости поверхности плоских образцов из титанового сплава ВТ6 после их упрочняющей обработки различными технологическими методами практически не оказывает влияние на их долговечность.

На рис. 2 показано распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образцов после упрочняющей обработки различными технологическими методами.

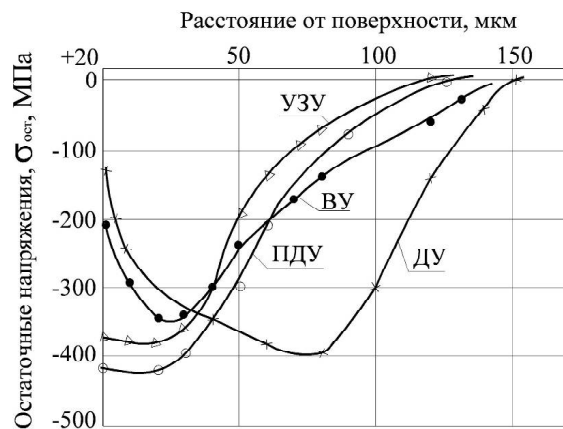


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образцов

Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в поверхностном слое образцов после упрочняющей обработки различными технологическими методами являются сжимающими.

На поверхности образцов величина остаточных напряжений изменяется в диапазоне: - 120 МПа (ДУ); - 200 МПа (ВУ); - 370 МПа (УЗУ); - 420 МПа (ПДУ).

Глубина расположения подслояного максимума остаточных напряжений: 70...80 мкм, - 400 МПа (ДУ); 20...30 мкм, - 350 МПа (ВУ); 10...20 мкм, - 380 МПа (УЗУ); 2030 мкм, - 425 МПа (ПДУ).

Наибольшая глубина расположения подслояного максимума остаточных напряжений наблюдается после ДУ – 70...80 мкм.

Наибольшие величины остаточных напряжений на поверхности наблюдаются после ПДУ (- 420 МПа) и после УЗУ (- 370 МПа).

Оценка эффективности технологических методов упрочняющей обработки поверхности плоских образцов производилась определением коэффициента повышения долговечности, K_d по формуле:

$$K_d = \frac{N_{\text{упр}}}{N_{\text{исх}}},$$

где $N_{\text{упр}}$ – долговечность плоских образцов после их упрочнения, цикл.

$N_{\text{исх}}$ – исходная долговечность плоских образцов после чистового фрезерования (без упрочнения), цикл;

Долговечность плоских образцов определялась испытаниями пульсирующим изгибом максимальным напряжением цикла $\sigma_{\text{max}} = 750,0$ МПа.

На рис. 3–5 представлены коэффициенты повышения долговечности плоских образцов после упрочняющей обработки различными технологическими методами.

ПДУ в зависимости от исходной высоты микронеровностей на поверхности образцов после чистового фрезерования, находящихся в диапазоне от 6,3 до 40 мкм, обеспечивает повышение коэффициента долговечности от 2,75 до 4,75 (рис. 3).

ДУ для исходной высоты микронеровностей поверхности плоских образцов, находящейся в диапазоне 6,3...40 мкм, обеспечивает повышение коэффициента долговечности от 3,0 до 31,0 (рис. 4).

Максимальное значение коэффициента повышения долговечности соответствует значениям исходной высоты микронеровностей поверхности плоских образцов, находящихся в диапазоне 10...20 мкм (см. рис. 4).

УЗУ после чистового фрезерования образцов с высотой микронеровностей 510 мкм обеспечивает повышение коэффициента долговечности до 29,0 (рис. 5).

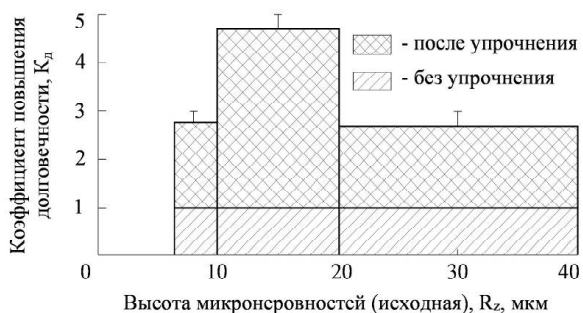


Рис. 3. Зависимость коэффициента повышения долговечности от исходной высоты микронеровностей после чистового фрезерования для ПДУ

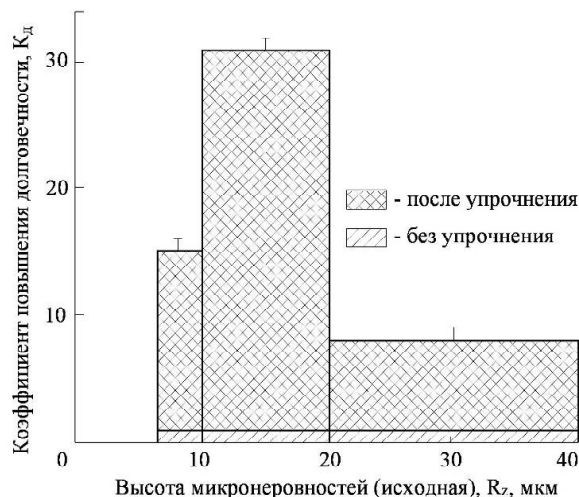


Рис. 4. Зависимость коэффициента повышения долговечности от исходной высоты микронеровностей после чистового фрезерования для ДУ

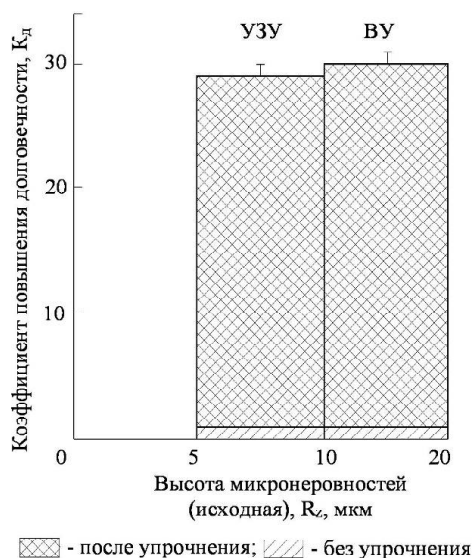


Рис. 5. Зависимость коэффициентов повышения долговечности от исходной высоты микронеровностей после чистового фрезерования для УЗУ и ВУ

ВУ в диапазоне исходной высоты микронеровностей 10...20 мкм обеспечивает повышение коэффициента долговечности до 30,0 (см. рис. 5).

Таким образом, ПДУ имеет меньшую эффективность, чем ДУ, УЗУ и ВУ.

Эффективность ДУ, УЗУ и ВУ находится практически на одинаковом уровне.

Выводы

1. Наиболее эффективными методами упрочняющей обработки плоских образцов из титанового деформируемого сплава ВТ6 после чистового фрезерования являются виброударный, дробеударный и ультразвуковое упрочнение стальными шариками.

2. Максимальное повышение коэффициента долговечности плоских образцов достигается при значениях исходной высоты микронеровностей после чистового фрезерования ВУ – 10...20 мкм; УЗУ – 5...10 мкм; ДУ – 10...20 мкм.

3. Величина шероховатости поверхности плоских образцов из титанового деформируемого сплава ВТ6 после упрочнения практически не оказывает влияние на их долговечность.

4. Для каждого из методов упрочнения плоских образцов из титанового сплава ВТ6 имеется оптимальный диапазон исходной шероховатости, при котором обеспечивается максимальная его эффективность.

5. Для упрочняющей обработки широкохордных вентиляторных лопаток ГТД из титанового сплава ВТ6 с учетом их габаритных размеров рекомендуются методы УЗУ и ДУ, а для малогабаритных лопаток – УЗУ и ВУ.

Список литературы

1. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / [Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье, АО «Мотор Сич», 2003. – 369 с.
2. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье, АО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
3. Богуслаев В. А. Пневмодробеструйное упрочнение лопаток ГТД / Богуслаев В. А., Яценко В. К., Гармаш А. В. // Проблемы прочности. – 1995. – № 8. – С. 91–94.
4. Технологическое обеспечение несущей способности лопаток компрессора. / Богуслаев В. А., Жеманюк П. Д., Яценко В. К., Пухальская Г. В. // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 4. – С. 8–13.

Поступила в редакцию 02.03. 2017

Березовський Є. К. Вплив технологічних методів зміцнюючої обробки на довговічність зразків з титанового сплаву ВТ6

У роботі встановлено ефективність технологічних методів зміцнюючої обробки плоских зразків з титанового сплаву ВТ6 після чистового фрезерування. Ефективність технологічних методів встановлювалася за допомогою визначення коефіцієнта підвищення довговічності зразків на основі експериментальних даних. Показано розподіл залишкових напружень по глибині поверхневого шару після зміцнення різними технологічними методами. Виявлено найбільш ефективні технологічні методи зміцнення з урахуванням впливу вихідної шорсткості поверхні зразків після чистового фрезерування. Дано рекомендації з їх застосування при виготовленні лопаток ГТД.

Ключові слова: шорсткість поверхні, залишкові напруження, поверхневий шар, довговічність, технологічні методи зміцнення, микронерівності.

Berezovsky Y.K. Influence of production processes of strengthening treatment on durability of specimens made of VT6 titanium alloy

The paper describes the efficiency of production processes of strengthening treatment of the flat specimens made of VT6 titanium alloys based on experimental data after finish milling. The paper demonstrates distribution of residual stresses in depth of the surface layer after strengthening by using various production processes. Виявлені The most efficient production processes of strengthening with due regard to influence of the initial surface roughness of the specimens after finish milling were identified.

Key words: surface roughness, residual stresses, surface layer, durability, production processes of strengthening, microroughnesses.