

**УПРОЧНЕНИЕ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВИБРОПОЛИРОВАНИЕМ И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ****Павленко В. Н., Волков И. В., Ткаченко В. В.**

Выполнена численная оценка влияния термической обработки, механического упрочнения образцов из сплава VT8 методом виброупрочнения и высокоэнергетической электроимпульсной обработки на величину коэффициента упрочнения. Определены коэффициенты упрочнения материала при различных режимах ВЭИО, что позволяет выбирать наиболее оптимальные сочетания технологических методов упрочнения титанового сплава VT8. Приведена методика проведения испытаний для оценки эффективности финишных отделочно-упрочняющих операций. Получены экспериментальные данные о влиянии высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения на усталостные характеристики лопаток компрессора из сплава VT-8М, которые были подвергнуты виброполированию.

Виконано чисельну оцінку впливу термічної обробки, механічного зміцнення зразків із сплаву VT8 методом віброзміцнення та високоенергетичною електроімпульсною обробкою на величину коефіцієнта зміцнення. Визначені коефіцієнти зміцнення матеріалу при різних режимах ВЕІО, що дозволяє вибирати найбільш оптимальні поєднання технологічних методів зміцнення титанового сплаву VT8. Наведено методику проведення випробувань для оцінки ефективності фінішних обробно-зміцнюючих операцій. Отримано експериментальні дані про вплив високоенергетичного електроімпульсного зміцнення на втомні характеристики лопаток компрессора зі сплаву VT-8М, які були оброблені віброполіруванням.

The numerical evaluation of the influence of heat treatment, mechanical strengthening of the VT8 alloy samples with the method of vibro-reinforcement and high-energy electro pulse treatment on the strengthening rate has been done. The material strengthening rates under different conditions of high-energy electro pulse treatment are determined, what makes it possible to choose the most optimal combination of technological methods of the VT8 titanium alloy strengthening. The testing methods for the efficiency assessing of final activities in trimming and reinforcing are explained. The experimental data on the effect of the high-energy electro pulse strengthening on the fatigue characteristics of the compressor blades made from the VT-8 M alloy, which have been subjected to vibro-polishing, are received.

Павленко В. Н.

канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой НАУ «ХАИ»  
pavlenko\_vitaliy@mail.ru

Волков И. В.

канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НАУ «ХАИ»

Ткаченко В. В.

канд. техн. наук НАУ «ХАИ»

УДК 621.452.3.002.3

Павленко В. Н., Волков И. В., Ткаченко В. В.

### УПРОЧНЕНИЕ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВИБРОПОЛИРОВАНИЕМ И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Разрушение деталей при эксплуатации, как правило, начинается с поверхности, вследствие того, что поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными при всех видах напряженного состояния и подвергаются активному воздействию внешней среды. Этому способствуют также облегченные условия пластического течения металла в поверхностном слое по сравнению с сердцевиной детали и разупрочняющее действие на металл поверхностного слоя экструзии и энтропии.

В этой связи особого внимания со стороны производителей авиационных двигателей заслуживают экономически приемлемые и эффективные методы упрочнения изделий, способные обеспечить повышенные прочностные характеристики высоконагруженных деталей, к которым в первую очередь относятся лопатки компрессора и турбины. Одной из таких технологий является технология высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения, поскольку она способна совместно с другими, традиционно применяемыми методами упрочнения, существенно повысить эксплуатационные свойства деталей [1].

К традиционно применяемым методам упрочнения лопаток относятся: дробеструйная обработка, ультразвуковая, пневмодробеструйная обработка, виброабразивная обработка, виброполирование, метод магнитно-абразивного полирования, ионно-плазменные методы нанесения покрытий. В работе [2] приведены данные, характеризующие эффективность поверхностного упрочнения титанового сплава, по результатам работ ряда авторов.

Целью работы является исследование влияния высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения на усталостные характеристики лопаток, которые были подвергнуты виброполированию.

Исследования лопаток из сплава ВТ8 велись в направлении исследования коэффициента упрочнения сплава ВТ8 в зависимости от метода упрочняющей обработки.

Исследования лопаток из сплава ВТ8М велись в направлении изучения эффективности упрочнения виброполированием и высокоэнергетической электроимпульсной обработкой (ВЭИО).

Далее приведены экспериментальные данные, полученные в результате проведенных исследований.

Для исследования лопаток из сплава ВТ8 использовались цилиндрические образцы корсетной формы диаметром рабочей части 8,5 мм, изготовленные из прутка. Заготовки образцов подвергались термообработке по трем режимам, что обеспечивало трем партиям образцов различную структуру и механические свойства.

Партия I – 920 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух

Партия II – 960 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С

Партия III – 1050 °С – 1 час → воздух + 870 °С – 1 час → 650 °С – 2 часа → воздух

Образцы из партий I, II и III обрабатывались шлифованием, после чего упрочнялись виброобработкой, а впоследствии подвергались ВЭИО.

Все заготовки, подвергаемые ВЭИО, разделены на три группы, каждая из которых обрабатывалась в соответствии со следующими значениями уровней удельной энергии ВЭИО [1]:

режим 1 –  $q_u = 0,402 \text{ Дж/мм}^3$ ; режим 2 –  $q_u = 0,843 \text{ Дж/мм}^3$ ; режим 3 –  $q_u = 1,005 \text{ Дж/мм}^3$ .

В эксперименте принята величина энергии, подводимая к образцу за один период тока, равная  $Q_{пер} = 420 \text{ Дж}$ .

На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов упрочнения образцов из сплава VT8, изготовленных из прутка после различной термической обработки, виброупрочнения и ВЭИО.

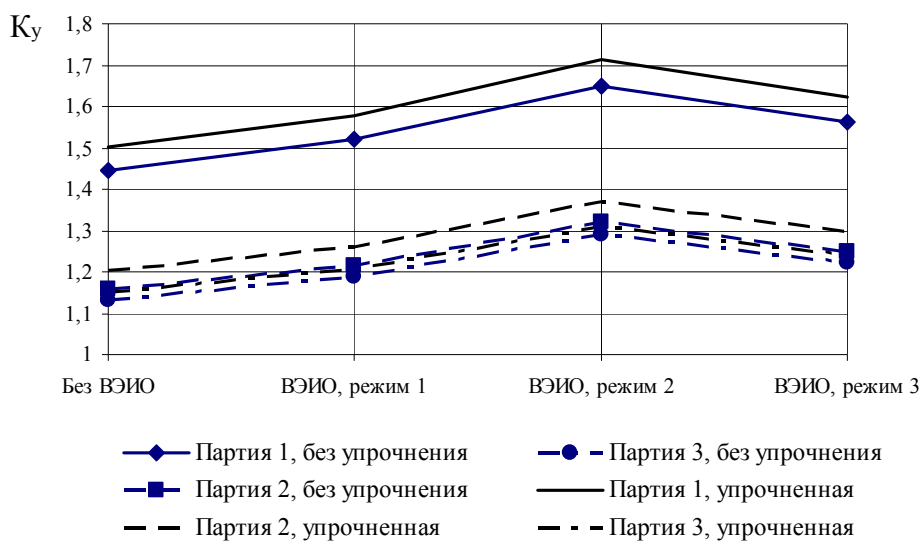


Рис. 1. Зависимость коэффициентов упрочнения образцов из сплава VT8, изготовленных из прутка после различной термической обработки, виброупрочнения и ВЭИО

Как видно из рис.1, образцы из различных партий, неупрочненные и прошедшие виброупрочнение имеют наибольший коэффициент упрочнения при высокоэнергетической импульсной обработке по режиму 2. Уровень удельной энергии на этом режиме составляет  $0,843 \text{ Дж/мм}^3$ . При этом следует отметить, что сочетание виброупрочнения и ВЭИО повышает коэффициент упрочнения образцов, по сравнению с неупрочненными.

Значения коэффициентов упрочнения, приведенные на рис. 1, наглядно иллюстрируют наиболее оптимальные сочетания технологических методов упрочнения титанового сплава для образцов из прутка. Эти значения можно использовать при выборе рационального технологического процесса упрочнения.

При изучении эффективности упрочнения лопаток из сплава VT8М виброполированием и ВЭИО исследованию подвергались лопатки, окончательно обработанные виброполированием и лопатки, подвергнутые высокоэнергетическому электроимпульсному упрочнению после виброполирования.

Испытания на усталость лопаток проводили способом динамического возбуждения в них колебаний по первой изгибной форме на электродинамическом вибростенде ВЭДС-200, оснащенный устройством автоматического возбуждения и поддержания заданных динамических нагрузок с выводом информации на печать.

Лопатка на вибростенде крепится в специальном замке и испытывается в резонансном режиме. В процессе испытаний уровень заданного напряжения контролируется с помощью бинокулярного микроскопа МБС-9 по размаху колебаний пера лопатки. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний. Методы испытания на усталость».

Проведение массовых испытаний натуральных лопаток компрессора на базе  $N = 10^8$  циклов является трудновыполнимой и дорогостоящей задачей. Поэтому для окончательной оценки эффективности финишных отделочно-упрочняющих операций вполне корректно проводить испытания лопаток на базе  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов с определением ограниченного предела выносливости и параметров его рассеяния.

Лопатки испытывали в резонансном режиме до появления макротрещины длиной 1–3 мм, что соответствовало падению частоты собственных колебаний на 2–3 %.

Частота собственных колебаний лопаток 1-й ступени компрессора составляла 605...625 Гц. Уровень заданной амплитуды (напряжения) колебаний автоматически поддерживался корректировкой резонансной частоты.

Момент начала разрушения, которое начиналось со стороны кромок или спинки лопатки, фиксировали по снижению частоты собственных колебаний. Количество циклов нагружения лопатки до разрушения или достижения заданной базы (долговечность) определяли по продолжительности испытания.

Зависимости между задаваемым напряжением в опасном сечении лопатки и амплитудой колебаний пера были получены тензометрированием.

Для установления зависимости величины напряжения по показаниям вольтметра ( $U$ ) и степени деформации ( $\varepsilon$ ) была проведена калибровка тензодатчиков с базой  $L = 3$  мм и сопротивлением 200 Ом.

Для калибровки была использована контрольная тарировочная балка, которая устанавливалась на вибростенде вместо исследуемой лопатки. На определенном расстоянии от места защемления балки наклеивались последовательно по ширине три датчика. Возбуждение балки осуществлялось вибратором от силовой части установки в резонансном режиме. Измерение удвоенной амплитуды проводилось по концу балки с помощью оптического микроскопа, применяемого для контроля размаха пера лопатки.

По показаниям приборов, к которым подключены тензодатчики, получали по три значения напряжений для каждой величины задаваемой амплитуды и вычисляли их среднюю величину:

$$\bar{U}_k = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3}.$$

По результатам испытаний была получена зависимость,  $\bar{U}_k = \varepsilon_k$ , которая преобразуется в зависимость  $\bar{U}_k - \sigma_k$ , где  $\sigma_k = \varepsilon_k E$  ( $E$  – модуль упругости материала,  $\varepsilon_k$  – величина степени деформации балки в исследуемом сечении, которая находится в пределах  $(6,5...7,5) \times 10^4$ ). Для проведения испытаний лопаток необходимо получить зависимость  $\sigma - 2A$  с помощью тарировки. На натурные лопатки были наклеены датчики и подключены к тензометрическому усилителю, который соединен с цифровым вольтметром В7-27.

При тарировке амплитуда колебаний лопатки выбиралась такой, чтобы напряжения в исследуемом месте составляли не более 100...150 МПа. Для построения графической зависимости  $\sigma - 2A$  после установления амплитуды снимали показания вольтметра, которые затем переводили в напряжения по данным калибровки датчиков  $\sigma_i = U_i \frac{\sigma_k}{U_k}$ .

Результаты испытаний лопаток на усталость представлены в табл. 1.

Оценка эффективности упрочнения производилась по разрушенным лопаткам. Для вероятности разрушения  $P = 50\%$  предел выносливости виброполированных лопаток оказался равным  $\sigma_{-1} = 480$  МПа и  $S_{\sigma_{-1}} = 93$  МПа ( $S_{\sigma_{-1}}$  – среднеквадратичное отклонение предела выносливости) и предел выносливости лопаток после ВЭИО –  $\sigma_{-1} = 586$  МПа и  $S_{\sigma_{-1}} = 69$  МПа.

Оценка эффективности упрочнения производилась по разрушенным лопаткам. Для вероятности разрушения  $P = 10\%$  после виброполирования были получены значения  $\sigma_{-1(10\%)} = 361$  МПа и ВЭИО –  $\sigma_{-1(10\%)} = 498$  МПа.

Таблица 1

Результаты испытаний на усталость лопаток компрессора из сплава ВТ-8М

Серийные - виброполирование		Виброполирование + ВЭИО	
$\sigma_{-1}$ , МПа	N 10 <sup>6</sup>	$\sigma_{-1}$ , МПа	N 10 <sup>6</sup>
480	20	600	20
500	20	620	20
520	1,535	640	1,585
500	15,184	620	8,147
480	20	600	14,198
500	1,685	580	20
480	20	600	20
500	20	620	12,155
520	17,355	600	20
500	0,375	620	11,144
480	20	600	20
500	13,120	620	7,344
480	20	600	13,149
500	1,855	580	20
480	20	600	20
500	20	620	3,149
520	20	600	12,158
540	12,155	580	20
520	15,420	600	20
500	13,145	620	12,145

Таким образом, наряду с повышением предела выносливости за счет нейтрализации технологических микродефектов и кристаллографической неоднородности в поверхностном слое пера лопаток ВЭИО также приводит к значительному уменьшению его рассеяния, что свидетельствует об однородности характеристик поверхностного слоя.

На основании полученных результатов можно сделать выводы о том, что все рассматриваемые в работе факторы имеют весьма существенное влияние на сопротивление усталости образцов и лопаток титановых сплавов.

### ВЫВОДЫ

Выполнена численная оценка влияния термической обработки, механического упрочнения деталей методом виброупрочнения и высокоэнергетической электроимпульсной обработки на величину коэффициента упрочнения. Установлен режим ВЭИО, позволяющий достичь максимального коэффициента упрочнения для исследуемого материала. Получены экспериментальные данные о влиянии высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения на усталостные характеристики лопаток, которые были подвергнуты виброполированию.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов / В. А. Богуслаев, А. И. Долматов, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье : Мотор Сич, 2000. – 110 с.*
2. *Эффективность поверхностного упрочнения титановых сплавов / В. В. Ткаченко, В. В. Попов, В. А. Матюхин, В. Н. Куципак // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2000. – Вып. 21 (4). – С. 110–124.*

Статья поступила в редакцию 11.11.2011 г.