

В.С. Кривцов, В.Н. Павленко

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

*Аннотация. Изучено влияние метода высокоэнергетической импульсной обработки на сопротивление усталости титановых сплавов.*

*Установлены значения коэффициентов упрочнения образцов, зависящие от структуры образца, определяемой предварительной термообработкой, и методом высокоэнергетической импульсной обработки.*

Современное авиадвигателестроение уделяет большое внимание вопросам повышения надежности, экономичности и ресурса выпускаемой продукции. Их решение требует разработки и применения технологий, способных обеспечить высокую надежность, стабильность и повышенные эксплуатационные характеристики деталей авиационных двигателей.

Многие рабочие параметры изделия в основном определяются состоянием поверхностного слоя материала, которое характеризуется в первую очередь напряженным состоянием, интенсивностью, характером распределения и знаком остаточных напряжений, глубиной дефектного слоя, шероховатостью поверхности, наличием потенциальных зародышей трещин, структурой материала и многими другими факторами.

Практика эксплуатации двигателей показывает, что преждевременное разрушение лопаток компрессора и турбины обычно происходит из-за их усталости. Сопротивление усталости силовых деталей двигателя можно повысить металлургическими, конструктивными, технологическими и эксплуатационными методами, причем технологические методы являются наиболее эффективными.

В этой связи особого внимания со стороны производителей авиационных двигателей заслуживают экономически приемлемые и эффективные методы упрочнения изделий, способные обеспечить повышенные прочностные характеристики высоконагруженных дета-

лей, к которым в первую очередь относятся лопатки компрессора и турбины. Одной из таких технологий является технология высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения (ВЭИО), поскольку она способна совместно с другими, традиционно применяемыми методами упрочнения, существенно повысить эксплуатационные свойства [1].

Целью данной работы является изучение влияния метода высокоэнергетической импульсной обработки на сопротивление усталости титановых сплавов.

Для достижения поставленной цели в работе проведены экспериментальные исследования процесса высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения на сопротивление усталости титановых сплавов подвергнутых предварительному упрочнению традиционными методами.

В качестве материала образцов был выбран титановый сплав ВТ 8. Для исследования использовались цилиндрические образцы корсетной формы диаметром рабочей части 8,5 мм, изготовленные из прутка и крупногабаритной поковки. Заготовки образцов подвергались термообработке по трем режимам, что обеспечивало трем партиям образцов различную структуру и механические свойства. Режимы термообработки и структура образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы термообработки и структура образцов

Партия I	
Термообработка	920 С – 1 час → 650°С-2 часа → воздух
Структура	Пруток. Мелкозернистая, равноосная. Поковка. Смешанная, состоящая из глобулярнопластинчатой формы частиц $\alpha$ - фазы и пластинчатая тонкотолченая корзиночного плетения.
Партия II	
Термообработка	960 С – 1 час → воздух + 870 С-1 час → 650 С
Структура	Пруток. Смешанная, состоящая из чередующихся участков беззеренной структуры с глобулярнопластинчатой $\alpha$ - фазой и зернистой с пластинчатым внутризеренным строением. Поковка. Пластинчатая с едва заметными местами прерывистыми границами $\beta$ - зерен.
Партия III	
Термообработка	1050 С – 1 час → воздух + 870 С-1 час → 650 С -2 часа → воздух
Структура	Пруток. Грубая пластинчатая структура с большим размером первичного $\beta$ - зерна. Поковка. Зернистая с тонкотолченым внутренним строением и большими участками коагулированной $\alpha$ - фазы.

Образцы из партий I, II и III, часть из которых обрабатывалась шлифованием (неупрочненные образцы), а другая часть после шлифования упрочнялась виброобработкой, впоследствии подвергались ВЭИО.

Все заготовки, подвергаемые ВЭИО, разделены на три группы, каждая из которых обрабатывалась в соответствии с режимами, указанными в табл. 2 [1]. Таким образом, для режима 1 – выбран нижний, для режима 2 – средний, для режима 3 – верхний уровень удельной энергии. В эксперименте принята величина энергии, подводимая к образцу за один период тока, равная  $Q_{пер} = 420 \text{ Дж}$ . Подводимая к образцу полная энергия регулировалась количеством импульсов тока, проходящего через образец.

Таблица 2

Уровни варьирования удельной энергии при ВЭИО образцов

№ режима	$q_u, \text{ Дж} / \text{мм}^3$	$q_u / q_{пл}$
1	0,402	0,115
2	0,843	0,241
3	1,005	0,287

После испытаний на усталость из образцов вырезались микрошлифы для анализа напряженного состояния поверхностного слоя. Исследования проводились только для тех образцов, которые обладали наилучшими характеристиками длительной прочности.

Для исследования остаточных напряжений был применен рентгеноструктурный метод при помощи рентгеноскопа «ДРОН-2».

Кривые усталости, построенные на основании испытаний, представлены на рис. 1, 2.

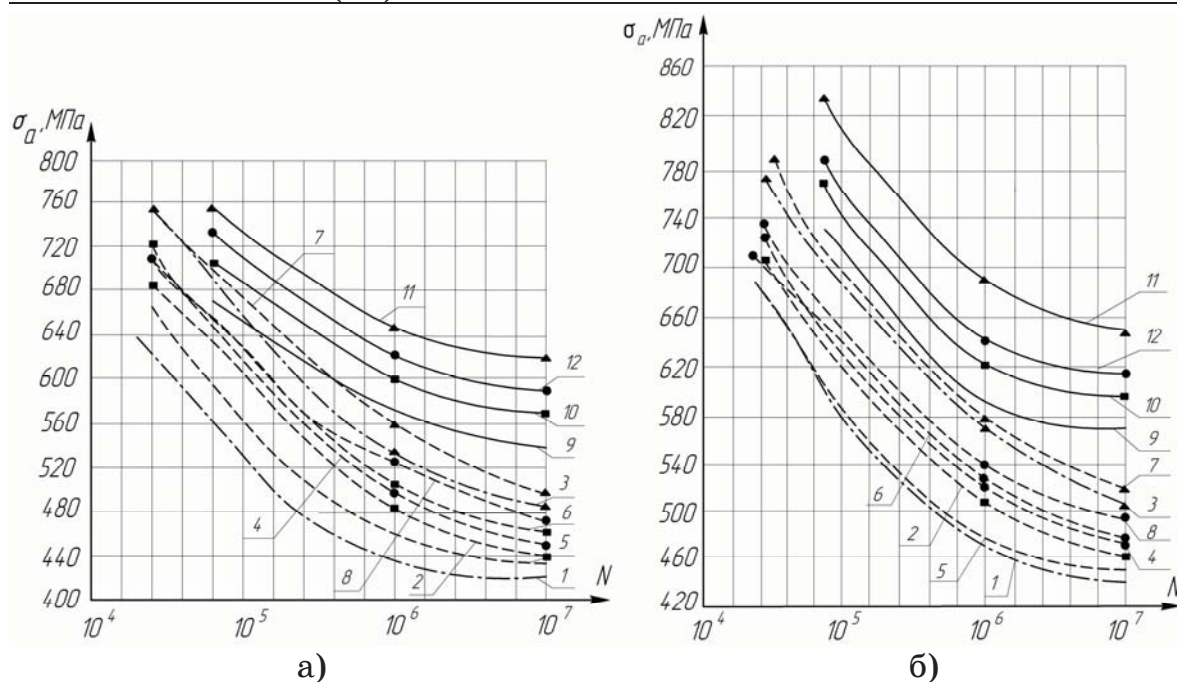


Рисунок 1 - Кривые усталости образцов из сплава ВТ8, изготовленных из прутка: а) без упрочнения до и после ВЭИО; б) упрочненные до и после ВЭИО  
 1- партия I; 2- партия I, режим 1; 3 - партия I, режим 2; 4 - партия I, режим 3; 1- партия II; 2- партия II, режим 1; 3 - партия II, режим 2; 4 - партия II, режим 3; 1- партия III; 2- партия III, режим 1; 3 - партия III, режим 2; 4 - партия III, режим 3

Из рисунков 1 и 2 видно, что метод высокоэнергетического электроимпульсного упрочнения может быть эффективным средством повышения прочностных характеристик материалов, в частности, предела выносливости титановых сплавов.

Следует отметить, что для различной структуры материалов эффективность такого упрочнения существенно меняется. Наибольший эффект достигается для образцов с мелкозернистой структурой, изготовленных из поковки (партия I) и для образцов с пластинчатой структурой (партия III), изготовленных из прутка. Помимо этого, очевидна тенденция максимального упрочнения всех типов образцов на режиме 2, указанном в таблице 2, соответствующем среднему уровню варьирования в эксперименте.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования дают основания для выявления наиболее эффективного комплекса технологических мероприятий по повышению длительной прочности исследуемых материалов. Для этого целесообразно использовать безразмерный параметр, определяющий степень упрочнения материала

после обработки по сравнению с некоторым исходным состоянием, за которое в свою очередь удобнее всего принять предел выносливости неупрочненного образца, т.е. коэффициент упрочнения  $K_y$ .

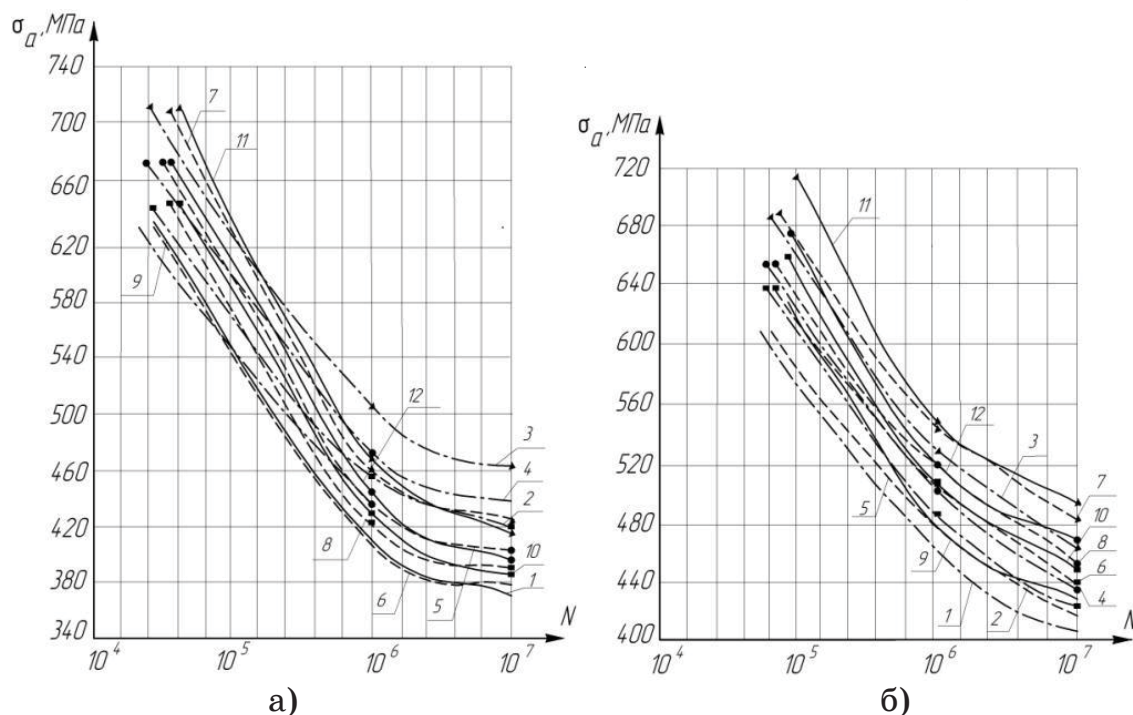


Рисунок 2 - Кривые усталости образцов из сплава ВТ8, изготовленных из поковки: а) без упрочнения до и после ВЭИО; б) упрочненные до и после ВЭИО  
 1- партия I; 2- партия I, режим 1; 3 - партия I, режим 2; 4 - партия I, режим 3; 1- партия II; 2- партия II, режим 1; 3 - партия II, режим 2; 4 - партия II, режим 3; 1- партия III; 2- партия III, режим 1; 3 - партия III, режим 2; 4 - партия III, режим 3

В данном случае за исходное состояние ( $K_y = 1$ ) принят образец из той партии, который обладает наименьшим значением предела длительной прочности.

Результаты статистического анализа экспериментальных данных, полученных при испытании образцов из поковок показали, что наименьшее значение предела длительной прочности имеет неупрочненный образец из поковки, принадлежащий партии II.

Значения остальных коэффициентов упрочнения образцов, зависящих от структуры образца, определяемой предварительной термообработкой, и метода упрочнения (виброупрочнение, ВЭИО) сведены в таблицу 3.

Значения коэффициентов упрочнения образцов после различной термической обработки, виброупрочнения и ВЭИО на базе  $10^7$  циклов

ПРУТКИ						
Режимы обработки	Без упрочнения			Упрочненные		
	Партия I	Партия II	Партия III	Партия I	Партия II	Партия III
Без ВЭИО	1,447	1,131	1,157	1,502	1,202	1,15
ВЭИО, режим 1	1,519	1,188	1,2157	1,577	1,262	1,207
ВЭИО, режим 2	1,65	1,29	1,32	1,713	1,371	1,311
ВЭИО, режим 3	1,563	1,222	1,250	1,622	1,298	1,242
ПОКОВКА						
Режимы обработки	Без упрочнения			Упрочненные		
	Партия I	Партия II	Партия III	Партия I	Партия II	Партия III
Без ВЭИО	1,026	1	1,065	1,118	1,1	1,055
ВЭИО, режим 1	1,077	1,05	1,119	1,174	1,155	1,108
ВЭИО, режим 2	1,17	1,135	1,215	1,275	1,254	1,203
ВЭИО, режим 3	1,108	1,082	1,151	1,207	1,188	1,139

Анализируя экспериментальные данные можно выбрать наиболее оптимальные сочетания технологических методов упрочнения титанового сплава как для образца из прутка, так и для поковки. Максимальный коэффициент упрочнения образцов наблюдается на режиме 2 ВЭИО.

**Выводы.** Комбинация метода высокоэнергетической импульсной обработки и виброупрочнения, способны дать эффект повышения предела выносливости сплава до 25 % по сравнению с неупрочненным образцом.

Экспериментальные исследования дают основания для выявления наиболее эффективного комплекса технологических мероприятий по повышению длительной прочности исследуемых материалов.

Исследования подтвердили гипотезу о том, что удельная энергия, необходимая для повышения предела выносливости детали находится в пределах 20% удельной энергии, необходимой для пластификации того же объема материала.

Установлены значения коэффициентов упрочнения образцов, зависящих от структуры образца, определяемой предварительной термообработкой, и методом высокоэнергетической импульсной обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богуслаев В.А., Долматов А.И., Жеманюк П.Д., Ткаченко В.В., Волков И.В., Повышение ресурса ГТД из титановых сплавов. – Запорожье, 2000. – 110 с.