

УДК 621.452.3:539.3

Д-р техн. наук А. Я. Качан, С. А. Уланов

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ПОЛЫХ ВАЛОВ ГТД НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния механической обработки: точения, шлифования и их сочетания с финишными операциями: электрохимическим полированием, обработкой в среде псевдосжиженного абразива (ПСА) на параметры качества поверхностного слоя стенки вала и предел выносливости. Установлены рациональное сочетание технологических операций и их последовательность, обеспечивающих несущую способность полых валов КВД из сплава ЭИ 437БУ-ВД.

Ключевые слова: предел выносливости, полый вал, КВД, остаточные напряжения, шероховатость, микроструктура, наклепанный слой, технологические методы обработки.

Значительный вклад в обеспечение качества изготовления несущих поверхностей деталей ГТД вносят прогрессивные технологические методы их обработки [1].

Существенное влияние на формирование параметров качества несущих поверхностей деталей ГТД оказывает технологическая наследственность предшествующих операций технологического процесса их изготовления, начиная от заготовки и до получения детали [2, 3].

Применительно к современным полым валам КВД двухконтурных газотурбинных двигателей, толщина стенок которых составляет 1,5...2 мм при внутреннем диаметре до 300 мм и более, разработка рациональной технологии их изготовления, обеспечивающей их высокую несущую способность, является актуальной и имеет важное практическое значение, так как позволяет повышать надежность ГТД в целом [4].

Цель работы – разработка рациональной технологии изготовления тонкостенных полых валов КВД, обеспечивающей их высокую несущую способность по критерию усталости.

Изготовление пустотелого тонкостенного вала КВД (рис. 1) авиационного двигателя Д-36 содержит следующие технологические операции.

1. Обрезка штамповки.
2. Термообработка $T = 1080^\circ\text{C} - 2$ часа.

3. Раскатка.
4. Термообработка $T = 1080^\circ\text{C} - 8$ час + $T = 750^\circ\text{C} - 16$ час.

5. Черновое точение.
6. Травление.
7. Чистовое точение (Т).
8. Шлифование (Ш).

Электрохимическое полирование (ЭХП).

Валы КВД изготавливают из сплава ЭИ 437БУ-ВД, химический состав которого соответствует нормам ТУ (табл. 1).

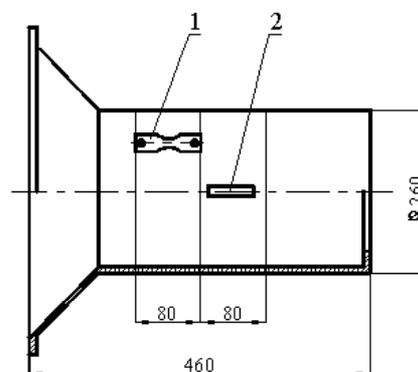


Рис. 1. Схема вырезки образцов:

- 1 – образец для испытаний на усталость;
- 2 – образец для исследования остаточных напряжений

Таблица 1 – Химический состав сплава ЭИ 437БУ-ВД

№ вала	Содержание элементов, %								
	C	Cr	Ti	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Ni
1	0,06	19,45	2,73	0,82	0,83	0,18	0,38	0,014	осн.
2	0,08	20,51	2,65	0,89	0,83	0,22	0,39	0,024	осн.
Норма ТУ 14-1-669-73	0,04...0,08	19,0...22,0	2,65...2,90	0,70...1,00	≤ 1,00	≤ 0,40	≤ 0,60	≤ 0,07	осн.

Микроструктура материала валов представляет собой Ni-Cr твердый раствор, упрочненный карбидной и интерметаллидной фазами.

Карбиды по границам зерен дискретные (рис. 2).

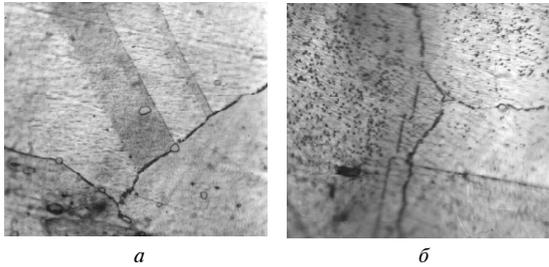


Рис. 2. Микроструктура сплава ЭИ 437БУ-ВД вала КВД авиационного двигателя Д-36:

a – для вала № 1; *б* – для вала № 2

Исследования пустотелых валов КВД, изготовленных по серийной технологии, показали, что механические свойства их раскатной части и технологического припуска соответствуют нормам 36ТУ-77, но наблюдается разброс значений величин длительной прочности.

Так, при испытании образцов, вырезанных из вала № 1, по режиму $\sigma = 750$ МПа, $T = 550$ °С, время до разрушения находилось в пределах 101...194 часов (при норме ≥ 300 часов).

При испытании образцов, вырезанных из вала № 2, по режиму $\sigma = 750$ МПа, $T = 550$ °С, время до разрушения – 168...287 часов (при норме ≥ 300 часов).

При этом установлено:

- характер разрушения образцов с различным уровнем длительной прочности идентичен;
- очаги начального разрушения локализованы и расположены на плоской части. Изломы в очагах интенсивно окислены до темно-синего цвета.

Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов, вырезанных из валов, определились методом травления на установке ПИОН-2.

Исследования распределения осевых остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя валов КВД после различных технологических операций: точение (Т); точение + шлифование (Т+Ш); точение + шлифование + электрополирование (Т + Ш + ЭХП) показали, что они характеризуются большим разбросом. На поверхности стенок средние осевые остаточные напряжения являются растягивающими и достигают по величине + 70...450 МПа (рис. 3).

Шероховатость поверхности после чистового точения составила $R_a = 0,8...2,0$ мкм.

Шлифование после точения снижает шероховатость поверхности до $R_a = 0,4...0,63$ мкм.

Установлено, что после механической обработки полого вала под электрохимическое полиро-

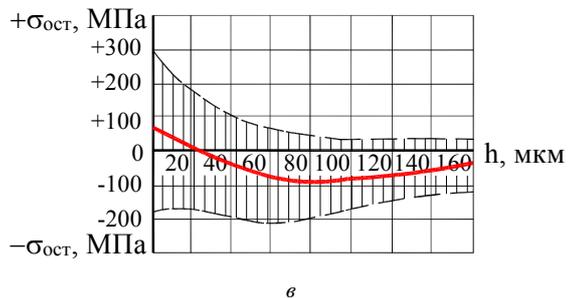
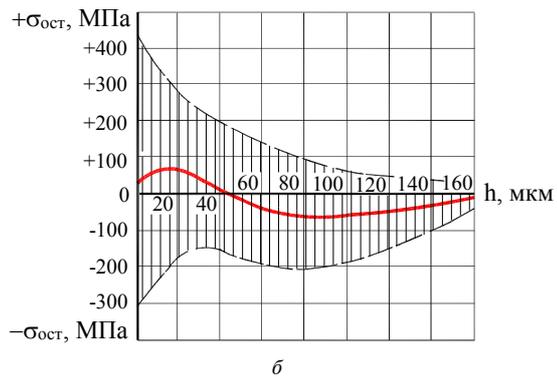
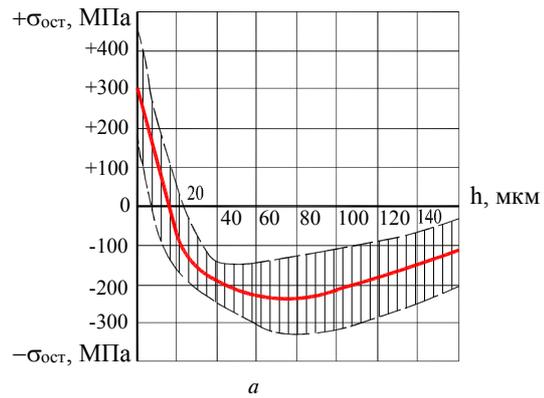


Рис. 3. Распределение осевых остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя:

a – после Т; *б* – после Т+Ш; *в* – после Т+Ш+ЭХП

вание в крайнем поверхностном слое как с наружной, так и с внутренней поверхностей наблюдается наклепанный слой в виде рекристаллизованных зерен с глубиной распространения от 8 до 42 мкм (рис. 4).

В процессе электрохимического полирования происходит сьем поверхностного слоя в диапазоне 30...80 мкм.

В результате в отдельных зонах вала после электрополирования может сохраниться наклепанный слой, превышающий величину съема при электрополировании, что существенно снижает эксплуатационную надежность вала (см. рис. 4, *в*).

Результаты испытаний на усталость образцов из валов КВД, изготовленных по серийной технологии, представлены в табл. 2.

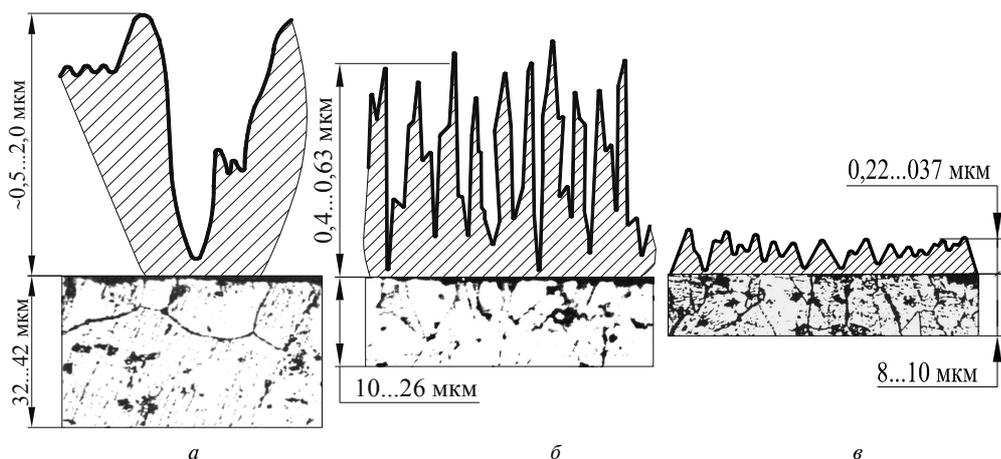


Рис. 4. Профилграммы шероховатости и наклепанный слой после выполнения технологических операций:
 а – Т; б – Т+Ш; в – Т+Ш+ЭХП

Таблица 2 – Результаты испытаний на усталость образцов из вала КВД

Вид обработки	Режимы обработки	Среднее значение предела выносливости, σ_{-1} , МПа	Среднее отклонение, $\Delta\sigma_{-1}$, %
Т	Скорость: 40...60 м/мин Подача: 0,10...0,15 мм/об	$255^{+25,7}_{-34,3}$	+10,1 -13,5
Т+Ш	Шлифование: $V_{сп} = 35$ м/с $n_{\delta} = 120$ об/мин Подача: $S_{пол} = 0,01...0,03$ мм $S_{пред} = 2...3$ м/мин	277^{+16}_{-13}	+16 -13
Т+Ш+ЭХП	ЭХП: Сила тока: 1300 А Время обработки: 25 мин	240^{+40}_{-60}	+17 -25

Предел выносливости σ_{-1} образцов, вырезанных из валов КВД, изготовленных по серийной технологии, изменяется в зависимости от вида обработки и последовательности выполнения технологических операций.

Среднее значение предела выносливости σ_{-1} находится в диапазоне от 240 до 277 МПа.

Среднее отклонение $\Delta\sigma_{-1}$ характеризуется большим разбросом их значений от 13...16 (Т+Ш) до 17...25 % (Т+Ш+ЭХП).

Предложен метод одновременной двусторонней обработки наружных и внутренних поверхностей стенок тонкостенных полых валов свободным абразивом, согласно которому их наружные поверхности обрабатываются в псевдооживленном слое абразива (ПСА), а внутренние – уплотненной под действием центробежных сил абразивной средой в полости вала при локальном воздействии на нее воздушными струями из сопел [4].

После выполнения технологических операций: черновое точение + чистовое точение + шлифо-

вание + обработка в ПСА происходит изменение шероховатости обработанных поверхностей вала.

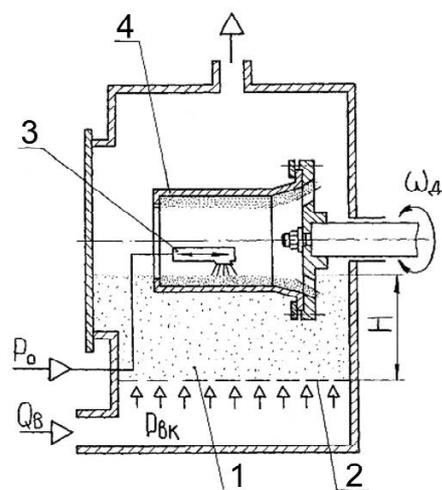


Рис. 5. Схема обработки пустотелого вала:

1 – свободный абразив; 2 – газораспределительная решетка; 3 – воздушное сопло; 4 – вал

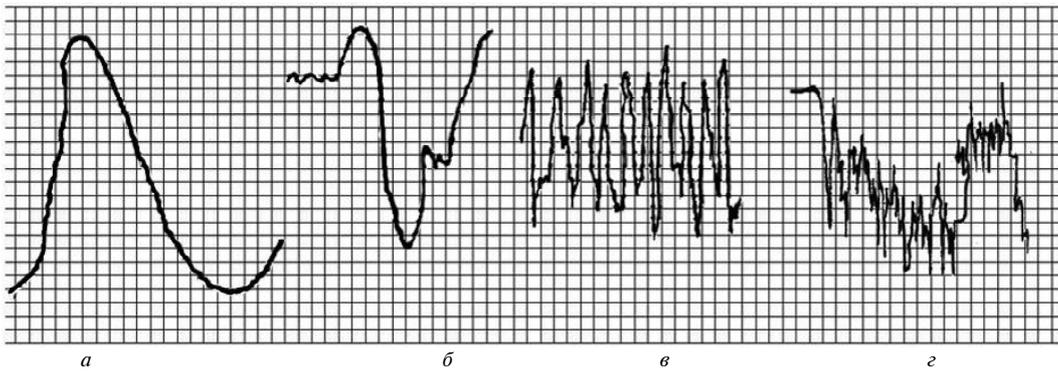


Рис. 6. Профилотграммы микронеровностей поверхности вала после черного (а), чистового точения (б), после шлифования (в) и обработки в ПСА (г)

Высота микронеровностей поверхностного слоя последовательно уменьшается от 5 мкм после черного точения, затем до 0,8...2,0 и 0,4...0,63 мкм при чистовом точении и шлифовании соответственно, а после последующей обработки в ПСА снижается до 0,30...0,37 мкм (рис. 6).

После обработки в ПСА на поверхности вала наблюдаются сжимающие остаточные напряжения – 350...400 МПа (рис. 7).

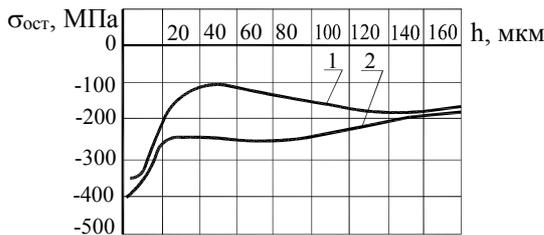


Рис. 7. Распределение осевых остаточных напряжений в поверхностном слое стенки вала:

1 – после Т+ПСА; 2 – после Т+Ш+ПСА

Исследования на усталость проводились при комнатной температуре по первой изгибной форме колебаний. База испытаний в соответствии с ОСТ 100870-77 $N = 20 \cdot 10^6$ циклов. За предел выносливости принят уровень напряжений, при котором шесть образцов выдержали базовое число циклов без образования трещины усталости. Результаты исследований образцов из валов КВД после различных вариантов обработки показаны в табл. 3.

Среднее значение предела выносливости изменяется в диапазоне от 320,0 до 360,0 МПа соответственно для Т+ПСА и Т+Ш+ПСА. Среднее отклонение $\Delta\sigma_{-1}$ находится в пределах от 2,0 до 4,0 %.

Выводы

1. В работе установлено, что отрицательное проявление технологической наследственности после механической обработки по серийной технологии изготовления тонкостенных валов из сплава ЭИ 437БУ-ВД характеризуется недостаточными

Таблица 3 – Результаты исследования вариантов обработки тонкостенного полого вала КВД из сплава ЭИ 437БУ-ВД

№ валов	Вариант обработки	Шероховатость, R_a , мкм	Остаточные напряжения, $\sigma_{ост \max}$, МПа	Среднее значение предела выносливости, σ_{-1} , МПа	Среднее отклонение, $\Delta\sigma_{-1}$, %
1	Одновременная двухсторонняя обработка наружных и внутренних поверхностей Т+ПСА двух.	$\frac{0,5}{0,55...0,60}$	$\frac{-390,0}{-410,0}$	320,0	$\frac{+4,0}{-2,0}$
2	Одновременная двухсторонняя обработка наружных и внутренних поверхностей Т+Ш+ПСА двух.	$\frac{0,30}{0,35...0,4}$	$\frac{-370,0}{-390,0}$	360,0	$\frac{+3,0}{-2,0}$

Примечание: 1. Т – токарная обработка; Ш – шлифование; ПСА – обработка в псевдосжиженном абразиве. 2. Данные в числителе – для наружной поверхности стенки вала; в знаменателе – для внутренней поверхности стенки вала.

уровнями пределов выносливости, длительной прочности, а также их значительной нестабильностью.

2. Низкий уровень предела выносливости, длительной прочности и разброс их значений обусловлены наличием в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, наклепа и микронеровностей несущих поверхностей и нестабильностью их значений.

3. Предложена технологическая схема одновременной двухсторонней полировально-упрочняющей обработки наружных и внутренних поверхностей пустотелых тонкостенных валов ГТД в ПСА с применением воздушных струй.

4. Показано, что обработка тонкостенных полых валов ГТД из сплава ЭИ 437БУ-ВД по схемам Т+Ш+ПСА и Т+ПСА повышает предел выносливости их стенок при меньшем значении рассеивания.

Список литературы

1. Богуслаев В. А. Финишные технологии обработки деталей ГТД / Богуслаев В. А., Качан А. Я., Мозговой В. Ф. // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 1. – С. 74–78.
2. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченков В. И. – Минск : Наука и техника. – 1977. – 256 с.
3. Качан А. Я. Математическое моделирование влияния технологической наследственности финишных методов обработки на предел выносливости деталей ГТД / Качан А. Я., Уланов С. А. // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 81–86.
4. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Валы ГТД. Часть IV. Монография / [Богуслаев В. А., Качан А. Я., Титов В. А. и др.] – Запорожье, АО «Мотор Сич». – 219 с.

Поступила в редакцию 21.01.2016

Качан О.Я., Уланов С.О. Вплив технологічних методів обробки тонкостінних порожнистих валів ГТД на їх несучу здатність

У роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу механічної обробки: точіння, шліфування і їх сполучення з фінішними операціями: електрохімічним поліруванням, обробкою в середовищі псевдозрідженого абразиву (ПЗА) на параметри якості поверхневого шару стінки вала та межю витривалості. Установлено раціональне сполучення технологічних операцій і їх послідовність, що забезпечують несучу здатність порожнистих валів КВТ зі сплаву ЭИ 437БУ-ВД.

Ключові слова: *межа витривалості, порожнистий вал, КВТ, залишкові напруження, шорсткість, мікроструктура, наклепаний шар, технологічні методи обробки.*

Kachan A., Ulanov S. Influence of processing technologies of thin-walled hollow shafts of gas turbine engine on their bearing capacity

The results of experimental study of influence of machining: turning, grinding and their combination with finishing operations: electromechanical polishing, machining in the medium of fluidized abrasive on quality characteristics of shaft wall layer and endurance limit, are given in the work. Efficient combination of processing procedures and their sequence, providing bearing capacity of HPC hollow shafts of ЭИ 437БУ-ВД alloy, is established.

Key words: *endurance limit, hollow shaft, HPC, residual stresses, roughness, microstructure, hammer-hardened layer, processing technologies.*