

УДК 621.452.3

А.Я. КАЧАН¹, В.А. ТИТОВ², В.Ф. МОЗГОВОЙ³, С.А. УЛАНОВ¹¹ Запорожский национальный технический университет, Запорожье,² Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев,³ АО «МОТОР СИЧ», Запорожье

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА НЕСУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛОВ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Представлены результаты экспериментальных исследований отделочно-упрочняющей обработки валов компрессоров ГТД алмазным выглаживанием и в псевдоожигенном абразиве с применением воздушных струй.

Ключевые слова: валы компрессора, алмазное выглаживание, обработка в псевдоожигенном абразиве, воздушные струи, предел выносливости, длительная прочность, шероховатость, микротвердость, микроструктура, остаточные напряжения.

Введение

Повышение надежности и ресурса наиболее ответственных деталей ГТД является важнейшей задачей современного авиадвигателестроения, так как от их эксплуатационных характеристик зависит эффективность авиационных силовых установок, и в целом, летательных аппаратов.

Формирование высоких эксплуатационных характеристик ответственных деталей ГТД на стадии их производства обеспечивается применением прогрессивных технологий формообразования несущих поверхностей. К параметрам качества несущих поверхностей деталей ГТД относят: шероховатость, волнистость, физико-механические свойства поверхностного слоя, остаточные напряжения, степень упрочнения, микроструктуру поверхностного слоя и др. [1, 2].

В процессе эксплуатации наиболее ответственные детали ГТД подвергаются циклическим нагрузкам, что приводит к их разрушению из-за усталости материала. Поэтому интегральной характеристикой качества этих деталей является предел выносливости, который является основной характеристикой усталости материала и зависит от применяемой технологии и технологической наследственности операций их изготовления [3].

Наиболее эффективными технологическими методами, обеспечивающими повышение сопротивления усталости материала деталей, являются финишные операции, которые формируют в поверхностном слое несущей поверхности оптимальное сочетание параметров качества.

При этом, в зависимости от конструкции деталей, их конструктивных параметров, применяемых материалов, эксплуатационных

факторов, воздействующих в процессе эксплуатации, и технологии их изготовления процессы формирования параметров качества их несущих поверхностей имеют свои технологические особенности.

Цель работы

Установить основные технологические особенности формирования параметров качества несущих поверхностей валов компрессоров ГТД алмазным выглаживанием и обработкой в псевдоожигенном абразиве, обеспечивающими повышение их выносливости.

Содержание и результаты исследований Алмазное выглаживание валов компрессоров ГТД

Валы ГТД работают в условиях высоких частот вращения (15000...45000 об/мин), циклических нагрузок и повышенных температур.

К валам ротора компрессора относятся: валы вентилятора, КНД, КСД, КВД, геометрические размеры которых соответственно: длина 2050...2840 мм, диаметр 240...300 мм; длина 240...1215 мм, диаметр 430...285 мм; длина 620...1650 мм; диаметр до \approx 480 мм; длина 195...500 мм; диаметр 280...595 мм.

Валы вентилятора, КНД, КСД изготавливаются из сплава Х12НМБФ-Ш (ЭП609-Ш), а валы КВД из сплавов Х77ТЮР-ВД (ЭИ437БУ-ВД), ХН73МБТЮ-ВД (ЭП698-ВД).

Конструктивными особенностями валов является то, что они являются полыми и тонкостенными. Минимальная толщина стенок $\delta_{ст} = 1,64, 0$ мм. Разностенность не более 0,1...0,2 мм. Шероховатость рабочих поверхностей валов $R_a = 0,8$ мкм, а посадочных мест подшипников – $R_a = 0,8...0,4$ мкм.

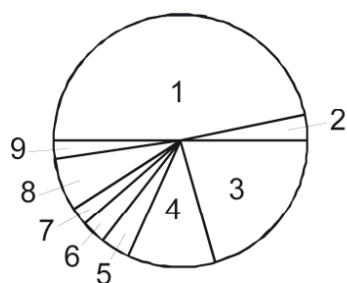
Заготовками валов являются полые штамповки, которые получают на КГШП и ротационной вытяжкой на горизонтально-раскатном стане.

Проявление технологической наследственности после механической обработки тонкостенных валов из сплава ЭИ437БУ-ВД характеризуется недостаточными уровнями пределов выносливости, а также их значительной нестабильностью как после каждой из этих операций, так и после проведения всего технологического цикла.

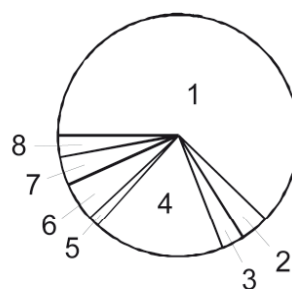
Низкий уровень эксплуатационных свойств валов и разброс их значений после выполнения основных технологических операций (точения, шлифования, ручного полирования) обусловлены наличием и нестабильностью значений в поверхностном слое растягивающих напряжений, наклепа и микронеровностей поверхности [4].

Наибольший вклад в повышение выносливости валов обеспечивается на финишных технологических операциях за счет формирования рационального сочетания параметров качества поверхностного слоя наружных и внутренних поверхностей их стенок. Наибольшее распространение получили методы финишной обработки валов алмазным выглаживанием и обработка свободным абразивом, находящимся в псевдооживленном состоянии, с применением воздушных струй.

Структура типовых технологических процессов и трудоемкости изготовления серийных валов роторов компрессора ГТД показана на рис. 1 [4].



1 – Токарные	– 45,9%
2 – Фрезерная	– 3,5%
3 – Сверлильные	– 23,6%
4 – Шлифовальные	– 14,4%
5 – Зубофрезерная	– 2,8%
6 – Слесарные	– 2,1%
7 – Полировальная	– 1,4%
8 – Упрочняющая	– 5,5%
9 – Прочие	– 0,8%



1 – Токарные	– 60,4%
2 – Шлифовальные	– 4,1%
3 – Притирочные	– 3,3%
4 – Сверлильные	– 20,7%
5 – Фрезерные	– 1,2%
6 – Полировальные	– 4,7%
7 – Слесарные	– 3,0%
8 – Прочие	– 2,6%

Рис. 1. Структура типовых технологических процессов и трудоемкости изготовления валов компрессора ГТД: а – вал ротора вентилятора; б – вал ротора КВД

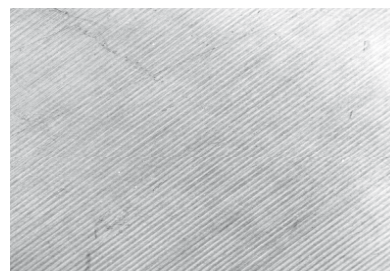
В процессе выглаживания образцов из стали Х12НМБФ-Ш алмазным наконечником с $R_{\phi} = 2,5$ мм шероховатость уменьшается от $R_a = 3,21,6$ мкм до $0,8 \geq R_a \geq 0,4$ мкм в диа-

пазоне подач $S = 0,080,15$ мм/об и усилия выглаживания $P = 100$ Н.

Поверхность фрагмента детали после алмазного выглаживания показана на рис.2 [5].



а



б

Рис. 2. Фактура поверхности фрагмента детали после алмазного выглаживания: а – наружная (×10); б – внутренняя (×10)

Распределение микротвердости на образцах сплава Х12НМБФ-Ш после алмазного выглаживания инструментом с $R_{\phi} = 2,5$ мм с усилием 150 Н и подачей $S = 0,15$ мм/об показано на рис. 3.

В процессе алмазного выглаживания, вследствие пластического деформирования, происходит дробление исходного зерна материала. Величина этой зоны достигает 40...60 мкм (рис. 4).

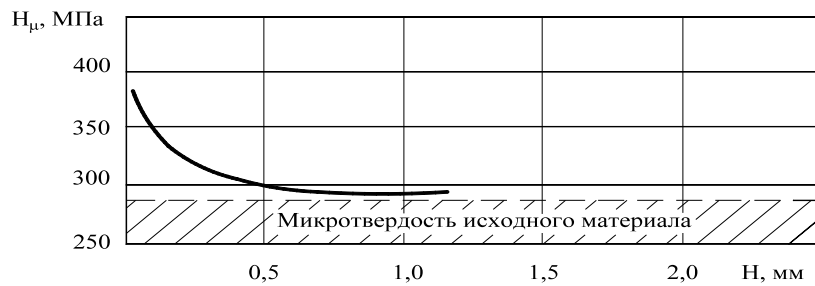


Рис. 3. Распределение микротвердости в поверхностном слое после алмазного выглаживания

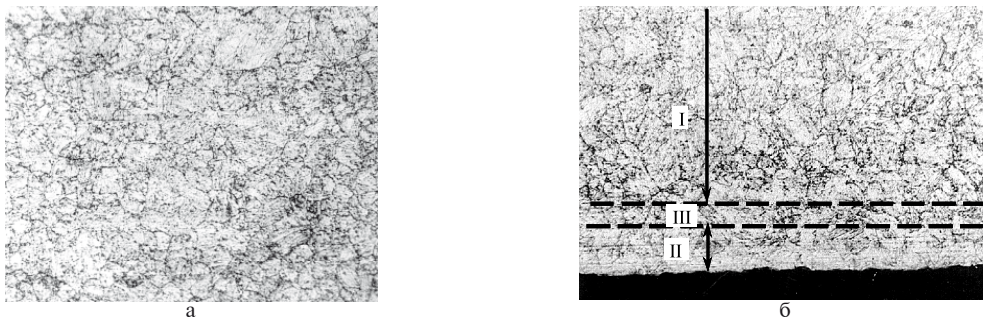


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя после алмазного выглаживания:

а – внутреннее сечение; б – область поверхностного слоя;
I – зона исходной структуры; II – зона дробления исходного зерна при пластической деформации;
III – переходная зона деформаций.

Режимы обработки $P = 100$ Н; $S = 0,08$ мм/об; $V = 63$ м/мин; $R_{\phi} = 2,5$ мм

После алмазного выглаживания формируются остаточные напряжения сжатия с глубиной распространения до 400...450 мкм (рис. 5).

Наибольший эффект упрочнения достигается на режимах, для которых предел выносливости составляет 470 МПа, что соответствует коэффициенту упрочнения $\gamma = 1,57$ (табл. 1)

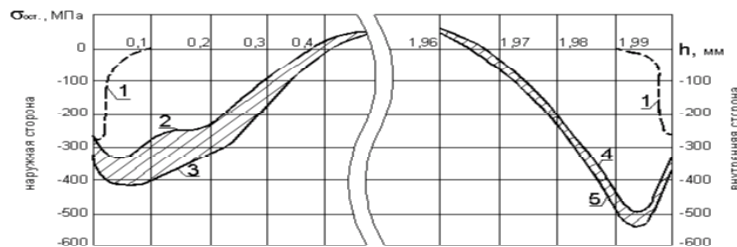


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по толщине стенки фрагмента детали ($\delta = 2$ мм):

1 – для шлифованных наружной и внутренней поверхностей;
2,3 – границы изменения остаточных напряжений на наружной стороне;
4,5 – границы изменения остаточных напряжений на внутренней стороне

$$\gamma = \frac{\sigma_{-1упр}}{\sigma_{-1}}$$

где $\sigma_{-1упр}$ и σ_{-1} – пределы выносливости упроч-

ненного и исходного материала деталей соответственно.

Зависимость коэффициента упрочнения от усилия алмазного выглаживания на базе $N_p = 10^7$ циклов представлена на рис. 6.

Таблица 1

Зависимость предела выносливости от режимов алмазного выглаживания образцов из стали Х12НМБФ-Ш

Вид обработки	Режимы обработки				σ_{-1} , МПа	Коэффициент упрочнения, γ
	S, мм/об	P, Н	V, м/мин	Количество проходов, K		
Шлифование	—	—	—	—	300	1,0
Алмазное выглаживание	0,15	100	150,8	2	430	1,43
	0,15	150	150,8	1	470	1,57
	0,08	100	226,1	2	470	1,57

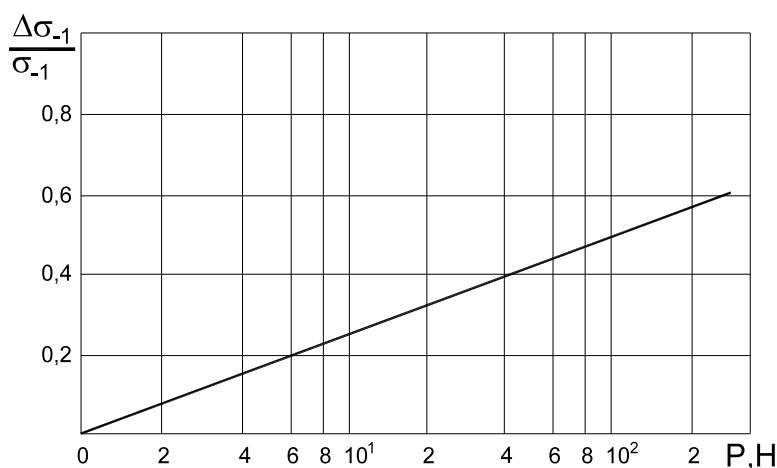


Рис. 6. Зависимость повышения предела выносливости от усилия алмазного выглаживания

Полировально-упрочняющая обработка пустотелых валов КВД ГТД свободным абразивом

Процесс одновременной двухсторонней обработки наружных и внутренних поверхностей стенок пустотелых валов стандартным свободным абразивным зерном можно представить в виде модели, согласно которой наружные поверхности стенки вращающегося пустотелого вала 2 обрабатываются в псевдооживленном («кипящем») слое абразива 1, а внутренние — той же абразивной средой 3, поступающей в полость вала из «кипящего» слоя и вращающейся вместе с валом, при воздействии на нее воздушными струями из сопел 4 (рис. 7).

Результаты экспериментальных исследований отделочно-упрочняющей обработки пустотелых валов КВД ГТД в псевдооживленном слое абразива представлены в табл. 2.

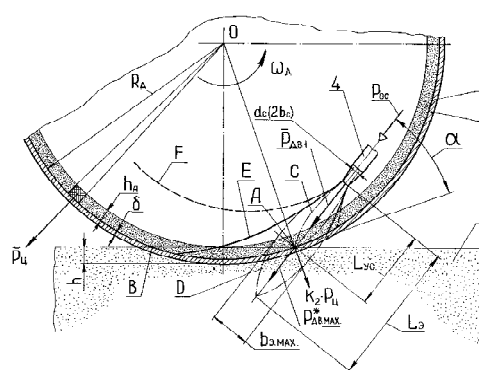


Рис. 7. Модель процесса одновременной двухсторонней обработки поверхностей стенок пустотелых валов 1 – «кипящий» слой абразива; 2 – обрабатываемый вал; 3 – абразивная среда в полости вращающегося вала; 4 – воздушное сопло; С – эффективная ширина струи, истекающей в неограниченное пространство, при давлении $P_{ос,р}$ перед соплом; D – эффективная ширина струи, истекающей в неограниченное пространство, при давлении $P_{ос,р}$ перед соплом; E – эффективная ширина деформированной струи, натекающей на обрабатываемую поверхность, при давлении $P_{ос,р}$ перед соплом; F – внешняя граница деформированной струи, натекающей на обрабатываемую поверхность, при давлении $P_{ос,р}$ перед соплом

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований шероховатости поверхности образцов из валов КВД (материал валов – сплав ЭИ 437БУ-ВД), остаточных напряжений и испытаний на усталость

Вариант обработки	Удаленный припуск, $\Delta\delta$, мкм	Шероховатость, R_a , мкм	Остаточные напряжения, $\sigma_{\max}^{\text{ост}}$, МПа	Предел выносливости, σ_{-1} , МПа
1.Т	--	2,0/2,0	+250,0/+250,0	260,0
2.Одновременная двухсторонняя обработка наружных и внутренних поверхностей Т+ПСА	18,0/17,0	0,5/0,550,60	-390,0/-410,0	320,0
3.Т+Ш		0,5/0,5	-190,5/-150,0	280,0
4.Одновременная двухсторонняя обработка наружных и внутренних поверхностей Т+Ш+ПСА	7,0/6,0	0,3/0,3550,4	-370,5/-390,0	360,0

Примечания: 1.Т – токарная обработка; Ш – шлифование; ПСА – обработка в псевдооживленном абразиве;

2.Данные в числителе – для наружной поверхности стенки вала, в знаменателе – для внутренней поверхности.

Распределение осевых остаточных напряжений по толщине стенки ($h_{\text{ст.}} = 1,8$ мм) вала из сплава ХН77ТЮР-ВД показано на рис. 8.

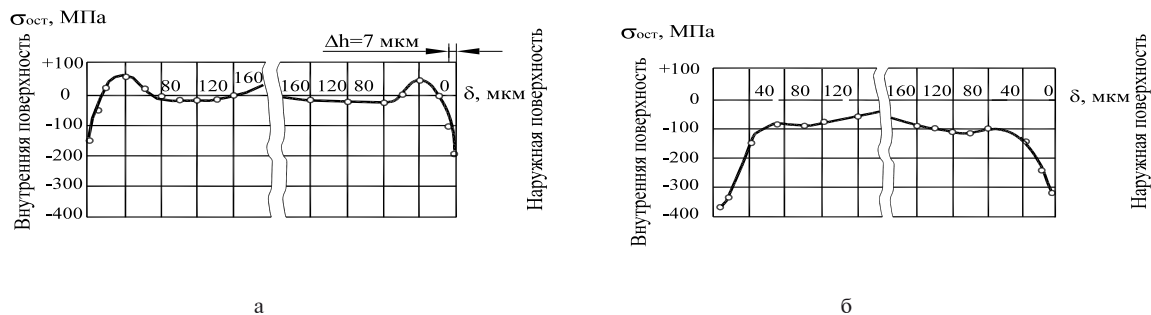


Рис. 8. Распределение осевых остаточных напряжений по толщине стенки ($h_{\text{ст.}} = 1,8$ мм) вала из сплава ХН77ТЮР-ВД:

а – после операций точения + шлифования (Т+Ш): $R_a^{\text{исх}} = 0,5...0,6$ мкм;

б – после одновременного двухстороннего полирования наружной и внутренней шлифованных поверхностей

($R_a^{\text{исх}} = 0,5...0,6$ мкм): $R_a = 0,300,4$ мкм; $\sigma_{-1} = 360,0$ МПа. Условия обработки: время обработки – $t = 15,0$ мин,

$V_d = 23,0$ м/с; абразивное зерно 14А40; $h_a = 15,0$ мм; $L_{y.c.} = 60,0$ мм; $b_c = 1,0$ мм; $\alpha = 25^\circ$; $R_{\text{ос.п}}^{\text{изб}} = 0,17$ МПа

Остаточные напряжения сжатия распространяются на глубину 160...200 мкм.

Предел выносливости материала валов после Т+ПСА составляет $\sigma_{-1} = 320$ МПа, а после (Т+Ш +ПСА) – $\sigma_{-1} = 360$ МПа. При этом, повышение предела выносливости после Т составляет $\approx 23\%$, а после (Т+Ш) – $\approx 28\%$ в сравнении с их исходными значениями соответственно 260 МПа и 280 МПа.

Результаты исследований влияния различных вариантов обработки валов КВД из сплава ЭИ437БУ-ВД на уровень механических свойств ($\sigma_B, \sigma_S, \delta$) и длительную прочность образцов из валов показывают, что после операций Т+ПСА и Т+Ш+ПСА уровень их выше, чем образцов из валов, обработанных по серийной технологии (Т, Т+Ш) (табл. 3).

Механические свойства и длительная прочность в зависимости от вида обработки

Вид обработки	Механические свойства при T = 25 °C			Длительная прочность, τ		
	σ _B , МПа	σ _S , МПа	δ, %	σ, МПа	T, °C	τ, час
Т	1052,0	677,0	24,0	750	550	230
	1064,0	669,0	25,6	750	550	322
Т+Ш	1050,0	679,0	24,8	750	550	550
	1072,0	670,0	28,8	750	550	250
Т+ПСА	1084,0	700,0	31,5	750	550	350
	1073,0	691,0	29,5	750	550	315
Т+Ш+ПСА	1089,0	710,0	32,0	750	550	372
	1080,0	700,0	30,5	750	550	340
Нормы 36ТУ-77	≥ 1000	≥ 680	≥ 13	750	550	≥ 300

Примечание. Материал – сплав ЭИ 437БУ-ВД; Т – точение;

Ш – шлифование; ПСА – обработка в псевдооживленном абразиве.

Заклучение

Но основе проведенных исследований и полученных результатов установлены основные технологические особенности формирования параметров качества несущих поверхностей валов компрессоров ГТД.

Наиболее эффективными методами отделочно-упрочняющей обработки пустотелых тонкостенных валов компрессоров являются алмазное выглаживание и обработка в псевдооживленном слое абразива с применением воздушных струй.

Литература

1. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / Сулима А.М., Евстегнеев М.И. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.

2. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. – М.: Машиностроение, 1988. – 273 с.

3. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.

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», 2014. – 291 с.

5. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением. Монография. / [Богуслаев В.А., Титов В.А., Качан А.Я. и др.] – Запорожье, АО «МОТОР СИЧ», 2012. – 236 с.

Поступила в редакцию 20.06.2014

О.Я. Качан, В.А. Титов, В.Ф. Мозговий, С.О. Уланов. Технологічні особливості формування параметрів якості несучих поверхонь валів компресорів ГТД

Представлено результати експериментальних досліджень обробно-зміцнювальної обробки валів компресорів ГТД алмазним вигладжуванням і в псевдозрідженому абразиві із застосуванням повітряних струменів.

Ключові слова: вали компресора, алмазне вигладжування, обробка в псевдозрідженому абразиві, повітряні струмені, границя витривалості, тривала міцність, шорсткість, мікротвердість, мікроструктура, залишкові напруги.

A.Ya. Kachan, V.A. Titov, V.F. Mozgovoy, S.A. Ulanov. Technological aspects of quality parameters configuration for load-bearing surfaces of gas-turbine engine compressor shafts

Presented are the results of experimental investigations of finishing-and-strengthening treatment of gas-turbine engine compressor shafts by diamond smoothing and by processing in abrasive fluidized bed with the use of air jets.

Key words: compressor shafts, diamond smoothing, processing in abrasive fluidized bed, air jets, durability limit, long-time strength, surface roughness, microhardness, microstructure, residual voltages.