

УДК 621.431.75

Качан А. Я.  
Уланов С. А.  
Березовский Е. К.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Эффективным способом обеспечения несущей способности деталей ГТД является упрочнение их несущих поверхностей поверхностным пластическим деформированием (ППД) [1].

Важной задачей при проведении ППД деталей ГТД является обеспечение точности геометрических размеров и параметров поверхностного слоя их несущих поверхностей, поскольку они в условиях эксплуатации двигателя определяют его ресурс и надежность [2].

Широкое распространение при ППД валов, рабочих лопаток компрессора, дисков, зубчатых колес, которые являются основными деталями авиационных двигателей, получили следующие методы обработки: алмазное выглаживание и ультразвуковое упрочнение стальными шариками [3, 4].

Цель работы – на базе результатов экспериментальных исследований упрочнения ППД определить влияние технологического обеспечения алмазного выглаживания и ультразвукового упрочнения на несущую способность валов и рабочих лопаток компрессора.

Для ППД полых тонкостенных валов ГТД применяют алмазное выглаживание, которое позволяет обрабатывать как наружные, так и внутренние их поверхности.

В процессе алмазного выглаживания происходит холодное пластическое деформирование поверхностного слоя деталей под действием усилия  $P_y$ , которое прикладывается к деформирующему инструменту (рис. 1).

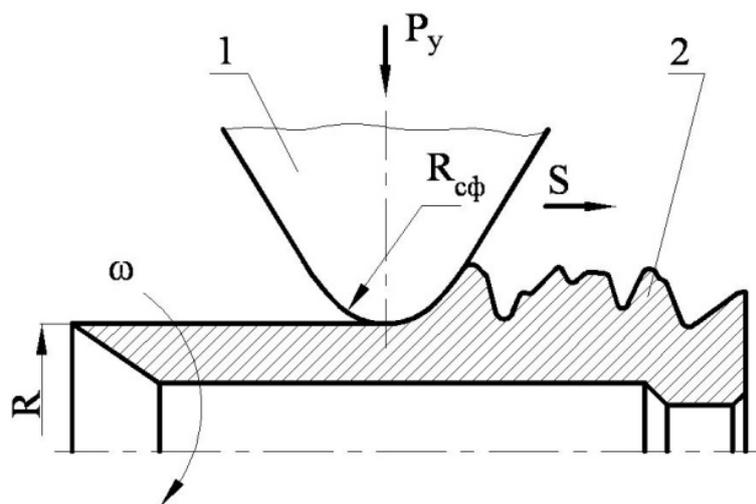


Рис. 1. Схема алмазного выглаживания:

1 – алмазный наконечник; 2 – вал;  $\omega$  – частота вращения детали; S – продольная подача;  $P_y$  – усилия прижима;  $R_{сф}$  – радиус сферы алмазного наконечника; R – радиус обрабатываемой поверхности детали

Одним из наиболее распространенных способов является обработка алмазным выглаживанием с закреплением инструмента в упругих оправках, где усилие  $P_y$  задается за счет упругой деформации самой оправки или с помощью пружины, тарированной в диапазоне от 50 до 400 Н. Отсчет усилия  $P_y$  проводится по индикатору [2].

Основными режимами и условиями обработки при алмазном выглаживании являются: подача инструмента,  $S$ , мм/об; скорость выглаживания,  $V = \omega \cdot R$ , м/с; усилие прижима,  $P_y$ , Н; использование смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

Основными контролируруемыми параметрами качества поверхности обрабатываемой детали является:

- шероховатость поверхности;
- форма микрорельефа;
- механическое состояние поверхностного слоя (глубина упрочнения и остаточные напряжения);
- предел выносливости.

Фактура поверхности фрагмента вала после шлифования с последующим выглаживанием внутренней и наружной поверхностей представлена на рис. 2 [3].

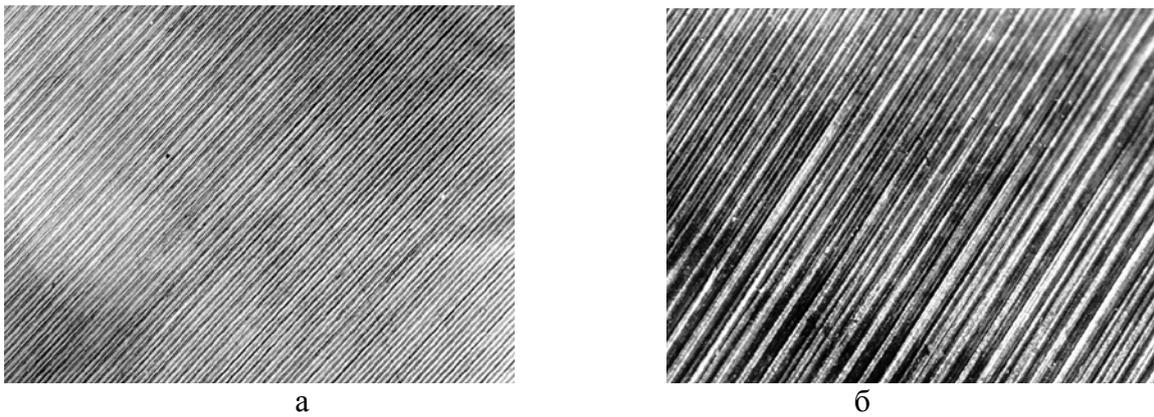


Рис. 2. Фактура поверхности фрагмента вала после алмазного выглаживания: а – наружная (x10); б – внутренняя (x10)

Шероховатость поверхности изменяется в диапазоне от исходной  $R_a = 3,2 \dots 1,6$  мкм до  $R_a = 0,8 \dots 0,4$  мкм при режимах выглаживания, которые не допускают вибрации инструмента.

Микроструктура материала образцов после алмазного выглаживания показана на рис. 3.

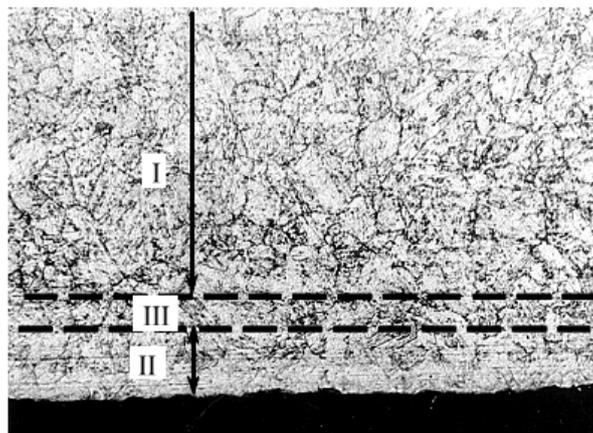


Рис. 3. Микроструктура материала образцов, обработанная алмазным выглаживанием:

I – зона исходной структуры; II – зона дробления исходного зерна при пластической деформации; III – переходная зона деформации. Режимы обработки:  $P = 100$  Н;  $S = 0,08$  мм/об;  $V = 63$  м/мин; число проходов – 1;  $R_{сф} = 2,5$  мм

Максимальная микротвердость наблюдается в слоях, близких к поверхности детали, и по мере удаления от поверхности уменьшается до величины, превышающей исходную микротвердость на 5...8 % (рис. 4).

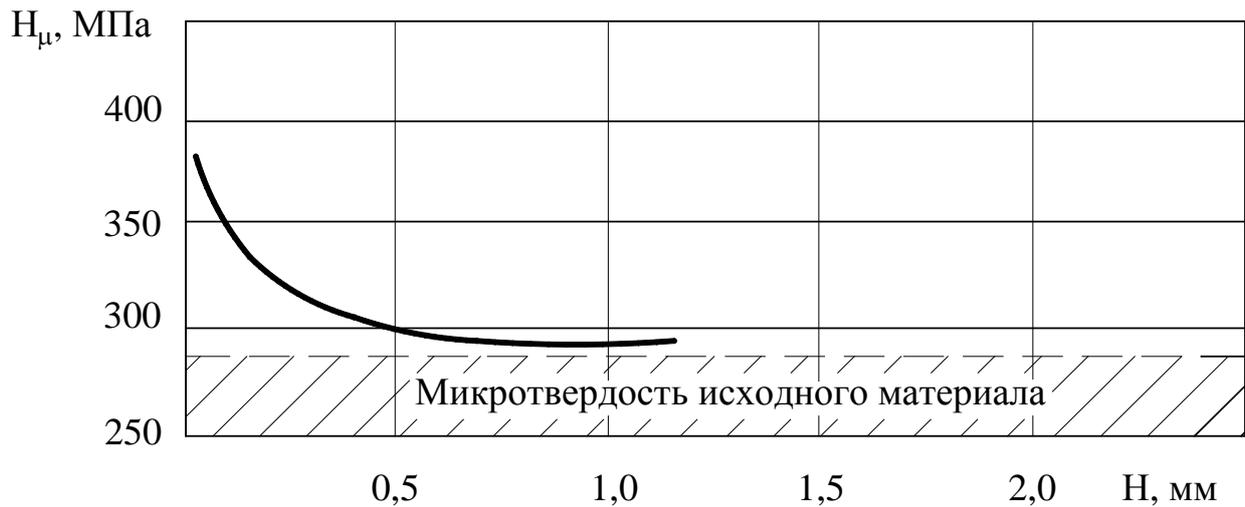


Рис. 4. Распределение микротвердости на образцах сплава X12NMБФ-III после алмазного выглаживания с усилием  $P_y = 150$  Н и продольной подачей  $S = 0,08$  мм/об

После алмазного выглаживания в поверхностном слое детали формируются остаточные напряжения сжатия, по величине превышающие остаточные напряжения после шлифования в 1,5...2,0 раза (рис. 5).

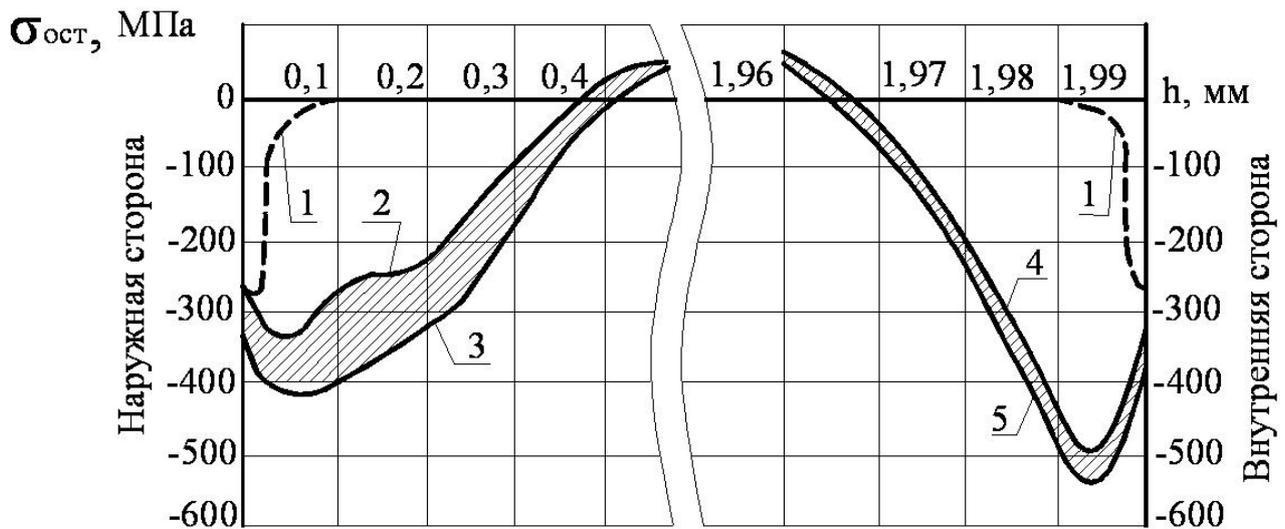


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по толщине стенки детали ( $\delta = 2$  мм):

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

Влияние алмазного выглаживания образцов из сплава X12NMБФ-III, вырезанных из натурального вала, на величину предела выносливости для различных параметров технологических режимов оценивали на базе испытаний  $N = 10^7$  с помощью коэффициента упрочнения

$$\gamma = \sigma_{-1упр} / \sigma_{-1},$$

где  $\sigma_{-1упр}$  и  $\sigma_{-1}$  – пределы выносливости упрочненного и исходного материала деталей соответственно (табл. 1) [3].

Таблица 1

Зависимость предела выносливости от технологических режимов обработки образцов из стали Х12НМБФ-Ш

Вид обработки материала	Технологические режимы обработки				$\sigma_{-1}$ , МПа	$\gamma$
	S, мм/об	P, Н	V, м/мин	Количество проходов, К		
Шлифование	-	-	-	-	300	1,0
Алмазное выглаживание	0,15	100	150,8	3	430	1,43
	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
	0,15	50	150,8	1	420	1,40
	0,13	100	59,4	1	400-420	1,33-1,40
	0,21	100	150,8	1	350-360	1,17-1,20

Наибольший эффект упрочнения достигнут при обработке по режимам (см. табл. 1), для которых предел выносливости составляет 470 МПа, что соответствует  $\gamma = 1,57$ .

Установка ультразвукового упрочнения ППД рабочих лопаток компрессора состоит из ультразвукового генератора, магнитострикционного преобразователя, сменных волноводов, устройства для закрепления магнитострикционного преобразователя, рабочего стола для установки технологического оснащения, обрабатываемых деталей и звукоизолирующего кожуха (рис. 6) [4].

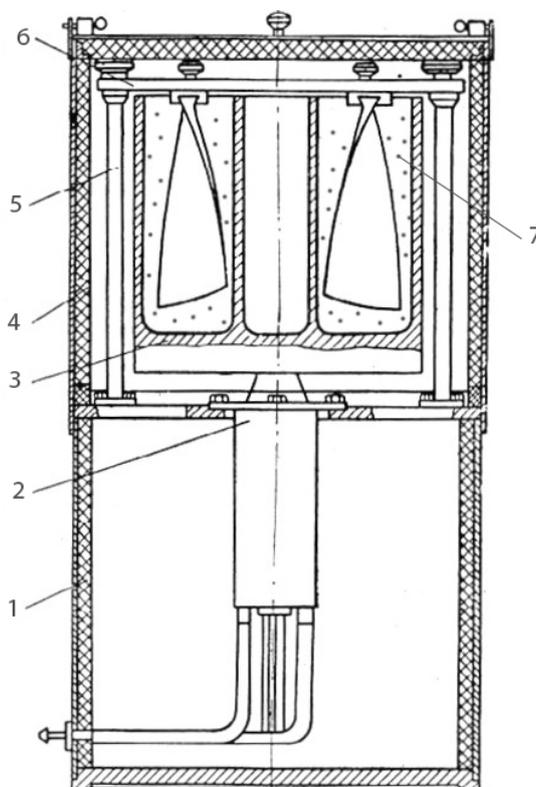


Рис. 6. Установка для ультразвукового деформационного упрочнения лопаток:

1 – основание; 2 – ПМС15А-18; 3 – волновод; 4 – шумоглушающий кожух с крышкой; 5 – штанги; 6 – технологический фланец; 7 – стальные шарики

После ультразвукового упрочнения пера лопаток из титанового сплава ВТ8М наблюдается шероховатость  $R_a = 0,36 \dots 0,42$  мкм, а микротвердость на поверхности пера находится в диапазоне от 4150 до 4320 МПа при исходной микротвердости в сердцевине 3750...3800 МПа, что свидетельствует о неоднородности исходных характеристик поверхностного слоя пера лопаток, сформированных на предыдущих технологических операциях их изготовления.

Ультразвуковое деформационное упрочнение пера лопаток КНД III ступени стальными шариками приводит к образованию структурной неоднородности, что связано с большей степенью деформации поверхности кромки при упрочнении (рис. 7).

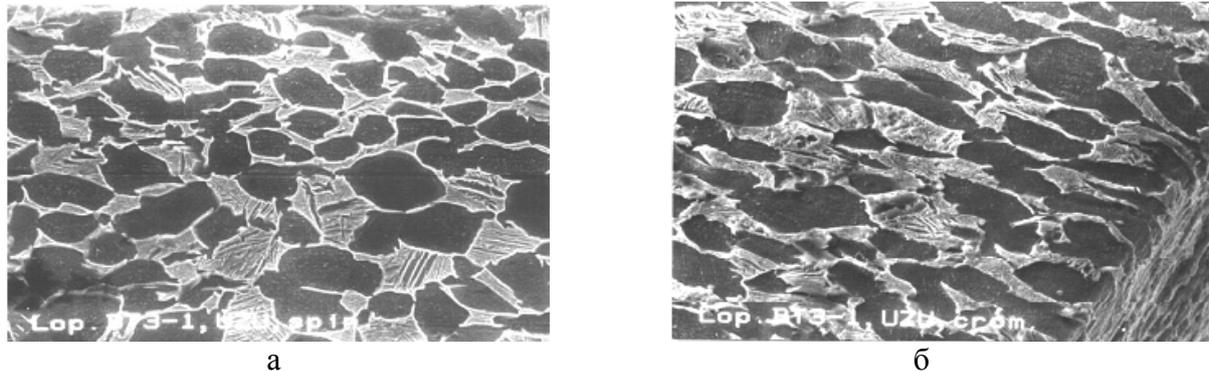


Рис. 7. Микроструктура поверхностного слоя пера лопаток компрессора после УЗУ: а – на поверхности спинки,  $\times 2000$ ; б – на поверхности кромки пера,  $\times 2000$

Остаточные напряжения определили после ультразвукового упрочнения лопаток I ступени КВД из сплава ВТ8. Диаметр шариков – 1,6 и 2,4 мм. Состав смеси 50х50%; продолжительность обработки – 10 мин. Масса шариков – 400 г.

В поверхностном слое пера наблюдаются остаточные напряжения сжатия от 400 до 440 МПа с глубиной распространения – 92...130 мкм (рис. 8) [1].

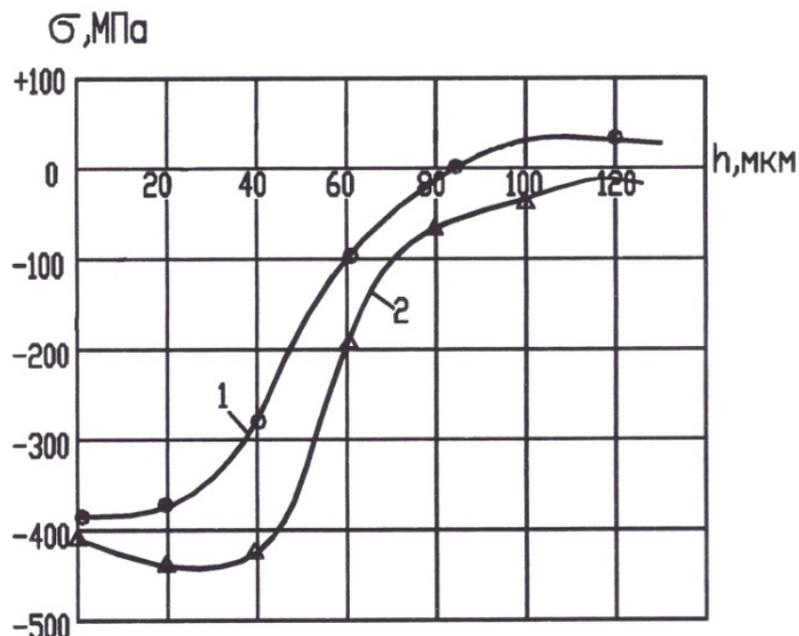


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений на поверхности пера лопаток I ст. КВД из сплава ВТ8 после:

1 – УЗУ/ I = 35...40 мА/; 2 – УЗУ/ I = 55...60 мА/

Исследование влияния ультразвуковой упрочняющей обработки на базе  $10^8$  циклов на сопротивление усталости лопаток III ступени КНД двигателя Д-36 показали, что метод обеспечивает их предел выносливости в диапазоне от 500 до 650 МПа.

### ВЫВОДЫ

Представленные экспериментальные исследования методов поверхностного пластического деформирования несущих поверхностей валов и рабочих лопаток компрессора ГТД показали, что при обработке валов наиболее эффективным является статический способ – алмазное выглаживание, а для рабочих лопаток компрессора – динамический способ – ультразвуковое упрочнение с применением стальных шариков.

Установлены диапазоны режимных параметров и технологические условия обработки указанных деталей для каждого из способов поверхностно-пластического деформирования, в пределах которых обеспечивается их высокая несущая способность.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД: монография / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.*
2. *Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением : монография / В. А. Богуслаев, В. А. Титов, А. Я. Качан [и др.]. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2012. – 236 с.*
3. *Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Валы ГТД. Часть IV : монография / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, В. А. Титов [и др.]. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2014. – 291 с.*
4. *Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I : монография / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк [и др.]. – Запорожье : АО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.*

### REFERENCES

1. *Otdelochno-uprochnjajushhaja obrabotka detalej GTD: monografija / V. A. Boguslaev, V. K. Jacenko, P. D. Zhemanjuk [i dr.]. – Zaporozh'e : AO «Motor Sich», 2005. – 559 s.*
2. *Formirovanie poverhnostnogo sloja detalej vyglazhivaniem s ul'trazvukovym nagruzheniem : monografija / V. A. Boguslaev, V. A. Titov, A. Ja. Kachan [i dr.]. – Zaporozh'e : AO «Motor Sich», 2012. – 236 s.*
3. *Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej GTD. Valy GTD. Chast' IV : monografija / V. A. Boguslaev, A. Ja. Kachan, V. A. Titov [i dr.]. – Zaporozh'e : AO «Motor Sich», 2014. – 291 s.*
4. *Tehnologicheskoe obespechenie jekspluatacionnyh harakteristik detalej GTD. Lopatki kompressora i ventiljatora. Chast' I : monografija / V. A. Boguslaev, F. M. Muravchenko, P. D. Zhemanjuk [i dr.]. – Zaporozh'e : AO «Motor Sich», 2003. – 396 s.*

Качан А. Я. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ЗНТУ;  
Уланов С. А. – лаборант ЗНТУ;  
Березовский Е. К. – аспирант ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: vd@zntu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 26.09.2015 г.