

## II ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.515.5-2

Канд. техн. наук Г. В. Пухальская<sup>1</sup>, И. Л. Гликсон<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук О. Л. Лукьяненко<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет, <sup>2</sup>ОАО «Мотор Сич»; г. Запорожье

### ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ШАРИКАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

*Исследовано влияние режимов обработки лопаток компрессора из титановых сплавов стальными шариками в магнитном поле на формирование характеристик поверхностного слоя. Установлена возможность формирования благоприятной эюры остаточных напряжений сжатия, степени наклепа, шероховатости поверхностного слоя путем подбора параметров режима обработки. В ходе проведенных исследований установлен оптимальный режим, который обеспечивает наиболее благоприятное сочетание характеристик поверхностного слоя.*

**Ключевые слова:** лопатка, магнитное поле, остаточные напряжения, шероховатость, наклеп.

#### Введение

Практика эксплуатации двигателей показывает [1, 2], что преждевременное разрушение лопаток обычно носит усталостный характер. Лопатки компрессора чаще всего обрываются в корневом сечении пера. В большинстве случаев усталостные разрушения лопаток вызываются изгибными колебаниями первой формы. Наличие и уровень переменных напряжений в лопатках ГТД связан с резонансными колебаниями, которые вызываются действием на лопатки переменных усилий как по величине, так и по направлению. Статистические исследования разрушений деталей двигателей показывают [3], что около 80 % разрушений составляют разрушения от усталости.

Вертолетные ГТД эксплуатируются в условиях повышенной запыленности на грунтовых площадках аэродромов, в пустынях, что приводит к повышенному износу рабочих лопаток компрессора и досрочному снятию деталей. Наибольший износ лопаток происходит по входной и выходной кромкам пера, по периферии, так как на периферии скорость газообразного потока наиболее велика [4]. Анализ компрессоров двигателей показал, что I ступень существенно отличается по количеству лопаток, имеющих забоины, от остальных ступеней. Лопатки с повреждениями глубиной не менее 0,3...0,5 мм равномерно распределены на всех ступенях компрессора, кроме первой, где забоин примерно в 4 раза больше, чем на любой последующей ступени [5].

Сопrotивление усталости многих деталей определяется прочностью поверхностного слоя. Поэтому проблема формирования поверхностного слоя детали с высокой несущей способностью должна решаться уже на стадии проектирования конструкции, а затем при разработке технологического процесса [6].

Одним из сравнительно простых и эффективных методов оптимизации свойств поверхностного слоя деталей является поверхностное пластическое деформирование (ППД), позволяющее при минимальных затратах повысить сопротивление усталости [7]. Применяемые в настоящее время методы поверхностного упрочнения лопаток ГТД имеют свои преимущества и недостатки, существенно отличаясь друг от друга способом упрочняющего воздействия и эффективностью [7–9]. Подбирая оптимальный режим упрочняющей обработки, можно формировать поверхностный слой с заданными параметрами. Наиболее сложным является выбор оптимальных режимов при обработке лопаток компрессора из титановых сплавов – сложная геометрия поверхности пера лопаток, тонкие кромки, необходимость достижения оптимального распределения остаточных напряжений как на поверхности пера, так и по глубине.

В работе [10] было исследовано влияние обработки лопаток компрессора из титановых сплавов стальными шариками в магнитном поле на параметры поверхностного слоя; установлено формирование благоприятных характеристик поверхностного слоя по сравнению

с лопатками, упрочненными по серийной технологии: существенное снижение параметров шероховатости, повышение микротвердости, формирование благоприятной эпюры остаточных напряжений сжатия.

Изучению влияния режимов обработки лопаток из титановых сплавов стальными шариками в магнитном поле на формирование характеристик поверхностного слоя посвящена данная работа.

### Методика проведения экспериментов

Целью работы являлось изучение влияния режимов обработки лопаток из титановых сплавов стальными шариками в магнитном поле на формирование характеристик поверхностного слоя.

В качестве объекта исследований выбраны лопатки I ступени компрессора двигателя ТВ3-117 из титанового сплава BT8, имеющие наработку в эксплуатации. Для устранения влияния эксплуатационных воздействий лопатки отожгли в вакууме ( $3,32 \pm 0,05$ )  $10^{-3}$  Па при температуре ( $900 \pm 3$ ) °С в течение трех часов. После отжига лопатки обработаны виброполированием по серийной технологии (лопатка Б17).

Состояние поверхностного слоя лопаток при различных режимах обработки исследовалось путем определения микротвердости, шероховатости и остаточных напряжений. Измерение параметров Ra и Rz выполняли с помощью профилометра «Pertometer M3» вдоль оси и хорды пера лопатки. Замеры микротвердости производили на приборе ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду 1 Н. Величину микротвердости определяли как среднее значение по десяти отпечаткам правильной формы. Степень наклепа рассчитывали по формуле [11]:

$$U_n = \frac{H_{\mu\max} - H_{\mu\text{исх}}}{H_{\mu\text{исх}}} \times 100 \%,$$

где  $H_{\mu\max}$  – микротвердость исследуемой поверхности, МПа;  $H_{\mu\text{исх}}$  – микротвердость поверхности эталона.

Исследование остаточных макронапряжений на пере лопаток производили механическим методом, разработанным акад. Н. Н. Давиденковым с использованием формул из работы [12] для построения эпюр и прибора ПИОН-2.

### Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния режимов упрочнения на формирование остаточных напряжений была разработана матрица планирования эксперимента. Варьировалось время обработки, величина магнитной индукции и частота колебаний лопатки вдоль оси пера. На опытно-промышленной установке было проведено упрочнение восьми партий по 3 лопатки в каждой. Режимы обработки приведены в табл. 1.

На формирование остаточных напряжений исследовано влияние: времени обработки – режимы 1, 2, 3; частоты колебаний лопатки вдоль оси пера – режимы

5, 6; индукции магнитного поля – режимы 1, 4. Выполнена оценка стабильности обработки по режиму 1 – лопатки Б10 и Б11.

Так как эксплуатация лопаток не допускает нарушения геометрии пера в процессе обработки, был произведен контроль обработанных лопаток на приборе ПОМКЛ-4 в различных сечениях. Результаты измерений показали стабильность геометрических параметров профиля пера лопаток, обработанных стальными шариками в магнитном поле.

**Таблица 1** – Режимы обработки лопаток стальными шариками  $\varnothing 1,6$  в магнитном поле

Параметры режима обработки				
Обозначение режима обработки	Номер лопатки	$B$ , Тл	$\nu$ , Гц	$\tau$ , мин
1	Б10, Б11, Б1	0,28	15	20
2	Б8, Б2, Б3	0,28	15	30
3	Б9, Б4, Б5	0,28	15	40
4	Б12, Б6, Б13	0,4	15	20
5	Б7, Б14, Б16	0,46	10	20
6	Б15, Б19, Б20	0,46	15	20

*Примечание:* сечение магнитопровода – усеченный конус, с меньшим диаметром 6 мм;  $B$  – индукция магнитного поля в рабочей зоне электромагнита при отсутствии шариков, Тл;  $\nu$  – частота колебаний лопатки вдоль оси пера, Гц с амплитудой 29 мм;  $t$  – время обработки, мин. При обработке лопаток дополнительно возбуждали колебания лопатки в направлении хорды с частотой 1 Гц.

Поскольку остаточные сжимающие напряжения и характер их распределения в поверхностном слое косвенно характеризуют сопротивление усталости лопаток, из каждой партии лопаток для исследований остаточных напряжений было отобрано по одной лопатке. С помощью механического метода были определены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя спинки лопаток (рис. 1–3).

Как видно из рис. 1, наибольший уровень и глубина остаточных напряжений сжатия 430 МПа (лопатка Б8) при обработке лопаток 30 минут; увеличение времени упрочнения до 40 минут (лопатка Б9) приводит к уменьшению величины и уровня остаточных напряжений сжатия вследствие возможного перегрева тонкого поверхностного и частичной релаксации остаточных напряжений сжатия.

Из рис. 2 видно, что увеличение частоты колебаний лопатки вдоль оси пера приводит к увеличению уровня остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое лопаток.

Из рис. 3 видно, что увеличение индукции магнитного поля с 0,28 до 0,4 Тл приводит к уменьшению поверхностных остаточных напряжений сжатия.

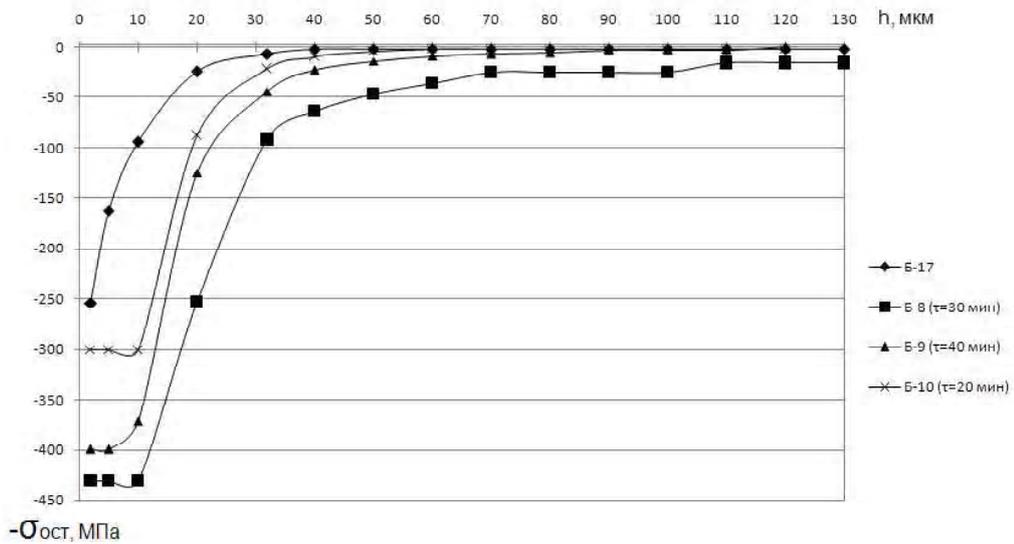


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток: влияние времени обработки

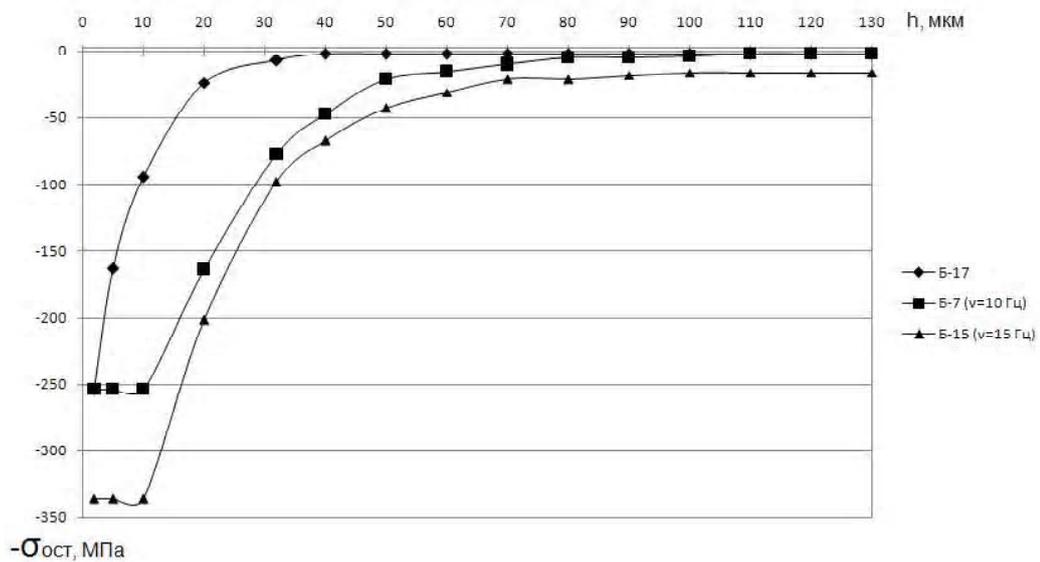


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток: влияние частоты колебаний лопатки вдоль оси пера

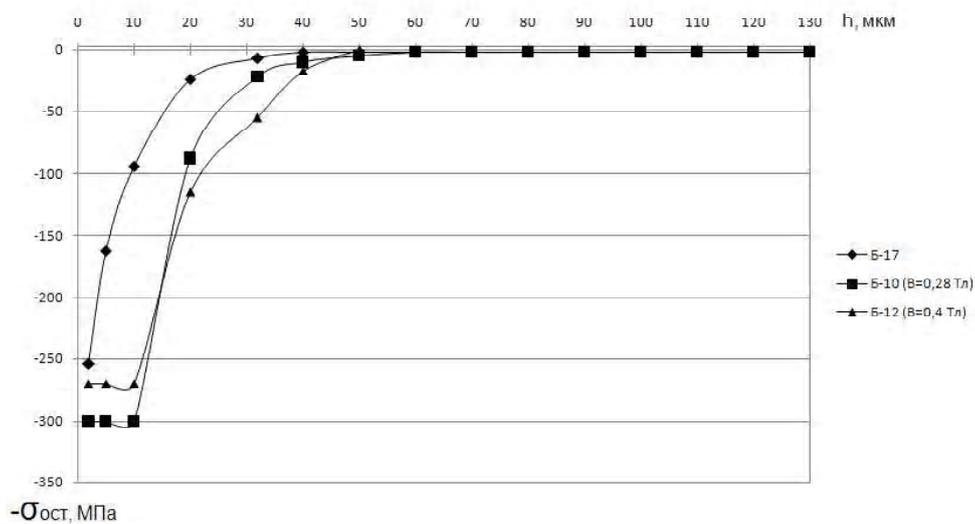


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток: влияние индукции магнитного поля

Оценка стабильности обработки проверена на лопатках Б10 и Б11, упрочненных по режиму 1. Как видно из рис. 4, эпюры остаточных напряжений лопаток практически совпадают; следовательно на опытно-промышленной установке обеспечивается стабильный процесс обработки.

Микрорельеф поверхности пера лопатки является одной из характеристик поверхностного слоя, оказывающих влияние на сопротивление усталости.

В табл. 2 представлены результаты измерений параметров шероховатости после обработки лопаток на различных режимах.

На лопатках, обработанных по режимам № 1 (Б10), № 2 (Б8), № 3 (Б9) и № 6 (Б15) на спинке и по корытцу вдоль оси и вдоль хорды отмечены сниженные параметры шероховатости.

На лопатках (Б7), обработанных по режиму № 5, наблюдаются увеличенные параметры шероховатости на спинке вдоль оси и вдоль хорды; на лопатках (Б12), об-

работанных по режиму № 4, – вдоль хорды на спинке и вдоль оси по корытцу.

При визуальном осмотре на лопатках, обработанных по режиму № 4, обнаружены мелкие забоины на корытце в прикорневой зоне; на лопатках, обработанных по режиму № 5, – поперечные риски в прикорневой зоне.

Так как указанные дефекты не допустимы, лопатки, обработанные по режимам № 4 и № 5, исключаем из дальнейших исследований.

При исследовании наклепа определяли микротвердость поверхности спинки лопаток.

Результаты исследований представлены в табл. 3.

Наибольшее увеличение степени наклепа 22 % обеспечивает обработка лопаток по режиму № 2 (Б8).

Установлена возможность формирования благоприятной эпюры остаточных напряжений, степени наклепа поверхностного слоя, шероховатости в продольном и поперечном направлениях путем подбора параметров режима обработки.

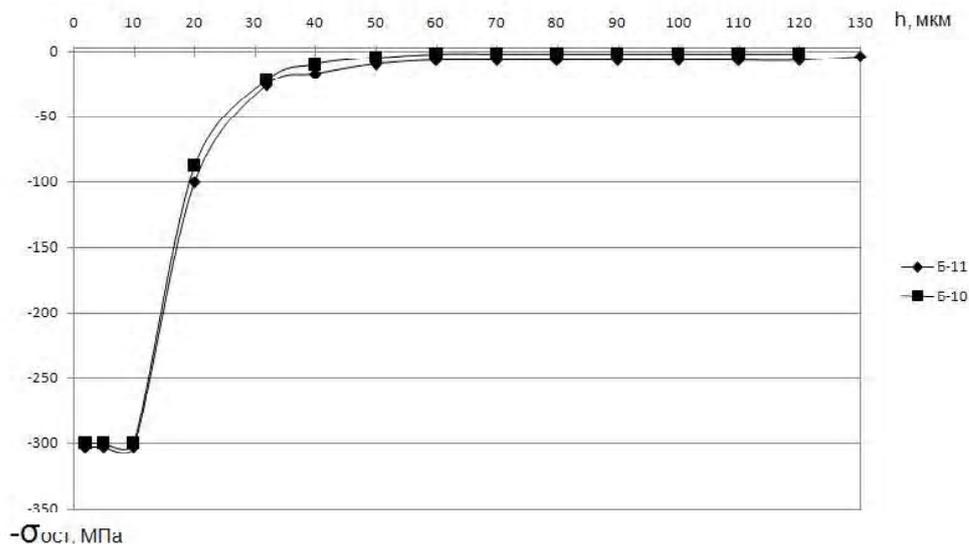


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток: оценка стабильности обработки

Таблица 2 – Результаты измерения параметров шероховатости поверхностного слоя лопаток

Номер лопатки		Б17	Б12	Б7	Б18	Б10	Б9	Б15	Б8	
Спинка	Вдоль оси	$Ra$ , мкм	0,190	0,116	0,229	0,138	0,175	0,128	0,195	0,193
		$Rz$ , мкм	1,766	0,799	1,652	0,856	1,145	0,970	1,178	1,231
	Вдоль хорды	$Ra$ , мкм	0,297	0,333	0,366	0,298	0,298	0,316	0,387	0,302
		$Rz$ , мкм	1,371	1,231	1,584	0,962	1,295	1,049	1,395	1,408
Корыто	Вдоль оси	$Ra$ , мкм	0,162	0,185	0,147	0,119	0,130	0,101	0,119	0,117
		$Rz$ , мкм	2,002	1,226	1,018	0,822	0,908	0,673	0,627	0,683
	Вдоль хорды	$Ra$ , мкм	0,229	0,195	0,212	0,206	0,225	0,203	0,195	0,159
		$Rz$ , мкм	2,157	1,072	1,111	1,078	1,181	0,953	0,689	1,266

Таблица 3 – Результаты исследований микротвердости поверхности лопаток

Номер лопатки	$H_{10}$ , МПа	$U_{H_2}$ , %
Б17(исх.)	3895	–
Б8	4738	22
Б9	4376	12
Б10	4208	8
Б18	4169	7

**Выводы**

1. На опытно-промышленной установке проведено упрочнение лопаток на различных режимах. Определено влияние времени обработки, частоты колебаний лопатки вдоль оси пера, индукции магнитного поля и проведена оценка стабильности обработки.

2. Установлено, что увеличение времени обработки лопаток свыше 30 минут и увеличение индукции магнитного поля свыше 0,28 Тл приводит к уменьшению величины и глубины залегания остаточных напряжений сжатия. Увеличение частоты колебаний лопатки вдоль оси пера благоприятно влияет на увеличение уровня остаточных напряжений сжатия на поверхности.

3. В ходе проведенных исследований установлено, что оптимальным режимом можно считать режим № 2 (лопатка Б8), который обеспечивает наиболее благоприятное сочетание параметров поверхностного слоя: максимальную величину остаточных напряжений сжатия – 430 МПа и глубину залегания до 130 мкм, приемлемые параметры шероховатости и максимальную степень наклепа.

**Перечень ссылок**

1. Акимов П. М. О факторах, влияющих на выносливость жаропрочных сплавов для лопаток // *Авиационная промышленность*. – 1967. – № 3. – 74 с.
2. Технический отчет ЗМКБ «Прогресс» № 182. – Запорожье, 1973.
3. Технический отчет ЗПОМ № 80. – Запорожье, 1972.
4. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитно-абразивной обработкой : монография /

[В. А. Богуслаев, А. И. Долматов, П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье : Дека, 1996. – 364 с.

5. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / [Богуслаев В. А., Яценко В. К., Жеманюк П. Д. и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с.
6. Исследование влияния обработки лопаток из титановых сплавов в жидком азоте на структурные и прочностные характеристики / [Жеманюк П. Д., Пухальская Г. В., Коваль А. Д. и др.] // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 1. – С. 119–125.
7. Кравчук В. С. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций : монография / В. С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А. В. Кравчук. – Одесса : Астропринт, 2000. – 160 с.
8. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справ-к / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
9. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. 1 : монография / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье : ОАО «Мотор Сич», 2003. – 396 с.
10. Влияние обработки лопаток компрессора шариками в магнитном поле на формирование параметров поверхностного слоя и прочностные характеристики / [Пухальская Г. В., Коваль А. Д., Степанова и др.] // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 2. – С. 92–102.
11. Чернышов В. В. Протягивание и упрочнение хвостовиков лопаток газотурбинных двигателей / Чернышов В. В., Рахманова М. С., Дейч Г. Б. – М. : Машиностроение. – 1971. – 276 с.
12. Биргер И. А. Остаточные напряжения / Биргер И. А. – М. : Машиностроение, 1963. – 232 с.

Поступила в редакцию 07.07.2010

**Пухальська Г.В., Гліксон І.Л., Лук'яненко О.Л. Вплив режимів обробки лопаток компресора кульками в магнітному полі на формування характеристик поверхневого шару**

*Досліджено вплив режимів обробки лопаток компресора з титанового сплаву сталевими кульками в магнітному полі на формування характеристик поверхневого шару. Встановлено можливість формування сприятливої епюри залишкових напружень стиску, ступеня наклепу, шорсткості поверхневого шару шляхом підбору параметрів режиму обробки. У ході проведених досліджень встановлено оптимальний режим, який забезпечує найбільш сприятливе сполучення характеристик поверхневого шару.*

**Ключові слова:** лопатка, магнітне поле, залишкові напруження, шорсткість, наклеп.

**Pukhal'skaya G., Glikson I., Luk'yanenko O. Influence of compressor's blade treatment regime by balls in magnetic field on coating surface's parameters forming**

*The influence of compressor's blade made of titanium alloys treatment by steel spheres in the magnetic field on coating surface parameters has been researched. The opportunity of forming favourable residual compression stresses distribution, cold-hardening's degree, coating surface's harshness has been determined by treatment's parameters picking up. The optimal treatment, which guarantee the favourable combination of coating surface's parameters, has been determined.*

**Key words:** blade, magnetic field, residual stresses, harshness, cold-hardening.