

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> АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ОБРАБОТКОЙ ШАРИКАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Исследовано влияние обработки стальными шариками в магнитном поле на усталостную прочность лопаток компрессора. Обработка лопаток шариками в магнитном поле приводит к повышению предела выносливости.*

**Ключевые слова:** лопатка, прочность, магнитное поле, предел выносливости.

### Введение

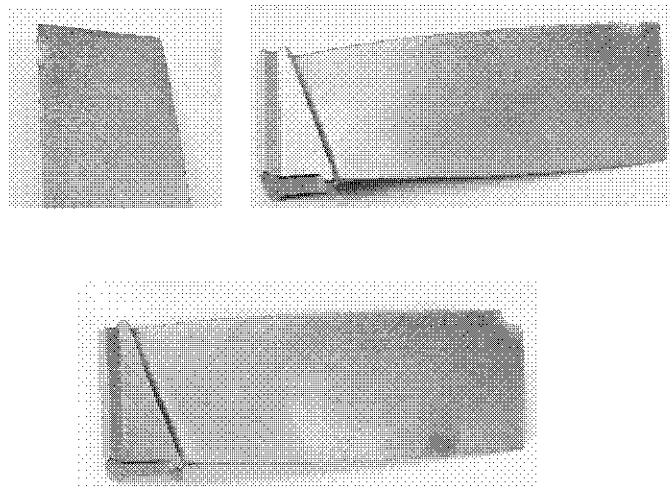
По мере развития и совершенствования авиационной техники постоянно растут параметры двигателей, что приводит к увеличению напряжений, воздействующих на детали, к возрастанию чувствительности этих деталей к различного рода повреждениям их поверхностного слоя. Потеря деталью своего служебного назначения начинается с поверхностного слоя, например, возникновение и развитие усталостной трещины, коррозии, эрозии, износа и др. [1].

Основным видом разрушения лопаток компрессора является усталостное. Причинами разрушения лопаток являются снижение предела выносливости или повышение амплитуды вибрационных напряжений. Кроме усталостных разрушений лопаток существует большая проблема, связанная с досрочным съемом двигателей из-за повреждения лопаток забоинами [2].

Вертолетные ГТД эксплуатируются в условиях повышенной запыленности, что приводит к износу и появлению забоин на входных кромках рабочих лопаток компрессора. Такое повреждение, как забоина, может привести к образованию трещины с последующим обрывом лопатки.

Поверхностное пластическое деформирование применяется для повышения несущей способности деталей за счет максимального использования свойств поверхностного слоя. Выбор метода деформирования определяется конструкцией и размерами детали, требованиями, предъявляемыми к точности, условиями эксплуатации и ресурсом.

В данной работе исследовано влияние обработки лопаток компрессора из титановых сплавов на усталостную прочность.



**Рис. 1.** Лопатки I-й ступени компрессора вертолетного двигателя с повреждениями пера

## Методика проведения экспериментов

В качестве объекта исследований использованы лопатки компрессора двух различных двигателей ГТД, изготовленные из титановых сплавов BT8M и BT3-1. Лопатки обработаны по режиму, рекомендованному как оптимальный в результате предыдущих исследований.

Испытания лопаток на усталость проводили способом возбуждения их колебаний по первой изгибной форме на электродинамическом вибростенде ВЭДС-200. Лопатки испытывали на усталость ускоренным методом «лестница» на базе  $N = 10^8$  циклов согласно ОСТ 1 00870-77 с определением среднего предела выносливости. Данный метод применяют для оценки влияния технологических факторов на сопротивление усталости с целью сокращения длительности и стоимости испытаний.

Сущность метода заключается в расчете среднего значения предела выносливости по формуле:

$$\sigma_{-1} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right),$$

где  $\sigma_0$  – самый низкий уровень напряжения, на котором появляется событие (разрушение или неразрушение) с меньшей частотой, МПа;

$\Delta\sigma$  – ступень приращения напряжения;

$$A = \sum_{i=1}^n i \cdot n_i;$$

$i = 0$  – номер низшего уровня напряжений, на котором событие появляется с меньшей частотой;

$i = 1$  – следующий уровень;

$i = k$  – самый высокий уровень напряжений, на котором появляется событие с меньшей частотой;

$n_i$  – число событий с меньшей частотой появления на соответствующем уровне напряжений;

$N$  – общее число анализируемых событий

Знак «плюс» ставится, если неразрушение проявляется с меньшей частотой, знак «минус» – если с меньшей частотой проявляется разрушение.

При проведении испытаний принято приращение величины напряжения 20 МПа.

Для подтверждения полученных результатов испытания на усталость проводили стандартным методом на базе 100 млн. циклов. Лопатки испытывали в резонансном режиме до появления макротрещины длиной

1–3 мм, что соответствовало падению частоты собственных колебаний на 2–3 %.

## Результаты и их обсуждение

Для оценки эффективности обработки лопаток компрессора стальными шариками в магнитном поле использовали специально разработанную и изготовленную опытно-промышленную установку с широким диапазоном варьирования параметров процесса (индукция магнитного поля, частота перемещений лопатки, диаметр шариков), влияющих на характеристики поверхностного слоя: шероховатость, степень наклепа, величину и глубину распространения остаточных напряжений. Между полюсами электромагнита, который питается от источника постоянного тока, размещаются стальные шарики, которые при создании магнитного поля образуют упругую среду, свойства которой можно варьировать, изменяя индукцию магнитного поля. Регулируемые сердечники в форме усеченного конуса концентрируют силовые линии магнитного поля в рабочей зоне, уплотняя рабочую среду и устраняя зазоры.

При движении лопатки через рабочую зону стальные шарики взаимодействуют с поверхностью лопатки, оказывая при этом определенное контактное давление, в результате чего поверхностный слой пластически деформируется.

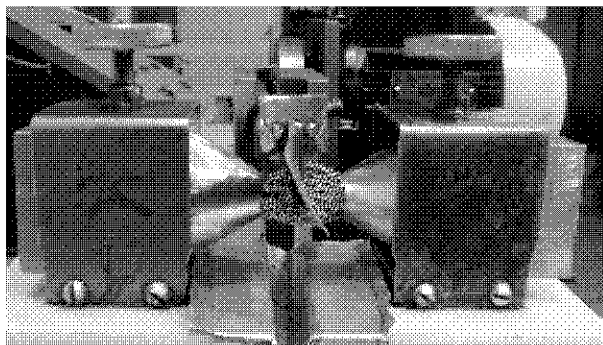


Рис. 2. Установка для обработки лопаток шариками в магнитном поле

Предложенный способ упрочнения лопаток компрессора с тонкими кромками характеризуется «мягкой» обработкой кромок лопаток – мест наиболее вероятного зарождения усталостных трещин без искажения геометрии (перенаклепа кромок).

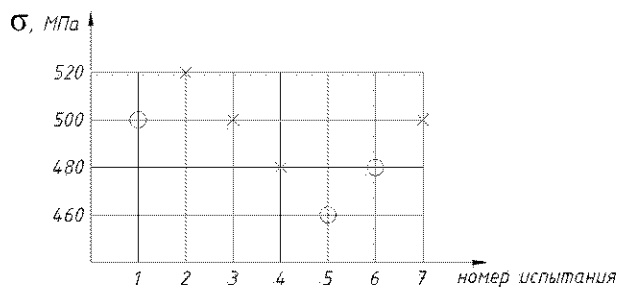
Параметры режима обработки представлены в табл. 1

Таблица 1 – Параметры режима обработки пера лопатки

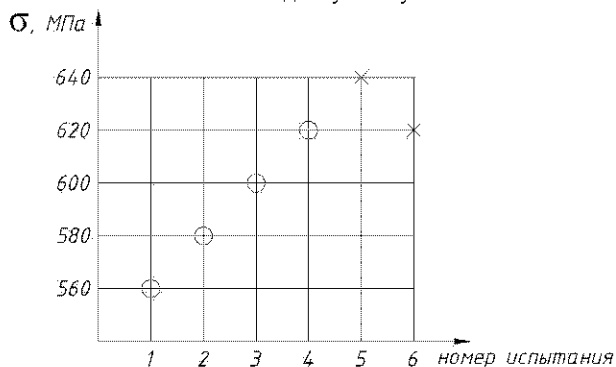
Параметры режима обработки						
Обозначение режима обработки	Сечение магнитопровода	$a$ , мм	$d$ , мм	Расстояние между полюсами магнита, мм	$\nu$ , Гц	$\tau$ , мин
№ 1	УК	29	1,6	11	16	30

Примечание: УК – сечение магнитопровода - усеченный конус, размер рабочей зоны –  $\varnothing 6 \times 11$  мм;  $d$  – диаметр шариков, мм;  $\nu$  – частота перемещений лопатки вдоль оси пера, Гц;  $a$  – ход лопатки вдоль оси пера, мм;  $\tau$  – время обработки, мин. При обработке лопатке дополнительно сообщали поперечные колебания, в направлении, перпендикулярном продольной оси с частотой 0,5 Гц и величиной 13 мм.

По результатам испытаний составлены табл. 2 и 3 и построены графики (см. рис. 3, 4).



**Рис. 3.** Обработка результатов испытания исходных лопаток: x – лопатки с трещинами, о – лопатки, отстоявшие заданную базу



**Рис. 4.** Обработка результатов испытания лопаток, обработанных шариками в магнитном поле: x – лопатки с трещинами, о – лопатки, отстоявшие заданную базу

Определяем средний предел выносливости:  
- исходных лопаток

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left( \frac{\sum i \cdot n_i}{\sum n_i} + \frac{1}{2} \right) = 460 + 20(4/3 + 1/2) = 497 \text{ МПа,}$$

- лопаток, обработанных стальными шариками в магнитном поле

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + \Delta\sigma \left( \frac{\sum i \cdot n_i}{\sum n_i} - \frac{1}{2} \right) = 620 + 20(1/2 - 1/2) = 620 \text{ МПа.}$$

**Таблица 2** – Результаты испытаний исходных лопаток

$\sigma_a$ , МПа	Число лопаток с трещинами	Число лопаток без трещин $n_i$	Порядковый номер события с меньшей частотой	$i \cdot n_i$
460	0	1	0	0
480	1	1	1	1
500	2	1	3	3
520	1	0		
$\Sigma$	4	3		4

**Таблица 3** – Результаты испытаний лопаток, обработанных шариками в магнитном поле

$\sigma_a$ , МПа	Число лопаток с трещинами $n_i$	Число лопаток без трещин	Порядковый номер события с меньшей частотой	$i \cdot n_i$
560	0	1		
580	0	1		
600	0	1		
620	1	1	0	0
640	1	0	1	1
$\Sigma$	2	4		1

Упрочнение лопаток компрессора стальными шариками в магнитном поле приводит к повышению их предела выносливости на 25 %.

Эффективность обработки упрочнением шариками в магнитном поле оценивали на серийных лопатках компрессора окончательно обработанных виброполированием и для сравнения, окончательно обработанных УЗУ (см. табл. 4–7).

Фрактографическое исследование исходных и упрочненных лопаток проводили на оптическом стереоскопическом микроскопе МСП-2 и растровом электронном микроскопе JSM-T300 на двух лопатках компрессора С6 и СМ12, разрушившиеся в процессе усталостных испытаний при разном уровне напряжений.

Трещина на лопатке С6 с началом развития по корыту от входной кромки, а по спинке ориентирована вдоль рисок от мехобработки. По месту зарождения трещины на лопатке СМ12 обнаружен технологический дефект. Обработанная шариками поверхность имеет равномерный серый цвет и слабый блеск.

Вскрытие и анализ строения изломов по трещинам показал следующее: оба излома имеют обычный для усталостного разрушения плоский макрорельеф с усталостными линиями (рис. 5). Разрушение лопатки С6 началось от «косой» риски по корыту пера вблизи входной кромки. В изломе лопатки СМ12, обработанной шариками, наблюдается окисленный технологический дефект по входной кромке пера, от которого началось разрушение (рис. 5).

Микрорельеф усталостной зоны излома обеих лопаток фасеточный, характерный для многоциклового усталости. Разрушение сопровождалось ветвлением трещин и, как результат, образованием микронадрывов в плоскости, перпендикулярной излому. В изломах лопаток отсутствуют признаки перегрузочного характера (вязкие бороздки, ямки).

**Таблица 4** – Результаты испытаний на усталость серийных лопаток из титанового сплава BT8M (ВП)

№ п/п	№ лопатки	Уровень нагружения $\sigma$ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	C1	620	10,442	Разр.	$l = 14$ мм, вх. кромка
2	C2	600	0,549	Разр.	$l = 34$ мм, вх. кромка
3	C3	560	0,363	Разр.	$l = 26$ мм, вх. кромка
4	C4	500	100,0	Н.р.	–
5	C5	520	46,67	Разр.	$l = 23$ мм, вх. кромка
6	C7	500	40,35	Разр.	$l = 28$ мм, вх. кромка
7	C6	480	0,36	Разр.	$l = 32$ мм, вх. кромка
8	C26	460	100,0	Н.р.	–
9	C14	480	100,0	Н.р.	–
10	C16	500	76,579	Разр.	$l = 36$ мм, вх. кромка
11	C26	460	100,0	Н.р.	–
12	C18	460	100,0	Н.р.	–
13	C39	460	100,0	Н.р.	–
14	C34	460	100,0	Н.р.	–
15	C66	460	100,0	Н.р.	–
16	C68	460	100,0	Н.р.	–

**Таблица 5** – Результаты испытаний на усталость серийных лопаток из титанового сплава BT8M (ВП+ обработка шариками в магнитном поле по режиму № 1)

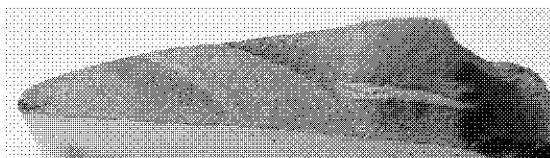
№ п/п	№ лопатки	Уровень нагружения $\sigma$ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	CM1	560	100,0	Н.р.	–
2	CM6	580	100,0	Н.р.	–
3	CM3	600	100,0	Н.р.	–
4	CM2	620	100,0	Н.р.	–
5	CM4	640	19,049	Разр.	$l = 28$ мм, вх. кр.
6	CM5	620	0,54	Разр.	$l = 45$ мм, вх. кр.
7	CM37	600	100,0	Н.р.	–
8	CM17	600	47,58	Разр.	$l = 26$ мм, вх. кр.
9	CM53	600	95,25	Разр.	$l = 39$ мм, спинка
10	CM52	600	15,96	Разр.	$l = 29$ мм, вх. кр.
11	CM50	600	100,0	Н.р.	–
12	CM30	580	40,3	Разр.	$l = 25$ мм, вх. кр.
13	CM65	580	13,14	Разр.	$l = 33$ мм, вх. кр.
14	CM12	560	69,27	Разр.	$l = 25$ мм, вх. кр.
15	CM67	540	100,0	Н.р.	–
16	CM56	540	100,0	Н.р.	–
17	CM13	540	100,0	Н.р.	–
18	CM20	540	100,0	Н.р.	–
19	CM25	540	100,0	Н.р.	–
20	CM61	540	100,0	Н.р.	–

**Таблица 6** – Результаты испытаний на усталость серийных лопаток из титанового сплава BT3-1 (УЗУ)

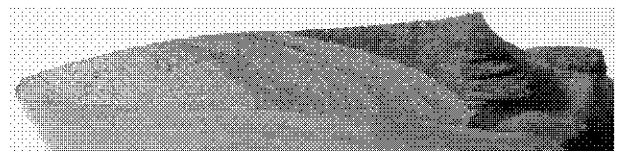
№ п/п	№ лопатки	Уровень нагружения $\sigma$ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	C3-10	400	31,21	Разр.	$l = 25$ мм, вх. кромка
2	C3-7	380	46,06	Разр.	$l = 25$ мм, вх. кромка
3	C3-9	360	100,0	Н.р.	–
4	C3-8	360	52,79	Разр.	$l = 23$ мм, вх. кромка
5	C3-4	340	100,0	Н.р.	–
6	C3-6	340	100,0	Н.р.	–
7	C3-2	340	100,0	Н.р.	–
8	C3-5	340	100,0	Н.р.	–
9	C3-1	340	100,0	Н.р.	–
10	C3-3	340	100,0	Н.р.	–

**Таблиця 7** – Результати испытаний на усталость серийных лопаток из титанового сплава BT3-1 (ВП + обработка шариками в магнитном поле по режиму № 1)

№ п/п	№ лопатки	Уровень нагружения $\sigma$ , МПа	Кол-во циклов, $N \times 10^6$	Результаты испытаний	Примечание
1	M1	600	23,552	Разр.	$l = 17$ мм, вх. кр.
2	M2	550	0,5	Разр.	$l = 20$ мм, вх. кр.
3	M8	500	100,0	Н.р.	–
4	M5	520	38,76	Разр.	$l = 15$ мм, вх. кр.
5	M9	500	62,37	Разр.	$l = 19$ мм, спинка
6	M4	500	38,77	Разр.	$l = 18$ мм, вх. кр.
7	M3	480	40,31	Разр.	$l = 18$ мм, вх. кр.
8	M10	460	4,88	Разр.	$l = 20$ мм, вх. кр.
9	M6	440	100,0	Н.р.	–
10	M7	440	32,29	Разр.	$l = 18$ мм, вх. кр.
11	M11	420	100,0	Н.р.	–
12	M12	420	100,0	Н.р.	–
13	M13	420	100,0	Н.р.	–
14	M14	420	0,312	Разр.	$l = 13$ мм, вых. кр.
15	M15	420	20,52	Разр.	$l = 15$ мм, вх. кр.
16	M16	400	100,0	Н.р.	–
17	M17	400	100,0	Н.р.	–
18	M18	400	100,0	Н.р.	–
19	M19	400	100,0	Н.р.	–
20	M20	400	100,0	Н.р.	–
21	M21	400	100,0	Н.р.	–



*a*



*б*

**Рис. 5.** Общий вид излома по трещинам на лопатке SM12 (*a*) и на лопатке C6 (*б*)

Проведенные испытания на усталость позволяют сделать вывод, что упрочнение лопаток компрессора стальными шариками в магнитном поле приводит к повышению предела выносливости с 460 до 540 МПа по сравнению с лопатками, упрочненными ВП – сплав BT8M и лопатками, упрочненными УЗУ – с 340 до 400 МПа – сплав BT3-1.

**Выводы**

Предложенный способ упрочнения лопаток компрессора с тонкими кромками позволяет существенно повысить их усталостную прочность. Предел выносливости лопаток, обработанных стальными шариками

в магнитном поле, повышается на 18 % по сравнению с лопатками, упрочненными ВП – сплав BT8M и на 18 % по сравнению с лопатками, упрочненными УЗУ – сплав BT3-1.

**Список литературы**

1. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитно-абразивной обработкой [Текст] : Монография / [В. А. Богуслаев, А. И. Долмагов, П. Д. Жеманюк и др.]. – Запорожье: Дека, 1996. – 364 с.
2. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А. Н. Петухов. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с. : ил.

*Одержано 04.12.2012*

**Пухальська Г.В., Гліксон І.Л., Лукьяненко -О.Л. Підвищення втомної міцності лопаток компресора обробкою кульками в магнітному полі**

*Досліджений вплив обробки сталевими кульками в магнітному полі на втомну міцність лопаток компресора. Обробка лопаток кульками в магнітному полі призводить до підвищення межі витривалості.*

*Ключові слова:* лопатка, міцність, магнітне поле, межа витривалості.

**Pukhalskaya G., Glikson L, Lukyanenko O. Compressor blades fatigue strength increasing by handling balls treatment in a magnetic field**

*Influence of steel balls in the magnetic field treatment on the durability of the compressor blades are investigated. Increasing of the endurance limit by blades balls processing in a magnetic field was established.*

*Key words:* blade, strength, magnetic field, the limit of endurance.