

вок лопаток в электропечи до температуры 950°C, выдержка 15-25 мин; правка в штампе, нагретом до 530-550°C; выдержка в штампе 30 с; термообработка при температуре 530°C, выдержка 6 часов.

В результате правки коробление пера заготовок лопаток длиной 100 мм снижается с 0,6-0,8 до 0,1-0,2 мм.

**В ы в о д.** Отличительной особенностью этого уникального технологического процесса является то, что за один удар деформирующего инструмента высокоскоростного молота путем выдавливания металла со скоростью истечения 250-400 м/с из приемника штампа, образующего замок лопатки, в гравюру штампа, образующего перо, получают заготовки лопаток с припуском по перу 0,05-0,2 мм на сторону, с большим коэффициентом использования металла (0,4-0,6), четко оформленными кромками и высокой чистотой поверхности. Высокая точность и стабильность геометрических размеров заготовок лопаток обеспечивается благодаря созданию упруго-напряженного состояния в разъемных матрицах штамповочной оснастки.

УДК 621.787.4

А. Ф. Шпатаковский

#### УПРОЧНЯЮЩЕ-ОТДЕЛОЧНАЯ ОБРАБОТКА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА НА УСТАНОВКЕ С ПЛАНЕТАРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОНТЕЙНЕРОВ

Приведены схема упрочнения и отделки лопаток компрессора высокого давления (КВД) авиадвигателей на установках с планетарным движением контейнеров (УПДК), результаты исследований по деформационному упрочнению, шероховатости и остаточным напряжениям на образцах из стали У8А и лопатках из сплава ЭП718ВД, обработанных на различных режимах. Показана эффективность обработки с точки зрения повышения выносливости лопаток и производительности труда.

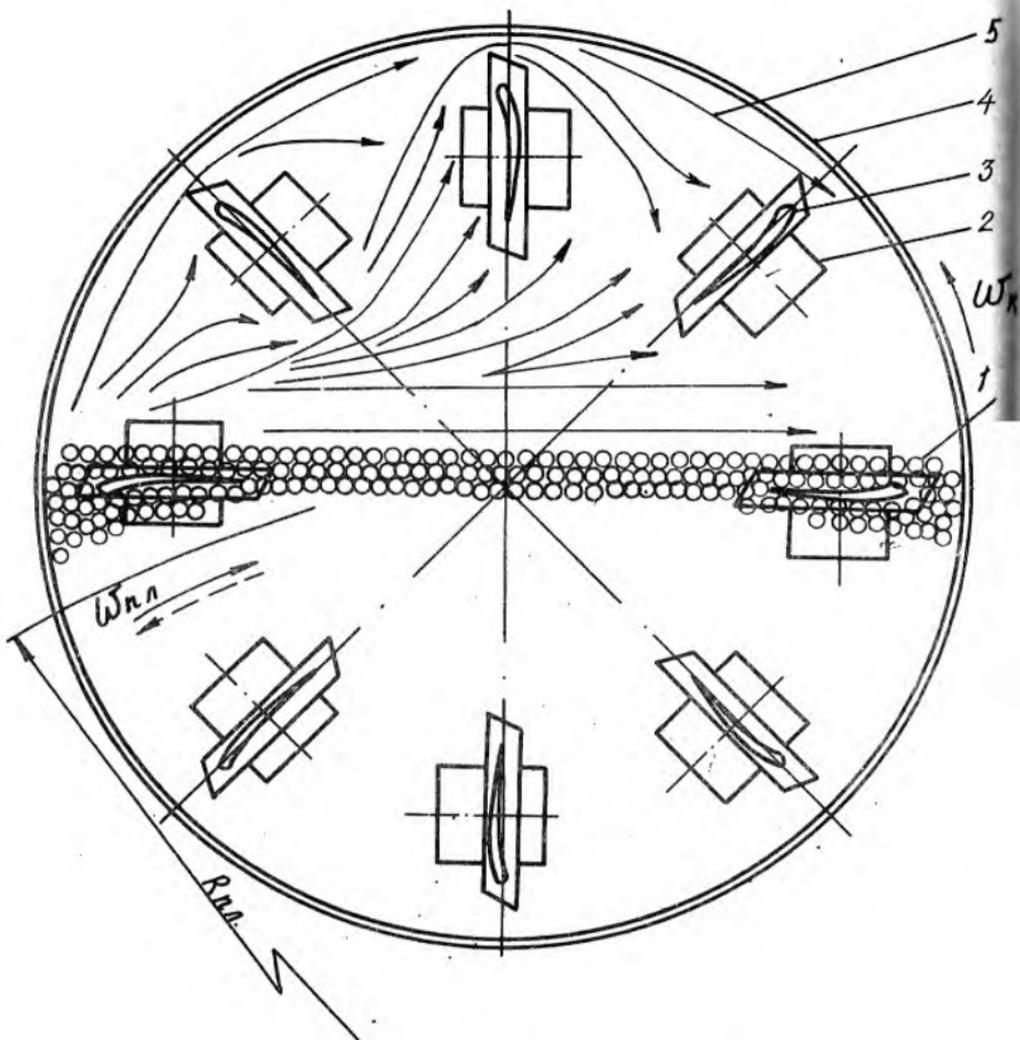
Обработка лопаток КВД авиадвигателей, имеющих тонкие сечения и острые кромки, поверхностно-пластическим деформированием шарами на установках УПДК [1], является перспективной, так как объединяет упрочнение и отделку в одну операцию. Кроме того, она позволяет уменьшить секущие удары по кромкам, обеспечить шероховатость поверхности в пределах 9-10 классов и высокий уровень остаточных напряжений (о.н.) сжатия с благоприятной эпюрой. Последнее особенно важно с точки зрения повышения сопротивления усталости тонкостенных деталей [2].

В процессе обработки (рис. 1) контейнер I с закрепленными в нем лопатками 2 и с рабочей средой в виде стальных шаров 4 при  $\omega_k = \omega_{пл}$  совершает поступательное движение с планшайбой по круговой орбите с  $R_{пл}$ .

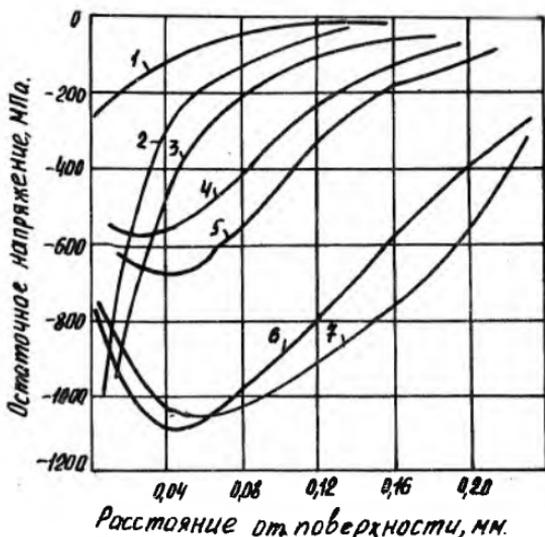
Кинематический и динамический анализ движения рабочей среды в контейнере показал, что упрочнение и отделка поверхностного слоя происходит под действием скоростного напора, удара и проскальзывания шаров, перемещающихся по круговой орбите со скоростью 8-11 м/с. Глубина, степень упрочнения и остаточные напряжения зависят от размера и массы шаров, скорости их движения и силы удара, общей массы рабочей среды, ее циркуляции и угла встречи шаров с поверхностью детали. Поэтому важное значение имеют схема расположения и количество одновременно обрабатываемых лопаток, заполнение контейнера рабочими телами ( $V$ ). При выборе схемы расположения лопаток необходимо также учитывать возможность сокращения вспомогательного и машинного времени. В работе [1] показаны три варианта возможного размещения лопаток в контейнере с расположением пера: по окружности ( $\alpha = 0^\circ$ ), под углом  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  к направлению вектора окружной скорости, каждый из которых имеет определенные достоинства и недостатки.

Для обработки лопаток КВД наиболее перспективной является схема с  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 1), так как при этом происходит упрочнение спинки и корыта за одну установку путем реверсирования вращения планшайбы. Это позволяет сократить время обработки.

Эффективность упрочнения, определяемого по прогибу, полученная при обработке образцов из стали У8А в виде пластин 70x20x1 шарами различного диаметра, при разных установках, скоростях и времени приведены в таблице, а по остаточным напряжениям - на рис. 2.



Р и с. 1. Схема установки и закрепления рабочих лопаток КВД в контейнере УПК при  $\alpha = 90^\circ$  и направление потоков рабочей среды: 1 - рабочие тела - шары; 2 - узел захвата; 3 - лопатка; 4 - контейнер; 5 - траектория движения шаров



Р и с. 2. Остаточные напряжения в образцах из стали У8А в исходном состоянии (1) и после обработки на УЦДК на режимах: 2 —  $n = 390$  об/мин, СОЖ — вода + триэтаноламин,  $V = 50\%$ ; 3 —  $d = 0,2-0,315$  мм;  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\tau = 16$  мин; 4 — дробь,  $d = 0,5-1,0$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\tau = 16$  мин; 5 — то же,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\tau = 6$  мин; 6 и 7 — то же,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\tau = 10$  мин; 6 и 7 —  $d = 2,0-2,5$  мм,  $\tau = 6$  мин,  $\alpha = 45$  и  $90^\circ$

Из таблицы видно, что при обработке микрошарами  $d = 0,2-0,315$  мм прогиб образцов, даже при максимальных оборотах планшайбы  $n = 390$  об/мин, небольшой, исходная шероховатость снижается незначительно при изменении угла  $\alpha$ , оставаясь в пределах 6 класса по ГОСТ 2789-73.

На кривой 2 (рис. 2) видно, что о.н. сжатия высокие, а максимумы их до 1000 МПа находятся у поверхности, но очень быстро снижаются по глубине и на расстоянии 0,05 мм от поверхности они не превышают 200 МПа. Эти данные свидетельствуют о небольшом силовом воздействии и малой глубине деформационного упрочнения, которая применительно к лопаткам может быть недостаточной.

С применением литой дроби  $d = 0,5-1,0$  мм деформационное упрочнение, глубина распространения о.н. сжатия существенно возрастают (рис. 2, кривая 3), такое упрочнение вполне приемлемо для лопа-

Прогиб и шероховатость поверхности образцов из стали У8А (HRC 50-52), ( $R_{max} = 1,87-2,20$  мкм) после обработки на УЦДК

Рабочая среда	Режим обработки				Прогиб образца, $f_{0,2}$ мм	Параметры шероховатости		
	заполнение V, %	$\alpha$ , град	$T$ , мин	$n$ , об/мин		$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{max}$ , мкм
Исходное состояние образца	-	-	-	-	0	2,1	5,3	6,8
Стальные микрошарики $\phi$ 0,2-0,315 мм из Р6М5	50	0	8+8	390	0,07	1,4	3,3	4,4
	50	45	16	390	0,08	1,7	3,5	4,3
Стальная дробь $\phi$ 0,5-1,0 мм	60	0	8+8	390	0,23	1,6	3,1	5,9
	50	45	6	390	0,22	1,9	3,5	6,0
	60	90	6	390	0,08	1,7	3,0	5,8
Стальные полированные шары $\phi$ 1,6 мм из ШХ15	50	0	5+5	330	0,30	1,7	3,5	5,5
	50	45	10	390	0,54	1,9	2,5	4,5
	50	90	6	390	0,35	0,9	1,8	2,3
Стальные полированные шары $\phi$ 2,5 мм	50	0	8+8	390	0,68	0,98	2,3	3,2
	50	0	3+3	250	0,17	0,45	1,0	1,85
	50	45	3+3	250	0,26	0,65	1,2	2,1
	50	90	3+3	250	0,28	0,74	2,2	3,4

ток КВД, имеющих кромки толщиной до 36 мм. Однако литая дробь является недостаточно качественной и не может обеспечить нужную шероховатость без дополнительной отделочной обработки, а стальные полированные шары такого диаметра являются слишком дорогими.

Применение шаров  $d = 1,6$  и  $2,5$  мм позволяет значительно повысить деформационное упрочнение на большую глубину и в 2-3 раза снизить шероховатость, выровнять микрорельеф, сделать его более плавным и жестким (параметры  $R_z$  и  $R_{max}$  существенно приближаются к  $R_a$ ). Однако исходные микровыступы полностью не деформируются и уровень шероховатости снижается только до 7-8 класса. Для по-

учения шероховатости по 9-10 классу необходимо снижать шероховатость исходной поверхности до 8-9 классов на предварительных операциях.

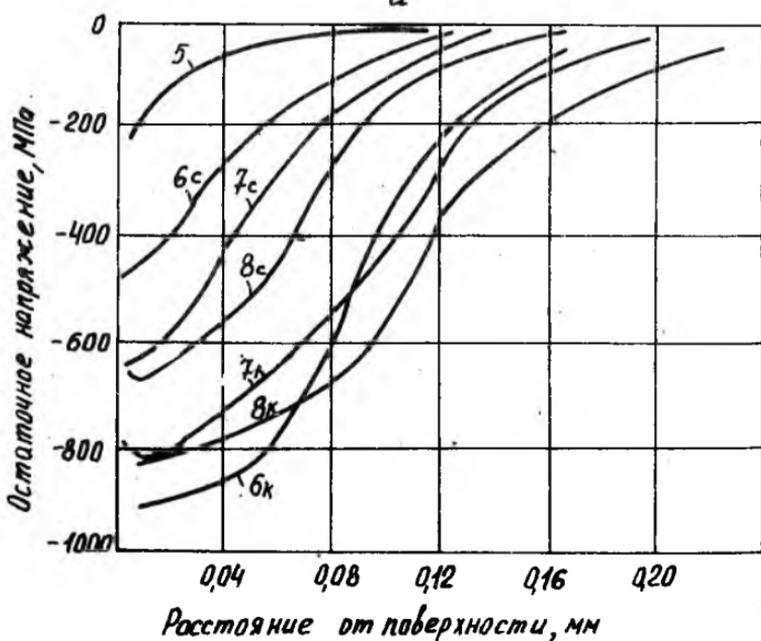
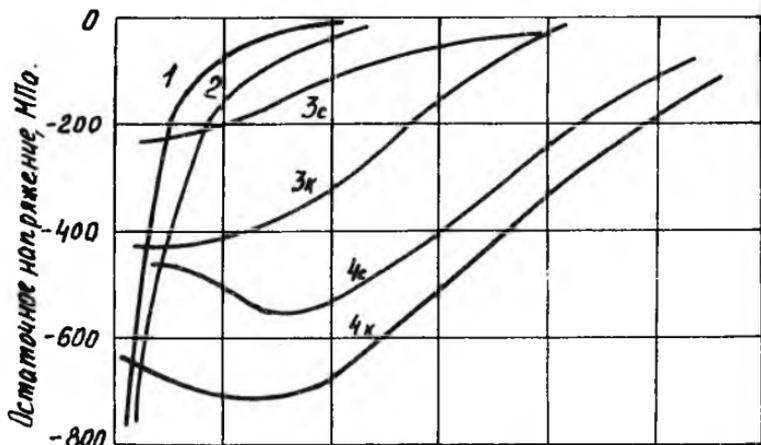
Остаточные напряжения сжатия (рис. 2, кривые 4-7) при  $n = 190$  об/мин имеют высокий уровень и распространяются на глубину более 0,2 мм, у них четко выявляется подслоный максимум. Более значительное упрочнение при одинаковом времени происходит при  $\alpha = 45^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$ . Следовательно, для упрочнения лопаток КВД приемлема схема с  $\alpha = 90^\circ$ , но для ее применения необходимы более мягкие режимы.

На рис. 3 приведены эпюры о.н., полученные при обработке лопаток КВД II-13 ступеней из жаропрочного сплава ЭП718ВД, анализ которых подтверждает выводы, сделанные по исследованиям на образцах из стали У8А.

Применение микрошариков для упрочнения неэффективно (таблица, рис. 2). Использование шаров  $d = 1,6$  мм эффективно при  $n = 190$  об/мин, а шаров  $d = 2,5$  мм — при  $n = 250$  об/мин. При установке лопаток по схеме с  $\alpha = 45^\circ$  имеется большое расхождение эпюр напряжений на спинке и корыте (рис. 3, б, кривые 6с и 6к), что не позволяет использовать такую схему без перестановки лопаток; при  $\alpha = 90^\circ$  эпюры напряжений на спинке и корыте сближаются (рис. 3, а, кривые 7-8).

Для оценки эффективности упрочнения на УЦДК были проведены три серии усталостных испытаний лопаток 13 ступени КВД на воздушном вибраторе с частотой колебаний  $f = 2200$  Гц на базе  $2 \times 10^7$  циклов. Обработка лопаток проводилась на режимах, приведенных в подписи к рис. 3, соответствующие им эпюры о.н. в спинке и корыте показаны на кривых 6, 7 и 8. В контейнере устанавливалось одновременно 8 лопаток. Для предотвращения расклепа кромки лопаток, обращенные к центру, затенялись экранами.

Шероховатость поверхности профиля пера лопатки после обработки на УЦДК снизилась с  $R_a = 0,26-0,31$  мкм до  $R_a = 0,085-0,153$  мкм, что соответствует требованиям чертежа. Остаточные напряжения сжатия во всех трех сериях имеют максимум у поверхности и колеблются в пределах 500-900 МПа. Наибольшая разница напряжений в спинке и корыте имеет место при установке с  $\alpha = 45^\circ$ , что связано с существенной разницей условий деформации.



б

Р и с. 3. Влияние режимов обработки на УЦК на остаточные напряжения в спинке (с) и корыте (к) лопаток КВД из сплава ЭП718ВД:  $V = 50\%$ , СОЖ - вода + триэтанолламин; 1, 2 - I2 ступень,  $d = 0,2-0,315$  мм,  $n = 330$  об/мин,  $\tau = (5+5)$  мин,  $\alpha = 90$  и  $45^\circ$ , 3с и 3к - II ступень,  $d = 1,6$  мм,  $n = 250$  об/мин,  $\tau = (3+3)$  мин,  $\alpha = 45^\circ$ ; 4с и 4к - I3 ступень,  $d = 1,6$  мм,  $n = 390$  об/мин,  $\tau = (3+3)$  мин,  $\alpha = 90^\circ$ ; 5 - исходное состояние; 6с и 6к - I3 ступень,  $d = 2,5$  мм,  $n = 250$  об/мин,  $\tau = (2+2)$  мин,  $\alpha = 45^\circ$ ; 7с и 7к - то же,  $\alpha = 90^\circ$ ; 8с и 8к - то же,  $\tau = (2,5+2,5)$  мин,  $\alpha = 90^\circ$

Испытания показали, что предел выносливости после обработки на трех режимах является достаточно высоким и близким к  $\sigma_{-1} = 600$  МПа. Наилучшие результаты получены на режиме  $d = 2,5$  мм,  $n = 250$  об/мин,  $\tau = (2,5 + 2,5)$  мин,  $\alpha = 90^\circ$ , СОЖ — вода + триэтанолламин. При повторном испытании лопаток, обработанных на этом режиме, получен  $\sigma_{-1} = 620$  МПа.

Таким образом, обработка лопаток КВД на УЦДК является эффективным способом как с точки зрения увеличения их выносливости, так и с точки зрения повышения производительности и улучшения социальных условий работы по сравнению с распространенными технологическими процессами финишной обработки.

### Библиографический список

1. М и т р я е в К.Ф., С а з о н о в М.Б., С т е п а н о в В.В., Ш и а т а к о в с к и й А.Ф. Исследование процесса упрочняюще-отделочной обработки на установке с планетарным движением контейнеров // Прогрессивные инструменты и методы обработки резанием авиационных материалов: Сб. науч. тр. / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989.

2. М и т р я е в К.Ф., С а з о н о в М.Б. Повышение выносливости лопаток компрессора ГТД регулированием напряженного состояния комбинированной упрочняюще-отделочной обработкой // Высокоэффективные методы механической обработки авиационных материалов: Сб. науч. тр. / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1991.