

В. А. ШМАНЁВ, Н. И. ПОТАПОВА, В. В. БАКАЛ

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

В современных газотурбинных двигателях детали типа лопаток, дисков работают в тяжелых условиях, испытывая значительные динамические и вибрационные нагрузки.

Несмотря на высокую жаропрочность материала лопаток имеются случаи разрушения их до выработки двигателем полного ресурса.

Микроструктурный анализ поверхности излома показал, что у большинства лопаток разрушение происходило по границам зерен в зонах невысоких температур и напряжений. По характеру излома и расположению его можно было сделать предположение, что причины возникновения трещин связаны с технологическим процессом изготовления лопаток. В связи с этим были проведены всесторонние исследования технологических процессов изготовления лопаток.

Исследования показали, что в поверхностном слое лопаток после механической обработки возникают остаточные напряжения: растягивающие или сжимающие. Особенно опасны растягивающие напряжения. Суммируясь с эксплуатационными, они могут изменить напряженное состояние поверхностного слоя таким образом, что напряжения, вызывающие пластические деформации, окажутся выше напряжений, вызывающих хрупкое разрушение. Кроме того, ранее проведенными работами установлено, что остаточные напряжения являются ускорителями процесса растворения металла, понижения его химической стойкости, износоустойчивости, предела усталости. Поэтому при изготовлении ответственных деталей двигателя следует особое внимание уделять качеству поверхностного слоя.

Причинами возникновения остаточных напряжений являются неравномерные пластические деформации в поверхностном слое, происходящие под действием тепловых и силовых факторов, имеющих место при резании металлов. Остаточные напряжения детали являются следствием всех технологических операций, но не все операции играют одинаковую роль. Наибольшие по величине и глубине проникновения остаточные напряжения возникают после

предварительных обработок. На последующих обработках может произойти перераспределение напряжений. Так, операции шлифования и полирования пера лопатки сопровождаются высокими температурами, нередко превышающими начало рекристаллизации поэтому напряжения от предыдущих обработок частично снимаются. Вследствие же последующего охлаждения наводятся новые остаточные напряжения.

Исследования, проведенные за последние годы, показали, что напряжения начальных операций оказывают существенное влияние на формирование напряжений на окончательных операциях. Для ослабления их влияния технологический процесс механической обработки лопаток должен быть построен таким образом, чтобы на каждой последующей операции снимался наклеп и остаточные напряжения предшествующей операции, т. е. минимальная величина припуска на данную ступень обработки должна быть равна или больше глубины наклепа и проникновения остаточных напряжений предшествующей ступени обработки.

Анализ методов шлифования лопаток показал, что припуск по сечениям снимается неравномерно. На отдельных лопатках имеются места, где сохраняются остаточные напряжения, возникающие при фрезеровании. Следовательно, для повышения качества поверхности лопаток припуск на шлифование, полирование, должен быть увеличен до полного снятия остаточных напряжений предшествующих операций. Увеличение же припусков на такие операции как шлифование, полирование, приводит к резкому повышению себестоимости операций. Целесообразней идти по пути совершенствования предыдущих подготовительных операций, выбора методов обработки и режимов резания, дающих наименьшие глубины дефектных слоев.

Наиболее распространенными методами предварительной обработки пера лопатки является копирное фрезерование, осуществляемое различными способами.

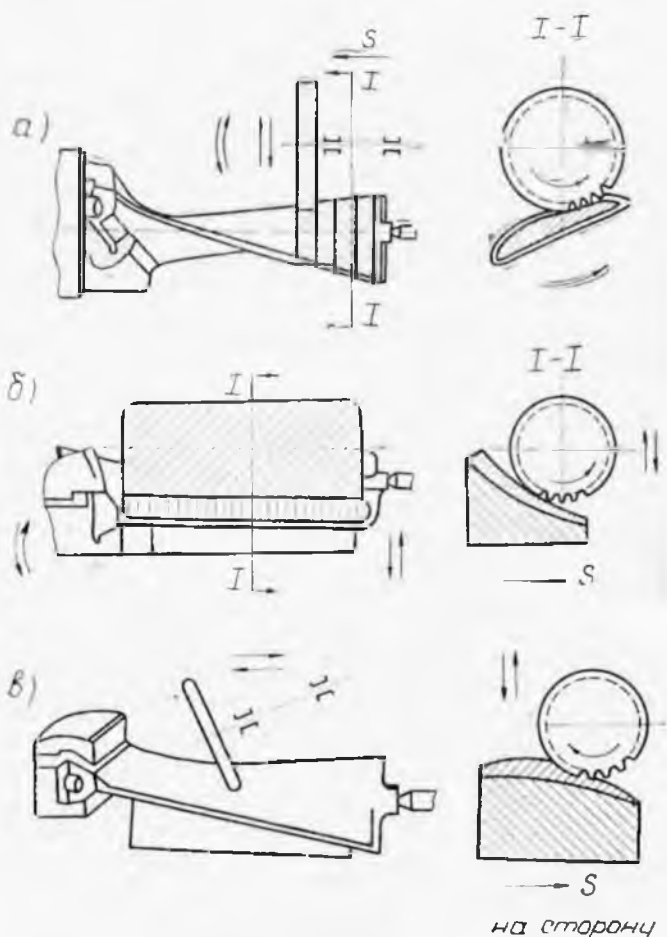
В настоящей статье на основании проведенных исследований даны характеристики применяемых методов фрезерования пера лопатки компрессора с точки зрения получения наименьших дефектных слоев. Рассмотрено влияние износа инструмента на наклеп и характер распределения остаточных напряжений. Исследования проводились на компрессорных лопатках как наиболее сложных по форме: профиль сечений и радиус кривизны по длине переменные с углом закрутки до 40° . Материал лопаток ЭИ-962.

Основными методами фрезерования пера лопаток на копирных станках являются:

1. фрезерование узкими поперечными строчками;
2. фрезерование одной широкой поперечной строкой;
3. фрезерование узкими продольными строчками.

По первому методу (фиг. 1а) корыто и спинка лопатки обрабатываются на модернизированном токарном станке модели 16 за один установ (ширина строки $6 \div 8$ мм).

При втором методе (фиг. 1б) перо лопатки обрабатывается на станке модели ОФ-31. Обработка спинки и корыта лопатки выполняется раздельно за один проход.



Фиг. 1. Схемы методов фрезерования пера лопаток.

На станке возможны три цикла автоматической работы:

1. цикл попутного фрезерования;
2. цикл встречного фрезерования;
3. двухсторонний цикл.

Фрезерование по третьему методу (фиг. 1в) производится на шлифовально-фрезерных станках модели 4ФПЛ (модернизированный горизонтально-фрезерный станок). В связи с отсутствием такого станка в нашем распоряжении, исследования проводились на горизонтально-фрезерном станке с полной аналогией движений

станка 4ФПЛ. Только в этом случае вместо лопаток использовались прямолинейные образцы заготовок, изготовленные по типу лопаток. В качестве режущего инструмента была использована дисковая фреза, расположенная под углом 45° (фиг. 1в).

УСЛОВИЯ ОБРАБОТКИ

Обработка лопаток производилась по действующей технологии цеха с режимами, указанными в таблице 1.

Таблица 1

Станок	$S, \frac{мм}{мин}$	$V, \frac{м}{мин}$	Глубина мм
Модернизированный токарный	35÷40	51,75	0,4÷0,7
ОФ-31	60÷65	22,60	0,9÷1,2
Горизонтально-фрезерный	400	22,60	[*] 1,0÷1,2

Опытные заготовки лопаток подбирались по твердости материала с колебанием не более 5%.

Подбор фрез производился по твердости и геометрии согласно чертежу инструмента.

По первому и второму методам рассматривалось влияние состава фрезы на качество поверхностного слоя. Половина всех заготовок обрабатывалась острыми фрезами, остальная часть фрезами, имеющими наибольшую величину износа, допустимую по условиям технологии. Такими фрезами являлись: на модернизированных токарных станках фреза, которой обрабатывали 5 заготовок, на станках ОФ-31 — 50 заготовок.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАКЛЕПА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Наклеп поверхностного слоя характеризуется глубиной и степенью. Изучение глубины и степени наклепа, полученного в процессе фрезерования производилось на образцах-пластинках, вырезанных из натуральных лопаток. Образцы вырезались электроэрозионной обработкой с режимами: напряжение постоянного питания 220 в, среднее напряжение 90—100 в, емкость не более 4 мкф, ток короткого замыкания $I = 3а$, электрод из латуни толщиной 0,8 мм.

Глубина наклепа определялась путем измерения микротвердости на поверхности косых срезов. Косые срезы получали при шлифовке образцов пастами ГОИ на чугунных и стеклянных плитах.

лих при помощи специального приспособления с давлением, не превышающим 200 г/см^2 . Замер микротвердости осуществляется на ПМТ-3, при нагрузке 100 г и увеличении 487 . Угол среза принимался $1^\circ 31'$, после притирки измерялась действительная величина угла среза. Измерение микротвердости производилось в десяти точках на расстоянии $0,1 \div 0,2 \text{ мм}$. Для уменьшения влияния случайных погрешностей на измерение отпечатка в расчет принимался среднеарифметический результат трех измерений одного и того же отпечатка.

Глубина наклепа подсчитывалась по формуле:

$$h = l \cdot \sin \alpha,$$

где h — глубина залегания наклепанного слоя;

l — расстояние между точкой измерения микротвердости и началом косо́го среза;

α — угол косо́го среза.

Степень наклепа:

$$N = \frac{H_d - H_{d'}}{H_{d'}} \cdot 100\%,$$

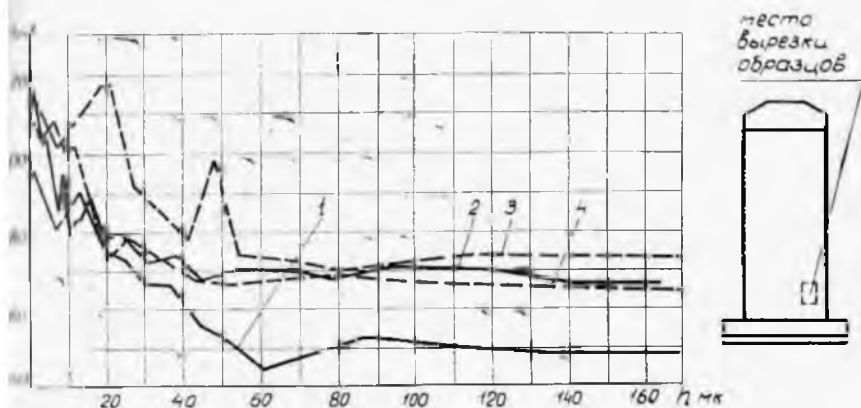
N — степень наклепа, %;

H_d — микротвердость обработанной поверхности, кг/мм^2 ;

$H_{d'}$ — микротвердость наклепанного металла, кг/мм^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАКЛЕПА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Характер изменения микротвердости по глубине представлен графиками в зависимости от метода обработки и состояния фрезы (фиг. 2, 3). На каждом графике приведены четыре кривые, соответствующие первому и второму методам обработки и различной степени износа фрезы.

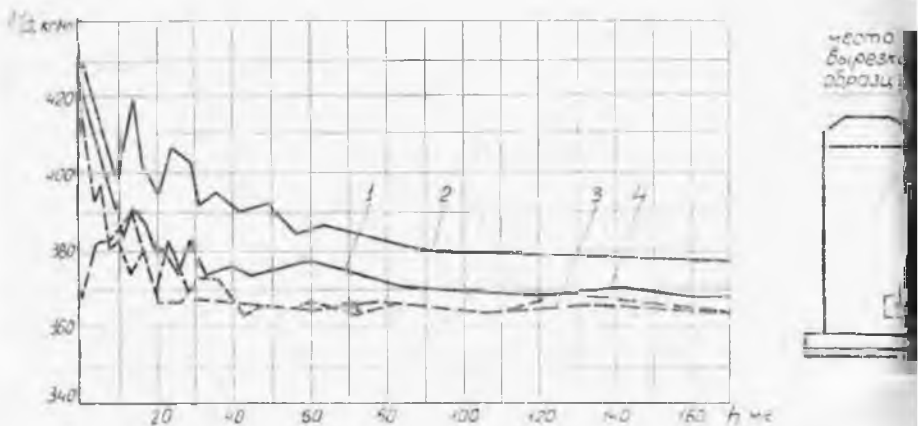


Фиг. 2. Изменение микротвёрдости по глубине спинки после фрезерования:

- а) узкой поперечной строкой: 1 — острый, 2 — тупой фрезой,
б) одной широкой поперечной строкой: 3 — острый, 4 — тупой фрезой.

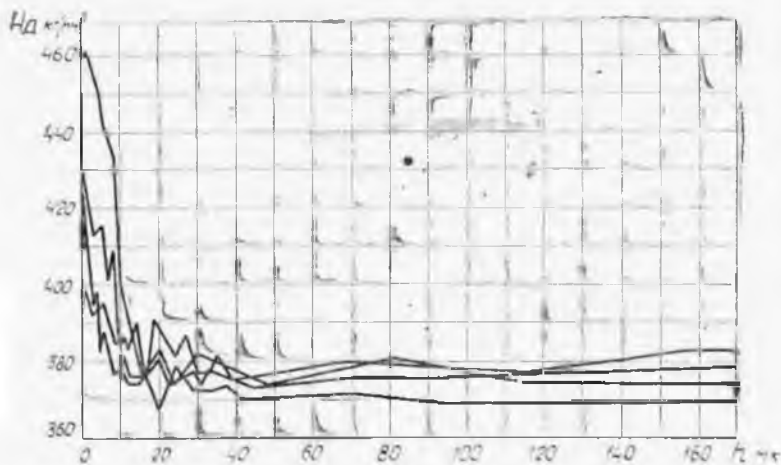
Анализ результатов исследования показывает, что резкое падение твердости наблюдается в верхнем слое исследуемой поверхности на расстоянии $20 \div 80$ мк. Кривые плавно изменяются до значений твердости исходного недеформированного металла.

При фрезеровании узкой поперечной строкой острыми фрезами глубина наклепа составляет $80-100$ мк, степень наклепа $8 \div 15\%$.



Фиг. 3. Изменение микротвердости по глубине корыта после фрезерования: а) узкой поперечной строкой: 1 — острой, 2 — тупой фрезой, б) одной широкой поперечной строкой: 3 — острой, 4 — тупой фрезой.

при фрезеровании затупившимися фрезами, у которых износ за ней грани составляет $v=0,4 \div 0,7$ мм, происходит увеличение глубины наклепа до $100 \div 110$ мк, степени наклепа до $13 \div 20\%$.



Фиг. 4. Изменение микротвердости по глубине после фрезерования узкой продольной строкой.

При фрезеровании широкой поперечной строкой на станках ОФ-31 острыми фрезами глубина наклепа $50 \div 60$ мк, степень наклепа $7 \div 30\%$, затупившимися фрезами с износом $b=0,1 \div 0,60$ мм, степень наклепа $15 \div 30\% \div 0,13$ мм—глубина наклепа 50 мк.

При фрезеровании узкой продольной строкой глубина наклепа $40 \div 45$ мк, степень наклепа $10 \div 24\%$ (фиг. 4).

Из приведенных графиков видно, что глубина наклепа на лопатках, обработанных на станках ОФ-31 и 4ФПЛ примерно одинаковая, при фрезеровании пера лопатки на токарных модернизированных станках больше в 2 раза.

Степень наклепа при фрезеровании острыми фрезами имеет одинаковое значение при всех трех методах. Износ фрезы оказывает значительное влияние на глубину и степень наклепа.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Исследование остаточных напряжений осуществлялось на образцах, вырезанных из натуральных лопаток электроэрозионной обработкой.

Сущность метода определения остаточных напряжений заключается в удалении части внутренне-напряженного слоя, измерения дополнительных деформаций, происходящих в результате такого удаления и вычисления по этим деформациям величины и знака остаточных напряжений. Снятие тончайших поверхностных слоев осуществлялось электрополированием. Измерение деформаций производилось с помощью тензодатчиков, на установке, разработанной лабораторией № 3 КуАИ под руководством доц. Кравченко Б. А. Напряжения вычислялись по формуле академика Цавиденкова Н. Н.

$$\sigma = - \frac{E \cdot a^2}{3b^2} \frac{df}{da}, \quad \text{кг/мм}^2,$$

E — модуль упругости испытуемого материала;

a — толщина образца;

b — половина длины сравненного слоя;

df — изменение стрелки прогиба пластинки, соответствующее снятому слою;

$\frac{df}{da}$ — тангенс угла наклона касательной в данной точке (фиг. 5).

После вычислений строились графики распределения остаточных напряжений σ по глубине поверхностного слоя a .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При фрезеровании узкой поперечной строкой на модернизированных токарных станках наблюдается следующее распределение остаточных напряжений по глубине: в тонком поверхностном слое

на глубине до 5 мк возникают остаточные напряжения сжати величиной до $40 \div 60 \text{ кг/мм}^2$. На глубине 5 мк сжимающие напряжения переходят в растягивающие, достигая наибольшего значения порядка 60 кг/мм^2 , затем вновь уменьшаются и на глубине $10 \div 35 \text{ мк}$ переходят в сжимающие (фиг. 6, 7). Общая глубина остаточных напряжений составляет $100 \div 330 \text{ мк}$.

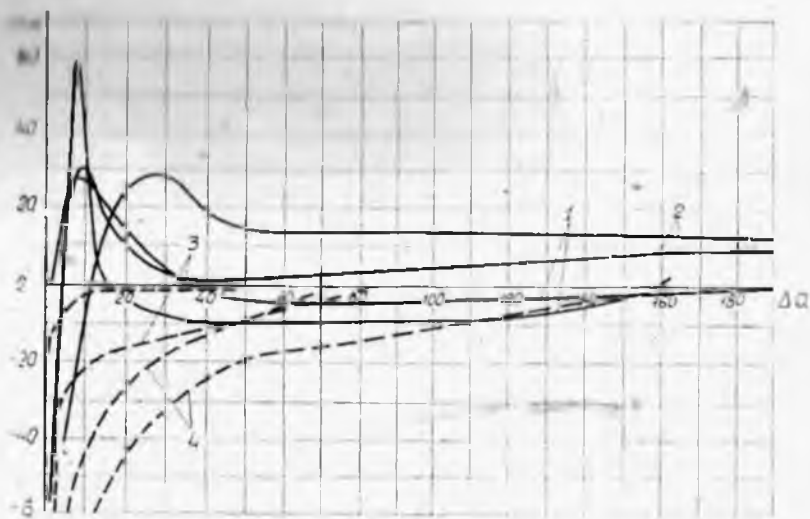
При фрезеровании широкой поперечной строккой на станке



Фиг. 8. Определение приращений стрелы прибора и снятого слоя.

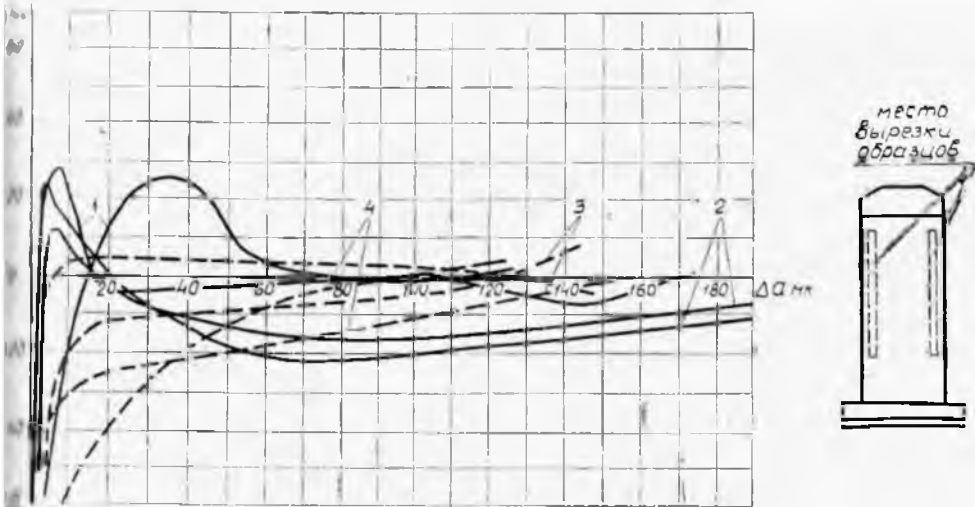
ОФ-31 по циклу попутного фрезерования в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения. Глубина проникновения их составляет $50 \div 200 \text{ мк}$, максимальная величина 60 кг/мм^2 .

Анализ напряженного силового поля показывает, что при фрезеровании узкой поперечной строккой



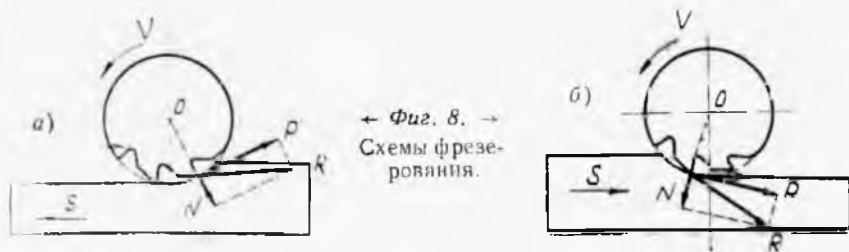
Фиг. 6. Остаточные напряжения по глубине спинки после фрезерования: а) узкой поперечной строккой: 1—острой, 2—тупой фрезой, б) одной широкой поперечной строккой: 3—острой, 4—тупой фрезой.

в начальный момент зуб фрезы начинает резать с нулевой толщины среза, т. е. наблюдается проскальзывание (фиг. 8). На этих участках возникают высокие удельные давления, которые приводят к сжимающим напряжениям в тонком поверхностном слое. При вступлении зуба фрезы в работу, равнодействующая внешних сил приводит к появлению растягивающих напряжений



Фиг. 7. Остаточные напряжения по глубине корыта после фрезерования
 а) узкой поперечной строккой: 1— острый, 2— тупой фрезой,
 б) одной широкой поперечной строккой: 3— острый, 4— тупой фрезой.

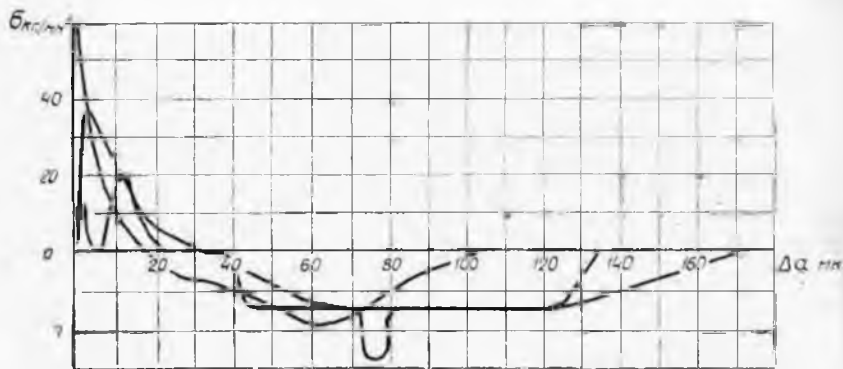
При фрезеровании широкой поперечной строккой возникновение сжимающих остаточных напряжений объясняется тем, что равнодействующая внешних сил направлена под обрабатываемую



← Фиг. 8. →
 Схемы фрезерования.

поверхность (фиг. 8б). Пластически-деформированные слои металла с остаточными напряжениями сжатия остаются на обработанной поверхности. Появлению остаточных сжимающих напряжений способствует также то обстоятельство, что при данной схеме обработки зуб фрезы в конце процесса резания не режет, а производит уплотнение поверхностного слоя.

При фрезеровании узкой продольной строккой (фиг. 9) в тонком поверхностном слое образуются растягивающие напряжения. Максимальная величина их 40 кг/мм^2 . На глубине $20\text{--}40 \text{ мк}$ растягивающие напряжения переходят в сжимающие, достигая наибольшего значения $\sigma = -30 \text{ кг/мм}^2$. Общее залегание напряжений входит до 180 мк .



Фиг. 9. Остаточные напряжения после фрезерования узкой продольной строчкой.

Анализируя кривые глубины наклепа и глубины проникновения остаточных напряжений, видим, что глубина проникновения остаточных напряжений значительно больше глубины наклепа. Для наглядности данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2

№ лопатки	Глубина наклепа, мк	Глубина проникновения остаточных напряжений, мк
5—37	90	160
5—45	100	240
6—3	60	120
6—5	65	120
6—6	60	160
6—14	45	150
6—16	60	170

ВЫВОДЫ

1. Глубина наклепа при фрезеровании пера лопатки на станках ОФ-31 в 1,5—2 раза меньше, чем при фрезеровании на модернизированных токарных станках. Наименьшее значение глубины наклепа имеет место при фрезеровании узкой продольной строчкой по схеме станка 4ФПЛ. При фрезеровании на станке ОФ-31 глубина наклепа составляет 50—60 мк, на токарных модернизированных станках 80—100 мк, на станках 4ФПЛ — 40—45 мк.

2. Степень наклепа для исследуемых методов фрезерования имеет примерно одинаковое значение (колеблется в пределах 8—30%).

3. Распределение остаточных напряжений по глубине при фрезеровании пера лопатки на токарных модернизированных станках

лах: в тонком поверхностном слое напряжения сжимающие, максимальная величина их $\sigma = -60 \text{ кг/мм}^2$ на глубине 5—30 мк переходят в растягивающие, $\sigma = 60 \text{ кг/мм}^2$ и на глубине 10—10 мк — вновь в сжимающие. Глубина проникновения их по сечению поверхностного слоя 100÷330 мк. При фрезеровании на станках ОФ-31 возникают остаточные напряжения сжатия $\sigma = -75 \text{ кг/мм}^2$, глубина проникновения которых 50—200 мк. При фрезеровании на станках по схеме 4ФПЛ в верхней части поверхностного слоя возникают растягивающие остаточные напряжения $\sigma = 40 \text{ кг/мм}^2$, на глубине 20÷40 мк растягивающие напряжения переходят в сжимающие $\sigma = -30 \text{ кг/мм}^2$. Глубина проникновения их 180 мк.

4. С увеличением износа фрезы увеличивается глубина наклепа и глубина проникновения остаточных напряжений, однако максимальная величина остаточных напряжений остается примерно на одном уровне.

5. Глубина наклепа и проникновения остаточных напряжений на спинке пера лопатки больше, чем на поверхности корыта.

6. При всех методах фрезерования глубина залегания остаточных напряжений превышает глубину наклепа.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты исследования показывают, что фрезерование пера лопаток по второму и третьему методам дает лучшее качество поверхностного слоя. Учитывая также более высокую производительность этих методов, целесообразней фрезерование пера компрессорных лопаток производить на станках ОФ-31 или 4ФПЛ.

2. Расчет минимальных припусков на операции шлифования пера лопатки следует вести из условия снятия глубины залегания остаточных напряжений, оставшихся в поверхностном слое после фрезерования.

Минимальный припуск на шлифование пера лопатки, обработанной на модернизированном токарном станке, должен составлять не менее 0,35 мм, на станке ОФ-31 — 0,2 мм, на станке модели 4ФПЛ — 0,18 мм.