

где  $d, L$  - номинальный диаметр и длина соединения соответственно;

$d_1$  - диаметр отверстия охватываемой детали;

$d_2$  - наружный диаметр охватывающей детали.

Конструктивное разнообразие соединений с натягом не позволяет установить постоянных значений коэффициентов  $K_1, K_2$  и  $K_3$ . Поэтому их значения устанавливаются в результате экспериментальных исследований с учетом габаритных размеров, материала деталей, условий их работы в эксплуатации и др.

**В ы в о д.** Установление критериев применимости способа механической сборки соединения с натягом позволит избежать грубых ошибок в выборе способа сборки при автоматизированном проектировании сборочной операции.

### Б и б л и о г р а ф и ч е с к и й   с п и с о к

1. Б о б р о в н и к о в Г.А. Прочность посадок, осуществляемых с применением холода. М.: Машиностроение, 1971. 90 с.

2. Г р е ч и ш н и к о в Е.С., И л ь я ш е н к о А.А. Соединение с натягом. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

3. З е н к и н А.С., А р п е н т ь е в Б.М. Сборка неподвижных соединений термическими методами. М.: Машиностроение, 1987. 128 с.

УДК 621.9.047.7

Г.В.Смирнов, Н.Д.Проничев

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
В ПЕРЕ ЛОПАТОК ГТД

С привлечением положений теории технологической наследственности проведен анализ технологического процесса изготовления малой компрессорной лопатки

---

ISBN 5-230-16902-8. Методы обработки авиаматериалов, Самара, 1991

---

из сплава ВТ9. Обсуждены особенности формирования и распределения остаточных напряжений в различных зонах пера лопатки после электрохимической размерной обработки.

Влияние технологической наследственности на точность размеров и взаимного расположения поверхностей заготовок подробно рассмотрено в работах [1, 2]. Нами были ранее изучены закономерности формирования остаточных деформаций пера лопаток компрессора ГТД после электрохимической обработки (ЭХО) [3, 4, 5]. На современном этапе развития авиадвигателестроения повышаются требования к лопаткам компрессора по точности и сложности формы. В этой связи вопрос о влиянии остаточных напряжений (о.н.) на точность размеров пера и расположения его сечений относительно замка становится более актуальным. Кроме того, при малых толщине и радиусе входной и выходной кромок проблема распределения остаточных напряжений приобретает особую остроту.

Целью настоящей работы является анализ особенностей формирования и перераспределения о.н. в различных зонах пера лопатки при заданной структуре технологического процесса.

В качестве объекта исследования выбран технологический процесс изготовления лопатки компрессора 7 ступени из сплава ВТ9 с длиной пера 60 мм и хордой 25 мм. Анализировалось распределение остаточных напряжений в поверхностном слое пера после основных операций технологического процесса, связанных со снятием припуска или поверхностно-пластическим деформированием пера. Кроме того, анализировалось распределение припусков по перу лопатки после основных формирующих операций.

Методика измерения припуска по перу лопатки достаточно подробно описана в работе [3]. Измерение о.н. по глубине поверхностного слоя пера проводилось по методике Н.Н. Давиденкова на образцах, вырезанных из пера на соответствующих стадиях технологического процесса.

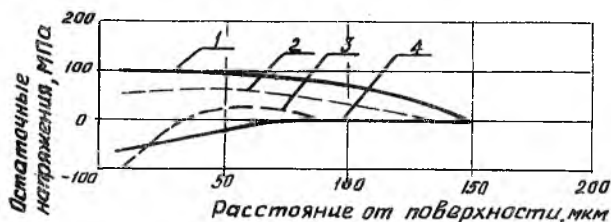
Технологический процесс изготовления лопатки имеет следующую структуру: заготовка (ВСП), окончательная обработка замка лопатки, электрохимическая обработка пера лопатки, упрочнение пера лопатки микрошариками, виброшлифование пера лопатки.

Особенностью данного технологического процесса является то, что

в нем отсутствует обработка лезвийным инструментом и в качестве заготовки используется прогрессивный способ высокоскоростной штамповки (ВСШ).

Припуск по перу соответствует техническим требованиям на заготовку, наименьшее его значение по спинке и корыту составляет 0,03-0,08 мм, наибольшее его значение достигает 0,9 мм. Наименьшая величина припуска по кромке в направлении хорды составляла 0,7-1,0 мм, наибольшая 2,0-2,2 мм, по толщине кромки соответственно 0,31-0,40 мм и 0,45-0,50 мм.

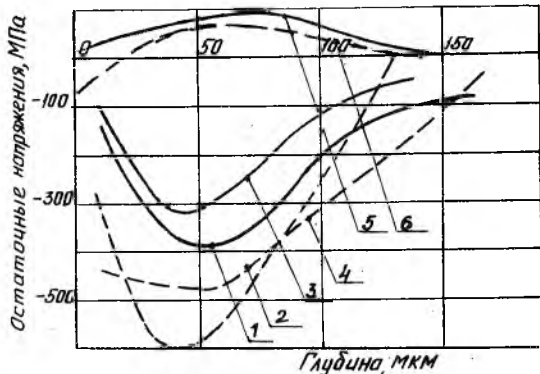
Распределение по перу о.н. после различных видов обработки показаны на рис. I-5.



Р и с. I. Изменение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя пера лопатки: — со стороны спинки; - - - со стороны корыта; 1, 2 — после ВСШ; 3, 4 — после электрохимической обработки

Как видно на рис. I (кривые 1, 2), величина о.н. после ВСШ не превышает +100 МПа по корыту и +50 МПа по спинке, уменьшаясь на глубине 150 мкм до 0.

Величина и характер о.н. таковы, что после снятия минимального припуска по перу ЭХО возможна неравномерная эпюра остаточных напряжений по поверхности пера. Наиболее вероятное расположение точек с минимальным припуском на корыте ближе к оси пера. Там, где величина съема более 0,15 мм, эпюра о.н. по спинке и корыту соответствует показанной на рис. I (кривые 3, 4). Слабоотрицательные по корыту (наибольшая величина - 50 МПа), они достигают нуля уже на глубине 100 мкм, по корыту характер их несколько сложнее, от отрицательных (-80 МПа) у поверхности через слабоположительные (+15 МПа) они достигают нуля на той же глубине в 100 мкм. В местах

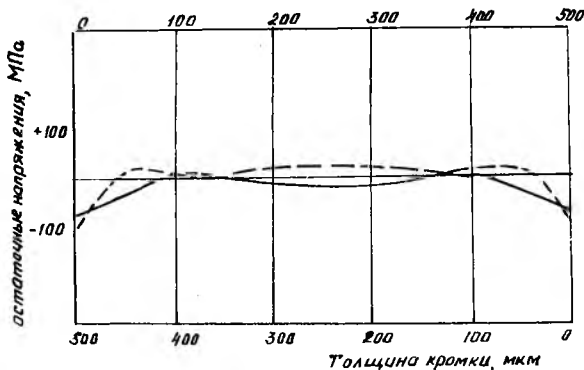


Р и с. 2. Изменение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя пера лопатки: — со стороны спинки, - - - со стороны корыта; по корыту: 1, 2 — после ГДУ, 3, 4 — после виброшлифования, 5, 6 — предполагаемое после ЭХО в зоне минимального съема припуска 0,03 мм

на корыте, приближенным к оси (местах наименьшего съема припуска), эпюра о.н., очевидно, будет соответствовать сумме эпюр на рис. 1 (кривые 1, 2) со сдвигом эпюры вправо на величину съема (рис. 2, кривые 5, 6).

Предлагаемое распределение о.н. по глубине после ЭХО получено в предположении съема минимальной величины припуска 30 мкм путем суммирования эпюр (рис. 1, кривые 1, 2) со сдвигом эпюры вправо на величину съема 30 мкм. По аналогии распределение о.н. можно получить при других значениях съема. Таким образом, эпюры, показанные на рис. 1 (кривые 3, 4) и рис. 2 (кривые 5 и 6) представляют собой крайние варианты распределения о.н. по глубине при минимальной и максимальной величине снимаемого припуска, реализуемые в одной операции. Чем больше зона минимального припуска по перу лопатки, тем большая часть его поверхности имеет эпюру, приближающуюся к показанной на рис. 2 (кривые 5, 6).

Особый интерес представляет распределение остаточных напряжений на кромках лопаток. В зависимости от соизмеримости толщины кромки и величины снимаемого припуска по ее толщине распределение о.н. будет отличаться от имеющегося на основной поверхности пера.



Р и с. 3. Предполагаемое изменение остаточных напряжений по толщине кромки пера лопатки в 500 мкм после ЭХО: — со стороны спинки, - - - - - корыта

При равновесном состоянии кромки пера эюра о.н. с учетом рис. 1 будет иметь вид, представленный на рис. 3. Таким образом, на пере лопатки можно выделить три основные зоны поверхности (рис. 4):

1 - зоны поверхности, непосредственно прилегающие к кромкам лопатки;

2 - зоны гарантированного снятия припуска глубиной более 0,15 мм;

3 - зона на корыте, непосредственно прилегающая к оси пера, когда съем близок к минимальному. Очевидно, со стороны спинки зона 3 отсутствует и переходит в зону 2.

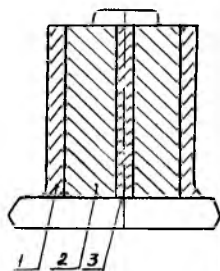
В первой зоне эюра о.н. соответствует показанной на рис. 3, во второй зоне - рис. 1 (зависимости 3, 4), в третьей - рис. 2 (зависимости 5, 6).

На границах зон, по-видимому, будут находиться промежуточные эюры о.н.

Из сказанного следует следующее:

1) эюры о.н. в поверхностном слое лопатки после ВСШ и ЭХО существенно различаются в разных зонах пера;

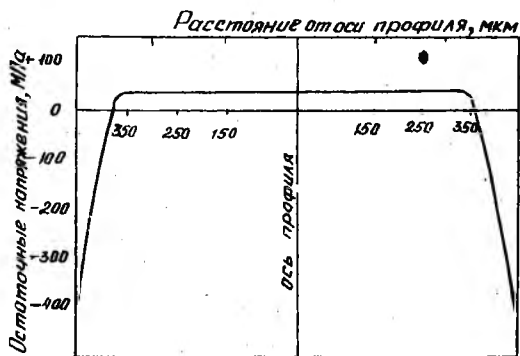
2) наибольший градиент о.н. имеет место на кромках пера лопатки (по ее толщине), однако величина напряжений при этом не превышает до-



Р и с. 4. Зоны характерных эюр остаточных напряжений по перу со стороны корыта

пустимых. Следует иметь в виду, что подобный характер изменения остаточных напряжений – двойная смена знака при движении от поверхности пера к его оси – без последующей дополнительной операции по выравниванию о.н. по знаку может служить дополнительным источником снижения усталостной прочности;

3) после электрохимической обработки пера лопаток, полученных методом ВСШ, требуется обязательная дополнительная упрочняющая обработка (ГДУ) с целью выравнивания характера эпюры остаточных напряжений по всей поверхности пера и снижения градиента напряжений по толщине кромки (рис. 5);



Р и с. 5. Распределение остаточных напряжений по толщине кромки пера после упрочнения его ГДУ

4) значительная неравномерность съема припуска по перу (наибольший съем по кромкам и наименьший по корыту) после ЭХО приводит к перераспределению остаточных напряжений по поверхности пера. В результате на кромке пера вместо эпюры напряжений, близкой к нулевым значениям, может возникнуть эпюра со значительным градиентом положительных и отрицательных значений. Это косвенно подтверждается результатами измерения остаточных напряжений на кромке после ГДУ (рис. 5).

Перераспределение остаточных напряжений в результате может привести к короблению кромочной части пера как наиболее тонкой, хотя на практике это отмечается редко.

1. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. Минск: Наука и техника, 1971. 210 с.

2. Исаев А.М., Овсеенко А.И. Определение остаточных напряжений и деформаций компрессорных и турбинных лопаток // Энергомашиностроение, 1968. № 8. С. 31-34.

3. Смирнов Г.В., Бороздин Б.П., Филимошин В.Г., Потапова Н.И. К вопросу о влиянии остаточных напряжений на точность электрохимической обработки лопаток ГТД // Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей из высокопрочных материалов: Сб. тр. Казань, 1981. С. 37-42.

4. Смирнов Г.В., Шманев В.А., Филимошин В.Г. Влияние остаточных напряжений на точность ЭХО крупногабаритных лопаток ГТД из титановых сплавов // Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: Сб. тр. М.: МДНТИ, 1984, С. 3-8.

5. А.с. 655497 СССР. Способ электрохимической обработки / Б.П.Бороздин, Б.М.Несмелов, Ю.С.Шипов, В.Г.Филимошин, А.П.Шулепов, Г.В.Смирнов (СССР). Опубл. Бюл. № 13. 1979.