

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЛОПАТОК – СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И РЕСУРСА

© 2006 М.Б. Сазонов, С.Ю. Сидоров

Самарский государственный аэрокосмический университет

Установлено влияние режимов обработки микрошариками в сочетании с различными методами отделочной обработки на сопротивление усталости лопаток компрессора. Предложены мероприятия, позволяющие существенно повысить предел выносливости лопаток компрессора, их ресурс и надежность работы за счет оптимизации напряженного состояния лопаток с учетом рабочих нагрузок путем совершенствования технологических процессов упрочняюще-отделочной обработки лопаток.

Создание поверхностного слоя с оптимальным упрочнением, то есть с наведением в нем необходимого уровня и глубины распространения сжимающих остаточных напряжений (о.н.), получение равномерного микрорельефа с большими шаговыми параметрами, радиусами впадин, шероховатостью с  $Ra=0,3...0,1\text{мкм}$ , позволяет повысить выносливость, ресурс и надежность лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Эта задача решается применением комбинированной упрочняюще-отделочной обработки.

Выбор метода и режима упрочняющей обработки зависит от нагрузки и фактического напряженного состояния лопаток в процессе работы, изменение его во времени. При этом надо также принимать во внимание тонкие сечения пера лопаток, острые кромки, являющиеся концентраторами напряжений.

Используемые в производстве технологические процессы окончательной обработки лопаток компрессора довольно часто включают в себя после полирования гидродробеструйную обработку (ГДО) стальными шарами диаметром 2,0...2,5 мм с последующим виброупрочнением (ВУ), виброобработкой на дисбалансных установках (ВУД) или виброшлифованием (ВШ), гидрогалтовкой дробью диаметром 0,6...1,0 мм (ГГД), ультразвуковым упрочнением шарами 2...3 мм (УЗУ).

При таких видах обработки шероховатость обеспечивается с  $Ra$  в пределах 0,4...0,08 мкм в зависимости от режима и вида отделки, В поверхностном слое толщиной 150...250 мкм происходит упрочнение до 20...30% в зависимости от материала лопатки, и формируются сжимающие остаточные напряжения до 400...600 МПа с подслоинным максимумом на глубине 40...60 мкм. Напряжения ближе к поверхности спадают до 100...400 МПа.

Данные методы обработки позволяют обеспечить значительное повышение предела выносливости толстостенных деталей, что подтверждено усталостными испытаниями круглых образцов из сплава ВТ9 с диаметром рабочей части 5 мм. Однако они сопровождаются большой ударной нагрузкой, глубоким упрочнением и часто наблюдающимся расклепом кромок, в особенности на тонких лопатках компрессора среднего (КСД) и высокого давления (КВД). Последующая зачистка кромок полированием полностью не исправляет этот дефект. Кроме того, при полировании возможны местные прожоги, происходит снижение сжимающих остаточных напряжений и даже образование растягивающих.

Как показывают исследования разрушение лопаток в процессе эксплуатации носит усталостный характер. Из комплекса характеристик качества поверхностного слоя, оказывающих влияние на сопротивление усталости, одно из главных мест отводится напряженному состоянию этого слоя в условиях эксплуатации. Допустимый уровень напряжений определяется прочностными и пластическими свойствами материала лопаток, их конструктивными особенностями и режимом работы. Этот уровень можно существенно регулировать величиной и формой эпюры остаточных напряжений, которые в области упругого состояния материала алгебраически сумми-

руются с рабочими напряжениями, изменяя их величину. Это особенно важно при циклических нагрузках, когда при наличии остаточных напряжений сжатия цикл становится асимметричным с уменьшением амплитуды растягивающих напряжений.

Экспериментально получена зависимость между пределом выносливости и остаточными напряжениями:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1 \text{ исх}} - c \sigma_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1 \text{ исх}}$  - предел выносливости полированных образцов, без наклепа и остаточных напряжений;

$\sigma_{\text{ост}}$  - максимальные остаточные напряжения в поверхностном слое;

$c$  - коэффициент, изменяющийся в пределах 0,1...0,35 в зависимости от пластических свойств материала и формы образцов (большие значения относятся к закаленным сталям и титановым сплавам).

Из зависимости (1) видно, что для повышения предела выносливости деталей необходимо увеличивать уровень остаточных напряжений. При выборе этого значения необходимо учитывать форму и размеры детали, возможные концентрации напряжений.

Проведенные исследования показали, что поднять уровень напряжений сжатия и приблизить их максимум к поверхности, возможно за счет применения для упрочнения поверхности обработки микрошариками (ОМШ).

При ОМШ диаметром 160...300 мкм титанового сплава ВТ9 со скоростями 45...50 м/с в течение 180...300 с происходит упрочнение поверхностного слоя толщиной 60...120 мкм, при этом в нём формируются остаточные напряжения сжатия с максимумом у поверхности до 700 МПа, которые по глубине снижаются с большим градиентом. Однако уровень шероховатости при этом повышается с  $Ra=0,15...0,20$  до  $Ra=0,6...1,3$  мкм, что не отвечает требованиям чертежа лопаток. Поэтому для снижения шероховатости после ОМШ рекомендована дополнительная отделочная обработка. Для лопаток компрессора низкого давления (КНД) и КСД с шероховатостью  $Ra = 0,4...0,2$  мкм можно использовать ВУ, ВШ и ВУД для КВД - виброконтактное полирование абразивной лентой (ВКПАЛ) или ВУД керамическими

гранулами, обеспечивающие шероховатость  $Ra = 0,2...0,1$  мкм. Кроме того, обработки ВУ и ВУД позволяют дополнительно увеличивать шаговые параметры  $S$  и  $S_m$ , сделать микрорельеф более плавным. Обработка ВУ также повышает уровень остаточных напряжений сжатия, в то время как при ВШ и ВКПАЛ он несколько снижается.

Установление влияния режимов ОМШ в сочетании с различными методами отделочной обработки на сопротивление усталости лопаток компрессора проводилось на специальных профильных образцах с тонкими прямоугольными сечениями, 12x1 мм на электродинамическом вибраторе с частотой 190Гц. На диаграмме (рис.1) приведены пределы выносливости образцов из сплава ВТ9, полученные на базе  $N = 2 \cdot 10^7$  циклов.

Параметры качества поверхностного слоя, соответствующие указанным в диаграмме видам обработки, представлены в таблице 1.

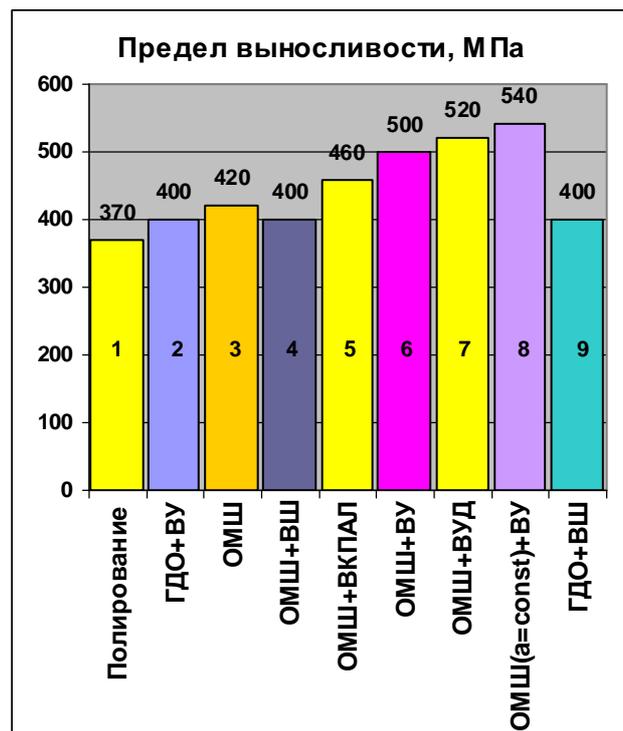


Рис.1. Влияние различных видов упрочняющей отделочной обработки на предел выносливости и профильных тонкостенных образцов из сплава ВТ9

Как видно из рис.1 и таблицы, при упрочнении по технологиям ГДО + ВУ и ГДО + ВШ, несмотря на достаточно высокий уровень сжимающих остаточных напряжений и благоприятный микрорельеф,

Таблица 1. Параметры качества поверхностного слоя

Вид обработки	$\sigma_{ост}$ , МПа	S, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм
1	-100	15...18	0,7...40	0,3...0,35
2	-200...-500	50...55	0,6...0,7	0,2...0,3
3	-480...-550	38...43	1,6...4,0	0,8...1,8
4	-150...-30	15...20	0,4...1,4	0,1...0,4
5	-250...-300	15...20	0,5...0,6	0,1...0,2
6	-450...-550	50...70	0,8...1,2	0,3...0,6
7	-500...-600	50...80	0,6...0,8	0,2...0,3
8	-600...-700	60...80	0,8...1,2	0,3...0,4
9	-250...-400	15...20	0,5...1,0	0,1...0,3

предел выносливости повышается незначительно и колеблется в интервале 350...400 МПа. Разрушение начиналось с кромок, которые после упрочнения не зачищались.

Обработка только микрошариками на оптимальном режиме ( $v=47\text{м/с}$ ,  $\tau=3\text{мин}$ ) повышает предел выносливости до 380...420 МПа. Относительно невысокий уровень предела выносливости обусловлен повышенной шероховатостью.

Использование ОМШ + ВШ повышает  $\sigma_{-1}$  незначительно, до 380...400 МПа. В этом случае, хотя шероховатость поверхности снижается почти на 2 класса, одновременно значительно уменьшаются сжимающие остаточные напряжения на поверхности до 300 МПа вследствие удаления при ВШ тонкого поверхностного слоя с высоким уровнем остаточных напряжений. Кроме того, на поверхности с помощью электронного микроскопа замечены отдельные риски от действия абразивных гранул, которые играют роль концентраторов напряжений.

Наиболее существенно, до 460 МПа, повышается предел выносливости при ОМШ + ВКПАЛ (за счет снижения шероховатости до  $Ra=0,1...0,2\text{мкм}$ , сохранения о.н. на уровне 250...300 МПа) и до 500...540 МПа при ОМШ+ВУД и ОМШ +ВУ (за счет повышения остаточных напряжений до 500..700 МПа, снижения шероховатости до  $Ra=0,2...0,4\text{мкм}$ , получения благоприятного микрорельефа и отсутствия отдельных рисок).

Из приведенных выше данных построены зависимости (рис.2) предела выносливости от величины остаточных

напряжений у поверхности (рис.2,а) и величины максимальных напряжений (рис.2,б), которые можно представить в

$$\sigma_{-1}=350-0,31\sigma_{ост.пов} \quad (2.a)$$

$$\sigma_{-1}=350-0,25\sigma_{ост.макс.} \quad (2.б.)$$

В первом случае (рис.2,а) разброс данных значительно меньше, а коэффициент при  $\sigma_{ост}$  больше, чем во втором (рис.2,б). Это свидетельствует лишь раз о том, что эпюры остаточных напряжений с максимумом у поверхности более благоприятны для увеличения предела выносливости.

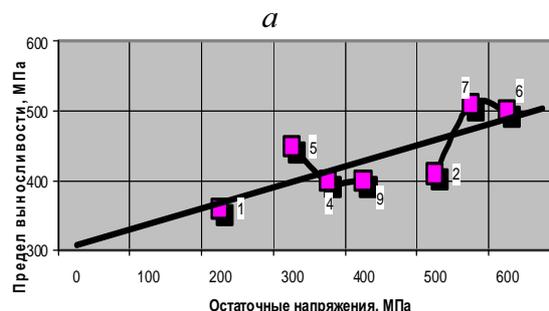
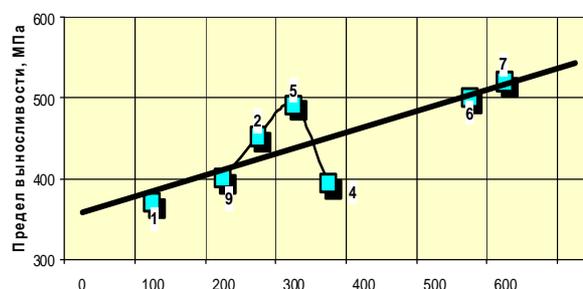


Рис.2. Зависимость предела выносливости тонкостенных образцов из сплава ВТ9 от остаточных напряжений у поверхности (а) и максимальных напряжений (б). Номера точек соответствуют видам обработки.

Из рис.2 видно, что повышение уровня напряжений сжатия у поверхности до наибольшего допустимого значения является резервом повышения выносливости лопаток.

На рис.3 показан анализ напряженного состояния рабочей лопатки КВД 10-й ступени изготовленной из стали ЭП517, без рабочей нагрузки и при воздействии на лопатку центробежной силы и изгибающего момента, возникающего при колебаниях пера лопатки. Напряжения определялись в продольном сечении пера у входной кромки с радиусом  $r = 0,18$  мм и толщиной  $H = 0,36$  мм (рис.3,а) по методике И.А. Биргера для пластин. Как видно из рис.3, после обработки пера по технологии ВШ в лопатке без нагрузки (рис.3,в) имеют место сжимающие остаточные напряжения в слое толщиной 0,12мм. Максимум напряжений сжатия у поверхности составляет 630. Таким образом, уровень напряжений еще далек от предельных значений (850...1000 МПа), в то же время в сердцевине растягивающие напряжения достигают 1150 МПа. Эпюра напряжений симметрична. С учетом рабочих нагрузок напряжения на поверхности остаются на прежнем уровне (рис.3,з), в то время как в сердцевине они возрастают до 1200 МПа и превышают предел текучести на растяжение ( $\sigma_T = 1050$  МПа).

Такое распределение напряжений является явно неблагоприятным. Очаг усталостной трещины может возникнуть и под поверхностью. Предел выносливости при частоте колебаний  $f = 1200$  Гц, составляет 560 МПа и может быть увеличен для ЭП517.

Как видно из рис.3, напряжения сжатия на поверхности лопаток необходимо повышать, а в сердцевине снижать за счет уменьшения толщины упрочненного слоя. Желаемая расчетная эпюра остаточных напряжений  $\sigma$  приведена на рис.3,б, она описывается параболической зависимостью вида

$$\sigma = \sigma_{\max} \left( \frac{6}{H^2} x^2 - \frac{6}{H} x + 1 \right),$$

где  $\sigma_{\max}$  - о.н. у поверхности,  $x$  - расстояние от поверхности.

Расчетная эпюра (рис.3,б) отличается от реальной (рис.3,в) допустимым уровнем сжимающих о.н. с максимумом у поверхности (до 500 МПа), с небольшой толщиной (до

0,12 мм) упрочненного слоя и невысокими (550...600 МПа) растягивающими напряжениями в сердцевине.

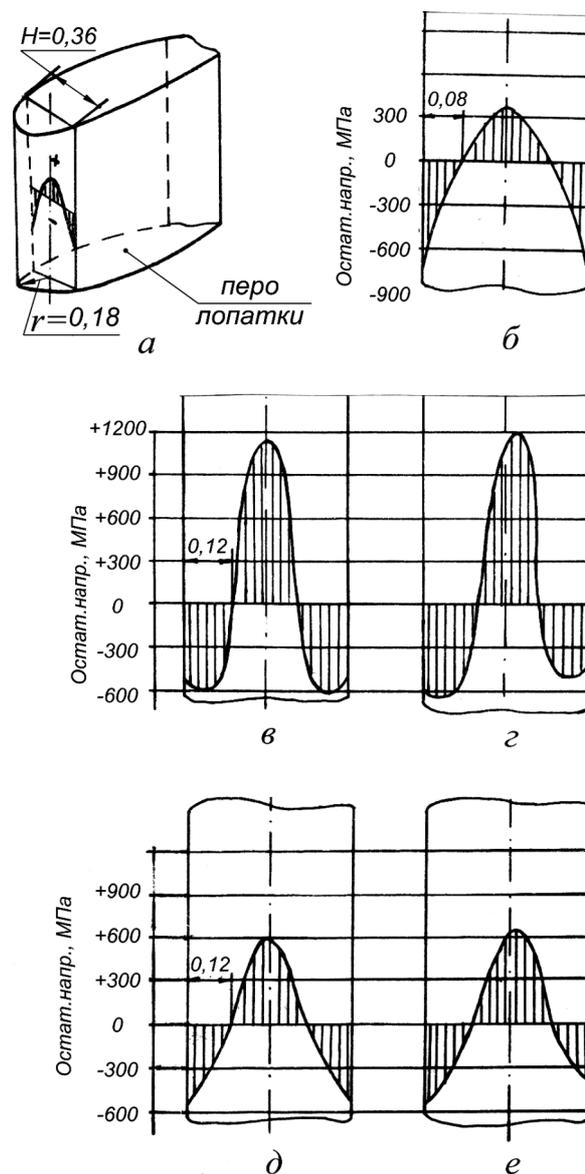


Рис.3. Напряжения в пере рабочей лопатки 10-й ступени КВД: а - место определения о.н.; б - оптимальная расчетная эпюра о.н.; в, г - эпюры о.н. после обработки ВШ; д, е - эпюры о.н. после обработки ОМШ + ВУД.

Использование обработки ОМШ + ВУД позволило получить эпюру о.н., близкую к расчетной (рис.3,д), максимумом о.н. у поверхности до 500 МПа и с учетом рабочих нагрузок (рис.3,е) до 570 МПа.

За счет этого предел выносливости лопаток повысился до 640 МПа (на 28%).

Как видим, дальнейшее приближение эпюры к оптимальной может дать дополнительное увеличение предела выносливости.

Похожая картина получена и в рабо-

чей лопатке 7 ступени КСД. Замена технологического процесса ГДО + ВШ на ОМШ с притенением кромок и последующим ВУД позволило повысить предел выносливости с 480 до 520 МПа. Здесь также не исчерпаны имеющиеся резервы повышения выносливости с помощью увеличения о.н. у поверхности.

Таким образом, за счет оптимизации напряженного состояния лопаток с учетом рабочих нагрузок путем совершенствования технологических процессов упрочняюще-отделочной обработки лопаток можно значительно повысить предел выносливости лопаток компрессора, их ресурс и надежность работы.

## **OPTIMIZATION OF THE RESIDUAL STRESS IN THE SURFACE LAYER OF THE BLADES IS THE METHOD OF THE INCREASING RELIABILITY AND RESOURCE**

© 2006 M.B. Sazonov, S.Y. Sidorov

Samara State Aerospace University

The results of the analysis of the stressed state in the blades of the compressor are represented. The ability of rising the fatigue limit of the blades, at the expense of optimization of the residual stress by improving the finishing hardening - the finishing treatment, shown.