

В.И.Волков, А.Н.Цейтлин, В.И.Цейтлин

УПРОЧНЕНИЕ МИКРОШАРИКАМИ - РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ  
И НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Для обеспечения стабильных и благоприятных характеристик поверхностного слоя деталей после механической обработки в газотурбинном двигателестроении широкое применение находит упрочнение деталей стальными шариками ШХ-15 ГОСТ 3722-66 в среде трансформаторного масла на эжекторных гидродробеструйных установках. Этому методу упрочнения с применением стальных шариков диаметром 2-3 мм подвергаются направляющие лопатки компрессора из сплавов ВТ-20, ВТ9 и рабочие лопатки компрессора из сплавов ВТ8, ВТ9, ЭИ-598ВД.

Ручное полирование профиля пера лопаток до упрочнения приводит к тому, что в поверхностном слое наблюдаются растягивающие остаточные напряжения, неравномерная микротвердость по поверхности. Даже самое тщательное полирование не гарантирует отсутствия дефектов в виде направленных рисок и прижогов. Применение гидродробеструйного упрочнения позволило благоприятно изменить состояние поверхностного слоя пера лопаток. Как видно из рис. 1, гидродробеструйная обработка обеспечивает формирование сжимающих остаточных

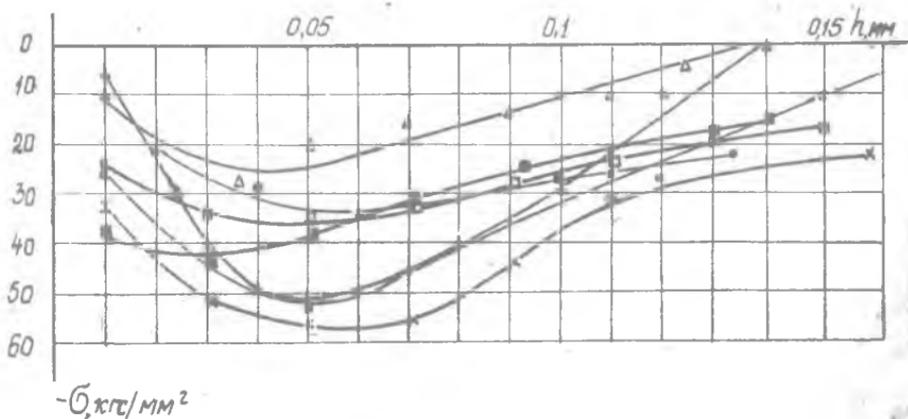


Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений в пера направляющей лопатки из сплава ВТ20 после гидродробеструйной обработки на эжекторной установке  $P_{ж} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ ,  $d_{ш} = 2,5 \text{ мм}$ ;  $t = 2 \text{ мин}$

напряжений в поверхностном слое пера лопаток на глубине более 150 мкм. Поверхностная микротвердость лопаток из сплава ВТ20 после

полирования повышается с 320-366 кгс/мм<sup>2</sup> до 420-433 кгс/мм<sup>2</sup>. Аналогичные результаты были получены при исследовании лопаток компрессора из сплава ВТ9 и ЭИ-598ВД.

Изменение состояния поверхностного слоя пера лопаток способствовало существенному повышению предела усталостной прочности лопаток для сплава ВТ9 с 35 до 45 кгс/мм<sup>2</sup> и с 44 до 50 кгс/мм<sup>2</sup> - для ЭИ-598ВД. Это соответствует повышению долговечности более чем в 25 раз. Испытания лопаток проводились на электродинамическом вибраторе на базе 20x10<sup>6</sup> циклов при T= 20<sup>0</sup>С.

Из рис. I следует, что процесс гидродробеструйной обработки не обеспечивает стабильного уровня сжимающих остаточных напряжений при постоянном режиме обработки. Кроме того, эпюра остаточных напряжений имеет характерный для обычной гидродробеструйной обработки подслоный максимум, хотя предпочтительной является эпюра с максимумом напряжений на поверхности [I].

Была поставлена задача разработать способ дробеструйной обработки, обеспечивающий формирование стабильной эпюры сжимающих остаточных напряжений с максимальной величиной непосредственно на поверхности.

Известно, что пластическая деформация в металле происходит в результате сдвигов по определенным кристаллографическим плоскостям, вызываемых касательными напряжениями [2]. При дробеструйном наклепе подслоный максимум сжимающих остаточных напряжений можно объяснить тем, что в зоне контакта дробинки с поверхностью детали максимальные касательные напряжения и деформации возникают на некотором удалении от поверхности. Известно также [3], что при контактной схеме деформирования область максимальных касательных напряжений располагается под упрочняемой поверхностью на глубине (0,3-0,4)  $\delta$ , где  $\delta$  - полуширина контактного участка. Отсюда следует, что одним из путей приближения подслоного максимума остаточных напряжений к поверхности является уменьшение поверхности контактного участка. Это достигается уменьшением размера деформируемых дробинки.

Процесс поверхностного пластического деформирования дробью является динамическим процессом, следовательно, определенную роль в протекании пластической деформации и в формировании эпюры остаточных напряжений играет скорость полета дробинки - скорость деформирования. С увеличением скорости удара увеличивается сопротивление пластической деформации, уменьшается деформированный объем, максимум остаточных напряжений перемещается к поверхности. Для подтвержде-

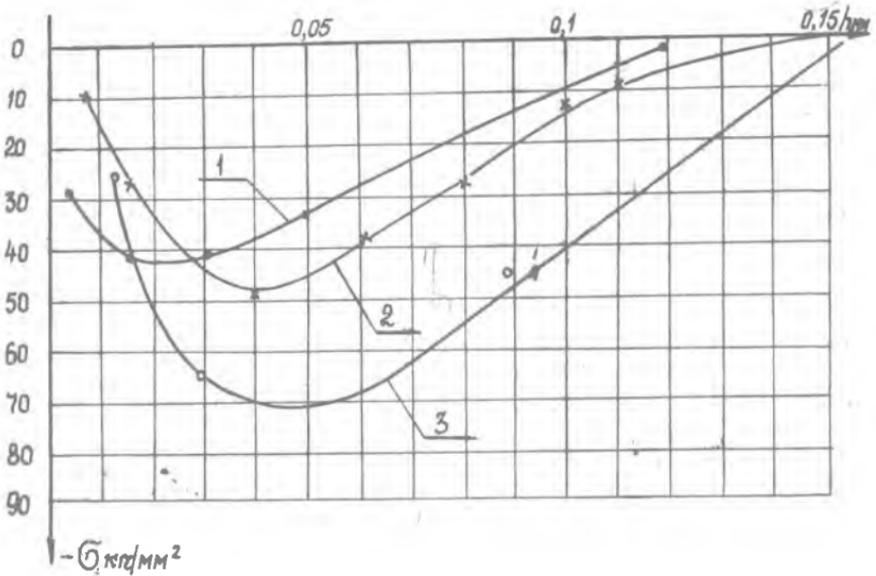


Рис.2.Эпюры остаточных напряжений в плоских образцах  $100 \times 20 \times 4 \text{ мм}$  из сплава ВТ9 после гидродробеструйного упрочнения с  $P_H = 3,0 \text{ кгс/см}^2$ ,  $t = 2 \text{ мин}$ , шариками различного диаметра:  
 1 -  $d_{ш} = 1,6 \text{ мм}$ , 2 -  $d_{ш} = 2 \text{ мм}$ , 3 -  $d_{ш} = 2,5 \text{ мм}$

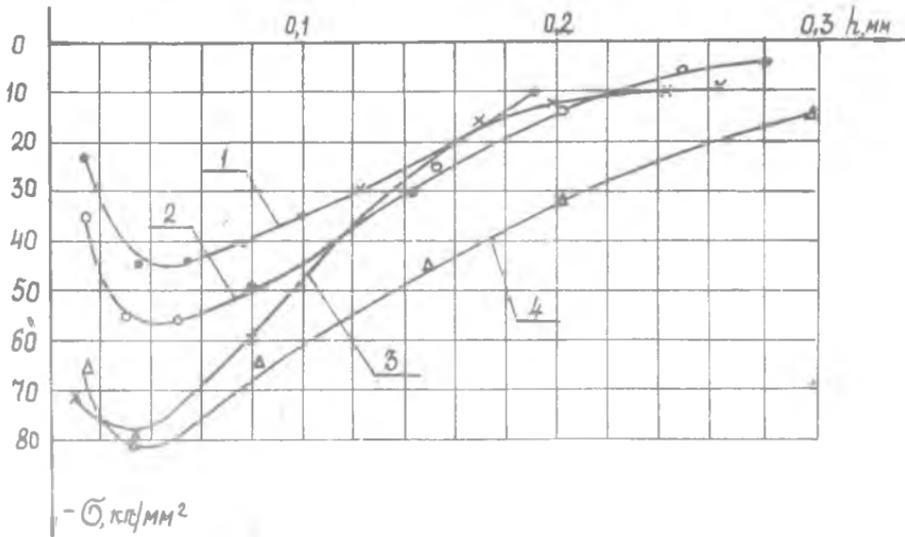


Рис.3.Эпюры остаточных напряжений в плоских образцах  $100 \times 20 \times 4 \text{ мм}$  из сплава ЗИ598ВД после гидродробеструйного упрочнения стальными шариками  $d_{ш} = 1,6 \text{ мм}$ ;  $t = 2 \text{ мин}$  при разных давлениях:  
 1 - 4 при  $P_H = 1,2; 1,5; 1,8 \text{ и } 2,1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

дения вышеизложенных соображений было проведено исследование остаточных напряжений после упрочнения образцов из сплава ВТ9 и ЭИ-598ВД гидродробеструйной обработкой на различных режимах.

Как видно из рис. 2, уменьшение диаметра стальных шариков в 1,5 раза при упрочнении сплава ВТ9 при постоянном давлении масла и одинаковом времени обработки приводит к заметному сдвигу подслоного максимума эпюры сжимающих остаточных напряжений к поверхности.

Исследование влияния скоростей полета стальных шариков на формирование эпюр остаточных напряжений проводилось на плоских образцах из сплава ЭИ-598ВД при гидродробеструйной обработке шариками  $D_{ш} = 1,6$  мм в течение 2 мин при различных давлениях трансформаторного масла. Как видно из рис. 3, с увеличением скоростей полета стальных шариков подслоный максимум остаточных напряжений несколько сдвигается к поверхности.

Таким образом, для получения эпюр сжимающих остаточных напряжений без подслоного максимума необходимо уменьшить диаметр стальных шариков и увеличить их скорость полета.

Для различных этих предложений был разработан способ получения металлических микрошариков, размером 63-100, 100-160, 160-200 мкм<sup>х</sup>, и роторная дробеметная установка, преимуществом которой перед эжекторными гидродробеструйными и пневматическими является возможность широкого регулирования скоростей полета микрошариков и постоянство их скоростей в эффективном ядре распыла.

Исследования состояния поверхностного слоя после обработки микрошариками производились на плоских образцах из сплавов ВТ20, ВТ9, ЭИ598ВД, ЭП718ВД. Как видно из рис. 4, обработка микрошариками обеспечивает формирование значительных сжимающих остаточных напряжений с максимумом на поверхности независимо от марки материала. Исследование микрогеометрии поверхности образцов показало, что обработкой микрошариками можно достичь шероховатости 8 класса. Благоприятный характер получаемой эпюры сжимающих остаточных напряжений, повышенная твердость тонкого поверхностного слоя, высокий класс чистоты обработки, возможность упрочнения малогабаритных деталей с острыми кромками и малыми радиусами без их повреждений позволили рекомендовать этот метод для упрочнения лопаток компрессора, деталей с мелким резьбами.

<sup>х</sup> Авторское свидетельство 417233.

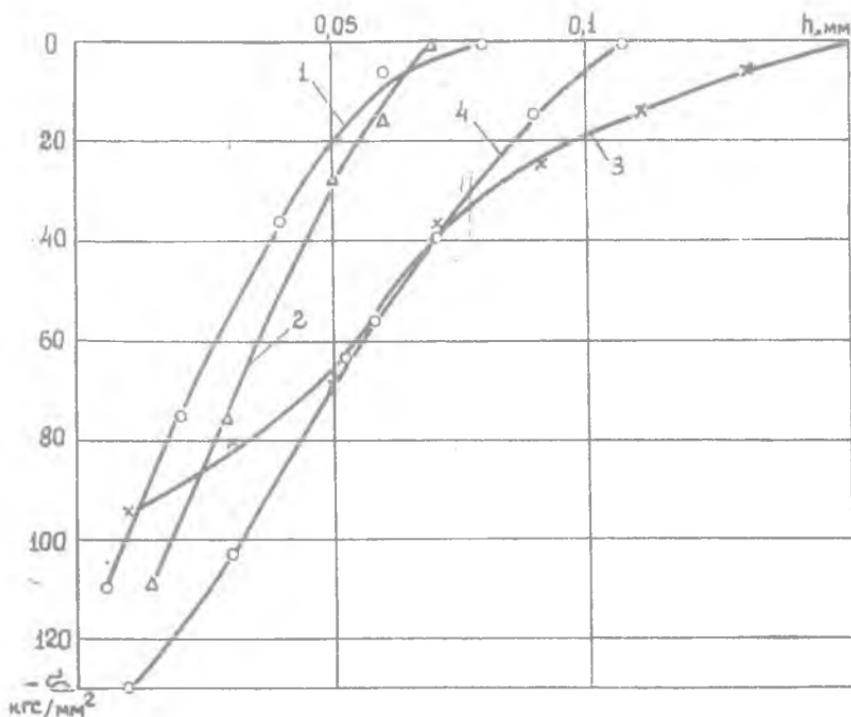


Рис.4.Эпюры остаточных напряжений в плоских образцах после обработки микрошариками ШХ-15.  $D_{ш} = 160 - 200 \text{ мкм}$ ,  $t = 30 \text{ сек}$ ;  
 $V = 70 \text{ м/сек}$ , ( $n = 4600 \text{ об/мин}$ ):

1 - ВТ20; 2 - ВТ9; 3 - ЭП718ВД; 4 - ЭИ598ВД

Сравнительные усталостные испытания лопаток компрессора из сплава ЭИ598ВД и ВТ9 при  $20^\circ\text{C}$  показали, что упрочнение микрошариками обеспечивает дополнительное повышение усталостной прочности на 10-12% по сравнению с гидродробеструйным упрочнением стальными шариками  $D_{ш} = 2 \text{ мм}$  и на 27% по сравнению с полированием (рис.5). Испытания проводились на электродинамическом вибраторе при консольном креплении лопаток с частотой основного тона изгибных колебаний  $f = 1200 \text{ Гц}$  на базе  $20 \times 10^6$  циклов.

Учитывая, что лопатки компрессора последних ступеней работают в условиях повышенных температур, достигающих  $650^\circ\text{C}$ , при которых

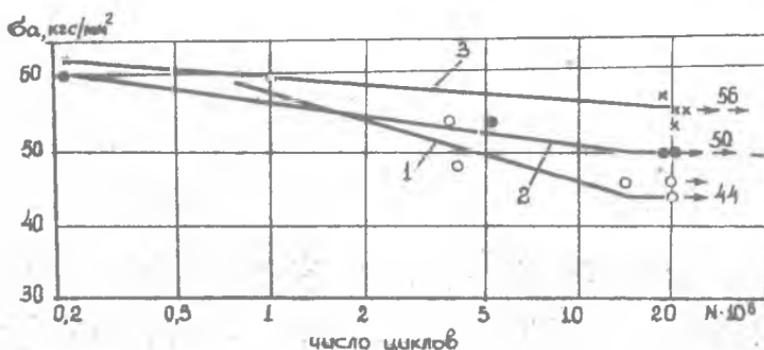


Рис.5. Кривые выносливости рабочих лопаток компрессора из сплава ЭИ598ВД:

1 - исходный вариант (полирование); 2 - гидродробеструйное упрочнение с  $P_{\text{ж}} = 2,3 \text{ кгс/см}^2$ ;  $\varnothing_{\text{ш}} = 2 \text{ мм}$ ;  $t = 2 \text{ мин}$  + виброупрочнение микрошариками ИЖ-15,  $\varnothing_{\text{ш}} = 160 - 200 \text{ мкм}$ ;  $V = 70 \text{ м/сек}$  ( $n = 3600 \text{ об/мин}$ );  $t = 30 \text{ сек}$

возможна релаксация остаточных напряжений и проявление вредного влияния наклепа, было исследовано влияние упрочнения микрошариками на выносливость в условиях симметричного и асимметричного цикла нагружения при повышенных температурах, а также на длительную прочность. Испытания проводились при температуре  $700^\circ\text{C}$  на базе  $T = 300$  час на круглых образцах из сплава ЭИ598ВД, обработанных по двум вариантам - электрополированием и упрочнением микрошариками на режиме упрочнения лопаток. Установлено, что обработка микрошариками не привела к изменению длительной прочности.

Усталостные испытания круглых образцов с надрезом  $R = 0,75 \text{ мм}$  после электрополирования и упрочнения микрошариками при температуре  $700^\circ\text{C}$  на базе  $20 \times 10^6$  циклов показали, что выносливость упрочненных микрошариками образцов была выше на 12% и составила  $32 \text{ кгс/мм}^2$ .

Влияние асимметричного цикла нагружения ( $\sigma_m = 15 \text{ кгс/мм}^2$ ) на эффективность упрочнения было исследовано на плоских стандартных образцах при температуре  $750^\circ\text{C}$  на базе  $5 \times 10^6$  циклов. Выносливость упрочненных микрошариками образцов на 38% выше выносливости термообработанных с последующими полированием образцов.

Таким образом, упрочнению микрошариками можно подвергать также и детали из жаропрочных сплавов, работающих в условиях повышенных температур.

Высокая эффективность упрочнения микрошариками проявилась на деталях из титанового сплава BT9 с резьбами M8xI,5, M10xI,5, M14xI,5. В данном случае применение других методов упрочнения резьб затруднено в связи с малыми радиусами впадин и вершин резьбы.

На основании вышеизложенного можно заметить, что разработка и внедрение дробеструйного упрочнения микрошариками явились резервом дополнительного повышения прочности и надежности, позволяющим расширить область применения поверхностного пластического деформирования деталей газотурбинных двигателей.

#### Л и т е р а т у р а

1. К о б р и н М.М. Эпюры остаточных напряжений при контактной и контактно-сдвиговой схемах поверхностного пластического деформирования. "Вестник машиностроения", 1963, № I.
2. О д и н г И.А. Основы прочности металлов паровых котлов, турбин и турбогенераторов. Госэнергоиздат, 1949.
3. С а в е р и н М.М. Контактная прочность материала. ЦНИИТМАШ. Кн.2, Машгиз, 1946.

Б.И.Крамаровский, А.Е.Вишняков, В.В.Степанов

#### ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА МЕТОДОМ ВИБРОГАЛТОВКИ СТАЛЬНЫМИ ШАРИКАМИ

В настоящее время многие газотурбинные двигатели имеют компрессоры с лопатками из стали IX12H2BMФ (ЗИ96I), которые упрочнены виброгалтовкой стальными шариками. Вместе с тем в эксплуатации имеется еще большое число изделий с неупрочненными лопатками компрессора. Такие лопатки при работе подвергаются эрозионному износу и механическим повреждениям кромок (забоины) более интенсивно, чем упрочненные. Вследствие этого предел выносливости неупрочненных лопаток меньше, что вызывает необходимость их замены на новые при промежуточном ремонте. У упрочненных лопаток выносливость практически не снижается,