

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Митряев К.Ф., Сазонов М.Б.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для повышения ресурса и надежности работы лопаток компрессора газотурбинных двигателей, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, необходимо при изготовлении обеспечивать оптимальное упрочнение поверхностного слоя с наведением в нем необходимого уровня и глубины распространения сжимающих остаточных напряжений, шероховатость поверхности с $R_a=0,3...0,1$ мкм, равномерным микрорельефом, большими шаговыми параметрами и радиусами впадин. Эта задача решается применением на финишных операциях упрочняюще-отделочной обработки.

Выбирая метод и режим упрочняющей обработки необходимо учитывать нагрузки и фактическое напряженное состояние лопаток в процессе работы. При этом надо так же принимать во внимание тонкие сечения пера лопаток, острые кромки, являющиеся концентраторами напряжений.

Существующие методы финишной обработки лопаток компрессора 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), ультразвуковое упрочнение (УЗУ) шарами диаметром 2...3 мм. При таких видах обработки шероховатость поверхности составляет $R_a=0,4...0,08$ км в зависимости от режима и вида отделки. В поверхностном слое толщиной 0,15...0,25 мм происходит упрочнение и формируются сжимающие остаточные напряжения до 400...600 Па с подслоным максимумом на глубине 0,04...0,06 мм [1,2]. Напряжения ближе к поверхности спадают до 100...400 МПа (рис. 1). Эти 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 [1]. Однако они сопровождаются большой ударной нагрузкой, глубоким упрочнением и часто наблюдающимся расклепом кромок, в особенности при обработке лопаток компрессора среднего (КСД) и высокого (КВД) давления имеющих тонкие сечения и острые кромки. Последующая зачистка кромок полированием полностью не исправляет этот дефект.

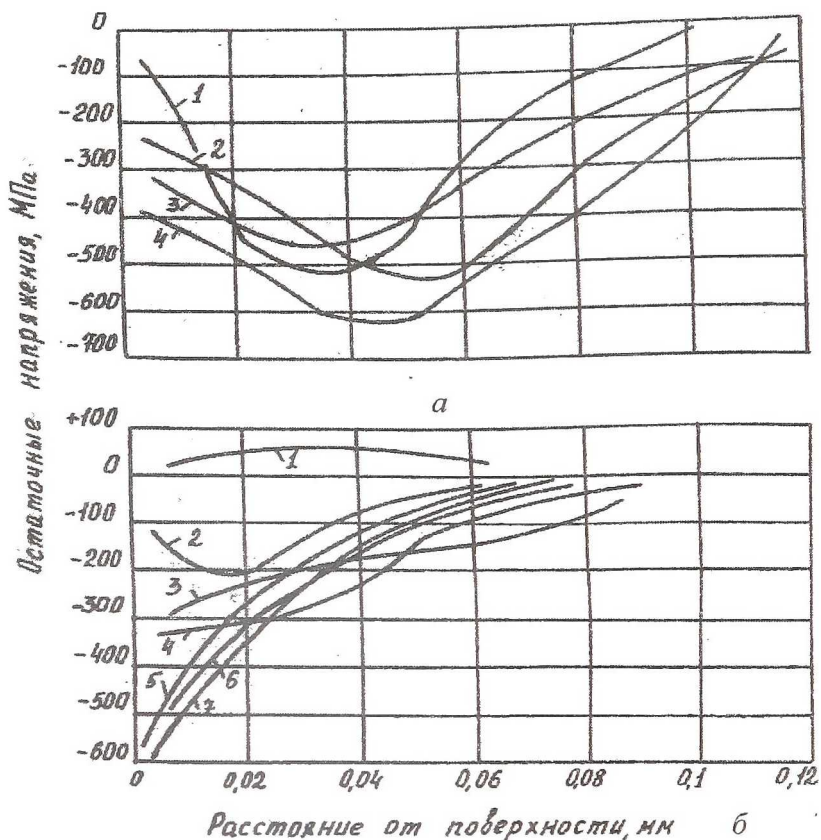


Рис.1. Остаточные напряжения в образцах из сплава ВТ9 после различных видов обработки: а: 1 – ВУ; 2 – ГДО; 3 – ГДО+ВУ; 4 – УЗУ; б: 1 – ВКПАЛ; 2 – полирование; 3 – ОМШ+ВКПАЛ; 4 – ОМШ+ВШ; 5 – ОМШ+ВУ; 6 – ОМШ+ВУД; 7 – ОМШ

Практика показала, что разрушение лопаток в процессе эксплуатации носит усталостный характер. Из комплекса качественных характеристик поверхностного слоя, оказывающих влияние на сопротивление усталости, одно из главных мест отводится напряженному состоянию этого слоя. Напряженное состояние в процессе эксплуатации складывается из действия рабочих нагрузок (растягивающие центробежные силы F , циклические изгибающие моменты M) и внутренних технологических (остаточных) напряжений. Допустимый уровень напряжений определяется прочностными и

пластическими свойствами материала лопаток, их конструктивными особенностями и режимом работы. Этот уровень можно регулировать величиной и формой эпюры остаточных напряжений, которые в области упругого состояния материала алгебраически складываются с рабочими нагрузками, изменяя их величину. Что особенно важно при циклических нагрузках, когда при наличии остаточных напряжений цикл становится асимметричным с изменением амплитуды растягивающих напряжений.

Существующие зависимости между пределом выносливости и остаточными напряжениями показывают, что для повышения предела выносливости необходимо увеличить уровень остаточных напряжений сжатия [3]. Наибольшая величина остаточных напряжений сжатия по разным источникам может задаваться в пределах 0,5...1,2 от предела текучести материала детали в зависимости от ее формы, размеров и возможных концентраторов напряжений.

Как показали исследования [2,4], поднять уровень напряжений сжатия и приблизить их максимум к поверхности возможно за счет применения для упрочнения поверхности обработки микрошариками (ОМШ). При ОМШ диаметром 0,16...0,3 мм деталей из титанового сплава ВТ9 происходит упрочнение поверхностного слоя 0,06...0,12 мм, при этом в нем 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 $R_a=0,15...0,20$ до $R_a=0,6...1,3$ мкм, что не соответствует требованиям чертежа лопаток. В связи с этим для снижения шероховатости после ОМШ рекомендована дополнительная отделочная обработка. Для лопаток компрессора низкого давления (КНД) и КСД с шероховатостью $R_a=0,4...0,2$ мкм можно рекомендовать ВУ, ВШ или ВУД для КВД виброконтактное полирование абразивной лентой (ВКПАЛ) или ВУД керамическими гранулами, обеспечивающие шероховатость $R_a=0,2...0,1$ мкм. Кроме того, обработка ВУ и ВУД позволяет дополнительно увеличивать шаговые параметры S и S_m , сделать микрорельеф более плавным. Обработка ВУ так же повышает уровень остаточных напряжений сжатия, в то время как при ВШ и ВКПАЛ он несколько снижается.

Для установления влияния ОМШ в сочетании с различными методами отделочной обработки на сопротивление усталости были проведены испытания специальных профильных образцов [1] с тонкими прямоугольными сечениями имитирующими кромки лопаток. На рис. 2 приведены пределы выносливости таких образцов из сплава ВТ9, полученные на базе $N=2 \cdot 10^7$ циклов. Из рисунка видно, что при

упрочнения по технологии ГДО + ВУ и ГДО + ВШ, несмотря на достаточно высокий уровень сжимающих остаточных напряжений и благоприятный микрорельеф, предел выносливости повышается незначительно и колеблется в интервале 350...400 МПа. ОМШ на оптимальном режиме повышает предел выносливости до 380...420 МПа, невысокий уровень предела выносливости объясняется повышенной шероховатостью. Применение ОМШ + ВШ позволяет получить предел выносливости в пределах 380...400 МПа, в этом случае, хотя шероховатость поверхности и снижается почти на 2 класса, однако значительно уменьшаются сжимающие остаточные напряжения у

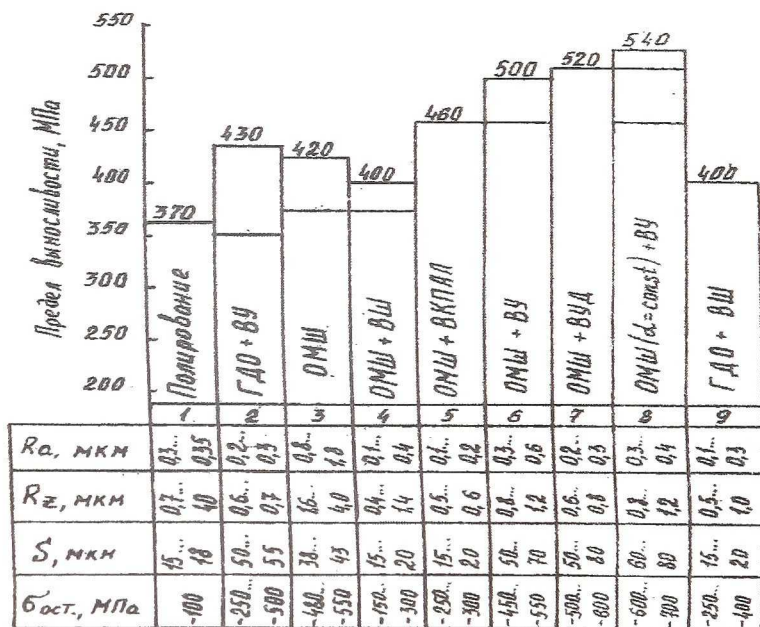


Рис. 2 Влияние различных видов упрочняюще отделочной обработки на предел выносливости и характеристики качества поверхностного слоя профильных тонкостенных образцов из сплава ВТ9 (верхние границы выносливости соответствуют образцам, обработанным при упрочнении с притенением кромок)

поверхности до 300 МПа вследствие удаления при ВШ тонкого поверхностного слоя с высоким уровнем остаточных напряжений. Наиболее существенно, до 460 МПа, повышается предел выносливости при ОМШ + ВКПАЛ (за счет снижения шероховатости до $R_a=0,1...0,2$ мкм и сохранения остаточных напряжений на уровне 250...300мпа) и до 500...540 МПа при ОМШ+ВУД и ОМШ + ВУ (за счет повышения остаточных напряжений до 500...700 МПа, снижения шероховатости до $R_a=0,2...0,4$ мкм и получения благоприятного микрорельефа).

Довольно эффективным мероприятием при динамическом упрочнении образцов и деталей стальными шариками (ГДО и ОМШ) является прикрытие (притенение) кромок. Это позволяет выровнять их упрочнение в сравнение с другими участками поверхности, исключить расклеп под действием прямых и секущих ударов. Применение притенения кромок позволило повысить предел выносливости образцов при ГДО+ВУ с 350...380 до 450 МПа, при ОМШ - с 380 до 420 МПа, при ОМШ + ВКПАЛ - с 430 до 450 МПа и при ОМШ+ВУ - с 450 до 500...540 МПа.

Анализ напряженного состояния проводился на лопатках компрессора без нагрузки и при воздействии на нее центробежной силы и изгибающего момента. Напряжения определялись в продольном сечении пера у входной кромки. На рис.3 показан такой анализ применительно к рабочей лопатке 3-й ступени КНД, изготовленной из сплава ВТ9. Как видно из рисунка после обработки пера по технологии ГДО + ВУД в лопатке без нагрузки (рис. 3, в) имеют место сжимающие напряжения в слое толщиной 0,24 мм. Максимум напряжений 450 МПа находится на глубине 0,08 мм, у поверхности он снижается до 300 МПа, в то же время в сердцевине растягивающие напряжения достигают 850 МПа. Эпюра напряжений симметрична. С учетом рабочих нагрузок напряжения на поверхности остаются почти на прежнем уровне (рис.3, г), в то время как в сердцевине они возрастают до 1000 МПа и приближаются к пределу текучести на растяжение ($\sigma=1050$ МПа). Такое распределение напряжений является явно неблагоприятным, так как очаг усталостной трещины может возникнуть под поверхностью с последующим выходом на поверхность. Предел выносливости составляет 500 МПа.

Анализируя данное напряженное состояние лопатки компрессора можно сделать вывод, что на поверхности лопаток напряжения сжатия необходимо повышать, а в сердцевине - снижать за счет уменьшения толщины упрочненного слоя. Для конкретной лопатки оптимальное распределение эпюры остаточных напряжений (полученное расчетным путем) показана на рис. 3, б. Максимум остаточных напряжений сжатия

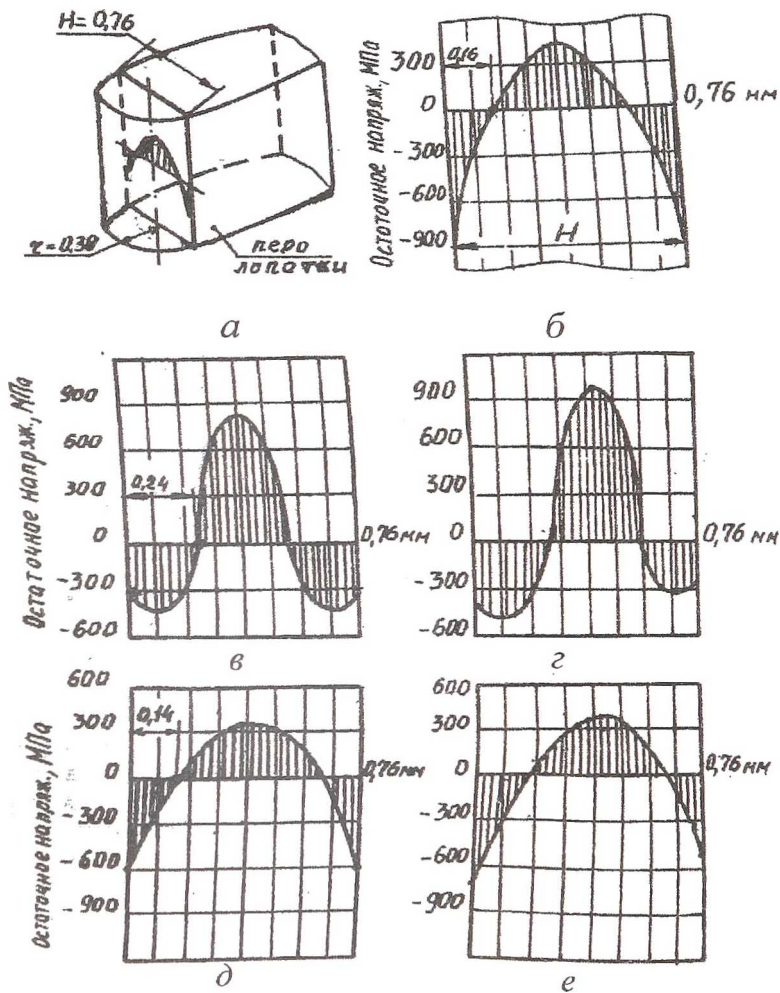


Рис. 3. Напряжение в пере рабочей лопатки 3-й ступени КНД:
 а - место определения остаточных напряжений;
 б - оптимальная эпюра остаточных напряжений;
 в, г - эпюры остаточных напряжений после ГДО + ВУД;
 д, е - эпюры остаточных напряжений после ОМС + ВУД.

у поверхности до 900 МПа (близок к пределу прочности материала), с небольшой толщиной (до 0,16 мм) упрочненного слоя и невысокими (380...400 МПа) растягивающими напряжениями в сердцевине.

Применение ОШМ + ВУД позволило получить эпюру остаточных напряжений, близкую к оптимальной (рис. 3, д), с максимумом остаточных напряжений сжатия у поверхности до 600 МПа и невысокими растягивающими напряжениями растяжения в сердцевине до 400 МПа. С учетом рабочих нагрузок (рис. 3, е) эпюра изменяется незначительно. Такое распределение остаточных напряжений по толщине лопатки позволило повысить предел выносливости до 540 МПа (на 8%). Как видно, дальнейшее приближение реальной эпюры к оптимальной может дать дополнительное увеличение предела выносливости.

Аналогичная картина получена на рабочих лопатках 7 ступени КСД. Замена технологического процесса ГДО + ВШ на ОМШ + ВУД позволило повысить предел выносливости с 480 до 520 МПа. Здесь также не исчерпаны имеющиеся резервы повышения выносливости за счет увеличения остаточных напряжений сжатия у поверхности.

Таким образом, оптимизация напряженного состояния лопаток компрессора путем совершенствования технологических процессов упрочняюще-отделочной обработки позволяет дополнительно повысить предел выносливости, а следовательно ресурс и надежность работы.

Список литературы

1. Митряев К.Ф., Кривенко М.П., Сазонов М.Б. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на усталостную прочность образцов из сплава ВТ9 //Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов: СБ. науч. тр. /Куйбышев, авиац. ин-т, Куйбышев, 1982. С. 54-59.
2. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1976-212 с.
3. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов /Куйбышев. авиац. ин-т, Куйбышев, 1968- 132с.
4. Митряев К.Ф., Сазонов М.Б., Кривенко М.П. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на наклеп и остаточные напряжения титановых сплавов //Оптимизация процессов резания жаро и особопрочных материалов: СБ. науч. тр./Уфимский авиац. ин-т. Уфа.. 1982.- С.161-167.