

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2019

**М. Б. Сазонов** кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[sazonov.mihail.56@yandex.ru](mailto:sazonov.mihail.56@yandex.ru)

**Л. В. Соловацкая** старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[lyud.kiselewa@yandex.ru](mailto:lyud.kiselewa@yandex.ru)

Рассмотрены различные виды упрочняюще-отделочной обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей. Проанализировано влияние каждого вида обработки на формирование шероховатости поверхности с благоприятным микрорельефом, на уровень и глубину распространения сжимающих остаточных напряжений в пере лопаток компрессора. Описаны причины формирования усталостного разрушения у лопаток и способы регулирования этого разрушения. Представлены результаты испытаний специальных образцов из титанового сплава ВТ9 для установления влияния режимов упрочняюще-отделочной обработки на сопротивление усталостному разрушению лопаток компрессора. Представлены результаты испытаний по распределению остаточных напряжений по толщине пера лопатки компрессора. Рассмотрен метод повышения динамического упрочнения образцов за счёт притенения (прикрытия) кромок лопаток компрессора. Приведены результаты графоаналитического анализа напряжённого состояния в пере лопаток компрессора низкого и среднего давления из сплава ВТ9, учитывающие остаточные напряжения и напряжения от рабочих нагрузок в процессе эксплуатации. Показана возможность повышения предела выносливости лопаток за счёт оптимизации эпюр остаточных напряжений путём совершенствования финишной упрочняюще-отделочной технологии с использованием обработки микрошариками.

*Газотурбинный двигатель; компрессор; лопатки; упрочняюще-отделочная обработка; шероховатость поверхности; остаточные напряжения; расклёп кромок; притенение кромок; предел выносливости.*

---

*Цитирование:* Сазонов М.Б., Соловацкая Л.В. Влияние напряжённого состояния поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) должны обладать высокой надёжностью и долговечностью. Улучшение характеристик отдельных деталей ГТД можно достичь за счёт решения конструкторских задач, применения современных материалов, использования оптимальных технологических процессов. Во многих случаях именно применение оптимальных технологических процессов изготовления деталей является наиболее эффективным и экономически выгодным.

Одним из наиболее сложных и дорогостоящих узлов ГТД (20–30% всей стоимости двигателя) является компрессор, так как он содержит большое количество деталей сложной пространственной формы (лопаток). Поэтому для увеличения ресурса компрессора и двигателя в целом необходимо повышать долговечность работы лопаток за счёт повышения сопротивления усталости.

Одним из перспективных направлений повышения эксплуатационных характеристик лопаток компрессора является применение на финишных операциях упрочняющей обработки микрошариками в сочетании с различными видами отделочных операций.

Такая обработка при небольших глубинах и степенях пластической деформации обеспечивает возможность тонкого регулирования физико-механических и геометрических характеристик и напряжённого состояния поверхностного слоя.

Лопатки компрессора ГТД работают при высоких циклических и статических нагрузках, подвергаются воздействию больших температур и эрозионной среды. В связи с этим при их изготовлении требуется обеспечить необходимое упрочнение поверхностного слоя и шероховатость поверхности. Для увеличения надёжности и долговечности лопаток компрессора необходимо в поверхностном слое создать остаточные напряжения сжатия с оптимальным уровнем и глубиной, а также благоприятный рельеф поверхности. Получение требуемых параметров возможно с помощью использования в технологическом процессе изготовления лопаток компрессора различных вариантов финишной обработки.

При выборе метода и режимов упрочняющей обработки необходимо учитывать реальную нагрузку и напряжённое состояние лопаток в процессе эксплуатации. Также важным фактором является то, что сечения пера лопатки компрессора тонкие, имеют острые кромки, которые являются концентраторами напряжений.

Финишная обработка лопаток компрессора проводится после полирования. Можно выделить несколько вариантов финишной обработки для лопаток компрессора:

- гидродробеструйная обработка (ГДО) стальными микрошариками диаметром 2–2,5 мм с последующим виброупрочнением (ВУ);
- виброобработка на дисбалансовых установках (ВУД);
- виброшлифование (ВШ);
- гидрогалтовка дробью диаметром 0,6 – 1 мм (ГГД);
- ультразвуковое упрочнение микрошариками диаметром 2 – 3 мм (УЗУ).

В зависимости от материала лопаток компрессора при таких видах упрочняюще-отделочной обработки можно получить шероховатость  $Ra$  0,4 – 0,08 мкм и сжимающие остаточные напряжения до 400 – 600 МПа с максимальными значениями, которые достигаются на глубине 40 – 60 мкм [1; 2]. Остаточные напряжения у поверхности снижаются до 100 – 400 МПа (рис. 1).

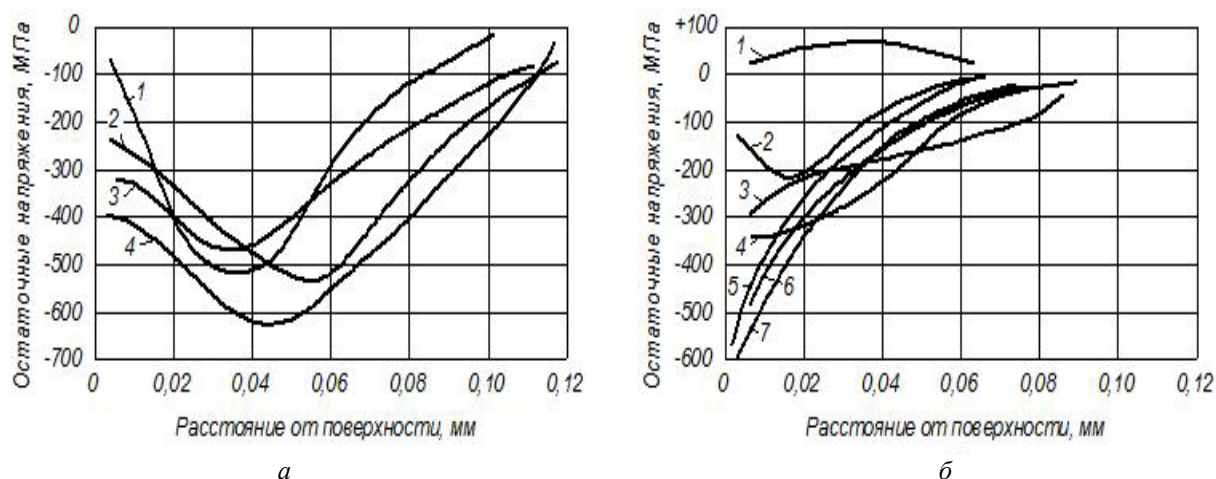


Рис. 1. Остаточные напряжения в образцах из сплава ВТ9 после различных видов обработки:  
 а - 1 – ВУ; 2 – ГДО; 3 – ГДО + ВУ; 4 – УЗУ;  
 б - 1 – ВКПАЛ; 2 – полирование; 3 – ОМШ + ВКПАЛ; 4 – ОМШ + ВШ; 5 – ОМШ + ВУ;  
 6 – ОМШ + ВУД; 7 – ОМШ

Все перечисленные методы финишной обработки деталей обеспечивают значительное повышение их предела выносливости. Это подтверждается усталостными испытаниями образцов из титанового сплава ВТ9 [1]. Однако в процессе упрочняюще-отделочной обработки имеет место большая ударная нагрузка, упрочнение на большую глубину и расклёп кромок. Особенно сильно это выражается при обработке тонких лопаток в компрессорах среднего и высокого давления. Применение полирования в качестве зачистки кромок лопаток полностью не устраняет расклёп кромок. При полировании возможно появление местных прожогов, а также уменьшение сжимающих остаточных напряжений, а в некоторых случаях – образование растягивающих напряжений. Если в поверхностном слое возникают достаточно большие эпюры остаточных напряжений сжатия, то в сердцевине лопаток и кромок образуются высокие растягивающие напряжения, которые могут стать причиной ускоренного зарождения очага усталостной трещины внутри лопатки.

В процессе эксплуатации лопаток компрессора происходит их износ и разрушение. Разрушение лопаток имеет усталостную природу. Важной качественной характеристикой поверхностного слоя, которая оказывает влияние на сопротивление усталости, является напряжённое состояние этого слоя. Поэтому при оптимизации технологического процесса финишной обработки пера лопатки ей должно быть уделено особое внимание. Формирование напряжённого состояния лопаток компрессора в процессе работы происходит в результате суммирования рабочих нагрузок от постоянных растягивающих центробежных сил, циклических изгибающих моментов и внутренних остаточных напряжений. Максимально допустимый уровень напряжений определяется пластическими и прочностными свойствами материала, из которого изготовлены лопатки компрессора, их конструктивными особенностями и условиями эксплуатации. На этот уровень напряжений можно влиять величиной и формой эпюры остаточных напряжений.

Известна зависимость между пределом выносливости и соответствующими напряжениями [3]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1ucx} - c \cdot \sigma_{ост} ,$$

где  $\sigma_{-1ucx}$  – предел выносливости полированных образцов;  $\sigma_{ост}$  – максимальные остаточные напряжения в поверхностном слое;  $c$  – коэффициент, зависящий от пластических свойств материала и формы детали.

Из представленной зависимости следует, что для увеличения предела выносливости деталей необходимо поднять уровень остаточных напряжений. Наибольшая величина остаточных напряжений может задаваться в пределах от 0,5 до 1,2 от значений предела текучести. На выбор максимального значения остаточных напряжений сжатия влияет форма и размеры детали, а также её конструктивные особенности, которые могут являться концентраторами напряжений.

Увеличить уровень напряжений сжатия и приблизить их максимальные значения к поверхности, не превышая заданной величины растягивающих напряжений в сердцевине, возможно за счёт применения для упрочнения поверхности лопаток компрессора финишной обработки микрошариками (ОМШ) [2; 4].

Для получения упрочнения поверхностного слоя титанового сплава ВТ9 на 60–120 мкм необходимо производить обработку микрошариками диаметром 160–300 мкм со скоростями 45–50 м/с в течение 180–300 с. В поверхностном слое формируются остаточные напряжения сжатия с максимальным значением у поверхности до 700 МПа. Однако эти напряжения по направлению к сердцевине уменьшаются с большим перепадом. При этом увеличивается шероховатость поверхности с  $Ra$  0,15–0,2 мкм до

$Ra$  0,6–1,3 мкм. Полученные характеристики поверхности не удовлетворяют требованиям чертежа. Таким образом, для уменьшения шероховатости поверхности после обработки микрошариками необходимо производить дополнительную отделочную обработку.

Для получения шероховатости поверхности  $Ra$  0,4–0,2 мкм при обработке лопаток компрессора низкого и среднего давления рекомендуется применять технологии ВУ, ВШ и ВУД; при обработке лопаток компрессора высокого давления – технологию виброконтактного полирования абразивной лентой (ВКПАЛ) или ВУД. Применение технологий ВУ и ВУД позволяет сформировать благоприятный микрорельеф поверхности лопаток за счёт увеличения шаговых параметров профиля шероховатости. Уровень сжимающих остаточных напряжений при технологии ВУ увеличивается, а при технологиях ВШ и ВКПАЛ он незначительно уменьшается.

Были проведены экспериментальные исследования профильных образцов [1]. В результате была установлена зависимость режимов обработки микрошариками от сопротивления усталости лопаток компрессора при применении отделочной обработки.

На рис. 2 приведены значения пределов выносливости образцов из титанового сплава ВТ9 при различных видах отделочно-упрочняющей обработки.

Применение технологий ГДО + ВУ и ГДО + ВШ при обработке лопаток формирует высокий уровень остаточных напряжений сжатия и благоприятный микрорельеф поверхности. Однако предел выносливости увеличивается незначительно, всего до 350–400 МПа. Также в процессе применения технологий ГДО + ВУ и ГДО + ВШ происходило разрушение кромок лопаток.

Увеличить предел выносливости лопаток до значений 380–420 МПа позволяет обработка по технологии ОМШ с оптимально подобранными параметрами скорости движения микрошариков и времени, в течение которого проводится обработка. Получение в результате небольших значений предела выносливости объясняется повышенной шероховатостью поверхности.

Аналогичные значения предела выносливости лопаток позволяют применение технологии ОМШ + ВШ, хотя при этом шероховатость поверхности уменьшается на 2 класса. Однако вместе с этим на поверхности существенно снижаются остаточные напряжения сжатия (до 300 МПа). Это происходит за счёт того, что при обработке ВШ удаляется поверхностный слой небольшой толщины, но с высоким уровнем остаточных напряжений сжатия. Также от действия абразивных частиц на поверхности лопаток появляются отдельные царапины. Такие царапины в процессе эксплуатации лопаток могут стать концентраторами напряжений.

При использовании технологии ОМШ + ВКПАЛ предел выносливости повышается до 460 МПа, при технологиях ОМШ + ВУД и ОМШ + ВУ – до 500–540 МПа. В первом случае это происходит за счёт уменьшения шероховатости поверхности до  $Ra$  0,1–0,2 мкм и сохранения значений остаточных напряжений в пределах 250–300 МПа; во втором – за счёт увеличения остаточных напряжений до 500–700 МПа и уменьшения шероховатости до  $Ra$  0,2–0,4 мкм.

При динамическом упрочнении образцов стальными шариками (ГДО и ОМШ) наиболее эффективным является прикрытие (притенение) кромок, так как в процессе обработки лопаток они находятся гораздо более длительное время под воздействием микрошариков. Такой способ позволяет выровнять упрочнение кромок лопаток с другими участками поверхности, исключить их расклёп под действием прямых и секущих ударов микрошариками. Применение притенения кромок позволяет повысить предел выносливости лопаток при технологиях ГДО + ВУ с 350–380 до 450 МПа, при ОМШ – с 380 до 420 МПа, при ОМШ + ВКПАЛ – с 430 до 450 МПа, при ОМШ + ВУ – с 450 до 500–540 МПа.

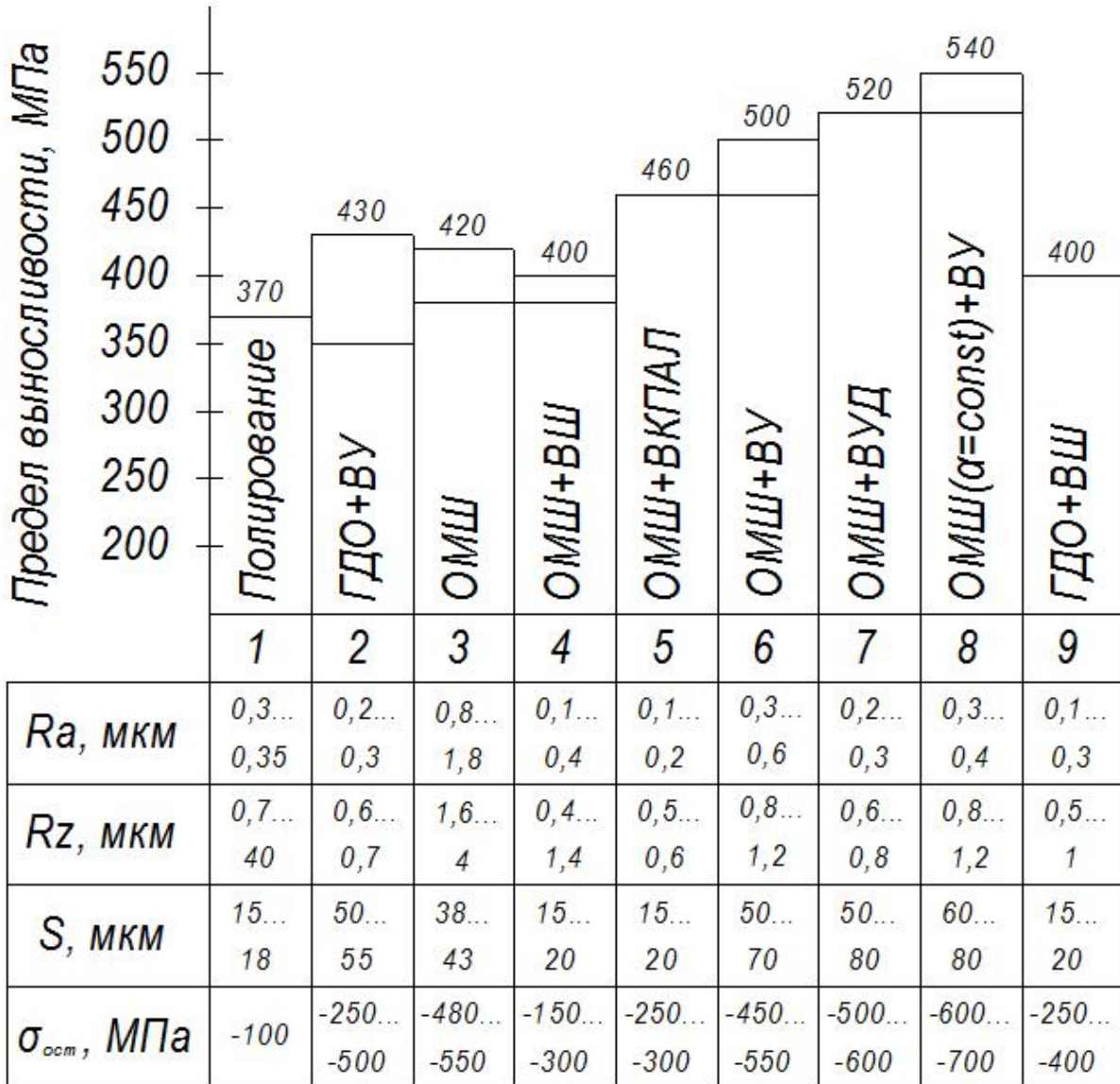


Рис. 2. Влияние различных видов упрочняюще-отделочной обработки на предел выносливости и характеристики качества поверхностного слоя профильных тонкостенных образцов из титанового сплава VT9 (верхние границы выносливости соответствуют образцам, обработанным при упрочнении с притенением кромок)

На основании полученных значений, представленных на рис. 2, получены зависимости предела выносливости (рис. 3, а) и величины максимальных напряжений (рис. 3, б) от величины остаточных напряжений у поверхности:

$$\sigma_{-1} = 350 - 0,31\sigma_{ост.пов};$$

$$\sigma_{-1} = 350 - 0,25\sigma_{ост.макс}.$$

На графике рис. 3, а разброс значений предела выносливости меньше, несмотря на то, что коэффициент при параметре остаточных напряжений больше, чем на графике рис. 3, б. Это доказывает, что эпюры остаточных напряжений с максимальным значением у поверхности являются предпочтительней в целях увеличения предела выносливости.

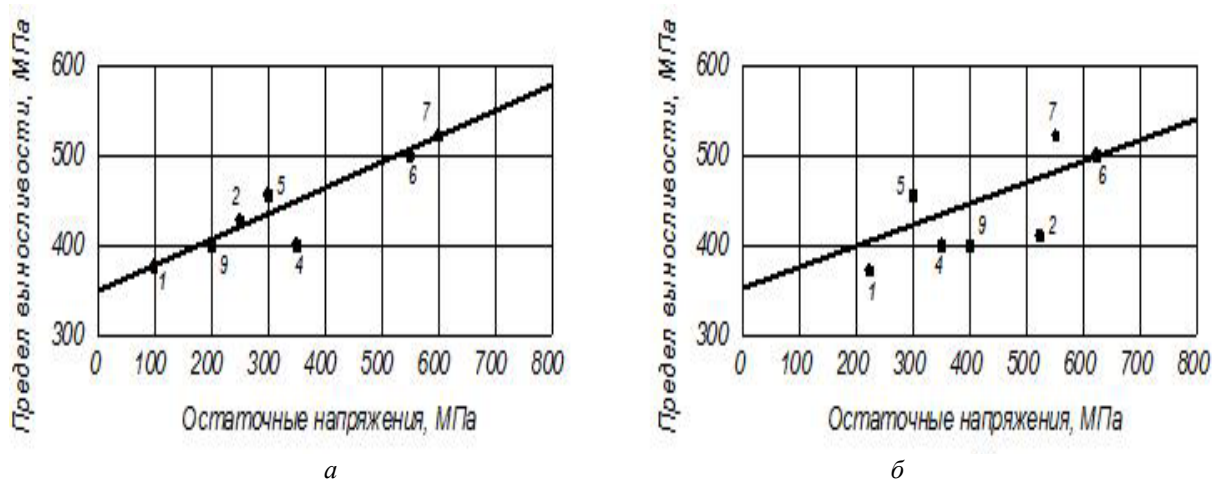


Рис. 3. Зависимость предела выносливости тонкостенных образцов из сплава ВТ9 от остаточных напряжений у поверхности (а) и максимальных напряжений (б).  
Номера точек соответствуют видам обработки (рис. 2)

Возможностью увеличения выносливости лопаток компрессора является увеличение уровня напряжений сжатия у поверхности до максимального значения.

На рис. 4 представлены эпюры напряжённого состояния рабочей лопатки третьей ступени компрессора низкого давления, изготовленной из титанового сплава ВТ9. Эпюры построены при отсутствии рабочей нагрузки и при воздействии центробежной силы и изгибающего момента на перо лопатки. Остаточные напряжения определялись по методике И.А. Биргера (рис. 4, а) для пластин [5].

При отсутствии нагрузки в лопатке при обработке по технологии ГДО + ВУД (рис. 4, в) формируются остаточные напряжения сжатия. Глубина распространения остаточных напряжений – до 0,24 мм. Максимальные значения остаточных напряжений (450 МПа) располагаются на глубине 0,08 мм, у поверхности они снижаются до 300 МПа. В результате получаем, что уровень напряжений значительно ниже возможных предельных значений (850–1000 МПа). Однако растягивающие напряжения в сердцевине могут достигать значений до 850 МПа. Полученная эпюра остаточных напряжений при отсутствии нагрузки в лопатке симметрична.

При воздействии нагрузки от центробежной силы и изгибающего момента остаточные напряжения сжатия принимают практически такие же значения (рис. 4, з). Одновременно с этим остаточные напряжения в сердцевине увеличиваются и становятся равны пределу текучести на растяжение ( $\sigma_T = 1050$  МПа). В этом случае эпюра несимметрична. Полученная эпюра напряжений неблагоприятна, так как возможно возникновение усталостной трещины под поверхностью лопатки. Для титанового сплава ВТ9 предел выносливости составляет 500 МПа и может быть значительно увеличен.

Таким образом, напряжения сжатия на поверхности лопаток необходимо увеличивать, а в сердцевине – уменьшать. Этого можно добиться за счёт уменьшения глубины упрочнённого поверхностного слоя. Предпочтительная расчётная эпюра остаточных напряжений представлена на рис. 4, б. Такая зависимость описывается выражением

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

где  $\sigma_{\max}$  – остаточные напряжения у поверхности;  $x$  – расстояние от поверхности.



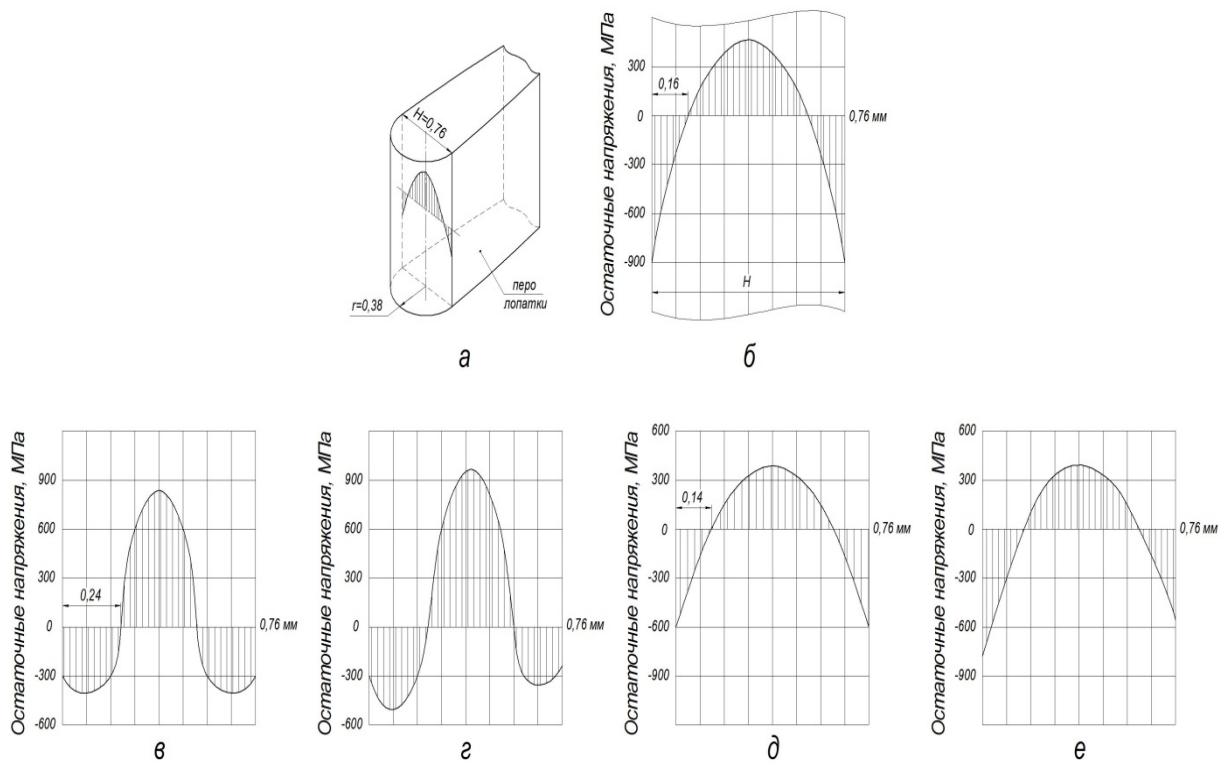


Рис. 4. Напряжения в перо рабочей лопатки третьей ступени компрессора низкого давления:  
 а – место определения остаточных напряжений; б – оптимальная расчётная эпюра остаточных напряжений; в, г – эпюры остаточных напряжений после обработки ГДО + ВУД;  
 д, е – эпюры остаточных напряжений после обработки ОМШ + ВУД

Оптимальная расчётная эпюра остаточных напряжений (рис. 4, б) отличается от фактической (рис. 4, в). На расчётной эпюре уровень остаточных напряжений сжатия в несколько раз ниже, чем на фактической, а растягивающие напряжения в сердцевине, наоборот, в несколько раз выше.

Применение обработки по технологии ОМШ + ВУД позволяет получить фактическую эпюру остаточных напряжений, приближённую к оптимальной: без учёта нагрузки (рис. 4, д) и с учётом рабочей нагрузки на лопатку компрессора (рис. 4, е). При этом предел выносливости лопаток увеличивается почти на 8%. Очевидно, что для дополнительного повышения предела выносливости лопаток компрессора необходимо добиться формирования фактической эпюры остаточных напряжений возможно близкой к оптимальной расчётной.

Были проведены аналогичные исследования для лопаток компрессора среднего давления. В качестве образца была использована лопатка седьмой ступени. В этом случае также не достигнуты максимально возможные значения предела выносливости и остаётся возможность его повышения с помощью увеличения остаточных напряжений у поверхности лопаток.

Таким образом, для увеличения надёжности и срока службы лопаток компрессора необходимо увеличивать их предел выносливости. Необходимо формировать в поверхностном слое оптимальные остаточные напряжения, учитывая реальные условия нагружения лопаток. Для решения поставленных задач самым эффективным и экономически выгодным способом является использование оптимальных технологических процессов, включающих различные варианты финишной обработки.

### Библиографический список

1. Митряев К.Ф., Кривенко М.П., Сазонов М.Б. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на усталостную прочность образцов из сплава ВТ9 // Сб. научных трудов «Высокоэффективные методы обработки резанием жаропрочных и титановых сплавов». Куйбышев: КуАИ, 1982. С. 54-59.
2. Еленевский Д.С., Соляников В.А. Прогнозирование ресурса деталей турбомашин на основе моделирования эксплуатационных условий нагружения // Известия Самарского научного центра РАН. 2001. Т. 3, № 2. С. 227-231.
3. Давыдова И.С. Материаловедение : учеб. пособие. М.: РИОР, 2006. 240 с.
4. Митряев К.Ф., Сазонов М.Б., Кривенко М.П. Влияние упрочняющей обработки микрошариками на наклёп и остаточные напряжения титановых сплавов // Сб. научных трудов «Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов». Уфа: Уфимский авиационный институт, 1982. С. 161-167.
5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.

### INFLUENCE OF THE STRESSED STATE OF THE SURFACE LAYER ON THE ENDURANCE OF GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR BLADES

© 2019

**M. B. Sazonov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [sazonov.mihail.56@yandex.ru](mailto:sazonov.mihail.56@yandex.ru)

**L. V. Solovatskaya** Senior Lecturer, Department of Engine Production Technology; Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [lyud.kiselewa@yandex.ru](mailto:lyud.kiselewa@yandex.ru)

Different types of final strengthening treatment of gas turbine engine (GTD) compressor blades are considered. The influence of each type of treatment on the formation of roughness of the surface with favorable microrelief, as well as on the level and depth of distribution of residual compressive stresses in the compressor blade airfoil is analyzed. The causes of blade fatigue failure are described and methods of controlling this kind of failure are presented. The results of testing special specimens made of VT9 titanic alloy are presented to establish the influence of final strengthening treatment modes on the compressor blade resistance to fatigue stress. The results of testing residual stress distribution along the thickness of compressor blade airfoil are presented. A method of improving dynamic strengthening of specimens due to the protection of compressor blade edges is discussed. The results of semi-graphical analysis of the stressed state of low-pressure and medium-pressure compressor blades made of VT9 alloy are presented. They take into account residual stresses, as well as operating load stresses in the process of operation. We show that it is possible to increase the limit of the blade endurance due to the optimization of residual stress diagrams by improving the final strengthening technology with the use of dust blasting.

*Gas turbine engine; compressor; blades; final strengthening treatment; surface roughness; residual stresses; edge unriveting; protection of edges; limit of endurance.*

---

*Citation:* Sazonov M.B., Solovatskaya L.V. Influence of the stressed state of the surface layer on the endurance of gas turbine engine compressor blades. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 1. P. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117

### References

1. Mitryaev K.F., Krivenko M.P., Sazonov M.B. Vliyanie uprochnyayushchey obrabotki mikrosharikami na ustalostnuyu prochnost' obraztsov iz splava VT9. *Sbornik nauchnykh*



*trudov «Vysokoeffektivnye metody obrabotki rezaniem zharoprochnykh i titanovykh splavov».* Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1982. P. 54-59. (In Russ.)

2. Yelenevsky D.S., Solyannikov V.A. Prediction of turbomachinery parts service life basing upon simulation of loading operating conditions. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN.* 2001. V. 3, no. 2. P. 227-231. (In Russ.)

3. Davydova I.S. *Materialovedenie: ucheb. posobie* [Materials Science]. Moscow: RI-OR Publ., 2006. 240 p.

4. Mitryaev K.F., Sazonov M.B., Krivenko M.P. Vliyanie uprochnyayushchey obrabotki mikrosharikami na naklep i ostatochnye napryazheniya titanovykh splavov. *Sbornik nauchnykh trudov «Optimizatsiya protsessov rezaniya zharo- i osoboprochnykh materialov».* Ufa: Ufa Aviation Institute Publ., 1982. P. 161-167. (In Russ.)

5. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963. 232 p.