

УДК 621.7:62-253

ОСОБЕННОСТИ ФИНИШНОГО ЭТАПА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ ГТД

Н.В. Гончар¹

В статье показаны результаты исследований свойств поверхностного слоя и испытаний на усталость ободной части диска компрессора с пазами «ласточкин хвост» после предложенной совокупности методов финишной обработки, направленной на повышение несущей способности дисков, изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов. Финишный этап включает снятие заусенцев и скругление острых кромок полимерно-абразивными инструментами, упрочнение стальными шариками и затем упрочнение стеклянными микрошариками.

Ключевые слова: финишная обработка, диск компрессора, пазы «ласточкин хвост», качество поверхностного слоя, сопротивление усталости, инструмент на основе полимерно-абразивных волокон, упрочнение шариками

В настоящее время для получения благоприятных свойств поверхностного слоя деталей газотурбинных двигателей (ГТД) применяют отделочно-упрочняющие методы финишной обработки, учитывающие сложный профиль и труднодоступность конструктивных элементов деталей (например, для дисков компрессоров – это ободная часть с пазами под хвостовики лопаток типа «ласточкин хвост»), такие как обработка в псевдосжиженном слое абразива (ПСА), упрочнение шариками в ультразвуковом поле (УЗУ) или на специальных пневмодробеструйных установках (ПДУ). Варьированием способами и режимами отделочных и упрочняющих методов можно регулировать и обеспечивать рациональные параметры поверхностного слоя: шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, что, в свою очередь, повышает сопротивление усталости деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, за счет реализации прочностных характеристик материала и, в конечном счете, увеличивает прочностную надежность.

Одним из технологических вариантов, подходящих для лопаточных дисков, является комплексное (комбинированное) упрочнение.

Например, применение УЗУ после ПСА ободной части дисков компрессора, повышает предел выносливости межпазовых выступов (рис. 1) за счет получения стабильности свойств поверхностного слоя, а также из-

¹ © Гончар Н.В., к.т.н, Запорожский национальный технический университет (ЗНТУ).

мельчения и удаления частиц абразива, внедренных в поверхность после ПСА [1], объединяя преимущества обоих способов.

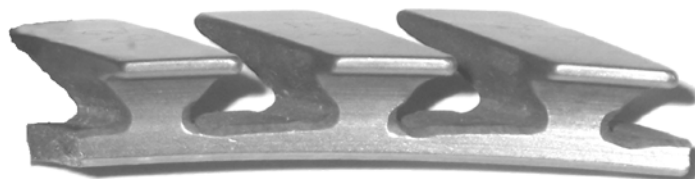


Рис. 1. Пазы типа «ласточкин хвост» и межпазовые выступы ободной части диска компрессора

Интерес представляет последовательная обработка поверхностей деталей ГТД макро- и микрошариками. В литературных источниках имеются сведения о применении технологии комплексного упрочнения шариками для формирования благоприятных характеристик поверхностного слоя деталей из различных материалов [2, 3]. Однако, существенными факторами, сдерживающими внедрение данного метода упрочнения в производство деталей авиационных двигателей, являются противоречивость имеющейся информации и недостаточность исследований комплексной обработки жаропрочных сплавов.

Основным принципом повышения несущей способности деталей при упрочнении является формирование в поверхностном слое равномерно распределенных остаточных напряжений сжатия. Из-за того, что на поверхности деталей имеются многочисленные концентраторы напряжений, вызванные предшествующей обработкой, причиной разрушения деталей являются усталостные трещины, очаговая зона которых располагается непосредственно на поверхности [4].

Одним из путей снижения величины коэффициента интенсивности напряжений от поверхностных микродефектов является формирование на поверхности значительных напряжений сжатия. Также известны данные о зарождении трещин в подповерхностном слое на глубине до 150 мкм [5]. В результате вышесказанного можно предположить, что максимальной выносливостью будут обладать те детали, у которых остаточные напряжения сжатия будут значительными как непосредственно на поверхности, так и в глубине поверхностного слоя. В работе [3] автор утверждает, что применяя последовательно упрочняющую обработку крупной, и затем – мелкой дробью, можно добиться суммирования эпюр остаточных напряжений, тем самым увеличив глубину распространения сжимающих напряжений.

Однако, прежде, чем начать упрочняющую обработку диска, нужно учесть следующие особенности. Для дисков компрессоров ГТД формообразующий этап процесса изготовления заканчивается операцией протяги-

вания многочисленных пазов типа «ласточкин хвост» по ободной части. Острые кромки и заусенцы по криволинейному контуру каждого паза, оставленные протяжкой на входе и на выходе с двух сторон диска, необходимо удалить и обеспечить заданный радиус скругления, уменьшив влияние конструктивного концентратора напряжений, что также влияет на выносливость. Эта операция должна быть высокопроизводительной, экономичной, обеспечить стабильный результат и исключить использование ручного труда. Затем, после моечной и контрольной операции можно приступать к упрочнению.

Цель данной работы – оценить влияние технологии финишного этапа обработки на предел выносливости диска компрессора с пазами «ласточкин хвост», изготовленного из жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД.

Отработку рациональных режимов упрочнения шариками проводили на лабораторных образцах прямоугольной формы, изготовленных из исследуемого жаропрочного сплава, усталостные испытания – на образцах с концентратором напряжений (галтелью) согласно ГОСТ 25.502-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость».

Полностью вариации финишного этапа технологии отрабатывали на натуральных образцах, вырезанных из ободной части серийного диска компрессора по методике [5, 6].

В работе [7] были установлены рациональные режимы комплексного упрочнения образцов стальными шариками в ультразвуковом поле и стеклянными микрошариками на пневмодробеструйной установке по условию максимального значения остаточных сжимающих напряжений, степени поверхностного наклепа, исключающего перенаклеп материала, и сохранения минимальной шероховатости. Интерес в данной работе представляют результаты исследований следующих партий образцов, упрочненных на рациональных режимах:

- партия Т1 – исходные полированные образцы (без упрочнения);
- партия Т2 – образцы после УЗУ стальными шариками (диаметром 0,68 мм);
- партия Т3 – образцы после ПДУ стеклянными микрошариками (диаметром 0,04...0,07 мм);
- партия Т4 – образцы, подвергнутые комплексному упрочнению (УЗУ стальными шариками + ПДУ стеклянными микрошариками).

Для этих партий шероховатость поверхности составляла Ra 0,4...0,8 мкм; степень поверхностного наклепа 25...40 %; сформированные комплексным упрочнением сжимающие остаточные напряжения образцов партии Т4 величиной до -500 МПа равномерно, без подповерхностных пиков и скачков, распределяются по всей глубине поверхностного слоя

100...150 мкм и затем плавно уменьшаются, приближаясь к нулю на глубине 200 мкм.

Для оценки влияния методов упрочнения на выносливость были проведены сравнительные испытания на усталость методом «лестницы» четырех партий образцов (Т1...Т4) при комнатной температуре (рис. 2).

Известно, что высокие температуры, за счет релаксации внутренних напряжений, резко уменьшают эффект, достигнутый такого рода упрочнением.

Приняв во внимание, что диски последних ступеней компрессора работают в условиях умеренно-повышенных температур, не превышающих 550 °С, дополнительно провели испытания на усталость при температуре 550 °С партии Т4-t, аналогичной Т4 по технологии обработки. Количество образцов в каждой партии составляло 10-11 шт.

По результатам работы [7] и дополнительно проведенным исследованиям можно сделать следующий вывод. Наибольший эффект с точки зрения наведения в поверхностном слое благоприятных свойств показывает комплексная обработка (партия Т4).

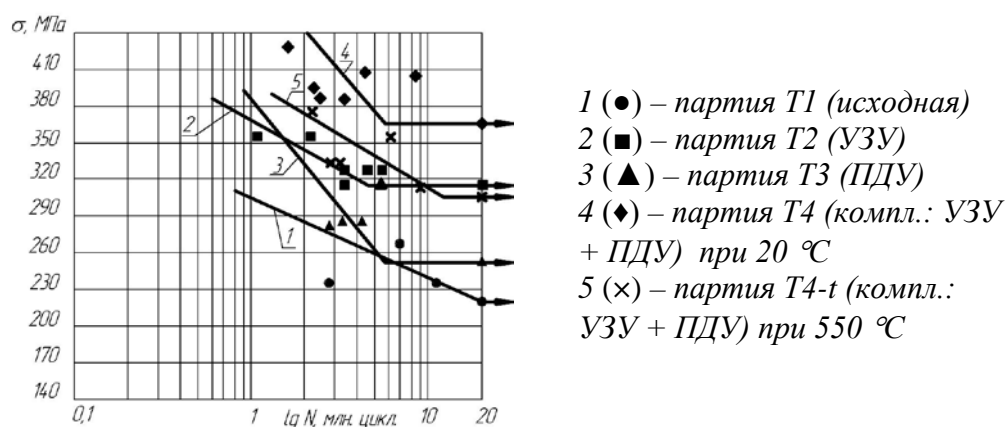


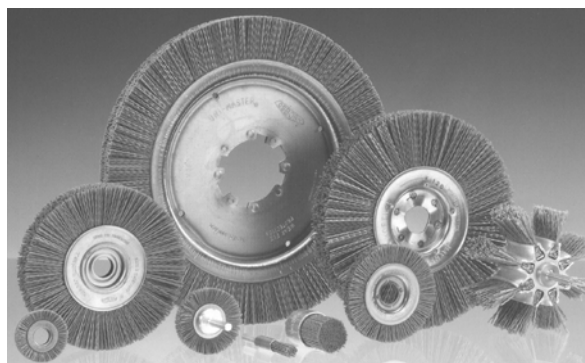
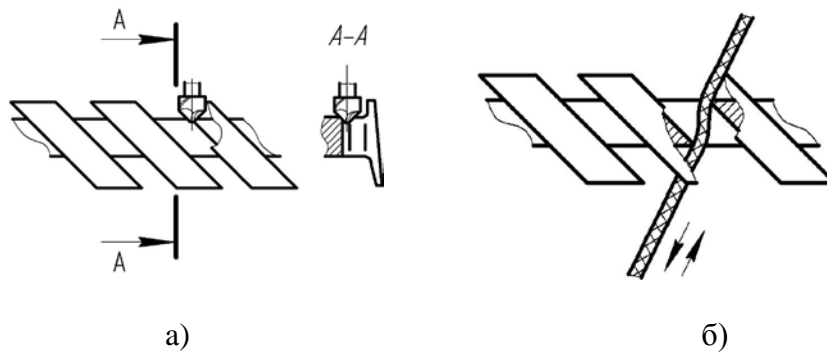
Рис. 2. Кривые усталости образцов партий Т1, Т2, Т3, Т4 (испытанных при 20 °С) и партии Т4-t, испытанной при 550 °С.

Предел выносливости контрольной партии образцов Т4-t, упрочненных комплексно (УЗУ + ПДУ) и испытанных при температуре 550 °С, составил 305 МПа, по сравнению с такой же партией Т4, испытанной при 20 °С, предел выносливости которой – 375 МПа, что значительно выше σ_{-1} исходной неупрочненной партии (220 МПа).

Таким образом, с точки зрения повышения характеристик выносливости деталей из сплава ХН73МБТЮ-ВД, комплексное упрочнение последовательно макро- и микрошариками является наиболее эффективным, и его можно рекомендовать использовать в отделочно-упрочняющем этапе

обработки деталей из данного сплава, эксплуатируемых при умеренно-повышенных температурах.

Еще одним проблемным вопросом завершающего этапа обработки дисков ГТД является слесарная обработка межпазовых выступов после протягивания пазов «ласточкин хвост». Из-за криволинейного профиля полученных после протягивания поверхностей, удаление заусенцев и дальнейшее скругление острой кромки сложно механизировать, операция производится вручную зенковкой (рис. 3, а) с пневмоприводом, является трудоемкой и утомительной. Для такой сложной операции необходим рабочий высокой квалификации. К тому же много времени уходит на вспомогательные переходы, такие как проворачивание диска для обработки пазов очередного сектора, частую замену зенковки из-за труднообрабатываемого материала и т.п. Таким образом на этой части слесарной операции по контуру пазов получают фаску заданной величины. Затем диск подвергают обработке в псевдосжиженном слое абразива, что улучшает качество поверхности и несколько округляет фаску, незначительно приближая ее по форме к радиусу скругления.



в)

Рис. 3. Инструменты для обработки кромок пазов: а – зенковка; б – шнур; в – ПАИ

Альтернативой данной операции на производстве является обработка острых кромок пазов шнуром с абразивной пастой также вручную. Ее продолжительность еще больше, однако она не требует рабочих высокой квалификации и дает полноценный радиус скругления по контуру пазов.

В работе [8] были проанализированы недостатки существующих вариантов удаления заусенцев (рис. 3, а,б); и было предложено применить полимерно-абразивные инструменты (рис. 3, в) вращательного действия (ПАИ), позволяющие за счет гибкости полиамидных волокон, в которых равномерно распределены абразивные зерна, удалять заусенцы и скруглять острые кромки в труднодоступных местах с высокой производительностью.

К основным преимуществам данного вида инструментов следует отнести невысокое силовое и температурное воздействие, высокую стойкость (своего рода самозатачивание), отсутствие эффекта «засаливания», высокую упругость и гибкость, возможность обработки фасонных поверхностей, большой выбор типов и конструкций ПАИ. Недостатком является необходимость применения охлаждающих жидкостей, так как при достижении определенной температуры (80-120 °С) полимерная основа волокон теряет свои эксплуатационные свойства, начинает плавиться.

В данном исследовании [8] также разработаны технологические рекомендации по применению ПАИ разных типов (дискового и чашечного последовательно) при различных условиях и режимах обработки для обеспечения стабильного получения радиусов скругления заданной величины по всему контуру пазов «ласточкин хвост» на данной слесарной операции с высокой производительностью и качеством.

Эти два вышеописанных исследования разными способами преследовали одну цель – повысить прочностную надежность самых нагруженных конструктивных элементов лопаточных дисков – межпазовых выступов и, соответственно, несущую способность детали в целом.

При их объединении получается логически завершенный финишный этап обработки дисков компрессоров после операции протягивания (Пр) пазов:

- удаление заусенцев и скругление острых кромок с помощью ПАИ;
- упрочнение стальными шариками в ультразвуковом поле;
- упрочнение стеклянными микрошариками на пневмодробеструйной установке.

Предложенную последовательность финишных операций необходимо проверить на натуральных образцах – оценить качество поверхностного слоя и выносливость межпазовых выступов. Для исследования параметров шероховатости в продольном и поперечном направлении и для измерения

микротвердости доньшки пазов вырезались электроэрозионным методом и заливались в сплав Вуда.

Исследование качества поверхностей пазов и межпазовых выступов после обработки по предложенной технологии дало следующие показатели: параметр шероховатости R_a составлял 0,5...0,8 мкм в зависимости от места и направления измерения (при заданном на чертеже $R_a=2,5$ мкм), степень поверхностного наклепа составила 28...35 %.

Результаты испытаний на усталость партии натуральных образцов ободной части диска, обработанных по предложенной технологии: комбинированная обработка дисковым ПАИ – удаление заусенцев после протягивания и чашечным ПАИ – формирование радиуса скругления по контуру пазов) с последующим комплексным упрочнением (УЗУ + ПДУ), сравнивали с партией натуральных образцов, обработанных по действующей серийной технологии (слесарная обработка зенковкой – удаление заусенцев и формирование фасок скругления + ПСА), и с партией натуральных образцов, обработанных шнуром с пастой ГОИ (рис. 4).

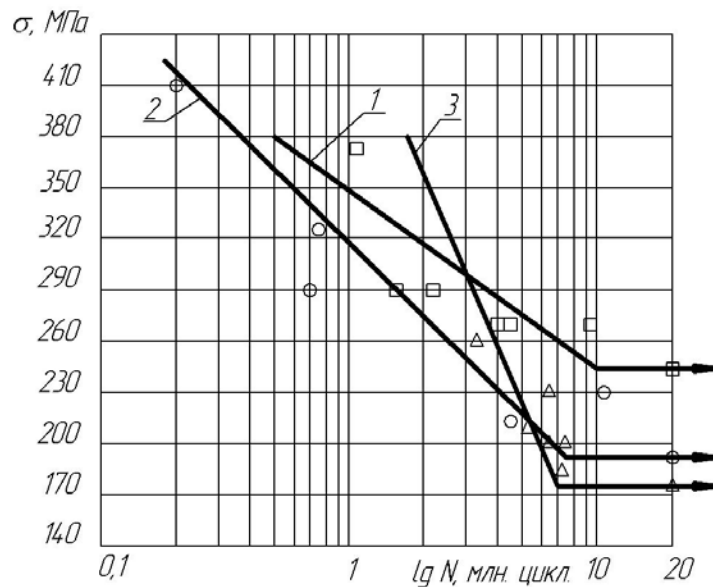


Рис. 4. Кривые усталости натуральных образцов, испытанных при 20 °C:

- 1 – Пр + ПАИ + УЗУ + ПДУ;
- 2 – Пр + Сл + ПСА;
- 3 – Пр + шнур с пастой ГОИ

Сравнительные испытания показали, что предлагаемая последовательность методов финишной обработки дисков компрессора, в частности, применение на слесарной операции для снятия заусенцев, притупления острых кромок и формирования радиуса скругления полимерно-абразивных инструментов, а также последующее комплексное упрочнение макро- и микрошариками ободной части обеспечивает повышение предела выносливости межпазовых выступов на 20...25 % ($\sigma_{-1}=245$ МПа) по сравнению с действующей ($\sigma_{-1}=190$ МПа) и альтернативной ($\sigma_{-1}=175$ МПа) технологией финишной обработки. Это достигается заменой фаски на радиус скругления рациональной величины по контуру пазов «ласточкин хвост» и наведением благоприятных свойств поверхностного слоя ободной части дисков компрессора (высокое качество поверхности, оптимальная величина степени поверхностного наклепа, большая глубина и равномерность распределения сжимающих остаточных напряжений).

Выводы

1. Предложенный вариант финишного этапа обработки дисков компрессора из жаропрочного никелевого сплава ХН73МБТЮ-ВД, учитывающий конструктивные особенности геометрии элементов ободной части, наличие труднодоступных мест для обработки и упрочнения, технологические особенности, позволил повысить прочностную надежность детали в целом, производительность и экономичность выполнения операций, исключить применение ручного труда.
2. Применение ПАИ дает возможность механизировать данную операцию с помощью несложной установки, обеспечивающей непрерывное вращение диска и одновременную обработку ободной части несколькими дублирующими ПАИ с учетом реверсивности вращения инструментов при условии встречной подачи, что значительно уменьшает продолжительность операции.
3. Последующее комплексное упрочнение макро- и микрошариками при применении рациональных режимов формирует в поверхностном слое ободной части диска благоприятные характеристики, повышающие способность сопротивляться усталостному разрушению, в том числе и при эксплуатации в условиях умеренно-повышенных температур.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуслаев В. А., Яценко В. К., Сахно А. Г., Гончар Н. В. Эффективность технологических методов повышения качества поверхности и сопротивления усталости дисков ГТД из сплава ХН73МБТЮ-ВД // Проблемы прочности. – 1998. – № 5. – С. 126-133.
2. Матлин М. М., Лебский С. Л. Комбинированное поверхностное пластическое деформирование деталей дробью // Вестник машиностроения. – 2000. – №1. – С. 54-56.
3. J. Solis Romero The Effect of Saturation and Duplex Peening on Fatigue Resistance of the 2024-T351 Aluminium Alloy // Metal Finishing News. – 2004. – Vol.5, July Issue. – P. 38-40.
4. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
5. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: [Справочник]. Ч.1. – К.: Наукова думка, 1987. – 512 с.
6. Яценко В. К., Сахно А. Г. Оценка усталостной прочности межпазовых выступов дисков компрессора // Авиац. промышленность. – 1990. – № 11 – С. 24-26.
7. Гончар Н. В., Павленко Д. В., Яценко В. К., Ткаченко В. В. Технологические особенности комплексного упрочнения деталей ГТД // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 1 – С.117-122.
8. Внуков Ю. Н., Гончар Н. В., Кондратюк Э. В., Степанов Д. Н. Применение полимерно-абразивных инструментов для обработки острых кромок пазов типа «ласточкин хвост» // Резание и инструмент в технологических системах. – 2011. – Вып. №79. – С.14-24.

Рукопись поступила в редакцию 25.04.2013 г.