

УДК 629.7.036

Г.В. Цыбанев, Ю.С. Налимов, О.В. Кононученко

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА

Рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния технологии виброупрочнения и нанесения покрытий на хвостовик лопатки на цилиндрическую прочность замкового соединения в условиях фреттинг-коррозии.

Одним из факторов, снижающих работоспособность замковых соединений лопаток компрессора газотурбинного двигателя, является процесс фреттинг-коррозии. Полностью устранить этот процесс невозможно, поэтому идут по пути снижения его влияния на циклическую прочность соединения лопаток с диском, используя различные технологии обработки и покрытия замковой части лопатки.

При экспериментальном исследовании влияния технологии виброупрочнения и нанесения покрытий на хвостовик лопатки на циклическую прочность замкового соединения в условиях фреттинг-коррозии испытания проводили по специально разработанным методикам на образцах и натуральных соединениях. На рис. 1, 2 показаны результаты испытаний двух серий образцов и лопаток компрессора в условиях фреттинг-усталости и результаты определения коэффициентов трения в парах ВТ9-ВТ10 при различных технологиях виброупрочнения сплава ВТ9.

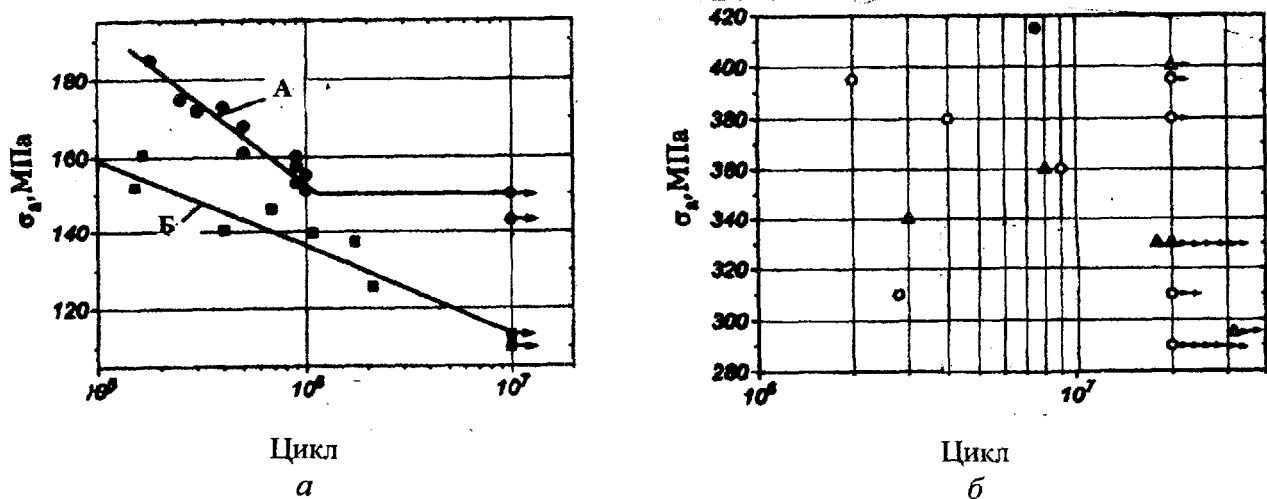


Рис. 1. Результаты испытания образцов (а) и лопаток компрессора (б) на фреттинг-усталость:
 А – лопатки и образцы, упрочненные по новой технологии;
 Б – лопатки и образцы, упрочненные по серийной технологии;
 ○ – серия А; △ – серия Б; ●, ▲ – разрушение по перу

Предлагаемая менее трудоемкая технология виброупрочнения (образца и лопатки серии Б) дает более высокие пределы выносливости как на образцах, так и при испытании реального замкового соединения при фреттинг-усталости. При этом коэффициенты трения в испытанных парах отличаются незначительно (рис. 2), что свидетельствует о существенной роли в процессе развития трещины эпюры распределения остаточных напряжений сжатия по глубине материала. В образцах из серии Б распределение остаточных напряжений по

глубине материала обеспечивает высокий предел выносливости. Пределы выносливости испытанных лопаток по критерию их разрушения от фреттинг-усталости составили соответственно $\sigma_{-1фф} = 295$ МПа для лопаток серии А, $\sigma_{-1фф} = 330$ МПа для лопаток серии Б, что послужило обоснованием для перехода на более эффективную и менее трудоемкую технологию виброупрочнения хвостовиков лопаток компрессора газотурбинных двигателей.

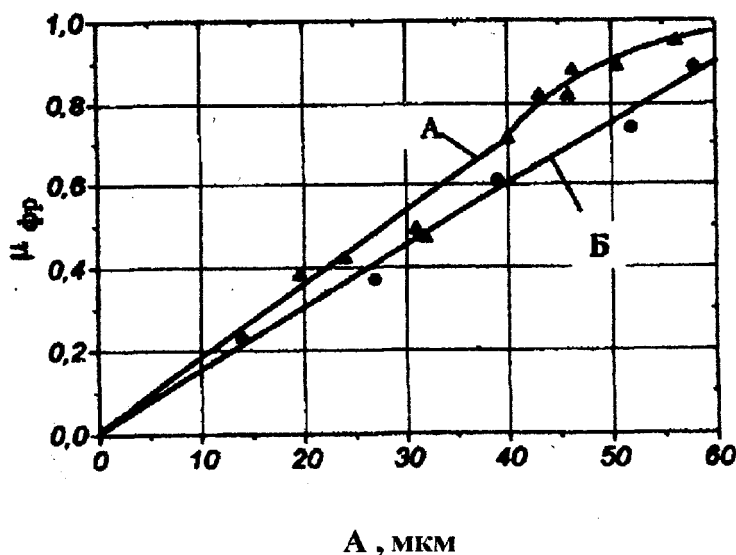


Рис. 2. Триботехнические характеристики фреттинг-пар:

А – лопатки и образцы, упрочненные по серийной технологии;

Б – лопатки и образцы, упрочненные по новой технологии;

●, ▲ – разрушение по перу

Другим способом защиты лопаток и диска от фреттинг-коррозии в зоне их контакта является нанесение покрытий на хвостовик. Наиболее часто хвостовики лопаток первых ступеней компрессора низкого давления газотурбинного двигателя покрывают тонким слоем серебра. Изучение механизма фреттинг-усталости металлов свидетельствует о том, что существуют другие виды покрытий и обработки контактирующих поверхностей, применение которых более целесообразно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения повышения надежности работы замкового соединения. Выбор оптимального покрытия для хвостовика осуществляли применительно к замковому соединению лопаток из сплава ВТЗ-1 компрессора низкого давления и диска из сплава ВТ9. В испытаниях на фреттинг-усталость, когда покрытие нанесено на контртело, использовали четырнадцать видов покрытий. Как следует из таблицы, наиболее высокие пределы выносливости достигнуты для обработок и покрытий над номером 2, 3, 4, 13, 14, 15.

Фреттинг-коррозия, возникающая при взаимодействии образцов с накладками в исходном состоянии без ультразвукового упрочнения и без покрытия, снижает предел выносливости материала диска более чем в три раза. Наличие ультразвукового упрочнения повышает наклеп рабочей поверхности накладки и улучшает условия трения, что несколько поднимает предел выносливости сплава ВТ9. Важную информацию о процессах фреттинг-коррозии несут следы (темные пятна), остающиеся на поверхности образцов и накладок после испытаний. Накладки без покрытия оставляют пятна малой площади, локализованные в основном у мест разрушения, т.к. микрорельеф контактирующих поверхностей и их высокая твердость препятствуют их равномерному прилеганию. Интенсивность

окрашивания пятен свидетельствует о высокой степени химического и адгезионного взаимодействия металлов в контакте.

Присутствие покрытия на накладках оказывает различное влияние на долговечность циклически нагруженного материала в зависимости от типа покрытия. Мягкие металлические покрытия (серебро, медь, латунь и бронза) обеспечивают равномерное прилегание контактирующих поверхностей образца и контртела, сглаживая шероховатости и обеспечивая твердую смазку. Однако для этих покрытий характерна высокая степень химического и адгезионного взаимодействия с материалом образца. Об этом свидетельствуют большая площадь и интенсивность окраски пятен фреттинга, рассеяние энергии колебания образца, что проявляется в повышенных затратах мощности вибростенда, необходимой для поддержания резонансных колебаний.

Относительный предел выносливости и коэффициент трения
для различных покрытий и способов обработки

Вид покрытия, обработки	Относительный предел выносливости*	Коэффициент трения
1. Исходная кривая без фреттинга	1,0	0
2. ВАП-2 без обдувки электрокорундом	0,468	0,022-0,068
3. Импульсное анаодирование + ВАП-2	0,447	0,016-0,050
4. Гальваническая бронза	0,37	0,036-0,073
5. Гальваническое серебро	0,34	0,061-0,173
6. Низкотемпературное цианирование	0,34	0,014-0,090
7. Гальваническая латунь	0,328	0,067-0,110
8. Ультразвуковое упрочнение без покрытия	0,328	—
9. Без ультразвукового упрочнения, без покрытия	0,276	0,022-0,126
10. Нитрид титана (катодно-ионная бомбардировка)		0,056-0,140
11. Медь (катодно-ионная бомбардировка)	0,328	0,080-0,165
12. Нитрид титана (катодно-ионная бомбардировка) + медь (катодно-ионная бомбардировка)	0,29	0,025-0,158
13. Латунь (катодно-ионная бомбардировка)	0,438	0,062-0,174
14. Сплав ВК8 (электроискровой метод)	0,468	0,026-0,078
15. Сплав ВК22 (электроискровой метод)	0,45	0,025-0,091

* Отношение предела выносливости материала при наличии фреттинга к величине без фреттинга $\sigma_{OT} = \sigma_{-1\Phi P} / \sigma_{-1}$.

Твердые покрытия низкотемпературного цианирования, вольфрамовых сплавов ВК8, ВК22 показывают малую степень химического и адгезионного взаимодействия с поверхностью образца. Следы фреттинга – светлые, характерные для скользящих друг по другу без схватывания металлических поверхностей. Накладки низкотемпературным цианированием вообще не разрушают образец по механизму фреттинга: наступает либо раннее разрушение от концентрации напряжений у края накладки, либо образцы выстаивают

базу испытаний. Нитрид титана отличается высокой степенью адгезии с материалом образца.

Сопоставление триботехнических характеристик с усталостными позволяет установить наличие корреляции между ними. Более существенное снижение предела выносливости наблюдается в фреттинг-парах, характеризующихся более высокими значениями коэффициента в эксплуатационном диапазоне варьирования амплитуд скольжения (см. таблицу, позиции 9, 10, 11, 12).

На рис. 3 показаны результаты следующего этапа исследований, когда выбранные защитные покрытия нанесены на циклически нагружаемый образец, а контрольно – без покрытия. Из полученных результатов следует, что увеличение толщины покрытия из серебра до 25 мкм не дает пропорционального увеличения предела выносливости по сравнению с обычно применяемой толщиной 7 - 10 мкм, т.к. некоторое увеличение долговечности при этом достигается лишь за счет более длительного фреттинг-износа более толстого покрытия.

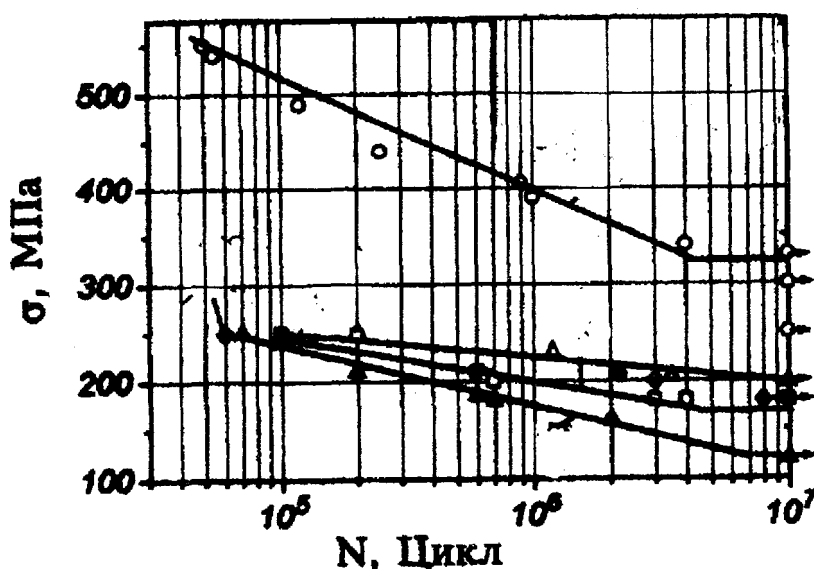


Рис. 3. Кривые усталости и фреттинг-усталости пар ВТЗ-1-ВТ9 при нанесении покрытия на образец:
 ○ – гладкий образец без покрытия и без фреттинга;
 Δ – серебро, 25 мкм; □ – латунь (катодно-ионная бомбардировка); ▲ – нитрид титана;
 ◆ – серебро, 10 мкм

Пределы выносливости не отличаются у титанового сплава с базовым покрытием серебром и с покрытием латунью методом катодно-ионной бомбардировки. В этом же эксперименте был опробован вариант слоистой защиты металла от фреттинга с функциональным распределением роли слоев: нижний слой из нитрида титана – для защиты металла от контакта с продуктами фреттинга, верхний слой из латуни – нанесенной методом катодно-ионной бомбардировки – для лучшего прилегания контактирующих поверхностей и обеспечения низкого коэффициента трения в зоне фреттинга. В этом варианте характеристики фреттинг-усталости были несколько ниже, чем просто покрытие латунью методом катодно-ионной бомбардировки.

Поверочные испытания проведены на натуральных лопатках, закрепленных в натуральных замках в соответствии со специально разработанной методикой. Результаты испытаний показали, что в этих условиях предложенный вариант покрытия хвостовика лопатки

приводит к повышению предела выносливости замкового соединения лопатки на 65 % (рис. 4) по сравнению с использованием базового покрытия. Кроме того, покрытие из латуни, нанесенное методом катодно-ионной бомбардировки, является более экономичным и технологичным по сравнению с серийным.

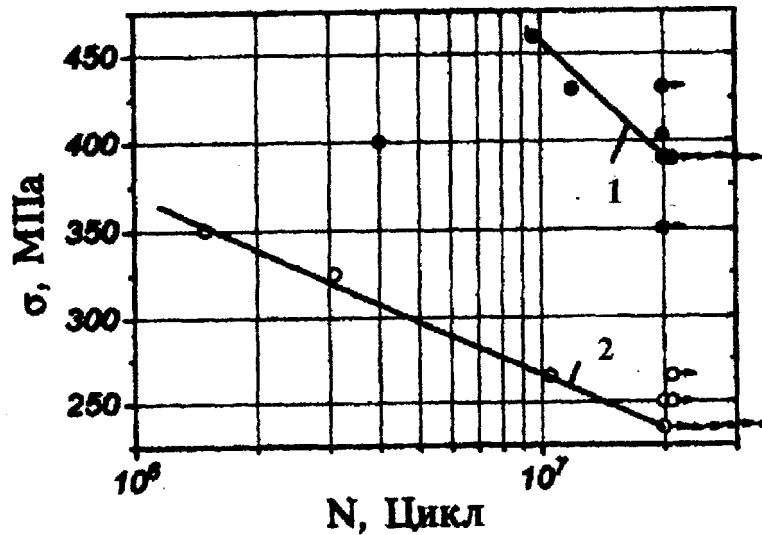


Рис. 4. Результат испытания на фреттинг-усталость хвостовика лопатки II ступени компрессора низкого давления:
1 – с предложенным покрытием;
2 – лопатка с серийным покрытием

Таким образом, с помощью разработанной экспериментальной методики оценки фреттинг-усталостной прочности лопаток газотурбинных двигателей сделан выбор более экономичного технологичного способа защиты хвостовика лопатки от фреттинг-коррозии.

Стаття надійшла до редакції 11 жовтня 1999 року.