

УДК 539.538 : 655.7 : 038.5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ФРЕТТИНГЕ УПРОЧНЯЮЩЕГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ, СОВМЕЩЕННОГО С ПРОТИВОИЗНОСНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

© 2018 А.Г. Ковшов

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

Приведены результаты сравнительных лабораторных и опытно-промышленных испытаний эффективности упрочняющего деформационного формоизменения (УДФ) поверхностей трения образцов и лопаток из титанового сплава ВТ9 компрессора низкого давления газотурбинного двигателя (ГТД) и традиционных методов обработки поверхностей. Показана высокая эффективность технологии нанесения твердых смазочных покрытий на формоизмененные способом УДФ поверхности трения и комплексной технологии нанесения на образованный регулярный рельеф поверхностей мягких металлических покрытий (медь, латунь, кадмий, серебро), а затем твердых смазок. *Ключевые слова:* износостойкость, фреттинг, лопатка, компрессор, поверхность, трение, деформация, упрочнение, покрытие, смазка.

ВВЕДЕНИЕ

В практике повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин в условиях малых относительных вибросмещений контактирующих поверхностей (фреттинга) нашли широкое применение разнообразные [1] методы поверхностного пластического деформирования (ППД) при обкатке (раскатке) шарами, роликами, алмазном выглаживании и пр. Повышение сопротивления изнашиванию обработанных такими методами пластичных конструкционных материалов ограничивается непродолжительным временем изнашивания поверхности трения на глубину залегания сформированных остаточных напряжений сжатия. В жестких условиях вибротрения без смазки (фреттинга) и повторно-переменных нагрузок в замковых соединениях и на бандажных полках титановых лопаток компрессора ГТД в короткий период контактирования протекает интенсивный износ на глубину, превосходящую глубину залегания остаточных напряжений, предварительный натяг на полках исчезает, появляется зазор между полками на некоторых участках бандажного колеса [2, 3]. Это приводит к потере всех эффектов бандажирования лопаток, интенсификации износа и разрушению бандажных полок, замковых соединений и дисков турбины.

Дополнительные резервы повышения фреттингостойкости деталей турбокомпрессора обнаруживаются при упрочняющем деформационном формоизменении поверхностей трения [4, 5] специальным деформирующим ин-

струментом (роликом), на периферии которого расположены клиновидные инденторы, образующие замкнутые контуры (ячейки) гексагональной, круглой, ромбической, квадратной или иной структуры (рис. 1). При движении обката под нагрузкой инденторы ролика внедряются в материал, образуя на поверхности замкнутую сетку каналов с ячейками соответствующей структуры. На поверхности трения образуется регулярный рельеф в виде чередующихся элементарных выступов заданной структуры с горизонтальными площадками контакта, разделенными сеткой каналов. Упрочнение поверхности и формирование остаточных напряжений сжатия осуществляется в процессе всестороннего встречного тангенциального деформирования (обжатия) элементарных выступов по всему контуру боковыми поверхностями клиновидных инденторов. При этом в деформируемых объемах элементарных выступов и по периферии площадок контакта образуются остаточные напряжения сжатия, которые закрепляются наклепанным слоем металла по боковым стенкам

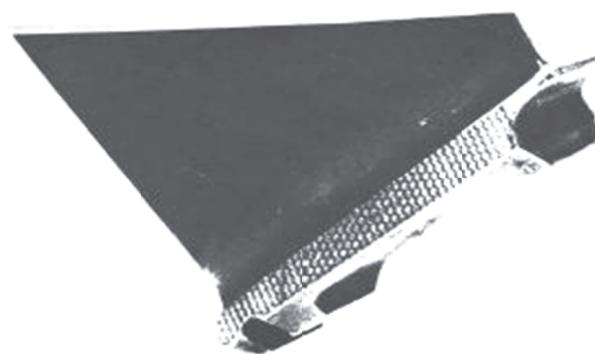


Рис. 1. Формоизмененная поверхность трения замка лопатки

Ковшов Анатолий Гаврилович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». E-mail: k.ntm@mail.ru

образованных каналов, замедляют цикл перестройки кристаллической структуры металлов пары трения и износ поверхностей.

Износостойкость при фреттинге может быть существенно повышена при дополнительном нанесении на регулярный рельеф формоизмененных поверхностей трения тонких пленок мягких металлов или твердых смазочных покрытий.

Целью настоящей работы является лабораторная и опытно-промышленная оценка фреттингостойкости поверхностей образцов из титанового сплава ВТ-9, применительно к условиям контактирования лопаток компрессора низкого давления ГТД в замках и на полках бандажа, подвернутых упрочняющему деформационному формоизменению (УДФ) поверхностей контакта, а также УДФ совмещенному с нанесением на регулярный рельеф формоизмененных поверхностей пленок мягких металлов и твердых смазочных покрытий.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Эффективность упрочняющего деформационного формоизменения оценивалась в процессе сравнительных испытаний фреттингостойкости поверхностей с нанесенным регулярным рельефом и обработанных традиционными методами без упрочнения. Испытания проводили на электродинамическом вибростенде [6], блок схема которого приведена на рис.2, в условиях трехкоординатного фреттинга при среднегеометрической амплитуде проскальзывания 0,015мм, частоте осцилляции 310Гц, удельном давлении в контакте: статическом-7МПа,

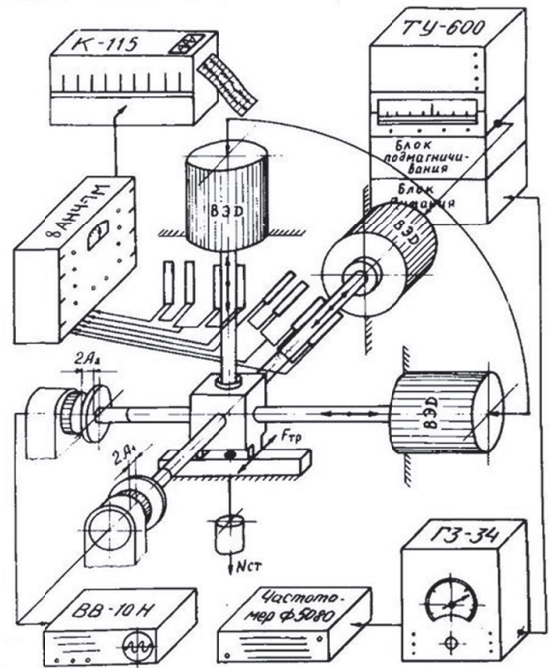
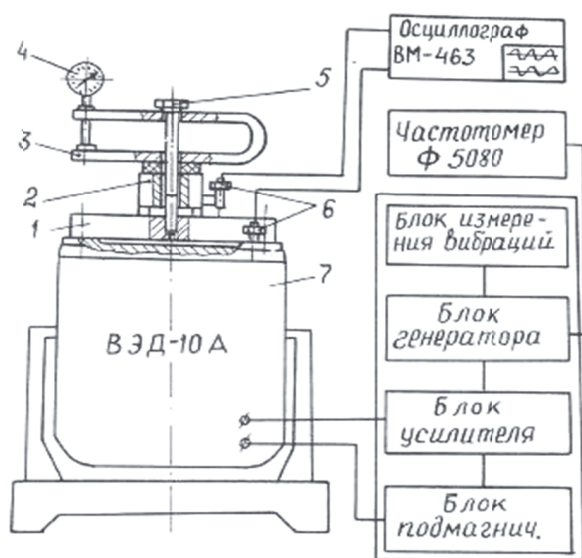


Рис. 2. Блок-схема стенда для испытаний на фреттинг-износ

динамическом-3МПа. Износ и параметры микрогеометрии поверхностей оценивали профилографированием дорожек трения профилографом-профилометром ВИ-201.

Упругие и диссипативные свойства изнашиваемого контакта оценивали способом контактного резонанса на специальной установке (рис.3,а), созданной на базе вибростенда ВЭДС-10А.

Способ состоит в том, что в исследуемом стыке контактирующих деталей возбуждают-

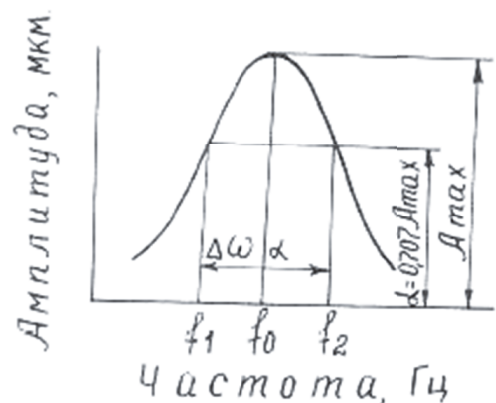


а

Рис. 3. Схема установки для исследования (а)

и измерения (б) упругих и диссипативных свойств контакта:

- 1 – испытуемый образец, 2 – образец-индентр, 3 – динамометр, 4 – индикатор, 5 – винт, 6 – вибропреобразователи колебаний в стыке



б

ся нормальные колебания. При плавном изменении частоты этих колебаний снимается амплитудо-частотная характеристика (АЧХ) при постоянной максимальной амплитуде возмущающей силы (рис. 3,б), по которой оцениваются упругие и диссипативные свойства контакта: резонансная частота нормальных колебаний в стыке f_0 ; контактная жесткость $k=4\pi^2mf_0^2$, где m – масса осциллятора в кг; логарифмический декремент колебаний $\delta=\pi\Delta\omega_\alpha/f_0=\pi(f_2-f_1)/f_0$, где $\Delta\omega_\alpha=f_2-f_1$ – ширина резонансного пика АЧХ на уровне амплитуды колебаний в стыке $\alpha=0,707A_{\max}$, где $A_{\max}$ – наибольшая амплитуда при резонансной частоте колебаний f_0 .

ЛАБОРАТОРНАЯ ОЦЕНКА ФРЕТТИНГСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Результаты испытаний фреттингстойкости поверхностей образцов, при пятикратной повторности опытов, представлены на рис. 4.

Группы образцов с регулярным рельефом, с размером площадки гексагональной ячейки 2мм, при испытаниях в одноименных парах без смазки показали увеличение износостойкости при фреттинге в 1,5 раза (рис.4) по сравнению с неупрочненными образцами. Повышение фреттингстойкости обусловлено, очевидно, комплексным влиянием целого ряда физико-механических и конструкторско-технологических факторов описанных выше. Сопротивление материала изнашиванию повышается в связи с тем, что, как показано в работе [7], в элементарных объёмах выступов создаются остаточные напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}$ порядка 100-500 МПа. За счет образования регулярного рельефа с шагом волнистости в 3-4 раза меньшим, чем при традиционных методах обработки [7, 8], увеличивается площадь контактирования, улучшается прирабатываемость поверхностей, повышается их контактная жесткость и снижается контурное давление. После снятия тонким шлифованием наплывов оттесненного клиновидными инденторами деформированного материала сечения кромок по периметру гексагональных выступов сохраняют выпуклую форму в виде поясков высотой порядка 0,3...0,5мкм. Выступающие над зеркалом контакта пояски являются концентраторами контактного давления, ускоряющего приработку контактирующих поверхностей. В процессе приработки твердые абразивные частицы продуктов износа скругляют острые кромки выступов, создается некоторая выпуклость зеркала элементарной площадки и поверхность приобретает равновысотную волнистость в пределах высоты шероховатостей. То есть за счет расчленения технологической волны на фрагменты, изменения числа, шага и высоты волн следует ожидать существенного снижения

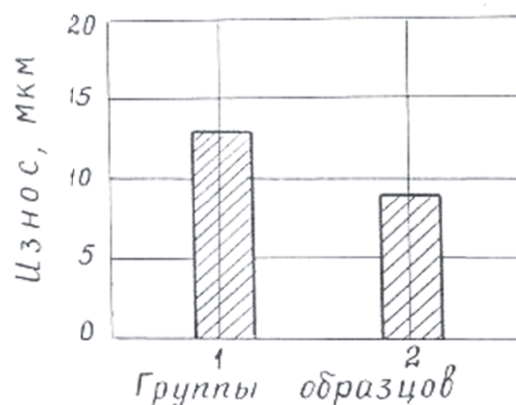


Рис. 4. Износ поверхностей образцов:
1 – ВТ9 без упрочнения;

2 – ВТ9 с гексагональным рельефом $S = 2$ мм

контурного давления, повышения фактической площади контакта (ФПК), контактной жесткости и положительного эффекта в повышении износостойкости. Перечисленные ожидания подтверждены в ходе экспериментального исследования контактных характеристик упрочненных и неупрочненных поверхностей.

Исследовали, методом контактного резонанса (рис.3), изменения контактной жесткости, резонансной частоты и логарифмического декремента колебаний сухих приработанных при фреттинге стыков, образованных гладкими неупрочненными и гладкими в паре с формоизмененными поверхностями образцов из сплава ВТ9. Установлено, что в контакте гладкой поверхности с формоизмененной, при возрастании нагрузки до 900 Н (рис.5), резонансная частота, контактная жесткость и логарифмический декремент колебаний увеличились по сравнению с контактом гладких поверхностей примерно на 15-20%, что пропорционально повышению ФПК и уменьшению контурного давления. Полученные результаты не противоречат данным работы [7] по сближению формоизмененных поверхностей из чугуна СЧ21-40.

Увеличение фреттингстойкости поверхностей с гексагональным регулярным рельефом обязано, кроме эффектов связанных со сложным напряженным состоянием элементарных выступов и зеркала ячеек, повышением ФПК и снижением контурного давления, наличием сетки профильных канавок. Канавки обеспечивают: интенсивное вентилирование контактного зазора и снижение теплонапряженности поверхностей; свободный доступ в зону трения кислорода; стимулирование образования пленок окислов, разделяющих контактирующие поверхности; снижение адгезионной активности. На неупрочненных поверхностях контакта наблюдается, при детальном микроскопическом анализе, интенсивное схватывание и раз-

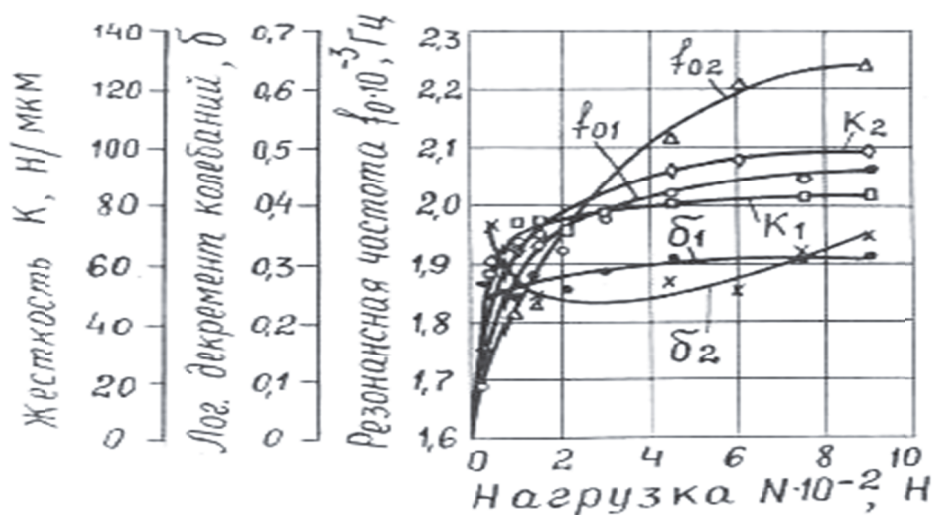


Рис. 5. Зависимость контактных характеристик от нагрузки:

f_{01}, k_1, δ_1 – в контакте неупрочненных (гладких) поверхностей;
 f_{02}, k_2, δ_2 – в контакте гладкой и рельефной ($S=2\text{мм}$) поверхностей

рушение поверхностей по всей площади контактирования (рис.6). В контакте поверхностей с регулярным гексагональным рельефом преобладают окислительные процессы. Однако схватывание присутствует в центре гексагональных площадок, куда доступ кислорода затруднен, в виде (рис. 7) единичных очагов.

Полное разделение контактирующих поверхностей, экранирование от воздействия коррозионно-активных компонент среды, сохранение защитных пленок окислов титана и, в конечном итоге, повышение их износостойкости достигается при нанесении твердых смазочных покрытий. Кинетика изнашивания смазочных покрытий ВАП-2, ВНИИП-209, ЦВСП-3 на поверхностях без упрочняющей обработки с использованием грунтового подслоя и на поверхностях с гексагональным регулярным рельефом показана на рис.8. Контактное разрушение покрытий осуществлялось с гладкой неупрочненной поверхностью образцов из сплава ВТ9.

Анализ представленных кинетических кривых показывает, что износ твердых смазочных покрытий, независимо от способа их нанесения и компонентного состава, наиболее интенсивен в начале испытаний. Интенсивность износа при приработке возрастает пропорционально толщине покрытия.

В условиях вибраций и высоких удельных давлений при фреттинге способ нанесения твердых смазок на гладкие металлические поверхности, с грунтовкой и без нее, не обеспечивает достаточно прочного сцепления покрытий с основой. Фреттинг приводит к разрушению сплошности покрытия, отслоению его у края контактной площадки по границе раздела покрытие-основа или покрытие-грунтовка (рис.9а,б) и быстрому отделению, обнажению и износу металлических поверхностей (рис.9,в). Долговечность покрытий, в конечном итоге, определяется временем износа слоя смазки (рис. 8, кривые I). Стойкость покрытий возрас-

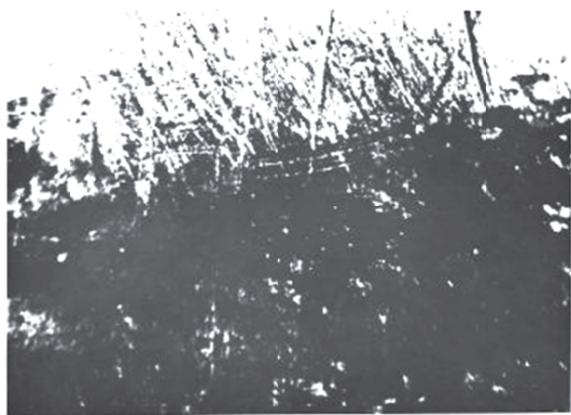


Рис. 6. Характер разрушения неупрочненной поверхности

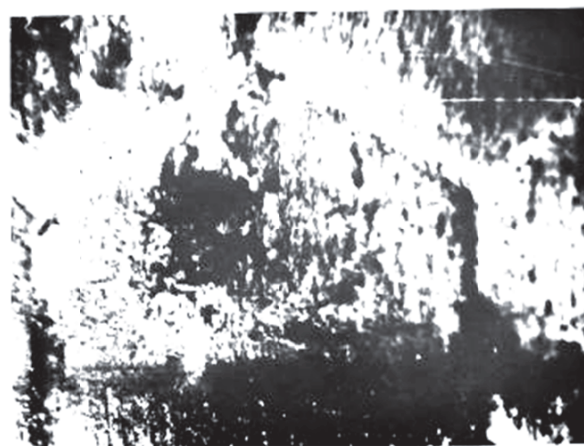


Рис. 7. Характер разрушения поверхности с гексагональным регулярным рельефом $S=2\text{мм}$

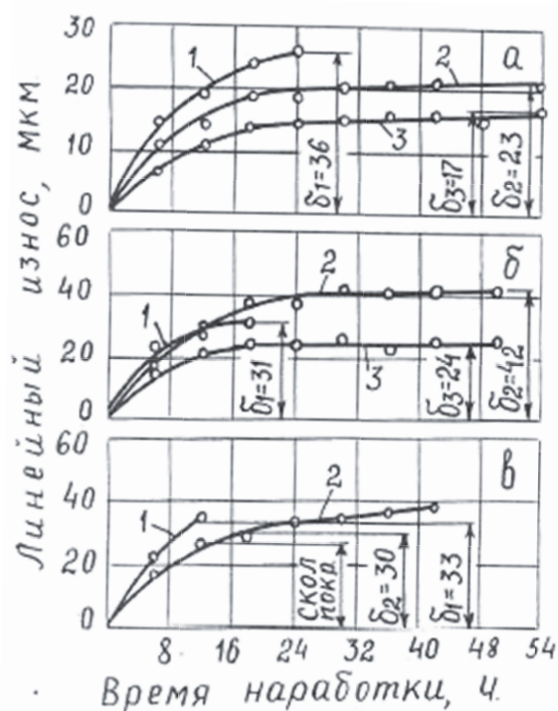


Рис. 8. Кинетика изнашивания твердых смазочных покрытий:

а-ВАП-2, б-ВНИИ НП-209, в-ЦВСП-3;

1 – на грунтовке, 2 – на гексагональном рельефе
 $S=2\text{мм}$; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина покрытий в мкм

тает при нанесении твердых смазок на поверхности с регулярным рельефом, что связано, очевидно, с активизацией поверхностного слоя металла и усилением адгезионного взаимодействия между металлом и смазочным материалом в результате роста энергии активации пластической деформации при формообразовании рельефа. Положительный эффект, кроме того, усиливается за счет увеличения площади контакта металлической поверхности с твердым покрытием, повышения сопротивления сдвигу покрытия за счет заполнения твердой смазкой образованных каналов. Износ замедляется с уменьшением в процессе приработки толщины покрытия и далее стабилизируется (рис.8, кривые 2 и 3). Длительные испытания (вплоть до 54ч наработки) показали, что на поверхностях трения постоянно генерируется тонкая (порядка 2-4мкм) пленка твердой смазки, восполняемая за счет адгезии из профильных канавок, предотвращающая металлический контакт, схваты-

вание и износ поверхностей (рис.10). При этом существенно изменяется характер взаимодействия контактирующих пар. Резонансная частота колебаний и контактная жесткость приработанных (в течении 36ч) поверхностей с твердой смазкой, нанесенной на гексагональный рельеф с размером ячеек 2мм (рис.11), уменьшаются по сравнению с незащищенными поверхностями (рис.5) в 1,5-2раза, демпфирование возрастает. Наилучшие результаты по рассеянию энергии колебаний при фреттинге получены (рис.11) для твердого смазочного покрытия ВАП-2.

Проведенные исследования выявили следующие особенности процесса контактного взаимодействия формоизмененных поверхностей: по контуру элементарных площадок и выступов создаются остаточные напряжения сжатия, что благоприятно сказывается на сопротивлении материала изнашиванию; улучшается прирабатываемость поверхностей, увеличиваются контурная и фактическая площади контакта, снижаются контурное и фактическое давление, повышаются контактная жесткость и демпфирующая способность стыков; улучшается подвод кислорода воздуха, чем облегчается создание защитных пленок окислов и теплоотвод; схватывание и разрушение локализуются в пределах одной элементарной площадки; абразивные частицы износа имеют возможность выхода из зоны контактирования поверхностей в профильные канавки; снижается дополнительная нагрузка в контакте, возникающая в связи с расклинивающим действием продуктов износа, объем которых больше объема исходного материала; канавки регулярного рельефа служат аккумуляторами смазочного материала, подпитывающими контактирующие поверхности смазкой; за счет профильных каналов увеличивается площадь металлической поверхности контакта, что благоприятно сказывается на прочности сцепления и сопротивлении сдвигу защитных покрытий; контактные процессы смещаются в слои смазочной пленки, экранирующей поверхности и эффективно рассеивающей энергию колебаний. Совокупное действие перечисленных факторов проявляется в положительном эффекте повышения износостойкости при фреттинге и ресурса контактирующих поверхностей.

Резервы повышения фреттингостойкости поверхностей при нанесении твердых смазоч-

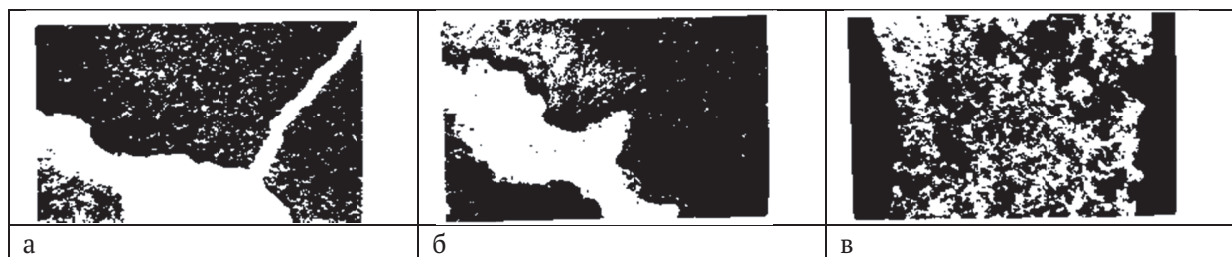


Рис. 9. Характер разрушения твердого смазочного покрытия на грунтовом подслое



Рис. 10. Износ твердого смазочного покрытия на гексагональном рельефе $S=2\text{мм}$

ных покрытий на регулярный рельеф обнаруживаются в следующем: в совершенствовании технологии приготовления, нанесения и термообработки твердых смазочных покрытий; в уменьшении толщины покрытий; в применении комплексной технологии обработки, включающей нанесение на регулярный рельеф мягких металлических покрытий (например, латунь, кадмий, серебро), а затем твердых смазок.

Стойкость поверхностей сплава ВТ9 с испытанными в режиме фреттинг-износа металлическими покрытиями на регулярном рельефе и без него может быть представлена убывающим по эффективности защиты рядом: серебро, латунь, кадмий.

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ОЦЕНКА ФРЕТТИНГСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В процессе опытно-промышленных испытаний проведена отработка технологического процесса УДФ поверхностей замков (рис.1) и бандажных полок лопаток из сплава ВТ9 второй

ступени компрессора низкого давления ГТД.

План опытно-промышленного внедрения включал: разработку способов базирования лопаток, чертежей технологической оснастки и накатного инструмента; разработку технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки рабочих поверхностей замков, торцов бандажных полок лопаток и контроля качества выполнения операций; внесение изменений в заводскую технологическую документацию изготовления и приемочного контроля; изготовление опытной партии лопаток с отработанными по способу УДФ боковыми поверхностями замков и торцов бандажных полок; проведение эксплуатационных наблюдений работоспособности опытной партии изделий.

Отработка технологического процесса УДФ показала, что лучшее качество обработки, при приемлемой трудоемкости процесса, достигается при использовании многорядных роликов, в частности, пятирядного ролика диаметром 21,9 мм, длиной 12 мм, с гексагональной формой ячейки размером 2 мм и жесткой оправки для установки и крепления ролика.

По точности и жесткости суппортной группы станков упрочняющее формоизменение поверхностей замков и бандажных полок, с учетом их формы и схемы базирования, целесообразно проводить на горизонтально-фрезерных станках, например, 6М82. Рекомендуется использовать два рабочих движения органов станка: вертикальное ручное перемещение стола для создания нагрузки на деформирующий инструмент; продольную подачу стола для обеспечения обкатки роликом упрочняемой поверхности детали.

Заданную глубину каналов рельефа следует достигать при двух для бандажной полки и трех для плоскости замка рабочих ходах стола и одном ходе на выхаживание для предупреждения

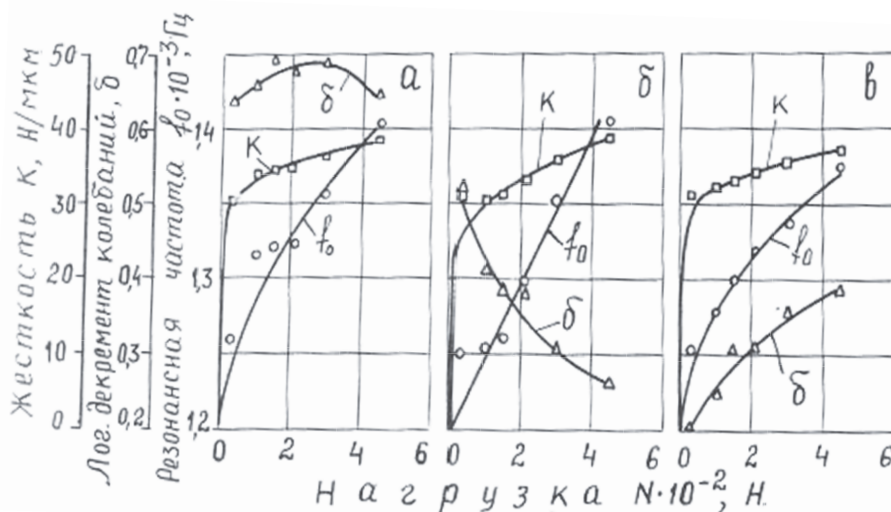


Рис. 11. Зависимость контактных характеристик поверхности сплава ВТ9 с твердым смазочным покрытием на гексагональном рельефе $S=2\text{мм}$ от нагрузки:
а – ВАП-2, б – ВНИИП-209, в – ЦВСП-3

деформации и нарушения геометрии тонкостенных лопаток. Усилие на ролик не должно превышать при обкатке плоскостей замка 5-6кН, плоскостей бандажной полки - 2,5...2,6кН. Скорость обката - в пределах 200...315мм/мин. Оптимальная глубина каналов гексагонального рельефа на плоскостях замка $(0,2-0,25)^{+0,1}$ мм, на плоскостях полки - $(0,1-0,15)^{+0,1}$ мм. Контроль глубины каналов осуществляется индикаторным глубиномером с радиусом при вершине игольчатой ножки 0,1мм. Смазочно-охлаждающая жидкость при обкатке-масло индустриальное И-20.

Наплывы металла на поверхностях, образовавшиеся после тиснения сетки гексагональных каналов, удаляются тонким фрезерованием со скоростью подачи 10-12 м/мин, глубиной резания 0,05-0,06 мм/зуб.

Покрyтия твердой смазки ВАП-2, ВНИ-ИНП-209 или серебрение плюс покpытия твердой смазки наносились на формoизмененные поверхности по заводской технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные и опытно-промышленные испытания предложенной отделочно-упрочняющей обработки на изделиях показали, что способ технологичен и производителен ($t_{шт}=5$ мин). После деформационного упрочнения рабочих поверхностей геометрия профиля лопаток не нарушается. Параметры образованного регулярного рельефа соответствуют расчетным.

Результаты эксплуатационных испытаний пяти комплектов изделий с упрочненными по технологии УДФ контактирующими поверх-

ностями лопаток с последующим нанесением твердых смазочных покpытий показали увеличение их ресурса в 1,25-1,5раза, что позволило получить экономию от снижения трудовых и материальных затрат в производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974.-272 с.
2. Опыт эксплуатации ГТД большого ресурса с бандажированными рабочими лопатками турбины / А.А. Мухин, А.А. Ковалев, А.Н. Ведин, А.А. Симаков // Проблемы прочности, 1978. №5. С.18-21.
3. Износостойкость бандажных полок лопаток компрессора и турбины / И.Г. Сипухин, Д.Е. Еланевский, Р.С. Бекбулатов, Н.Г. Гаврилов // В кн.: научные основы и методы повышения надежности и долговечности газотурбинных двигателей. Киев: Наукова думка, 1979. С. 122-126.
4. Деформирующий инструмент для упрочнения поверхностного слоя деталей / А.С. 675824(СССР). КПТИ: Авт. изобрет. С.М. Андюн, Д.Г. Громаковский, А.Г. Ковшов и др. Опубл. в Б.И. №40, 1980.
5. Способ нанесения твердых смазочных покpытий на поверхности трения / А.С.775505(СССР). КПТИ: Авт изобрет.: Ю.М. Агошков, В.И. Алексеев, Д.Г. Громаковский, А.Г. Ковшов и др. Опубл. в Б.И. №40, 1980.
6. Стенд для испытаний материалов на фреттинг-износ / А.С. 684398(СССР). КПТИ: Авт. изобрет. В.И. Алексеев, Д.Г. Громаковский, А.Г. Ковшов, Н.В. Сиднев, В.И. Цейтлин. Опубл. в Б.И. №33, 1979.
7. Костин В.А. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств прямолинейных направляющих скольжения из чугуна: дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 1980.-215 с.
8. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 195 с.

ESTIMATION OF EFFICIENCY AT FRETTING OF A SIMPLE FORMATION DEFORMATION FORMATION OF FRICTION SURFACES OF COMPATIBLE WITH ANTI-VIBRATIONAL COATINGS

© 2018 A.G. Kovshov

Samara State Technical University

The results of comparative laboratory and pilot-industrial tests of the effectiveness of strengthening deformational shaping (UDF), friction surfaces of specimens and blades from titanium alloy VT9, low-pressure compressor of gas turbine engine (GTD) and traditional methods of surface treatment are presented. The high efficiency of the technology of applying solid lubricating coatings to the shaped surfaces of soft metal coatings (copper, brass, cadmium, silver) molded by the UDF friction method and a complex technology of depositing the surfaces of soft metal coatings onto the formed regular relief and then solid lubricants is shown.

Keywords: wear resistance, fretting, blade, compressor, surface, friction, deformation, hardening, coating, lubrication.