

ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГ-СТОЙКОСТИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

К. С. СЕЛИВАНОВ

УГАТУ, факультет авиационно-технологических систем
Тел: (3472) 22 26 76, 23 07 63 E-mail: adie@chat.ru

Аннотация: Рассмотрены технологические методы защиты деталей от фреттинга модифицированием их поверхности направленными потоками заряженных частиц. Сделана попытка объяснить причину повышения триботехнических свойств поверхности после ее ионного легирования. Приведены результаты исследования схватывания при фреттинге титановых образцов, подвергнутых ионной имплантации азота

Ключевые слова: фреттинг; схватывание; защита поверхности; ионная имплантация

Основной задачей современного авиадвигателестроения является повышение качества поверхностного слоя деталей и сборочных узлов, определяющих в совокупности ресурс и эксплуатационную надежность авиационной техники. Время эксплуатации узлов и агрегатов резко сокращается в результате износа деталей, работающих в агрессивных средах под воздействием высоких статических и динамических нагрузок, в результате которых активно развивается процесс фреттинга.

Фреттинг — это особый вид износа, возникающий при малых колебательных перемещениях одной поверхности относительно другой под нагрузкой. Он характеризуется малыми амплитудами и скоростями смещения сопряженных тел, а также связанным с этим затруднительным удалением продуктов реакции из зоны контакта [1]. Лабораторный анализ причин разрушения деталей, проведенный в ходе их стендовых испытаний, показал, что в результате данного вида износа происходят отказы таких ответственных механизмов, как агрегаты поворота лопастей вертолета, разрушение замков и бандажных полок лопаток компрессоров ГТД. Аналитический обзор литературных источников подтвердил, что процессы фреттинга происходят также на рабочих поверхностях подшипников, в заклепочных соединениях, на электрических контактах и других сопрягаемых поверхностях, работающих в условиях действия переменной тангенциальной нагрузки.

Механизм развития фреттинга определяется совместным действием физических и химических процессов, протекающих на поверхностях сопряженных деталей при их эксплуатации. В результате взаимодействия шероховатых поверхностей, во-первых, образуются частицы износа, которые из-за трудностей их выхода из зоны контакта воздействуют на поверхности как абразив, во-вторых, относительные перемещения микронеровностей поверхности и абразивных частиц стирают поверхностную пленку окислов, что приводит к адсорбции кислорода на металле и образованию нового оксида или к сближению чистых поверхностей металлов, что обуславливает их схватывание [2]. Разрушения от фреттинг-коррозии проявляются в виде натиров, вырывов, раковин размером в несколько десятков микрометров, запол-

ненных порошкообразными продуктами изнашивания [1,2].

Анализ литературы [1,2,3] показал, что в настоящее время существуют следующие традиционные методы защиты деталей от фреттинга:

1) *конструктивно-технологические методы:*

– предотвращение относительного смещения контактируемых поверхностей;

– перенос относительного смещения поверхностей в промежуточную среду, например, использование в качестве промежуточных слоев полимеров;

2) *защита поверхности от процессов, ведущих к повреждению поверхности при фреттинге:*

– уменьшение коэффициента трения упрочнением контактирующих поверхностей;

– предотвращение заедания путем подбора металлов с низкой склонностью к схватыванию;

– защита поверхностей от абразивного разрушения повышением твердости поверхностей сопряженных деталей.

Наиболее перспективные методы защиты поверхностей деталей от воздействия фреттинга связаны с технологией обработки. В отличие от них конструктивно-технологические методы влекут за собой изменение конструкции узлов и механизмов машин и поэтому в большинстве случаев являются нежелательными.

При использовании традиционных технологических методов упрочняющей обработки поверхности, таких как пластическая деформация, химико-термическая обработка, нанесение покрытий и других, создается модифицированный поверхностный слой с повышенной твердостью, что способствует некоторому увеличению износостойкости. Вместе с тем в тяжело нагруженных узлах авиационной техники такое частное улучшение свойств нередко бывает недостаточным. Дальнейшее увеличение ресурса работы пар трения, связанное с повышением твердости на базе традиционных методов обработки, представляется затруднительным [4,9].

Еще более усложняет проблему то обстоятельство, что в настоящее время при создании современных машин и механизмов, наряду с повышением ресурса, также стоит задача сокращения массогабаритных характеристик. Во многих случаях эта задача решается применением титановых сплавов.

Однако этот материал из-за склонности к схватыванию в процессе фреттинга не является работоспособными ни на воздухе, ни в вакууме [6].

Таким образом, весьма актуальной является задача поиска новых, более прогрессивных методов обработки поверхности деталей из современных конструкционных материалов. Эффективным и высокопроизводительным методом поверхностной обработки, существенно улучшающим эксплуатационные характеристики деталей из различных материалов, может явиться ионная имплантация [4–9, 14].

Из литературных источников [10, 11, 13] известно, что при ионном модифицировании поверхностного слоя направленным потоком заряженных частиц (ионами легирующего вещества) образуется высококонцентрированный раствор имплантируемого элемента в твердой матрице и реализуются механизмы дислокационного, твердорастворного и дисперсионного упрочнения материала поверхности детали. Вследствие этого происходит увеличение твердости, износостойкости и коррозионной стойкости, усталостной прочности и долговечности [5]. Испытания на трение и износ показали, что имплантация ионов азота в поверхность образцов из титанового сплава ВТ1-0 и низкоуглеродистой стали (0,17% С) повышает их циклическую прочность на 36% и 23% соответственно [6], а также снижает коэффициент трения титанового сплава с 0,22 до 0,1 [4], то есть примерно в два раза. Исследования [7] также показывают, что ионное модифицирование способствует защите поверхностей деталей от коррозионного воздействия, которое имеет место в процессе фреттинг-коррозии. Например, коррозионная активность высоколегированной стали 13Х11Н2В2МФШ вследствие формирования объемной диффузионной зоны значительно снижается после имплантации ионов азота с последующим нанесением нитрида титана.

При анализе надежности титановых материалов дополнительно следует отметить, что детали из этого материала имеют повышенную склонность к схватыванию в процессе трения. Схватывание сопряженных деталей протекает в несколько этапов. В начале процесса трения происходит взаимодействие сопряженных тел по поверхностным пленкам в условиях упругой деформации. Через некоторое количество циклов трения, соответствующих приработке, начинается локальная пластическая деформация. Она сопровождается разрушением защитных пленок и выходом на поверхность ювенильного металла, в результате чего происходит активное развитие узлов (точек) схватывания материала трущихся деталей. При дальнейшем развитии трения образованные узлы могут разрушаться под действием приложенной тангенциальной силы. В этом случае на поверхностях трения образуются наросты металла, обладающие абразивными свойствами, что ведет к резкому увеличению износа поверхностей [15].

Таким образом, можно предположить, что ионное модифицирование поверхностей деталей позволит обеспечить дополнительные (в сравнении

с названными методами упрочняющей обработки) возможности управления их триботехническими характеристиками, что должно защитить их от воздействия фреттинга и тем самым повысить эксплуатационные характеристики, обеспечить увеличение ресурса и надежности изделия.

Для исследования возможности применения ионной имплантации в качестве способа защиты поверхностей титановых сплавов от схватывания при фреттинге были проведены следующие испытания. В качестве объекта были выбраны образцы с криволинейными контактирующими поверхностями типа «вал–штулка» из титанового сплава ВТ6. Испытания образцов проводились на специальной установке [14] при режимах:

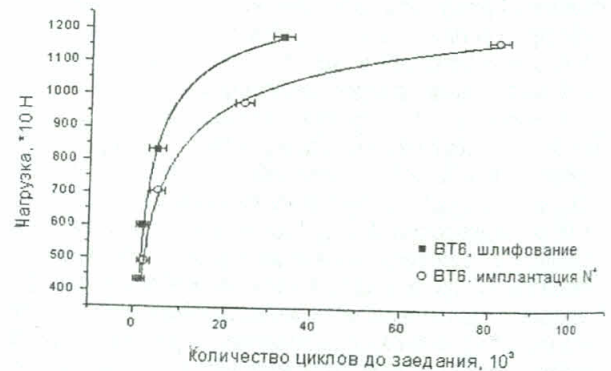
– амплитуда взаимного перемещения образцов 125 мкм;

– осевая нагрузка на сопряжение образцов 4..12 кН;

– средняя частота взаимного перемещения поверхностей образцов 70 Гц.

Регулируемым параметром была прилагаемая на сопряжение нагрузка, а измеряемым – время до начала схватывания материала, т.е. время до появления на сопряженной поверхности образцов вырывов, каверн, наростов и других характерных дефектов поверхности детали.

В качестве упрочняющей обработки была выбрана ионная имплантация азота с энергией $E = 30$ кэВ и дозой $D = 2 \cdot 10^{17}$ ион/см². Полученные результаты испытания приведены на рисунке.



Влияние технологии обработки на схватывание сопрягаемых деталей из титанового сплава ВТ6

Из рисунка видно, что по мере увеличения осевой нагрузки количество циклов до схватывания у образцов, подвергнутых ионной имплантации азота, резко увеличивается. Так, например, сопряжение после упрочняющей обработки при приложении нагрузки 9,0 кН до схватывания проработало в два раза дольше, чем исходное, без упрочняющей обработки. Такой рост стойкости к схватыванию у образцов можно объяснить процессами, происходящими в поверхностном слое образца после ионной имплантации, которые существенно влияют на механические, коррозионные и триботехнические характеристики детали.

Важнейшим следствием ионной имплантации является возникновение в обрабатываемой по-

верхности так называемых радиационных дефектов. Они возникают при выбивании высокоэнергетичными легирующими ионами атомов матрицы из своих узлов, при этом в кристаллической решетке образуются дефекты строения в виде вакансий и смещенных атомов, известных как пары Френкеля. Концентрация наведенных радиационных дефектов примерно повторяет распределение концентрации легирующего элемента в поверхности [8]. При этом с повышением концентрации вакансий становятся существенными процессы их взаимодействия, в частности, образование микропор, вакансионных кластеров, дислокационных петель. С появлением дефектов строения связано возникновение внутренних напряжений в ионно-легированном слое, изменение коэффициентов диффузии, механических и других свойств [9,10]. Важным следствием ионного легирования является образование метастабильных фаз, которые не создаются традиционными методами химико-термической обработки. В частности, в результате ионного легирования происходит образование твердых растворов, в которых различие атомных радиусов элементов достигает 40% [9,11].

Таким образом, основными причинами повышения стойкости к схватыванию деталей из титановых сплавов после ионного легирования являются: создание радиационных дефектов и образование примесей внедрения. Последние, попадая в октаэдрические поры гексагональной плотной упаковки титана, приводят к увеличению параметров решетки, уменьшению напряжения сдвига вдоль базисных поверхностей, а также к ослаблению адгезионного взаимодействия с контртелом сопрягаемой поверхности трения [9, 12], что способствует уменьшению схватывания.

Ионы азота, образованные при ионной имплантации, кроме того, имеют большую подвижность и при высокой концентрации легко образуют твердые мелкодисперсные выделения, а также обеспечивают формирование атмосферы атомов, которые блокируют выход дислокаций на поверхность. В результате этого при возникновении нагрузки генерируемые дислокации скапливаются около образованного в процессе имплантации слоя, увеличивая тем самым прочность поверхности. Кроме того, при фреттинге знакопеременная касательная нагрузка вызывает распределение дислокаций вдоль этого слоя, что способствует уменьшению анизотропии структуры поверхности и, следовательно, положительно сказывается на улучшении ее механических свойств.

Известно [8], что при обработке поверхности ионами азота имплантированный слой, где образуются новые нитридные фазы, составляет не более 10 мкм. Однако в процессе трения при износе поверхностного слоя тем не менее наблюдается стабильность этих фаз [5, 6], что обеспечивает постоянство эксплуатационных свойств поверхности. Данное явление можно объяснить подвижностью имплантированных ионов азота в решетке титана, которая обуславливает функционирование так называемого *триботехнического стабилизатора*. Его работа заключается в следую-

щем. При трении на сопряженных поверхностях выделяется большое количество теплоты, которое способствует возникновению термо-ЭДС и поддержанию разности потенциалов по глубине поверхностного слоя [16]. Возникающее при этом электрическое напряжение обеспечивает диффузию ионов азота к поверхности и, следовательно, образование новых мелкодисперсных нитридных фаз, которые и обеспечивают постоянство эксплуатационных свойств поверхности детали, как уже было указано.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в условиях фреттинга ионная имплантация поверхности деталей ионами легирующего вещества (в данном случае ионами азота) является наиболее перспективным методом обеспечения высокой износостойкости и сохранения ее стабильности в процессе трения даже в случае контактирования деталей из титановых сплавов, склонных к схватыванию.

В процессе модифицирования поверхности направленными потоками заряженных частиц можно изменять величину кинетической энергии ионов легирующего вещества, плотность и направленность их потока и тем самым управлять триботехническими характеристиками деталей на основе изменения технологической наследственности поверхностного слоя ответственных деталей авиационной техники. Новая технология ионной имплантации позволяет создать защитный поверхностный слой, препятствующий развитию фреттинга, и тем самым повысить эксплуатационные свойства деталей, увеличить их ресурс и надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г., Пучков В. Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М.: Машиностроение, 1986. 223 с.
2. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия. Ленинградское отд., 1989. 454 с.
3. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбаров В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.
4. Металлополимерные пары трения, модифицированные ионной имплантацией / А. И. Блесман, Б. Г. Грязнов, Ю. И. Машков, В. Г. Порохин // Авиационная промышленность. 1988. № 9. С. 28-30.
5. Повышение износостойкости стали ШХ15 ионной имплантацией / Е. В. Васильева, С. М. Савичева, И. В. Крюкова // Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 1. С. 59-62.
6. Влияние низкоэнергетической ионной имплантации на механические свойства сплавов титана и железа // Физика и химия обработки материалов. 1987. № 2. С. 18-24.
7. Повышение коррозионной стойкости стали 13X11H2B2MФШ методом ионной имплантации и металлными покрытиями / Н. А. Амирханова, Р. Х. Нуриева А. М. Смыслов и др. // Авиационная промышленность. 1990. № 3. С. 61-62.
8. Мухин В. С., Шустер Л. Ш. Износ инструмента, качество и долговечность деталей из авиационных материалов. Уфа: УАИ, 1987. 215 с.

9. **Белый А. В., Карпенко Г. Д., Мышкин Н. К.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1991. 208 с.
10. **Комаров Ф. Ф., Морозкин Н. В.** // ЖТФ. 1984. Т. 54, № 9. С. 1836–1837.
11. **Ионная имплантация** / Под ред. Дж. К. Хирвонена. М.: Металлургия, 1985. 391 с.
12. **Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии** / А. В. Белый, Е. Н. Макумок, И. Л. Поболь; Под ред. В. И. Беляева. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 79 с.
13. **Мухин В. С., Смыслов А. М., Боровский С. М.** Модифицирование поверхности деталей ГТД по условиям эксплуатации. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
14. **Смыслов А. М., Коробейников Н. И., Селиванов К. С.** К вопросу об исследовании фреттинг-коррозии на контактирующих криволинейных поверхностях // Оптимизация процессов обработки конструкционных материалов: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 1997. С. 99–108.
15. **Голего Н. Л.** Исследование кинетики возникновения и развития процесса схватывания металла при трении // Трение, смазка и износ деталей машин. Вып. 5. Минск, 1964. С. 45–50.
16. **Кашеев В.** Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1987. 213 с.

ОБ АВТОРЕ

Селиванов Константин Сергеевич, аспирант кафедры технологии машиностроения УГАТУ. Дипл. инженер в области технологии машиностроения (УГАТУ, 1997).

УДК 658.512.001.89

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА

М. В. ИВАНОВА

УГАТУ, факультет авиационно-технологических систем
Тел: (3472) 22 26 76 E-mail: imva@chat.ru

Аннотация: Рассмотрены нейросетевые методы решения следующих задач технологической подготовки машиностроительного производства: группирования деталей, оптимизации проектных технологических процессов и планировок технологического оборудования. Группирование деталей производится с помощью многослойного персептрона, оптимизационные задачи решаются с помощью искусственной нейронной сети Хопфилда обычной и модифицированной архитектуры

Ключевые слова: искусственный интеллект; оптимизация; технологические процессы; технологические планировки оборудования

В науке и технике находят все большее применение интеллектуальные моделирующие, вычислительные и управляющие системы на основе использования искусственных нейронных сетей (ИНС). Так, например, достаточно широко известны коммерческие программные продукты на основе ИНС, предназначенные для использования:

- в нефтяной и химической промышленности для анализа геологической информации, идентификации неисправностей оборудования, анализа состава примесей;

- в военной промышленности и авиации их используют для обработки звуковых, радарных, инфракрасных сигналов, обобщения информации и автоматического управления летательными аппаратами;

- в банках и страховых компаниях ИНС применяют для автоматического считывания финансовых документов, прогнозирования изменений экономических показателей, курсов валют, оценки финансовых рисков;

- в медицинской промышленности они нашли применение в целях анализа рентгенограмм, обнаружения отклонений в ЭКГ;

- в телекоммуникациях ИНС используют для адаптивного управления сетями связи, сжатия и восстановления изображений;

- в промышленном производстве их применяют в целях управления автоматическими манипуляторами и технологическими процессами.

В данной работе рассмотрены новые возможности применения искусственных нейронных сетей в технологической подготовке производства изделий машиностроения. С помощью математического аппарата теории искусственных нейронных сетей нами предложено решать задачи группирования деталей, оптимизации проектных технологических процессов обработки деталей и планировок расположения технологического оборудования.

Искусственная нейронная сеть представляет собой совокупность элементов — нейронов — с указанием правил взаимодействия нейронов между собой и закона эволюции всей системы во времени. Состояние нейрона характеризуется некоторым числом — его выходным сигналом. Каждый нейрон взвешивает значения своих входов и приводит над их суммой нелинейное преобразование. В зависимости от решаемой задачи для такого преобразования используют: пороговую и сигмоидальную функции, а также функцию гиперболического тангенса активации нейронов.