

---

---

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.  
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

---

---

УДК 531.43

**ФРЕТТИНГ-ИЗНОС ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ИМПУЛЬСОВ ТОКА**© 2024 г. А. Ю. Албагачиев<sup>1</sup>, А. В. Михеев<sup>1, \*</sup>, М. А. Тананов<sup>1</sup><sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail: alexmichdm@gmail.com*

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

В статье рассмотрено влияние импульсов электрического тока, проходящих между деталями на фреттинг-износ титановых сплавов. Приведено описание испытательного стенда и описание методики испытаний.

*Ключевые слова:* электропластичность, электрический ток, импульс, нагрузка, трение, фреттинг износ

**DOI:** 10.31857/S0235711924050118, **EDN:** NTKLTQ

Из всех существующих видов изнашивания фреттинг-износ или фреттинг-усталость являются малоизученными, но в то же время широко распространенными. Этому виду изнашивания при эксплуатации подвергаются все неподвижные и подвижные соединения в том числе шины и тоководы устройств импульсной техники и детали станков с электрохимическими и электрофизическими методами обработки.

При фреттинге процесс трения осуществляется при циклическом микроперемещении контактирующих поверхностей качением/скольжением без смазки при малых амплитудах. Продукты износа не выносятся из зоны трения [1]. Под действием электрического тока высокой плотности механические свойства металлов изменяются временно или постоянно. При высоких плотностях тока на процесс трения оказывает влияние электропластический эффект, проявляющийся в снижении напряжений течения и повышении пластичности [2]. В работе [3] показано, что проявление электропластического эффекта в титановых сплавах зависит от состава и размера зерна.

Для изучения влияния импульсов тока на фреттинг-износ был разработан стенд, схема которого приведена на рис. 1, конструкция показана на рис. 2 и сделана на основе стенда, описанного в [4].

Источником механических колебаний является магнитострикционный вибропреобразователь, соединенный с индентором (подвижным образцом) при помощи механического преобразователя. Питание магнитострикционного преобразователя осуществляется от источника тока подмагничивания и генератора синусоидальных сигналов. Частота и амплитуда перемещений подвижного образца определяются генератором сигналов и контролируются по акселерометру и анализатору спектра. Постоянная нормальная нагрузка прикладывается так же к индентору через устройство

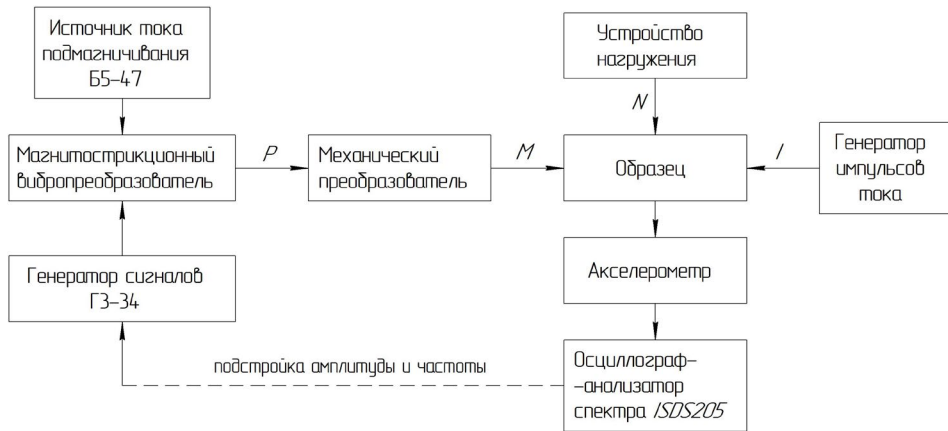


Рис. 1. Структурная схема стенда.

нагружения. Импульсы тока от специального генератора, вырабатывающего прямоугольные однополярные импульсы, прикладываются к неподвижному образцу.

Узел трения стенда состоит из контактирующих неподвижного плоского образца и подвижного сферического индентора. Индентору сообщается поступательное колебательное перемещение, а также, на него действует нормальная к поверхности образца постоянная сила нагружения.

Образец 1, представляющий собой неподвижную пластину, закреплен на общем основании 3 при помощи болтов и диэлектрической подложки 2 с продольными пазами. Наличие пазов позволяет перемещать образец относительно основания

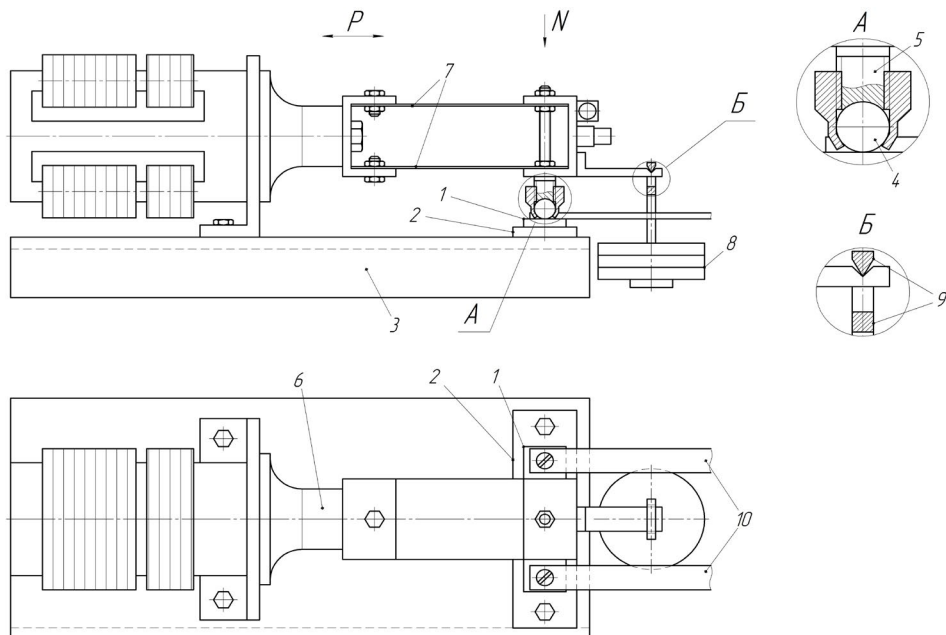


Рис. 2. Конструкция стенда. Обозначения: 1 — образец; 2 — диэлектрическая подложка; 3 — основание; 4 — индентор; 5 — держатель индентора; 6 — магнитострикционный преобразователь; 7 — подвеска индентора; 8 — грузы; 9 — подвеска грузов; 10 — токоведущие шины.

и проводить несколько испытаний на одном образце. Индентор 4, выполненный в виде сферы, установлен в держатель 5 и зафиксирован гайкой. Сферическая форма обеспечивает нечувствительность к отклонению осей образца и индентора. Механические колебания генерируются магнитострикционным преобразователем 6, состоящим из магнитопровода с рабочей обмоткой и обмоткой подмагничивания, концентратора и кронштейна. Рабочая обмотка подключена к генератору синусоидальных колебаний с регулируемой амплитудой. Обмотка подмагничивания служит для установки рабочей точки магнитопровода и подключена к стабилизированному источнику тока. Преобразователь связан с держателем индентора через пружинный параллелограмм 7, образованный плоскими пружинами и кронштейнами. Пружинный параллелограмм позволяет механически развязать продольные колебания и нормальное нагружение. Нагружение (приложение нормальной силы) проводится посредством наборных грузов 8, устанавливаемых на подвес 9, опирающийся призматическим выступом в паз кронштейна. Описанная конструкция подвеса позволяет компенсировать неточность установки основания на плоскости. Для контроля формы и амплитуды колебаний применен акселерометр. Неподвижный образец соединен с генератором импульсов тока при помощи шин 10.

Блок-схема генератора импульсов тока представлена на рис. 3. Работа генератора основана на заряде батареи конденсаторов от источника стабилизированного тока с последующим разрядом на нагрузку (образец).

Емкостной накопитель заряжается от управляемого инвертора, выходное напряжение которого определяется схемой стабилизации, которая сравнивает напряжение датчика тока и падение напряжения на токоизмерительном шунте. Стабилизация зарядного тока осуществляется за счет обратной связи.

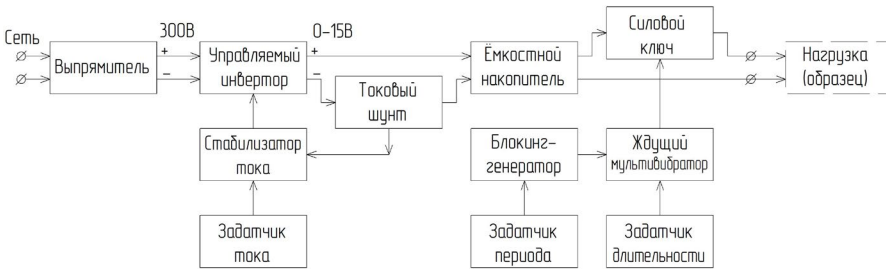


Рис. 3. Блок-схема генераторов импульсов тока.

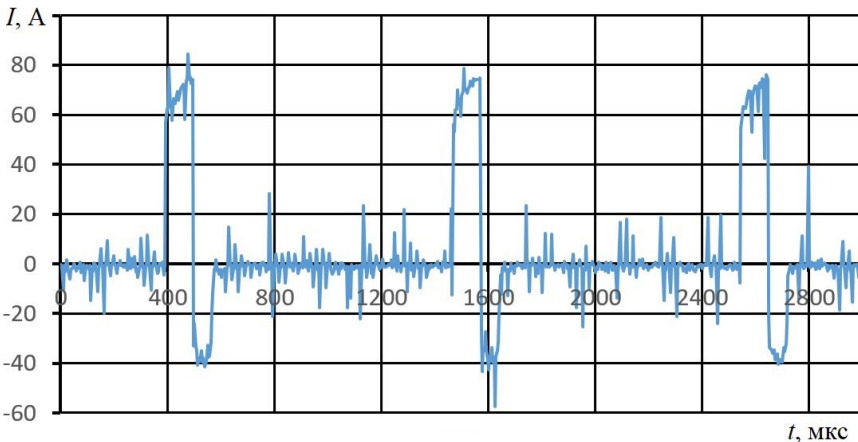


Рис. 4. Форма импульсов тока через образец, измеренная на дополнительном шунте.

Длительность и период повторения импульсов определяются открытием и закрытием силового ключа, соединяющего емкостной накопитель и нагрузку. Импульс заданной длительности генерируется ждущим мультивибратором, запускаемым короткими импульсами от блокинг-генератора.

Осциллограмма импульса тока во время проведения испытаний приведена на рис. 4.

Эксперименты проводились с титановыми сплавами ВТ6 и Grade 4. Условия испытаний: плотность тока  $12 \text{ А/мм}^2$ , длительность импульса 100 мкс, скважность 100, температура образца  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ , нагрузка на индентор 60 Н, время испытаний 30 мин, частота механических колебаний индентора 12 кГц, амплитуда колебаний 60 мкм. Результаты представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты испытаний титановых сплавов

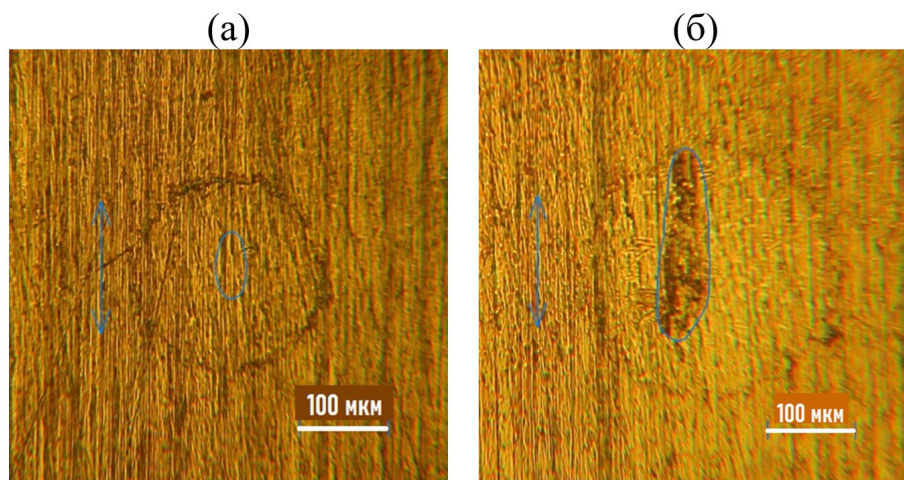
Материал	Твердость НВ, МПа	Режим	Износ, мкм
Grade 4	313	с током	$200 \times 120 \times 2.5$
		без тока	$130 \times 60 \times 1.5$
ВТ6	386	с током	$170 \times 80 \times 3$
		без тока	$150 \times 60 \times 2$

После проведения испытаний определяют степень износа образца через площадь пятен износа на плоском образце, диаметр которых измеряется при помощи инструментального микроскопа. Площадь поверхности износа вычисляется по фотографии, сделанной через микроскоп. Масштаб снимка уточняется по ранее измеренным диаметрам. Глубина пятен износа измерялась при помощи микроинтерферометра МИИ-4 по глубине фокусировки. Примеры пятен износа при испытаниях с током и без тока приведены на рис. 5.

**Вывод.** По результатам испытаний можно заключить, что воздействие импульсного тока приводит к значительному увеличению износа при фреттинге.

**Финансирование.** Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ИМАШ РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



**Рис. 5.** Пятна износа на сплаве Grade 4: (а) — без тока; (б) — с током.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Уотерхауз Р. Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 276 с.
2. Спицын В. И., Троицкий О. А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 160 с.
3. Stolyarov V. V. The electroplastic effect in coarse-grained and ultrafine-grained titanium // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. 2023. V. 89 (8). P. 62.
4. Пахомов М. А., Михеев А. В., Тананов М. А. Методические особенности испытаний УМЗ титана в условиях фреттинг износа // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Научные труды VII Международной научной конференции, М. ИМАШ РАН, 2021. С. 187.