

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. В. Богданович
С. С. Щербаков
Д. Е. Мармыш

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением
по естественнонаучному образованию
в качестве учебно-методического пособия
для магистрантов учреждений высшего образования,
обучающихся по специальности 1-31 80 04 «Механика»*

МИНСК
БГУ
2017

УДК 620.17(075.8)

ББК 22.2я73-1

Б73

Рецензенты:

доктор физико-математических наук *А. В. Чигарев*;

кандидат технических наук *О. М. Еловой*

Богданович, А. В.

Б73 Лабораторный практикум по экспериментальной механике : учеб.-метод. пособие / А. В. Богданович, С. С. Щербаков, Д. Е. Мармыш. – Минск : БГУ, 2017. – 107 с.

ISBN 978-985-566-421-6.

Кратко изложены основные сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ по экспериментальной механике, даны контрольные вопросы, а также библиографический список для эффективного усвоения изучаемого материала.

Для магистрантов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1-31 80 04 «Механика».

УДК 620.17(075.8)

ББК 22.2я73-1

ISBN 978-985-566-421-6

© А. В. Богданович,
С. С. Щербаков,
Д. Е. Мармыш, 2017
© БГУ, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

К настоящему времени для преподавания дисциплин теоретического курса магистрантам, обучающимся по специальности 1-31 80 04 «Механика», разработано соответствующее учебно-методическое обеспечение. При этом для приобретения практических навыков будущими специалистами необходимы руководства по выполнению лабораторных работ, отражающие современные подходы к экспериментальным исследованиям на наукоемком оборудовании.

Цель учебно-методического пособия – кратко и доступно изложить сведения, требуемые для выполнения полного курса лабораторных работ по экспериментальной механике. В нем описан порядок выполнения лабораторных работ, приведены контрольные вопросы и библиографический список для эффективного усвоения изучаемого материала и защиты работ. В необходимых случаях рассмотрены примеры требуемых расчетов.

Издание содержит девять лабораторных работ, в которых излагается методика экспериментального (в том числе ускоренного) определения характеристик сопротивления разрушению при механической усталости, трении скольжения и качения, а также в условиях комплексного износоусталостного повреждения. При выполнении заданий магистранту предлагается не только спланировать соответствующий эксперимент, но и произвести анализ его результатов, построить соответствующие графики и диаграммы.

МАШИНЫ ДЛЯ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ: УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Цель работы. Изучить технические характеристики, конструктивные особенности и принцип работы машин серии СИ для износоусталостных испытаний.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [3; 5; 6, с. 4–13; 8, с. 32–38; 9, с. 28–36; 10, с. 25–34; 11: Т. 1, с. 227–238; Т. 2, с. 153; 14, с. 1–74].

1.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1.1.1. Методы износоусталостных испытаний

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияний процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения разработаны специальные методы износоусталостных испытаний.

В лабораторных условиях сопротивление износоусталостным повреждениям (ИУП) изучают, как правило, при испытании малоразмерных моделей силовых систем, которые проводят на специальных машинах для износоусталостных испытаний. В результате определяют количественные характеристики сопротивления ИУП. Эти характеристики могут быть использованы:

- при выборе конструкционных материалов для силовых систем и обосновании конструктивно-технологических решений;
- контроле качества материалов;
- расчетах на этапе проектирования силовых систем;

- сертификации силовых систем по критерию ИУП;
- конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления ИУП.

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание. Принцип такого формирования, в том случае, когда базовым методом испытания на усталость принимают изгиб с вращением, в качестве примера показан на рис. 1.1. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы, представленные на рис. 1.1, являются практически важными.

Используя подобный подход, достигают той цели, что на машинах, предназначенных для износоусталостных испытаний, можно проводить и обычные испытания либо на механическую усталость, либо на трение и изнашивание в определенных условиях.

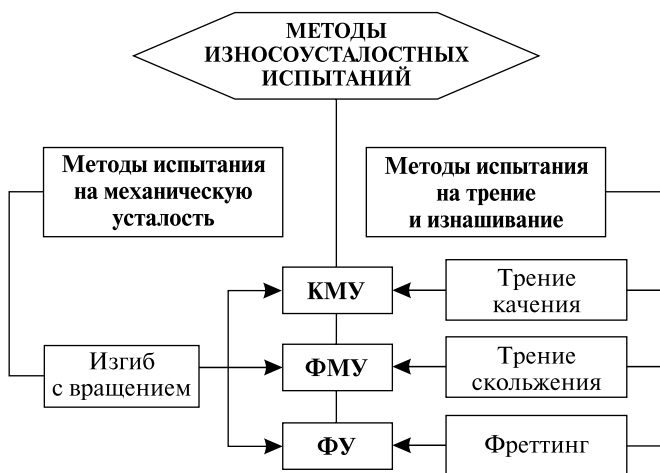


Рис. 1.1. Формирование методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении: КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость

Испытания на фрикционно-механическую усталость (рис. 1.2, д). Цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вер-

тикальная изгибающая (внеконтактная) нагрузка Q (вверх или вниз). К его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N невращающийся контрообразец 3, например пластина или частичный вкладыш. Таким образом, в рабочей зоне образца одновременно возникают максимальные контактные и изгибные напряжения.

Нетрудно видеть, что при реализации схемы испытаний, согласно рис. 1.2, *д*, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фрикционно-механическую усталость (рис. 1.2, *д*) с варьированием величин F_N , Q и ω ;
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рис. 1.2, *в*) с варьированием величин Q и ω . В этом случае контрообразец 3 снимают, так что $F_N = 0$;
- испытания на трение и изнашивание при скольжении (рис. 1.2, *з*) с варьированием величин F_N и ω . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 в целях экономии материала делают укороченным.

Итак, если, согласно рис. 1.1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение скольжения, то получим схему испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, *д*).

При испытаниях на механическую усталость (см. рис. 1.2, *в*) изгибающая нагрузка Q может быть постоянной (неизменной во времени t), но действующие нормальные напряжения в каждой точке рабочего сечения образца 1 изменяются по симметричному циклу (рис. 1.3) с периодом T вследствие вращения образца. Если наибольший изгибающий момент в рабочем сечении образца $M = Ql$, где l – расстояние от опасного сечения до линии действия нагрузки Q , то наибольшие нормальные напряжения в том же сечении определяют по формуле

$$\sigma = M/W, \quad (1.1)$$

где W – момент сопротивления.

Для симметричного цикла нагружения максимальные (σ_{\max}), минимальные (σ_{\min}) и амплитудные (σ_a) значения напряжения оказываются численно равными; в дальнейшем в таких случаях будем говорить просто о циклических напряжениях σ .

При испытаниях на трение при скольжении (см. рис. 1.2, *з*) контактная нагрузка F_N аналогично может быть статической, т. е. постоянной во времени, но действующие контактные напряжения тоже являются циклическими. В связи с этим испытания на трение при скольжении, согласно схеме, показанной на рис. 1.2, *з*, – это, по существу,

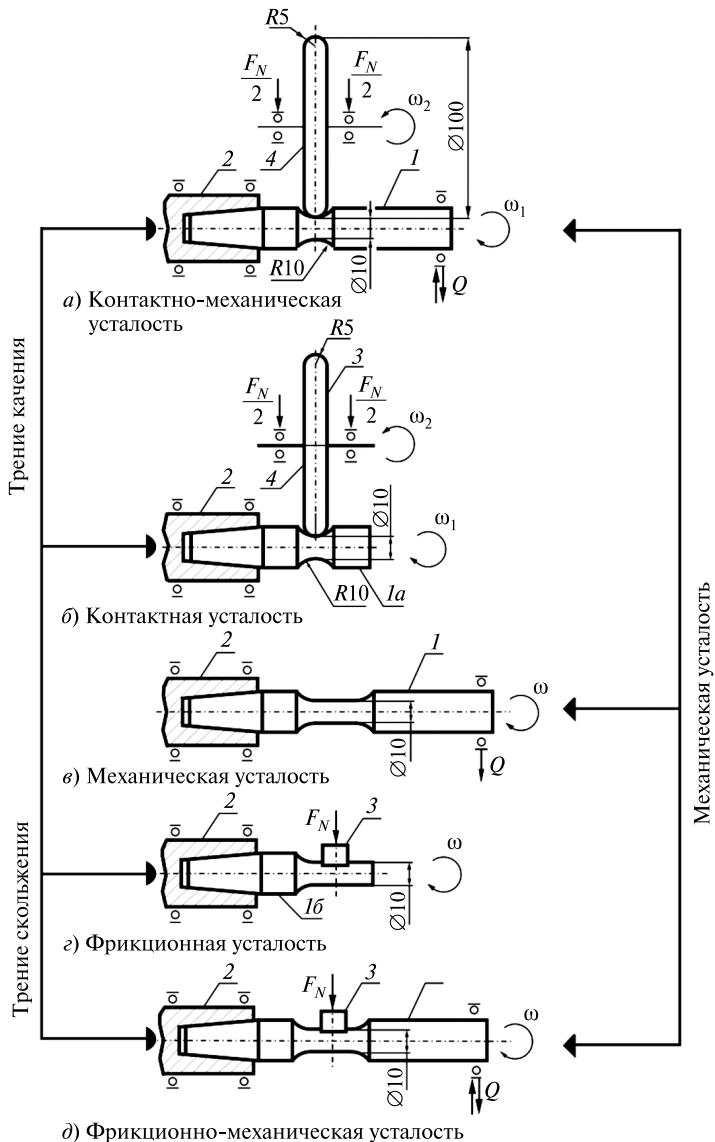


Рис. 1.2. Типичные схемы износусталостных испытаний:
 1, 1а, 1б – образец; 2 – шпindel испытательной машины;
 3, 4 – контробразец; Q – изгибающая нагрузка; F_N – контактная нагрузка; ω_1, ω_2 – скорость вращения образца, контробразца

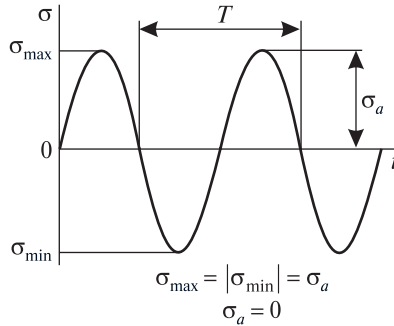


Рис. 1.3. Симметричный цикл напряжений при испытаниях на механическую усталость

испытания на фрикционную усталость (в условиях асимметричного растяжения-сжатия).

Условия, при которых реализуется фрикционная усталость, интегрально могут быть описаны либо контактной нагрузкой F_N , либо средним (номинальным) контактным давлением

$$p_a = F_N / A_a, \quad (1.2)$$

либо удельной силой трения при скольжении, которую называют также фрикционным напряжением:

$$\tau_{ws} = f_S p_a = F_S / A_a = f_S F_N / A_a. \quad (1.3)$$

Возвращаясь теперь к испытаниям на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, д), видим, что силовые условия взаимодействия образца и контробразца могут быть охарактеризованы двумя параметрами: величинами циклического напряжения (1.1) от внеконтактной (изгибающей) нагрузки Q и фрикционного напряжения (1.3) (либо среднего давления (1.2)) от контактной нагрузки F_N .

Испытания на контактно-механическую усталость (рис. 1.2, а). Эта схема отличается от схемы испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, д) тем, что неподвижно закрепленный контробразец заменен на вращающийся ролик 4. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 и в различных направлениях. При реализации схемы испытаний (рис. 1.2, а) можно проводить:

- износоусталостные испытания на контактно-механическую усталость (рис. 1.2, а) с варьированием величин F_N , Q , ω_1 и ω_2 ;

- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рис. 1.2, *в*) с варьированием величин Q и ω . В этом случае ролик снимают, так что $F_N = 0$ и $\omega_2 = 0$;

- испытания на трение качения или трение качения с проскальзыванием (рис. 1.2, *б*) с варьированием величин F_N , ω_1 и ω_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец *Ia* в целях экономии материала делают укороченным.

Итак, если, согласно рис. 1.1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение при качении, то получим схему испытаний на контактно-механическую усталость (см. рис. 1.2, *а*).

Условия, при которых реализуется трение качения (см. рис. 1.2, *а, б*), интегрально могут быть описаны либо контактной нагрузкой F_N , либо наибольшим давлением в центре контактной площадки, которое определяют по формуле Герца (для случая упругого деформирования)

$$p_0 = n_p F_N / A_p, \quad (1.4)$$

либо удельной силой трения при качении, которую называют также фрикционным напряжением (1.3). Здесь A_p — площадь контакта ($A_p = a^2$ для круговой площадки контакта с радиусом a ; $A_p = lb$ для контакта по полоске с размерами $l \times b$; $A_p = ab$ для эллиптической площадки контакта с размерами $a \times b$; n_p — коэффициент ($n_p = 0,478$ для круговой и эллиптической площадок контакта и $n_p = 0,637$ для контакта на полоске).

При испытаниях на трение качения (см. рис. 1.2, *б*) контактная нагрузка F_N , как и при трении скольжения, может быть статической, т. е. постоянной во времени, но действующие контактные напряжения (например, $p_0 = \sigma_{z\max}$) тоже являются циклическими (рис. 1.4). Следова-

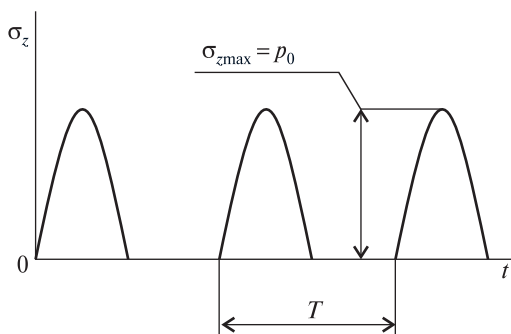


Рис. 1.4. Цикл напряжений при испытаниях на контактную усталость

тельно, испытания на трение при качении, согласно схеме, показанной на рис. 1.2, б, — это, по существу, испытания на *контактную усталость* поверхностного слоя материала.

Возвращаясь к испытаниям на контактно-механическую усталость (см. рис. 1.2, а), видим, что силовые условия взаимодействия образца и контрообразца могут быть интегрально охарактеризованы двумя параметрами: величинами циклического напряжения (I) от внеконтактной (изгибающей) нагрузки Q и фрикционного напряжения (3) (либо наибольшего давления (4) в центре контактной площадки) от контактной нагрузки F_N .

Испытания на фреттинг-усталость (рис. 1.5, а). В отличие от схем испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, д) и контактно-механическую усталость (см. рис. 1.2, а), в этом случае (см. рис. 1.5, а) к рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца I , изгибаемого нагрузкой Q , прижимают контактной нагрузкой F_N два контрообразца 3 , называемые мостиками фреттинга. Последним можно либо сообщать окружное (со скоростью v_1) или осевое (со скоростью v_2)

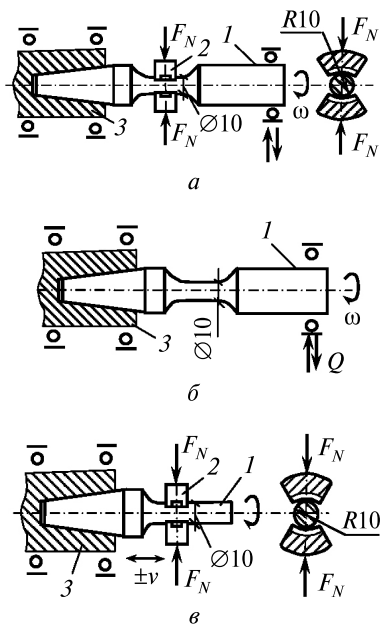


Рис. 1.5. Схемы испытаний на фреттинг-усталость (а), механическую усталость (б) и фреттинг (в)

колебательное движение малой амплитуды, либо возбуждать оба движения одновременно. При реализации схемы испытаний, согласно рис. 1.5, *а*, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фреттинг-усталость (см. рис. 1.5, *а*) с варьированием величин F_N , Q , ω , v_1 и v_2 ;

- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рис. 1.5, *б*) с варьированием величин Q и ω . В этом случае мостики фреттинга не монтируются, так что $F_N = 0$, $v_1 = v_2 = 0$;

- испытания на фреттинг при осевом и/или окружном проскальзывании (см. рис. 1.5, *в*) с варьированием величин F_N , v_1 и v_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец *1* в целях экономии материала делают укороченным.

Условия силового взаимодействия образца и контробразца при фреттинг-усталости интегрально могут быть охарактеризованы циклическими напряжениями (1.1), номинальным контактным давлением

$$q = F_N/A_a$$

или фрикционными напряжениями

$$\tau_{wq} = f_q p_a = F_q/A_a = f_q F_N/A_a, \quad (1.5)$$

где F_q и f_q – сила и коэффициент трения при фреттинге.

Основные характеристики сопротивления ИУП определяют в результате износоусталостных испытаний соответствующих объектов.

Если испытания проводят на механическую усталость, то объектом испытания является элемент конструкции, например цилиндрический образец определенной геометрии (см. рис. 1.2, *в*). Если испытания производят на трение при скольжении либо качении, то объектом испытания является *пара трения* (см. рис. 1.2, *б*, *г*), состоящая из образца *1* и контробразца *3* или *4*; их называют также телом и контртелом. Заметим, что здесь образцом (телом) всегда называется цилиндрический элемент конструкции, а контробразцом (контртелом) – частичный вкладыш либо ролик. Разумеется, последние названия можно было бы поменять на обратные (что и можно найти в литературе). Наконец, если проводят износоусталостные испытания, то объектом испытания служат силовые системы, состоящие из двух элементов *1* и *3* или *4* (см. рис. 1.2, *а*, *д*).

По результатам испытаний строят соответствующую кривую усталости, по которой и устанавливают основные количественные характеристики сопротивления разрушению.

Экспериментально полученные четыре кривые усталости, а именно: кривая механической усталости $N(\sigma_a)$, построенная по результатам

испытаний образцов углеродистой стали 45 (после нормализации), кривая контактной усталости $N(p_0)$, построенная по результатам испытаний на трение качения пары «образец из углеродистой стали 45 – ролик из стали 25ХГТ (после улучшения)», а также две кривые контактно-механической усталости, построенные по результатам износоусталостных испытаний силовой системы «сталь 45 – сталь 25ХГТ», показаны на рис. 1.6.

При испытаниях на механическую усталость критерием предельного состояния принято разделение образца на части, при испытаниях на контактную усталость – критическая плотность ямок выкрашивания на поверхности катания. При испытаниях на контактно-механическую усталость наступление предельного состояния определяется критериями повреждения и разрушения, характерными для испытаний на механическую и контактную усталость.

Во всех четырех случаях установлены пределы выносливости (σ_{-1} , p_f , σ_{-1p} , $p_{f\sigma}$), параметры наклона левой ветви кривых усталости (m_σ , m_p , $m_{\sigma p}$, $m_{p\sigma}$), а также абсциссы точек перелома кривых усталости ($N_{G\sigma}$, N_{Gp} , $N_{G\sigma p}$, $N_{Gp\sigma}$). Заметим: если пределы выносливости при механической (σ_{-1}) и контактной (p_f) усталости являются однозначными и единственными характеристиками соответствующих объектов испытания, то пределы выносливости при контактно-механической усталости (σ_{-1p} , $p_{f\sigma}$) таковыми не являются. Подобных кривых усталости можно построить как угодно много – столько, сколько значений параметров $p_0 = \text{const}$ или $\sigma_a = \text{const}$ задают при износоусталостных испытаниях, когда изучают закономерности прямого и обратного эффектов.

Влияние процессов трения и изнашивания на изменение характеристик сопротивления механической усталости можно охарактеризовать коэффициентом прямого эффекта

$$K_D = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1}. \quad (1.6)$$

По существу, коэффициент K_D является прочностной характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на рис. 1.6, получим $K_D = 256/165 = 1,62$.

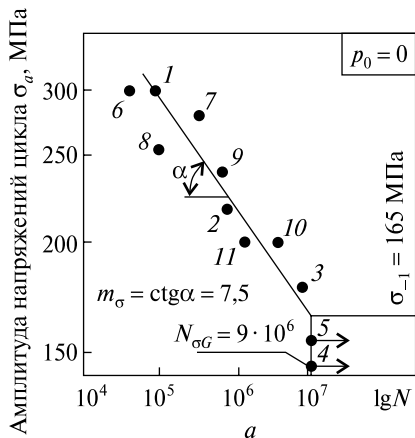
Влияние процессов механической усталости на изменение характеристик трения и изнашивания можно описать коэффициентом обратного эффекта

$$K_B = p_{f\sigma} / p_f. \quad (1.7)$$

По существу, коэффициент K_B является трибологической характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на рис. 1.6, получим $K_B = 2200/1760 = 1,25$.

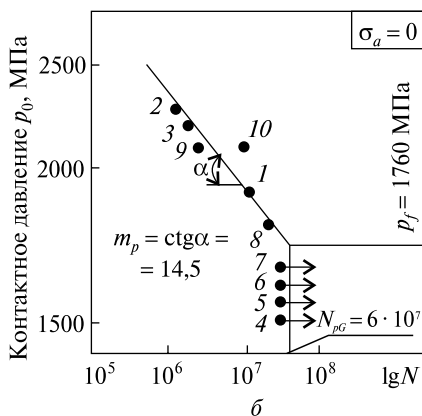
Образец стали 45

Кривая механической усталости $N(\sigma_a)$



Пара трения «сталь 45 – сталь 25ХГТ»

Кривая контактной усталости $N(p_0)$

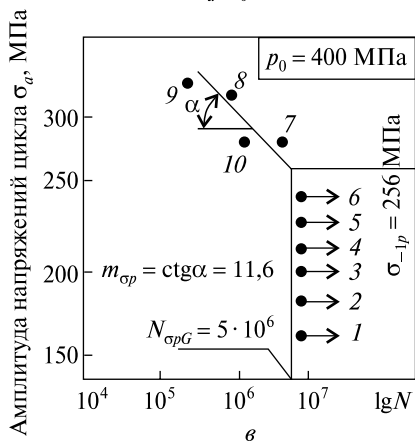


Силовая система «сталь 45 – сталь 25ХГТ»

Кривые контактно-механической усталости

Прямой эффект

$N(\sigma_a, p_0 - \text{const})$



Обратный эффект

$N(p_0, \sigma_a - \text{const})$

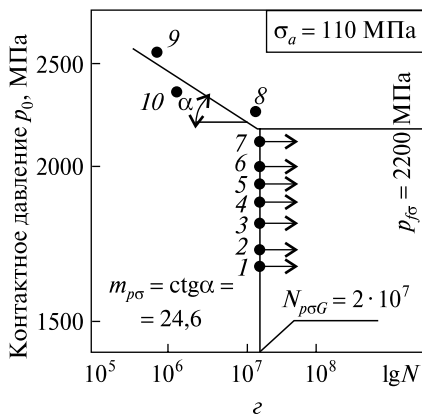


Рис. 1.6. К определению основных характеристик износусталостного повреждения (номер точки указывает последовательность испытаний)

Система обозначений и численные значения всех параметров, устанавливаемых по кривым усталости, представленным на рис. 1.6, даны в табл. 1.1. Изучая эти экспериментальные результаты, можно сделать следующие основные выводы:

а) при контактно-механической усталости предельные напряжения существенно больше, чем при механической и контактной усталости ($K_D > 1$, $K_B > 1$);

б) показатель наклона увеличивается, если переходят от кривой механической усталости к соответствующей кривой контактно-механической усталости ($m_{\sigma p} > m_{\sigma}$); от кривой контактной усталости к соответствующей кривой контактно-механической усталости ($m_{p\sigma} > m_p$).

Таблица 1.1

Система обозначений и численные значения основных характеристик

| Характеристики свойств | Кривая механической усталости | Кривая контактной усталости | Кривые контактно-механической усталости | |
|--|-------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------------|
| | $N(\sigma_a)$ | $N(p_0)$ | $N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$ | $N(p_0, \sigma_a = \text{const})$ |
| Предел выносливости, МПа | $\sigma_{-1} = 165$ | $p_f = 1760$ | $\sigma_{-1p} = 256$ | $p_{f\sigma} = 2200$ |
| Абсцисса точки перелома кривой усталости, цикл | $N_{G\sigma} = 9 \cdot 10^6$ | $N_{Gp} = 26 \cdot 10^7$ | $N_{G\sigma p} = 5 \cdot 10^6$ | $N_{Gp\sigma} = 2 \cdot 10^7$ |
| Показатель наклона кривой усталости | $m_{\sigma} = 7,5$ | $m_p = 14,5$ | $m_{\sigma p} = 11,6$ | $m_{p\sigma} = 24,6$ |

Иными словами, в условиях данного опыта сопротивление ИУП оказалось выше, чем сопротивление механической либо контактной усталости.

ИУП обусловлены тремя группами факторов.

1. Группа основных факторов, относящихся к условиям процесса повторно-переменного нагружения: 1) вид напряженного состояния (однородное, неоднородное, линейное, плоское, объемное); 2) уровень (величина) напряжений; 3) характер цикла напряжений (симметричный, пульсирующий и т. д.); 4) частота нагружения и др.

2. Группа основных факторов, относящихся к условиям трения: 1) вид процесса трения (скольжение, качение, качение с проскальзыва-

нием, проскальзывание); 2) уровень контактной нагрузки; 3) амплитуда проскальзывания (при фреттинге), степень проскальзывания (при трении качения); 4) скорость трения (при качении, скольжении), частота (при фреттинге) и др.

3. Группа основных факторов, относящихся к условиям контактного взаимодействия элементов системы: 1) материалы тела и контртела, их состав и состояние; 2) конструктивные особенности системы и, в частности, характер распределения контактного давления (контактная площадка в виде полоски, круга, эллипса) и др.; 3) технологические особенности изготовления элементов системы и, в частности, строение поверхностей контакта (шероховатость, волнистость и др.); 4) условия и состав смазки; 5) окружающая среда; 6) температура в зоне контакта; 7) время (число циклов) контактного взаимодействия (нагружения) и др.

Задача исследования характера и закономерностей ИУП с учетом влияния такого большого числа факторов представляется весьма сложной и должна выполняться с использованием теории планирования эксперимента. Однако анализ несколько упрощается, если методика испытаний предусматривает изучение прямого и обратного эффектов.

Изучить *прямой эффект* экспериментально можно двумя методами [11].

Метод комплексных испытаний. Заключается в том, что процессы трения, изнашивания и (механической) усталости реализуются одновременно, в совокупности, в течение всего времени испытаний. При этом изучают влияние условий процесса трения на изменение характеристик сопротивления усталости одного из элементов системы (предел выносливости, усталостная долговечность и др.).

Метод последовательных испытаний. Состоит из двух этапов, поэтому его можно назвать двухэтапным. На первом этапе производят испытания на трение и изнашивание (факторы 2) при заданных условиях контактного взаимодействия элементов узла трения в течение установленного времени (факторы 3). На втором этапе один из элементов узла трения подвергают усталостным испытаниям (факторы 1), определяя его характеристики сопротивления усталости.

Так изучают влияние предварительного повреждения при трении на сопротивление усталости одного из элементов системы.

Изучить *обратный эффект* экспериментально можно тоже двумя методами.

Метод комплексных испытаний. Его суть в том, что процессы трения, изнашивания и (механической) усталости реализуются одновременно, в совокупности, в течение всего времени испытания. При этом изучают

влияние условий повторно-переменного нагружения одного из элементов системы (факторы 1) на изменение характеристик трения и изнашивания как узла, так и обоих его элементов (коэффициент трения, интенсивность изнашивания элементов, их долговечность по износу и т. д.).

Метод последовательных (двухэтапных) испытаний. На первом этапе производят испытания на (механическую) усталость одного из элементов системы в заданных условиях (факторы 1) в течение установленного числа циклов нагружения (без усталостного разрушения), на втором этапе производят испытания узла на трение в заданных условиях контактного взаимодействия (факторы 2 и 3), определяя характеристики сопротивления трению и изнашиванию как отдельных элементов, так и узла в целом (интенсивность изнашивания элементов, коэффициент трения и др.). Так изучают влияние предварительного усталостного повреждения одного из элементов системы на износостойкость узла трения.

1.1.2. Машины для износоусталостных испытаний

На базе ряда изобретений созданы и по заказам потребителей изготавливаются (НПО «ТРИБОФАТИКА», Беларусь) следующие машины для износоусталостных испытаний:

- машина СИ-01 (испытания на фрикционно-механическую усталость);
- машина СИ-02 (испытания на контактно-механическую усталость);
- полнокомплектная машина СИ-03 (испытания на фрикционно-механическую и контактно-механическую усталость).

На всех перечисленных машинах можно также проводить и испытания на фреттинг-усталость.

Основные технические характеристики машин СИ-01, СИ-02, СИ-03 приведены в табл. 1.2, а их общий вид показан на рис. 1.7.

Машины серии СИ изготавливаются в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 30755-2001 «Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования».

Машины серии СИ состоят из следующих модулей (см. рис. 1.7):

- испытательная установка (3), которая содержит узлы и механизмы, необходимые для закрепления и испытания образцов или моделей силовых систем;
- специальные столы (1 и 6);

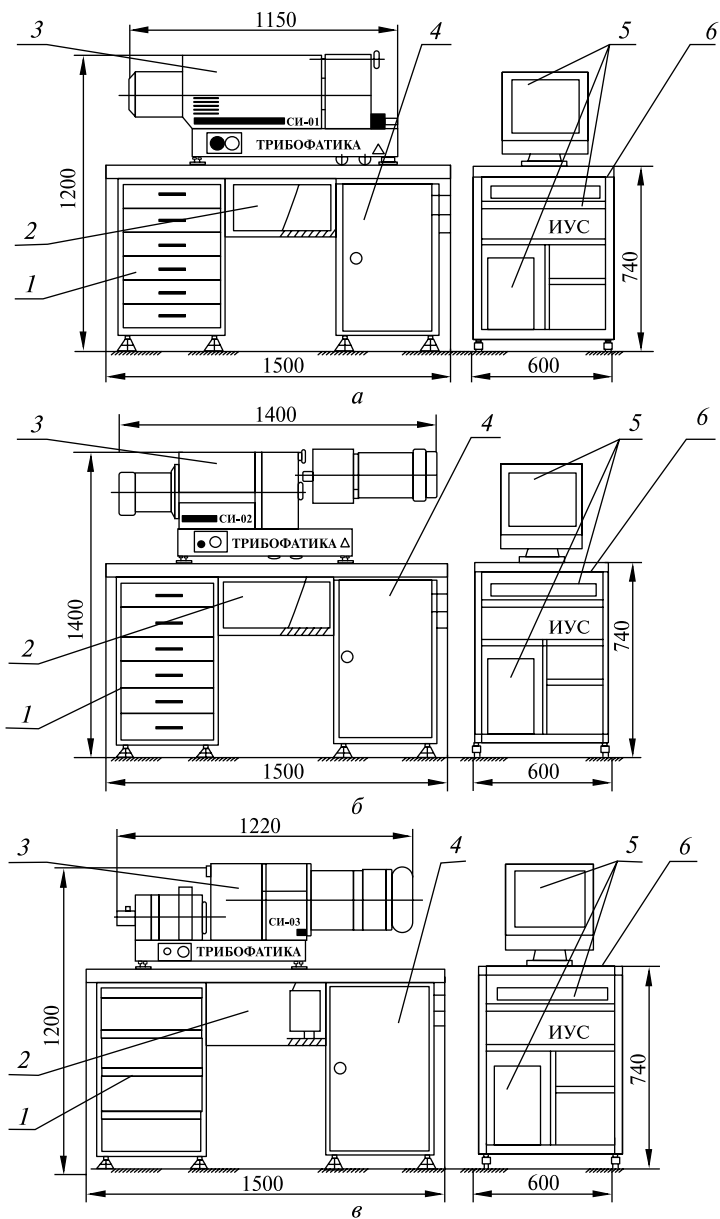


Рис. 1.7. Общий вид модульных машин серии СИ:
а – СИ-01; б – СИ-02; в – СИ-03

- электрошкаф (4), встроенный в тумбу стола и содержащий силовую пускорегулирующую аппаратуру, электронные блоки управления приводами образца, контробразца и нагрузателей;

- блок информационно-управляющей системы (ИУС) (2), включающий в себя первичные датчики оборотов и частот вращения, нагрузок, температуры, вибрации, линейного износа и др., электронный блок, содержащий усилители и АЦП для преобразования сигналов датчиков и аварийных сигналов в цифровые последовательности для передачи в ПЭВМ, ЦАП для управления приводами вращения образца, контробразца и нагрузателей;

- ПЭВМ с принадлежностями (5) и программным обеспечением.

Таблица 1.2

Технические характеристики модульных машин серии СИ

| Наименование показателя | СИ-01 | СИ-02 | СИ-03 |
|--|-------------------|-----------------|------------------------------------|
| | Пара трения | | |
| | Цилиндр – колодка | Цилиндр – ролик | Цилиндр – колодка, цилиндр – ролик |
| Диаметр рабочей части образца, мм | 10 | 10 | 10 |
| Размеры контробразца, мм | 10×10×11,5 | ∅100 | 10×10×11,5 ∅100 |
| Диапазон частот вращения образца, мин ⁻¹ | 40–4000 | 3000 | 600–6000 |
| Диапазон частот вращения контробразца, мин ⁻¹ | – | 50–500 | 50–500 |
| Диапазон изгибающих нагрузок, Н | 70–700 | 70–700 | 10–800 |
| Диапазон контактных нагрузок, Н | 10–500 | 50–1000 | 10–2000 |
| Диапазон измерения суммарного износа образца и контробразца, мкм | 10–3000 | 10–3000 | 10–4000 |
| Диапазон измерения момента трения, Н · м: – при трении скольжения – при трении качения | 0,01–1,2 – | – 0,2–20 | 0,01–1,2 0,2–20 |

Взаимосвязь составных частей испытательной установки машины СИ-03 показана на схеме (рис. 1.8). Электрощпиндель привода образца вращает вал, в котором закреплен испытываемый образец. Электродвигатель привода контробразца через гибкий вал вращает вал, на котором закреплен контробразец-ролик. В этом случае на машине реализуется трение качения. Электродвигатель постоянного тока с помощью тиристорного блока управления по команде ИУС позволяет изменять в широком диапазоне и поддерживать с высокой точностью заданную частоту вращения контробразца, обеспечивая заданную скорость проскальзывания пары трения.

Контробразец прижимается к рабочей поверхности образца с помощью электромеханизма через систему рычагов, создавая заданную контактную нагрузку.

Вместо вращающегося контробразца-ролика на рычаге может быть установлена кассета с неподвижным контробразцом или динамомет-

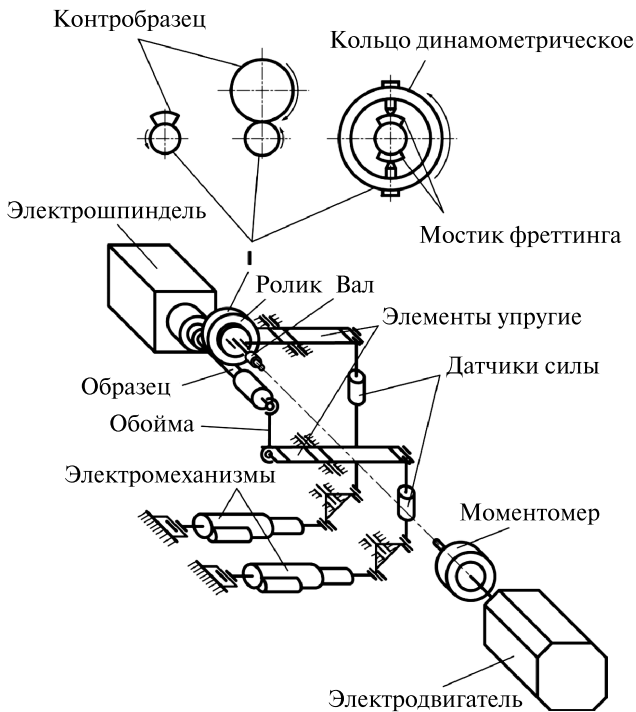


Рис. 1.8. Принципиальная схема испытательной установки машины СИ-03

рическое кольцо с мостиками фреттинга. В этом случае в используемой на машине силовой системе (образец/контробразец) реализуется трение скольжения или фреттинг.

Изгибные напряжения в образце создаются электромеханизмом через систему рычагов и обойму с подшипником, насаженным на хвостовик вращающегося образца.

Расположение площадки трения в зоне растяжения или в зоне сжатия образца обеспечивается изменением направления (соответственно вниз или вверх) изгибающей силы Q , действующей на образец.

Величины контактной и изгибной нагрузок определяются с помощью датчиков силы. Частота вращения контробразца измеряется с помощью оптоэлектрического датчика. Линейный износ либо сближение осей пары трения измеряется с помощью индуктивного датчика, параметры вибрации — виброакселерометром, установленным на рычаге в зоне крепления контробразца (на схеме не показаны). Момент трения измеряется с помощью моментомера, смонтированного на валу электродвигателя.

Отличие машины СИ-01 для испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.7) от машины СИ-03 состоит в том, что испытуемый образец приводится во вращение двигателем постоянного тока с бесступенчатым регулированием частоты (диапазон частот вращения — 40—4000 мин⁻¹). Привод контробразца на этой машине отсутствует, так как в процессе испытаний реализуется только трение скольжения. Отличие машины СИ-02 для испытаний на контактно-механическую усталость от машины СИ-03 состоит в том, что испытуемый образец приводится во вращение асинхронным электродвигателем переменного тока с номинальной частотой вращения 3000 мин⁻¹. Широкий диапазон скоростей проскальзывания обеспечивается за счет изменения частоты вращения привода контробразца-ролика. Привод контробразца на этой машине аналогичен приводу контробразца на машине СИ-03.

1.1.3. Испытательный центр SZ-01

Центр SZ-01 (в дальнейшем — центр) относится к новому классу испытательного оборудования, предложенного в трибофатике — науке о надежности силовых систем машин по комплексным критериям износоусталостного повреждения.

Центр разработан как полнокомплектный, т. е. предназначен и для реализации других известных, в том числе и стандартных, методов из-

носоусталостных испытаний – на механическую, контактную, контактно-механическую, фрикционную и фрикционно-механическую усталость, фреттинг-усталость. В результате таких испытаний экспериментально получают характеристики сопротивления износоусталостному повреждению и разрушению, которые используют в соответствующих расчетных процедурах.

Центр предназначен для работы в производственных помещениях, заводских лабораториях и испытательных центрах научно-исследовательских институтов, предприятий и учреждений образования при температуре 15–35 °С и относительной влажности воздуха (65±15) %.

Основные технические характеристики центра приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Технические характеристики, пределы и точность измерения параметров

| № п/п | Наименование параметра | Значение параметра |
|-------|---|---|
| 1 | Основные пары трения | Цилиндр – ролик, цилиндр – колодка |
| 2 | Диаметр рабочей части образца (вала), мм | 10 |
| 3 | Размеры частичного вкладыша, мм | 10×10×10 |
| 4 | Габаритные размеры контрообразца ролика (диаметр), мм | 100 |
| 5 | Привод вращательного движения образца | Асинхронный электродвигатель с управляемым преобразователем частоты |
| 6 | Диапазон задания частоты вращения образца, мин ⁻¹ | 300–4000 |
| 7 | Привод вращательного движения контрообразца (ролика) | Асинхронный электродвигатель с управляемым преобразователем частоты |
| 8 | Диапазон задания частоты вращения контрообразца, мин ⁻¹ | 40–600 |
| 9 | Допускаемая погрешность поддержания частоты вращения образца (контрообразца) в установившемся режиме, % | ±2 |

Продолжение табл. 1.3

| № п/п | Наименование параметра | Значение параметра |
|-------|--|-------------------------------------|
| 10 | Абсолютная погрешность фиксации наработки (число оборотов вала образца, число циклов нагружения) до момента достижения предельного состояния, оборотов | ± 1 |
| 11 | Диапазон задания коэффициента проскальзывания образца и контробразца, % | 0–80 |
| 12 | Способ задания контактной и изгибающей нагрузок | Программно-регулируемый |
| 13 | Диапазон задания контактных нагрузок, Н | 30–1700 |
| 14 | Диапазон задания изгибающих напряжений, МПа | 30–700 (при изгибе вниз и вверх) |
| 15 | Допускаемая погрешность поддержания контактной и изгибающей нагрузок в установившемся режиме, % | ± 3 |
| 16 | Диапазон задания контактных нагрузок при фреттинг-усталости, Н | 50–500 |
| 17 | Допускаемая погрешность поддержания контактной нагрузки при фреттинг-усталости в установившемся режиме, % | ± 5 |
| 18 | Диапазон измерения момента трения, Н · м – при трении качения – при трении скольжении | 0,2–10 0,2–10 |
| 19 | Допускаемая погрешность измерения момента трения в установившемся режиме, % | ± 1 |
| 20 | Диапазон измерения сближения осей образца и контробразца, мкм | 10–2000 |
| 21 | Допускаемая погрешность измерения сближения осей образца и контробразца, мкм | ± 15 |

| № п/п | Наименование параметра | Значение параметра |
|-------|--|---|
| 22 | Диапазон измерения вибрации уровень, дБ | 50–150 |
| 23 | Количество точек измерения величины сближения осей, контактной и изгибающей нагрузок и крутящего момента за 1 оборот образца | 8 |
| 24 | Установленная мощность электрооборудования, кВт, не более | 3,5 |
| 25 | Информационно-управляющая система сбора и обработки данных | Автономная на базе ПЭВМ |
| 26 | Число каналов управления (включая резервные) | 8 |
| 27 | Число измерительных каналов (включая резервные) | До 16 |
| 28 | Экранный интерфейс пользователя | Диалоговый графический с возможностью вывода изображения на мультимедийный проектор |

Пр и м е ч а н и е. Пределы допускаемых погрешностей систем измерения параметров указаны при статической градуировке шкал.

Центр содержит следующие основные части (рис. 1.9):

- испытательный центр (1);
- стол специальный (2);
- информационно-управляющую систему (3);
- электросиловую систему (4);
- ПЭВМ (5) с программным обеспечением, размещаемую на отдельном столе (6);
- стол для текущей документации (7) со стульями (8);
- шкаф инструментальный (9);
- соединительные устройства и кабели (на рис. 1.9 не показаны).

Основной частью центра является установка испытательная (1) (см. рис. 1.9), на которой расположены узлы и механизмы, необходимые для крепления и испытания образцов. Управление испытательной установкой осуществляется от ПЭВМ с помощью программного обеспечения.



Рис. 1.9. Общий вид испытательного центра SZ-01:
 1 – установка испытательная; 2 – стол специальный;
 3 – информационно-управляющая система; 4 – электросиловая система; 5 – персональный компьютер;
 6 – стол для ПК; 7 – стол для текущей документации;
 8 – стулья специальные; 9 – шкаф инструментальный

Установка состоит из сварной станины, на которой смонтированы:

- кожух защитный;
- съемные защитные ограждения;
- электрошпиндель привода образца;
- электродвигатель привода контробразца с измерителем момента трения и приводным валом;
- механизм изгибающей нагрузки;
- механизм контактной нагрузки.

Станина устанавливается на стол с помощью регулируемых виброопор.

Взаимосвязь составных частей испытательной установки показана на рис. 1.8.

Электрошпиндель с заданной скоростью вращает закрепленный испытываемый образец. Электродвигатель привода контробразца че-

рез приводной вал вращает вал, на котором закреплен контрообразец-ролик. Электродвигатели привода образца и контрообразца с помощью регулятора частоты тока по команде ИУС позволяют изменять в широком диапазоне и поддерживать с высокой точностью заданную частоту вращения образца и контрообразца, обеспечивая заданную скорость проскальзывания пары трения.

Контрообразец прижимается к рабочей поверхности образца с помощью электромеханизма через систему рычагов и плоскую пружину, создавая заданную контактную нагрузку. Изгибающие напряжения в образце создаются другим электромеханизмом через рычаги, плоскую пружину и обойму с подшипником, установленным на хвостовик вращающегося образца. Расположение площадки трения в зоне растяжения или в зоне сжатия образца обеспечивается изменением направления изгибающей силы, действующей на образец. Величины контактной и изгибающей нагрузок определяются с помощью датчиков силы. Момент трения измеряется с помощью моментомера, смонтированного на валу электродвигателя привода контрообразца. Суммарное количество оборотов образца (наработка), а также частота вращения образца и контрообразца измеряются с помощью датчиков, вмонтированных в корпусы электродвигателей. Суммарный линейный износ пары трения измеряется с помощью индуктивного либо лазерного датчика, параметры вибрации – вибродатчиком (на схеме не показаны).

При испытаниях на фреттинг-усталость и фрикционно-механическую усталость электродвигатель привода контрообразца не используется.

В качестве привода образца на испытательном центре применен специально разработанный высокоточный электрошпиндель. Электрошпиндель представляет собой асинхронный электродвигатель специальной конструкции, вал которого выполнен как шпиндельный и имеет посадочное место для крепления образца. Питается электрошпиндель током регулируемой частоты, что позволяет изменять скорость вращения образца в широком диапазоне. Для контроля частоты вращения на валу электрошпинделя установлен высокоточный оптоэлектронный датчик.

Привод контрообразца состоит из электродвигателя, закрепленного на кронштейне, моментомера и приводного вала. В качестве электродвигателя применен асинхронный электродвигатель специальной конструкции (со встроенным датчиком частоты вращения), питаемый током регулируемой частоты, аналогичный приводу образца.

В качестве моментомера применен датчик крутящего момента T20WN.

Вал привода контрообразца выполнен с двумя шарнирными муфтами, что позволяет проводить испытания при несоосности валов электродвигателя и контрообразца-ролика до 10 мм.

Механизм контактного нагружения в варианте испытаний на контактно-механическую усталость (рис. 1.10) состоит из электромеханизма (1), рычага (6) с контрообразцом, плоской нагружающей пружины (7), стойки с подшипниками, системы рычагов и датчика силы (9).

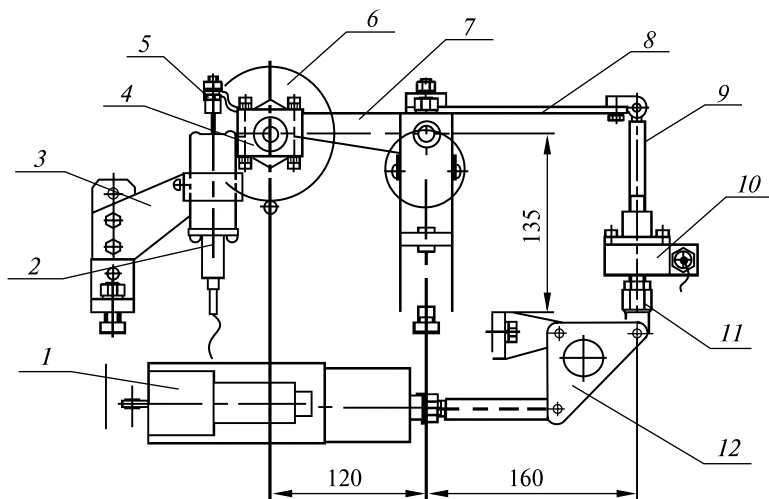


Рис. 1.10. Механизм контактного нагружения испытательного центра SZ-01:

- 1 – электромеханизм МП-100; 2 – датчик износа;
 3 – держатель; 4 – крышка; 5 – упор; 6 – контрообразец-ролик;
 7, 12 – рычаги; 8 – пружина; 9, 11 – тяги; 10 – датчик силы

В качестве датчика силы применен датчик U2B фирмы НВМ. Электромеханизм (1) состоит из электродвигателя, редуктора, шарико-винтовой передачи и линейно перемещающегося штока.

При перемещении штока электромеханизма рычаг (11) поворачивается и через датчик (9) изгибает плоскую пружину (7), которая прижимает рычаг с контрообразцом-роликом к образцу. Величина усилия прижима (контактное усилие) зависит от степени изгиба пружины и измеряется датчиком (9). Для уменьшения потерь на трение рычаг установлен в подшипниках качения. Конструкция механизма позволяет с помощью винта перемещать опорную стойку в продольном направлении в пределах ± 10 мм и тем самым смещать зону контакта на образце.

Как следует из рис. 1.10, ролик закреплен гайкой на валу, который установлен на двух шарикоподшипниках, закрепленных, в свою очередь, непосредственно в рычаге. Для замены ролика с валом служат съемные крышки (4).

Диаметр посадочного отверстия в ролике ($\varnothing 32 H7$) больше нагруженного диаметра подшипника ($D = 26$ мм), поэтому при замене ролика подшипники с вала не снимаются.

Расположение ролика между двух подшипников обуславливает, с одной стороны, уменьшение массы узла для снижения динамических нагрузок на образец, а с другой — уменьшение момента трения в подшипниках за счет их габаритов для повышения чувствительности моментомера. Так, при контактной силе $F_k = 50$ Н момент трения в подшипниках составляет $2 \cdot 10^{-4}$ Н·м, что позволяет измерять очень малые величины момента трения в паре «вал — ролик».

Индуктивный датчик износа (2) (типа WA10) позволяет определить суммарный износ контробразца и образца в пределах 10 ± 2000 мкм. Причем измерения могут производиться от восьми до тридцати двух раз за один оборот образца и в одних и тех же точках.

При испытаниях на фрикционно-механическую усталость контробразец-колодка закреплен на рычаге в «плавающем» положении, чтобы исключить кромочные давления при изгибе образца.

Механизм изгибающей нагрузки аналогичен механизму контактного нагружения, но при этом усилие к образцу можно прикладывать в двух направлениях — вверх или вниз. Это вызвано необходимостью приложения контактных усилий либо в зоне растяжения, либо в зоне сжатия. Изгибающая нагрузка на образец передается через обойму с подшипником, одетым непосредственно на хвостовик образца. Конструкция механизма такова, что при поломке образца обойма как бы «застревает» в рычаге, а не падает вниз. Для автоматического отключения центра при этом установлен бесконтактный индукционный датчик, взаимодействующий с лепестком на рычаге. При нормальной работе лепесток находится в зоне действия датчика (± 3 мм), а при поломке образца выходит из нее и стенд отключается.

Электросиловая часть системы включает в себя:

- схему включения/выключения с возможностью аварийного отключения питания электросиловой части системы;
- частотно-регулируемые приводы (преобразователи частоты) OMRONC1MR-V7AZB2P2;
- сетевые фильтры 3G3MV-PF11020-E;
- блоки управления нагрузками для электромеханизмов МП-100М2;

- источники питания для электромеханизмов на 24 В АИМТЕС – АМЕД-075-24;

- схему включения подачи смазки.

Для включения питания центра необходимо кратковременно нажать кнопку «ПУСК» зеленого цвета, расположенную на боковой стенке шкафа. При этом сработает магнитный пускатель и через свои силовые контакты подаст питающее напряжение на электроприводы образца и контрообразца.

В случае нажатия оператором кнопки «СТОП» (красного цвета) на стенде магнитный пускатель немедленно отключит питающее напряжение от электроприводов образца и контрообразца. Автоматическая защита оборудования электросилового системы от перегрузок и короткого замыкания обеспечивается автоматическим выключателем, рассчитанным на ток до 25 А.

Электросиловая система подключается к однофазной сети переменного тока с нулевым проводом напряжением 220 В.

Принцип работы электроприводов контактной и изгибающей нагрузок.

В качестве механизмов нагрузок в составе испытательного стенда использованы механизмы МП-100 с приводом постоянного тока. Напряжение питания механизмов – 24 В, потребляемый ток – до 2 А. Несмотря на небольшую потребляемую мощность, механизмы этой серии развивают усилие 1700 Н непосредственно на выходном штоке.

Питание электромеханизмов осуществляется от источника питания электросилового системы.

Механизмы оснащены путевыми выключателями, которые позволяют определять крайние положения штока. Кроме того, имеется путевой выключатель, который может быть установлен в любое промежуточное (среднее) положение.

При установке нагрузок управляющий компьютер включает нагрузку и одновременно осуществляет измерение уровня сигнала датчика силы. При достижении заданного значения нагрузки механизм МП-100 выключается.

1.1.4. Информационно-управляющие системы машин для износоусталостных испытаний

Структура. Информационно-управляющие системы (ИУС) модульных машин СИ-01, СИ-02 и СИ-03 созданы на базе ПЭВМ. ИУС построены по следующему принципу: испытательная установка – система управления/измерения – ПЭВМ. Структура ИУС представлена на рис. 1.11.

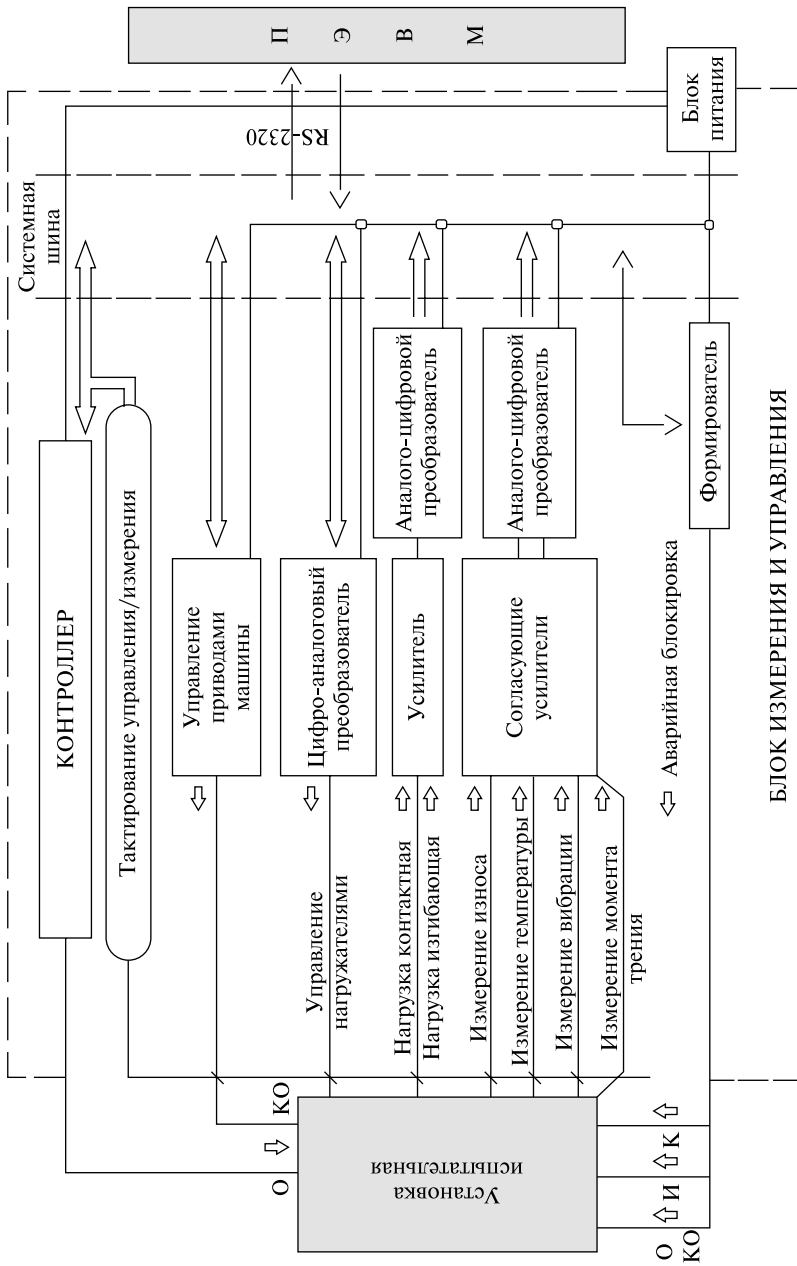


Рис. 1.11. Информационно-управляющая система модульных машин:

О, КО, К, И – соответственно приводы образца, контроллера, контактной и изгибающей нагрузок

Как видно из рис. 1.11, ИУС модульных машин состоит из двух основных частей: управляющей ПЭВМ и блока измерения и управления, связанного с ПЭВМ стандартным кабелем. Необходимые измерительные-преобразовательные устройства выполнены в виде электронных плат и модулей, устанавливаемых непосредственно в блоке измерения и управления.

ИУС имеет четыре канала управления устройствами испытательной машины. Они используются для управления скоростью вращения образца, скоростью вращения контробразца, величиной контактной нагрузки, величиной изгибающей нагрузки.

Количество каналов регистрации аналоговых сигналов — до 16. Эти каналы используются для измерения выходных сигналов: тензодатчиков измерителя контактной нагрузки, тензодатчиков измерителя изгибающей нагрузки, тензодатчиков измерителя момента трения, датчиков температуры (термопар) типа «хромель — капель», тензодатчиков измерителя износа, датчика виброускорения (акселерометра).

Блок измерения и управления включает следующие основные функциональные узлы: контроллер, счетчик оборотов образца, блок формирователей управляющих сигналов, блок аналого-цифрового преобразования сигналов, усилитель тензодатчиков, согласующие усилители, устройство блокировки, блок электропитания.

ИУС предусматривает следующие режимы работы: планирование испытаний, калибровка измерительных каналов, проведение испытаний, просмотр кинетических экспериментальных данных, обработка результатов испытаний. ИУС машины позволяет производить измерения и регистрацию параметров на протяжении всего времени испытаний. Параметры управления с помощью специальной программы поступают из ПЭВМ в контроллер, где происходит их преобразование в управляющие сигналы для исполнительных устройств и производится контроль за правильностью отработки установленного задания исполнительными устройствами (регуляторы частоты вращения образца и контробразца, приводы нагрузжателей). Он же передает в ПЭВМ результаты измерений. На экране ПЭВМ графически отображается процесс испытаний.

Программно-математическое обеспечение (ПМО) процесса испытаний представляет собой диалоговую рабочую программу, обеспечивающую: задание из меню режимов и условий испытаний (алгоритм управления испытаниями); контроль вывода управляющих воздействий (кинетика управления); сбор первичной информации от системы датчиков (алгоритм измерения); вторичную обработку полученных данных в соответствии с вложенными процедурами (алгоритм обра-

ботки результатов); представление конечных результатов (протоколы испытаний, таблицы, графики, кривые предельного состояния и др.).

Организация. Принципы управления параметрами испытаний поясним с помощью электромеханической схемы расположения датчиков и приводов машины СИ-03 (рис. 1.12).

Скорость вращения образца создает электрошпиндель, а скорость вращения контробразца-ролика (при испытаниях на контактную и контактно-механическую усталость) – электродвигатель контробразца. Как электрошпиндель, так и электродвигатель контробразца управляются с помощью специальных преобразователей частоты. Оптоэлектронные датчики, установленные на валах двигателей, измеряют частоту вращения образца и контробразца-ролика соответственно. Выходные сигналы датчиков представляют собой импульсы с изменяющейся частотой, пропорциональной скорости вращения.

Тензодатчики, установленные на нагружающих пружинах (балках равного сопротивления), дают ИУС информацию о текущих значениях контактной и изгибной нагрузок. Также производится сбор информации

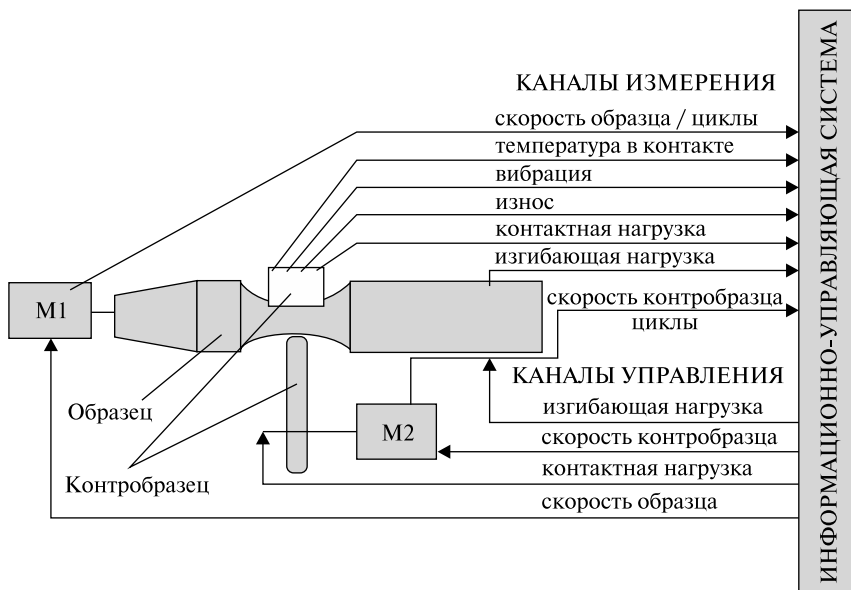


Рис. 1.12. Электромеханическая схема расположения датчиков в машине СИ-03: M1, M2 – приводы образца и контробразца соответственно

о температуре в зоне контакта образца и контробразца, параметрах вибрации испытуемой силовой системы. Измерение момента трения при скольжении (и фрикционно-механической усталости) и качении (и контактно-механической усталости) производится специально разработанными для этого устройствами, принцип действия которых изучается при выполнении лабораторных работ.

Специальный датчик формирует дискретный аварийный сигнал при разрушении образца, по которому ИУС производит немедленную остановку испытаний.

Измерения. Рассмотрим схемы измерения и регистрации двух основных параметров ИУП – износа и смещения осей пары трения (рис. 1.13).

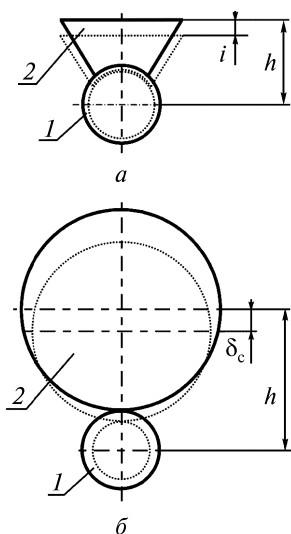


Рис. 1.13. Схемы, поясняющие измерение суммарного износа при трении скольжения (а) и смещение осей при трении качения (б): 1 – образец; 2 – контробразец (сплошными линиями показаны контуры элементов пары трения до испытаний, пунктирными – после или в процессе испытаний)

Износ i – это толщина снятого слоя материала в результате контактного взаимодействия образца и контробразца при трении скольжения и фрикционно-механической усталости. Смещение осей пары трения δ_c – это результат повреждения поверхностей элементов силовой системы при трении качения и контактно-механической усталости. Смещение осей пары трения обусловлено износом, остаточной деформацией и виброперемещениями. Схема формирования этих параметров представлена на рис. 1.13.

Измерение суммарного износа i (рис. 1.13, а, при испытаниях на трение скольжения и фрикционно-механическую усталость) и вели-

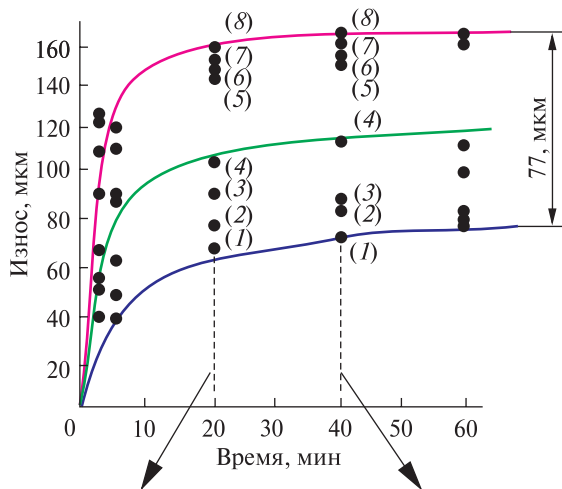
чины смещения осей δ_c пары трения (рис. 1.13, б, при испытаниях на трение качения и контактно-механическую усталость) в машинах серии СИ осуществляется с помощью индуктивного датчика микроперемещений.

Измерение и регистрация износа i (смещения осей δ_c) может производиться двумя способами — *интегральным* и *дискретным*. Интегральный способ предусматривает выполнение измерений величины i (либо δ_c) через любые, достаточно малые промежутки времени. При этом каждое измеренное значение i (либо δ_c) соответствует произвольной точке на периметре опасного сечения образца и/или рабочей поверхности контробразца.

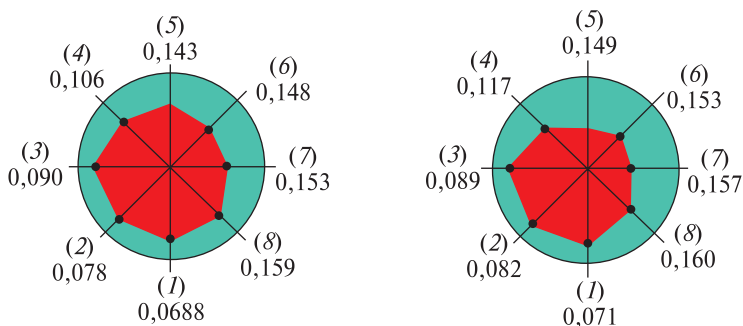
Результаты измерения *дискретного износа* в процессе испытаний силовой системы «сталь 45 — сталь 45» на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, з) представлены на рис. 1.14. Сущность метода состоит в том, что в опасном сечении образца, где возбуждаются наибольшие циклические напряжения и одновременно реализуется процесс трения скольжения, по длине окружности отмечаются восемь точек, в каждой из которых с высокой точностью измеряется локальный износ в течение одного оборота образца при его вращении. Естественно, что такие измерения могут быть проведены в любой момент испытаний (по времени t).

Обработка результатов. Полученные результаты испытаний можно представлять двояко. Первое представление — в виде восьми кинетических кривых изменения износа по времени t (см. рис. 1.14, а). Каждое сечение таких кривых имеет восемь экспериментальных точек, которые в совокупности определяют разброс величины износа в одном сечении образца в данный момент времени. Таким образом, получается сразу восемь реализаций случайного процесса изнашивания. Полоса разброса снизу и сверху ограничена на рис. 1.14 сплошными линиями, изменение среднего значения износа показано пунктиром. По существу, это среднее значение можно отождествить с интегральным износом, который измеряется обычно. Нетрудно увидеть, сколь серьезно отличается локальная картина изнашивания от интегральной в количественном отношении. Ширина полосы разброса достигает 77 мкм при среднем износе порядка 110 мкм. Другими словами, «амплитуда» износа относительно среднего значения составляет в условиях опыта ± 35 мкм (± 30 %).

Другое представление — в виде кругов износа, получаемых в заданные моменты времени (рис. 1.14, б). Эти круги представляют собой соответствующие сечения кинетических процессов локального износа.



a



б

Рис. 1.14. Кинетические кривые (а) и круги износа (б) при износоусталостных испытаниях металл-металлической системы «сталь 45 – сталь 45»

Экспериментальные точки на кругах износа соединяют между собой условными прямыми. Нетрудно увидеть, сколь качественно отличается картина действительного (локально измеряемого) износа в точках сечения образца за один его оборот от интегрального износа. Оказывается, что хотя нагрузки (изгибные и контактные) в течение одного оборота не изменяются, реакция поверхностных слоев металла в различных локальных зонах пути трения существенно различна. Это представляется естественным ввиду того, что физико-механические свойства по-

верхностных слоев металла также существенно неодинаковы (в обоих измерениях). Следовательно, поскольку сопротивление разрушению локальных поверхностных участков образца различно, то и локальный износ на таких участках должен быть разным. Таким образом, анизотропия локальных свойств материала порождает анизотропию дискретного (локального) износа.

Реализация принципа автоматизированного измерения и управления машинами СИ позволяет производить испытания по выбранным схемам в соответствии с заданными режимами нагружения с высокой точностью и достоверностью результатов.

Конструктивно ИУС испытательного центра выполнена в виде отдельного металлического шкафа, обеспечивающего легкий доступ ко всем элементам системы.

Основными компонентами ИУС, определяющими ее ориентацию на пользователя, являются технические средства и программное обеспечение.

ИУС обладает гибкостью с точки зрения расширения возможностей ее использования, поскольку программное обеспечение универсально и открыто.

Входные данные ИУС:

- сведения об испытании;
- сведения об испытателе;
- значения измеряемых параметров.

Выходные данные ИУС:

- управляющие сигналы;
- основные характеристики образца;
- визуализированные в процессе испытаний параметры;
- протоколы испытаний.

ИУС может функционировать под управлением операционных систем WINDOWS XP, WINDOWS VISTA.

Средства, предоставляемые WINDOWS, создают удобное автоматизированное рабочее место с простыми средствами доступа пользователя к прикладным программам.

Основные элементы системы управления:

- приводы образца и контробразца;
- датчики частоты вращения;
- механизмы и датчики контактной и изгибной нагрузок;
- фильтр питания и источник питания;
- система смазки;
- блок управления;

- нормирующие усилители с датчиками или первичными преобразователями;

- персональный компьютер с согласующим устройством.

Для обеспечения возможности проведения испытаний с применением различных смазок в состав испытательного стенда введена система смазки. Она работает по заданной программе в автоматическом режиме. Перед началом испытаний оператор должен задать интервал смазки испытываемого образца и объем одной порции смазки. Управляющее устройство формирует все необходимые управляющие сигналы для работы испытательного стенда.

Основной элемент системы управления – персональный компьютер. Он обеспечивает расчет необходимых параметров испытаний, подготовку данных частотных преобразователей и передачу данных по интерфейсу *RS485* и *USB*. Кроме того, все измерения, проводимые в процессе испытаний, фиксируются в памяти персонального компьютера для дальнейшего анализа.

Напряжение питания ИУС ~ 220 В ± 10 % частотой 50 Гц.

Программное обеспечение состоит из следующих модулей:

- ручное управление;
- тарифовка;
- тестирование;
- испытания;
- визуализация текущих характеристик;
- формирование отчетов.

1.1.5. Инструкция по охране труда для лиц, работающих с испытательным центром SZ-01

Общие требования безопасности

Виды опасности при работе на центре при обслуживании и ремонте:

- воздействие продуктов износа при трении образцов;
- воздействие осколков при разрушении образца;
- поражающее действие электрического тока;
- воздействие подвижных элементов;
- искрение при трении образцов;
- химическое воздействие агрессивной жидкости (при ее использовании в смазочной камере в испытаниях на коррозионно-эрозионную усталость);
- шум.

Источники видов опасности на центре:

- испытываемые образцы;
- токоведущие открытые части электрооборудования;
- открытые подвижные элементы центра;
- агрессивные жидкости (при их использовании в смазочной камере в испытаниях на коррозионно-эрозионную усталость).

Основные требования и необходимые меры для обеспечения безопасности работающих на центре:

- все токоведущие элементы электрооборудования должны быть изолированы от корпуса центра и иметь необходимую (указанную ниже) величину сопротивления изоляции;

- на корпусе испытательной установки, электрошкафа и ПЭВМ должны быть установлены болты заземления и знаки заземления в соответствии с требованиями ГОСТ 21130-75;

- значение сопротивления между заземляющим болтом и каждой доступной прикосновению металлической нетоковедущей частью (массой панели, массой измерительного блока, металлорукавами и т. п.), которая может оказаться под напряжением, не должно превышать 0,1 Ом;

- все открытые токоведущие части электрооборудования должны быть закрыты ограждениями;

- все открытые движущиеся части (соединительные муфты, гибкий вал и т. д.) должны быть закрыты кожухами;

- все монтажные работы, а также смена предохранителей должны проводиться на обесточенном центре.

Запрещается при работе превышать параметры, указанные в технических данных паспорта; запрещается работать на резонансных и околорезонансных режимах, а также с образцами, имеющими бинение более 0,04 мм в рабочей зоне и в зоне крепления обоймы механизма изгибающей нагрузки. При частотах вращения образца более 3000 об/мин запрещается использовать длинные образцы. Кроме того, испытания на повышенных частотах вращения образца следует проводить при пониженных (до 500 Н) контактных нагрузках и пониженном (до 2 Н · м) моменте трения;

- допускается работа только на заземленном центре;

- регулирование и настройка центра, находящегося под напряжением, допускается только в случаях, предусмотренных паспортом; в остальных случаях стенд должен быть обесточен;

- при работе с агрессивными жидкостями следует использовать резиновые перчатки, резиновый фартук и защитные очки;

- при наличии сильного шума в процессе испытаний следует надеть шумопоглощающие наушники и/или ушные вкладыши.

Сопротивление изоляции электрических цепей сетевого питания относительно корпуса и между собой при температуре окружающего воздуха (25 ± 10) °С и относительной влажности не более 80 % должно быть не менее 20 МОм.

Проверку сопротивления, электрической изоляции производить мегомметром М4100/4 на 1000 В ТУ 25-04.2131-78 при отключенном от сети центре и включенном сетевом выключателе.

Периодичность проверки электрического сопротивления, прочности изоляции и переходного сопротивления производить не реже одного раза в год в соответствии с требованиями правил ПТЭ и ПТБ.

При эксплуатации, ремонте и наладочных работах соблюдать правила обслуживания электроустановок.

Требования безопасности перед началом работы

Перед началом работы следует проверить исправность заземления, целостность изоляции силового кабеля, исправность защитных ограждений. При наличии неисправности запрещается приступать к работе. О выявленной неисправности следует сообщить ответственному руководителю.

Привести в порядок рабочее место, спецодежду аккуратно заправить и застегнуть на все пуговицы во избежание случайного захвата вращающимися частями оборудования.

Требования безопасности при выполнении работы

К работе на центре допускается только персонал, изучивший техническую документацию (паспорт, методику аттестации, инструкцию по охране труда).

При необходимости работы с химически агрессивными жидкостями следует использовать защитные очки, резиновые перчатки, фартук.

Установку образца и сборку механической схемы испытаний рекомендуется вести при выключенном центре или в режиме ручного управления.

Образец должен быть надежно закреплен в шпинделе. Биения при вращении не должны превышать 0,04 мм в рабочей зоне образца. Хвостовик образца должен быть зафиксирован в обойме винтом.

Рекомендуется использовать средства защиты органов слуха (наушники, ушные вкладыши), поскольку испытания могут сопровождаться повышенным уровнем шума.

Испытания должны вестись с закрытым защитным щитком.

Рекомендуемая спецодежда оператора — это костюм или халат из хлопчатобумажной ткани.

Спецодежда, включая манжеты, должна быть застегнута на все пуговицы во избежание случайного захвата вращающимися частями механизмов центра.

Во время испытания запрещается открывать защитный щиток и проводить какие-либо манипуляции в рабочей зоне центра во избежание травм.

При включенном питании центра оператору запрещается открывать электрошкаф и производить внутри него какие-либо операции, не связанные с прямыми обязанностями оператора.

Ремонтно-наладочные работы должны выполняться специалистами, имеющими соответствующий допуск к работе с электроустановками и изучившими паспорт центра.

Требования безопасности в аварийных ситуациях

В случае возможной аварии или несчастного случая центр должен быть отключен любым человеком. Для остановки вращения двигателей следует нажать выносную кнопку аварийной остановки. Для обесточивания центра следует нажать красную кнопку отключения на боковой панели электрошкафа или отключить силовую трехфазную вилку от розетки. При необходимости нужно отключить подачу электричества на центр на ближайшем электрощите или перерубить токоведущие провода топором с сухой деревянной ручкой.

При оказании помощи пострадавшему от электрического удара соблюдайте осторожность, чтобы не попасть под напряжение. При необходимости используйте сухие доски, сухие палки, сухую свернутую в несколько раз одежду.

В случае возникновения пожара центр следует обесточить и далее выполнить действия, описанные в инструкции по пожарной безопасности, действующей на предприятии. Если стенд обесточить невозможно, использовать огнетушитель, позволяющий тушить электроустановки под напряжением до 1000 В.

При травмировании следует оказать первую медицинскую помощь пострадавшему, при необходимости вызвать врача или скорую помощь, сообщить о случившемся ответственному руководителю.

Требования безопасности по окончании работы

После остановки испытания следует дождаться полной остановки двигателей и снятия контактной и изгибающей нагрузок. Только после этого можно открывать защитный щиток и производить операции по замене образца и т. п.

Замену образца рекомендуется осуществлять при выключенном питании центра или в режиме ручного управления.

После окончания работы при необходимости следует протереть станину сухой ветошью. Во избежание самовозгорания промасленную ветошь выбрасывать в специально отведенные контейнеры.

После окончания работы необходимо вымыть руки теплой водой с мылом.

1.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

1.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 1.1.

1.2.3. Под руководством преподавателя ознакомиться с принципиальным устройством машин для износоусталостных испытаний, изучить их конструкцию и принцип работы. Рассмотреть применяемые объекты испытаний на машинах для износоусталостных испытаний. Провести пробное испытание одного образца.

1.2.4. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ и защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Охарактеризуйте назначение методов износоусталостных испытаний.

2. Для каких целей могут быть использованы результаты износоусталостных испытаний?

3. Расскажите о принципах формирования методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении. Назовите объекты для испытаний на механическую, фрикционную, контактную усталость, а также объекты для износоусталостных испытаний.

4. Опишите схему испытаний на контактно-механическую усталость. Как она расчленяется на схемы испытаний на механическую и контактную усталость?

5. Опишите схему испытаний на фрикционно-механическую усталость. Как она расчленяется на схемы испытаний на механическую и фрикционную усталость?

6. Опишите схему испытаний на фреттинг-усталость. Как она расчленяется на схемы испытаний на механическую усталость и на фреттинг?

7. Почему повреждения при трении скольжения и трении качения считают усталостными?

8. Какова система обозначений кривых усталости, полученных при разных схемах износоусталостных испытаний?

9. Что такое прямой эффект? Как определяют коэффициент прямого эффекта?

10. Что такое обратный эффект? Как определяют коэффициент обратного эффекта?

11. Опишите систему обозначений пределов выносливости при механической, контактной и контактно-механической усталости. Какие из предельных напряжений характеризуют прямой и обратный эффекты?

12. Какие группы факторов обуславливают ИУП?

13. Какие модификации машин серии СИ для износоусталостных испытаний известны?

14. Какие виды испытаний можно проводить на машинах СИ-01, СИ-02, СИ-03?

15. Каким образом создаются и задаются контактные нагрузки на машинах серии СИ?

16. Каким образом создаются и задаются изгибные нагрузки на машинах серии СИ?

17. Из каких основных составных частей состоит испытательный центр SZ-01? Назовите его основные технические характеристики.

18. Охарактеризуйте механизм контактного нагружения испытательного центра SZ-01.

19. Для чего предназначена информационно-управляющая система? Каковы ее основные функции?

20. Дайте перечень основных измеряемых величин и управляемых параметров машин серии СИ.

21. Как различаются две характеристики ИУП: а) суммарный износ; б) сближение осей пары трения? Проиллюстрируйте эти понятия соответствующими схемами.

22. Что такое интегральный износ и дискретный износ? Как их измеряют?

23. Что такое «круг износа»? Как его можно построить?
24. Каковы особенности ИУС испытательного центра SZ-01?
25. Каковы общие требования безопасности при работе на испытательном центре?
26. Назовите требования безопасности перед началом и после окончания работ на испытательном центре.
27. Назовите требования безопасности во время работы на испытательном центре.
28. Каковы требования безопасности в аварийных ситуациях?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Экспериментально определить основные характеристики сопротивления механической усталости.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 23–30; 10, с. 26, 34–37, 43–44; 11: Т. 1, с. 17–42, 53–54, 216–218].

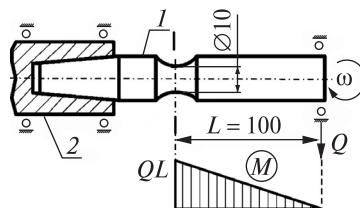
2.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

2.1.1. Схема испытаний на механическую усталость. Цикл напряжений. Типоразмеры образцов

Одной из наиболее распространенных схем испытаний на усталость является консольный изгиб при вращении гладких образцов круглого поперечного сечения (рис. 2.1).

При проведении испытаний по данной схеме гладкий цилиндрический образец (1) одним концом закрепляется в шпинделе (2) испытательной машины и вращается с угловой скоростью ω . На другом его

Рис. 2.1. Схема испытаний стандартного гладкого консольного образца на механическую усталость с основными размерами:
1 – образец (элемент конструкции);
2 – шпиндель



конце прилагается вертикальная изгибающая нагрузка Q . В опасном сечении образца возникает наибольший изгибающий момент $M = QL$ ($L = 100$ мм – расстояние от оси приложения изгибающей нагрузки до опасного сечения образца). Максимальные изгибающие напряжения (амплитуда напряжений цикла) в том же сечении определяют по формуле (1.1).

При испытаниях на механическую усталость изгибающая нагрузка Q является неизменной во времени t , но действующие нормальные напряжения в каждой точке рабочего сечения образца l изменяются по симметричному циклу (рис. 2.2) с периодом T (цифрами 0, 1, 2, 3, 4 отмечены характерные точки). Эюра действующих напряжений σ по сечению образца представлена на рис. 2.2, а, а реализуемый в данном случае симметричный цикл изменения напряжений при испытаниях на механическую усталость – на рис. 2.2, б.

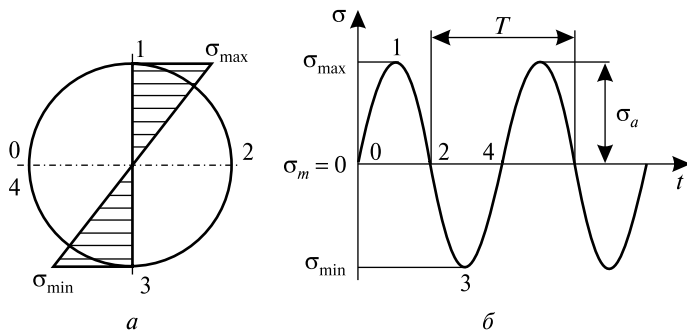


Рис. 2.2. Эюра действующих напряжений (а) и симметричный цикл изменения номинальных напряжений σ во времени t (б) в опасном сечении образца при приложении изгибающей нагрузки Q

В общем случае цикл напряжений характеризуется максимальным σ_{\max} и минимальным σ_{\min} напряжениями (см. рис. 2.2, б), взятыми со своими знаками; амплитудой напряжений цикла $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$; средним напряжением цикла $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$; размахом напряжений $2\sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ и коэффициентом асимметрии цикла напряжений $R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$.

В рассматриваемом случае напряжения изменяются по симметричному циклу, для которого максимальные (σ_{\max}), минимальные (σ_{\min}) и амплитудные (σ_a) значения напряжений оказываются численно равными: $\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}| = \sigma_a$, а среднее напряжение $\sigma_m = 0$. Коэф-

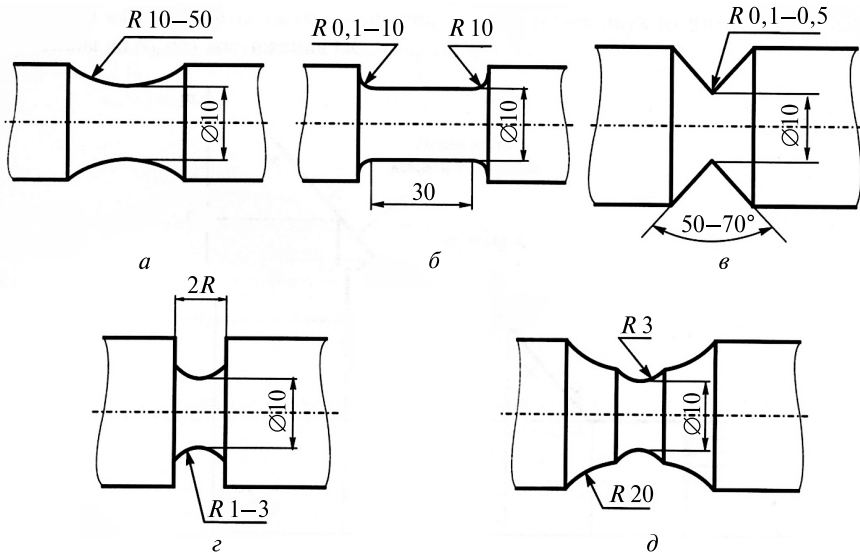


Рис. 2.3. Рабочие части (а–д) лабораторных образцов нескольких типоразмеров при испытаниях на механическую усталость

коэффициент асимметрии цикла для симметричного цикла напряжений $R_\sigma = -1$.

При испытаниях на механическую усталость применяют образцы нескольких типоразмеров (рис. 2.3) [1].

2.1.2. Построение кривой механической усталости. Характеристики сопротивления усталости

Основные характеристики сопротивления усталости определяют по кривой механической усталости, которая представляет собой график зависимости между максимальными напряжениями (σ_{\max}) или амплитудой цикла (σ_a) и циклической долговечностью (N_σ) одинаковых образцов, построенный по параметру среднего напряжения цикла или по параметру коэффициента асимметрии цикла. Ее строят либо в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N_\sigma$, либо в полулогарифмических координатах $\sigma_a - \lg N_\sigma$ (рис. 2.4).

Для построения кривой усталости и определения предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50 %, испытывают не менее 15 одинаковых образцов. Испытания ведут непрерывно

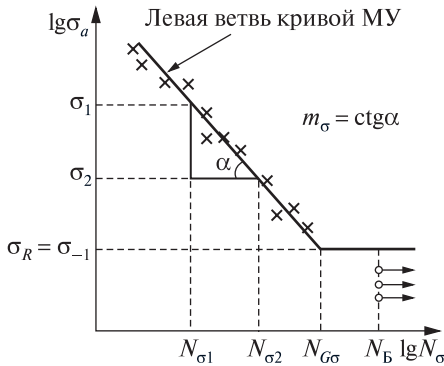


Рис. 2.4. Схема кривой механической усталости

до достижения предельного состояния (ПС) или достижения базового числа циклов (N_B — предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость) [1]. Принимают, что если образец выдержал N_B циклов, то он вообще не разрушится от действия повторно-переменных напряжений при заданном уровне нагружения. Наступление ПС характеризуется либо появлением усталостной макротрещины заданного размера, либо разрушением образца (разделением его на две части).

В интервале напряжений $0,95-1,05$ от предела выносливости (σ_{-1}), соответствующего $P=50\%$, должны быть испытаны не менее трех образцов, при этом не менее половины из них не должны разрушаться до N_B [1]. Базу испытаний для определения σ_{-1} принимают равной 10^7 циклов (для металлов и сплавов, имеющих горизонтальный участок на кривой усталости) или $10 \cdot 10^7$ циклов (для легких сплавов и других металлов и сплавов, ординаты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов). Для сравнительных испытаний базу для определения пределов выносливости принимают $3 \cdot 10^6$ и 10^7 циклов соответственно [1].

Процедура построения кривой механической усталости в двойных логарифмических координатах в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [2] реализуется следующим образом. Задают максимальный (начальный) уровень напряжения и после испытания одного образца до ПС определяют его долговечность. Величину максимального напряжения принимают $1,3-1,5$ от значения σ_{-1} для $P=50\%$, которое определяют на основании анализа имеющихся данных для аналогичных материалов или с помощью предварительных испытаний. Далее, постепенно уменьшая напряжение на величину $\Delta\sigma$, испытывают около $11-12$ образцов до наступления ПС, определяя при этом их долговечность. В результате на кривой усталости получают совокупность точек (на рис. 2.4 отмечены знаком \times). Вследствие уменьшения действующего напряжения наступает момент, когда образцы не достигают ПС. В этом случае около $3-4$ образцов испытывают до N_B . На кривой усталости данные результаты обозначают знаком $\circ \rightarrow$ (см. рис. 2.4).

Левую ветвь кривой усталости строят методом графического интерполирования экспериментальных точек, помеченных знаком \times , или по способу наименьших квадратов. На полученной линии определяют характерную точку, а затем от нее проводят горизонтальный участок (правую ветвь) кривой усталости. Данная точка находится на среднем расстоянии между точкой, соответствующей минимальному значению напряжения, при котором реализуется ПС, и точкой, соответствующей максимальному уровню напряжения, при котором образец не разрушился. Таким образом, получают кривую механической усталости. Из данной кривой определяют основные характеристики сопротивления усталости: предел выносливости σ_R (для симметричного цикла σ_{-1}), абсциссу $N_{G\sigma}$ точки перелома кривой механической усталости и показатель m_σ наклона левой ветви кривой механической усталости.

Любую кривую усталости можно описать степенным уравнением (уравнением Вёлера):

$$\sigma^{m_\sigma} N = C_\sigma = \text{const}, \quad (2.1)$$

где C_σ – константа сопротивления усталости.

Предел выносливости – это максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение элемента конструкции до N_B [1]. Из рис. 2.4 видно, что σ_{-1} соответствует горизонтальной линии, разделяющей область возможного изменения величины циклических напряжений на две подобласти: $\sigma > \sigma_{-1}$ (усталостное разрушение происходит) и $\sigma < \sigma_{-1}$ (усталостное разрушение до N_B не реализуется). Значит, σ_{-1} – это граница (по напряжениям) между выносливостью и усталостью материала.

Параметр m_σ (см. рис. 2.4), характеризующий угол наклона левой ветви кривой усталости к оси абсцисс, определяют по формуле

$$m_\sigma = \text{ctg} \alpha = (\lg N_{\sigma_2} - \lg N_{\sigma_1}) / (\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2). \quad (2.2)$$

Для аппроксимации экспериментальных данных и построения левой ветви кривой усталости, как правило, используют метод наименьших квадратов или метод графического интерполирования. Первый метод является одним из наиболее распространенных расчетных методов. В данном случае левая ветвь кривой усталости в двойных логарифмических шкалах аппроксимируется прямой линией, уравнение которой имеет вид

$$y = ax + b, \quad (2.3)$$

где $x = \lg N_\sigma$ и $y = \lg \sigma_a$, так что

$$\lg \sigma_a = a \lg N_\sigma + b. \quad (2.4)$$

Коэффициенты a и b данного уравнения определяют по формулам

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.5)$$

где x_i, y_i – абсцисса и ордината опытной i -й точки соответственно.

Показатель наклона левой ветви кривой усталости определяют как величину, обратную коэффициенту a :

$$m_{\sigma} = 1/|a|. \quad (2.6)$$

Приведем пример построения кривой усталости. Серия гладких образцов (12 шт.) углеродистой стали 45 испытана на механическую усталость при частоте 50 Гц.

Экспериментальные результаты испытаний представим графически в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$ (рис. 2.5, цифрами возле точек обозначены номера испытанных образцов).

Численные результаты испытаний семи разрушенных образцов, а также методика обработки опытных данных приведены в таблице. Используя эти данные, в соответствии с выражениями (2.5) имеем

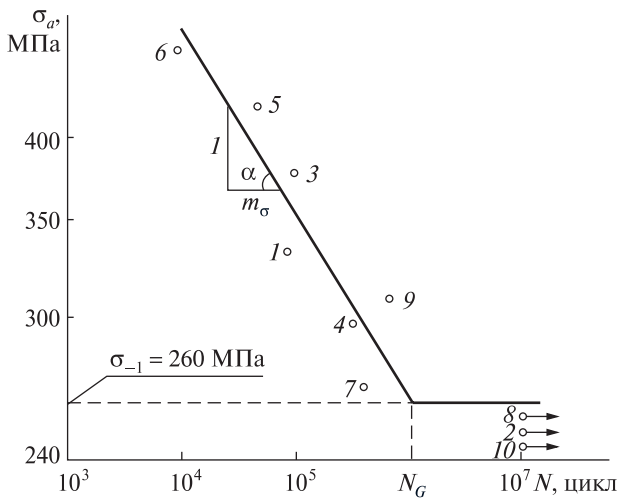


Рис. 2.5. Экспериментальная кривая механической усталости образцов из стали 45

$$b = \frac{17,743 \cdot 181,3143 - 89,3715 \cdot 35,3753}{7 \cdot 181,3143 - 35,3753^2} = 3,12;$$

$$a = \frac{7 \cdot 89,3715 - 35,3753 \cdot 17,743}{7 \cdot 181,3143 - 35,3753^2} = -0,116.$$

Результаты испытаний на усталость и их обработка

| Номер образца | σ_a , МПа | N , цикл | $y_i = \lg \sigma_a$ | $x_i = \lg N$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|---------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------|----------|-----------|
| 1 | 330 | $7,22 \cdot 10^4$ | 2,5185 | 4,8585 | 23,6050 | 12,2361 |
| 3 | 371 | $8,5 \cdot 10^4$ | 2,5697 | 4,9294 | 24,2989 | 12,6671 |
| 4 | 295 | $3,33 \cdot 10^5$ | 2,4698 | 5,5224 | 30,4969 | 13,6392 |
| 5 | 413 | $4,46 \cdot 10^4$ | 2,6154 | 4,6493 | 21,6159 | 12,1598 |
| 6 | 454 | $9,3 \cdot 10^3$ | 2,6568 | 3,9685 | 15,7489 | 10,5435 |
| 7 | 268 | $4,0 \cdot 10^5$ | 2,4281 | 5,6021 | 31,3835 | 13,6025 |
| 9 | 305 | $7,0 \cdot 10^5$ | 2,4847 | 5,8451 | 34,1652 | 14,5233 |
| $n = 7$ | Сумма Σ | | 17,7430 | 35,3753 | 181,3143 | 89,3715 |

Используя уравнение кривой усталости (2.3) с учетом полученных значений коэффициентов a и b , имеем

$$\lg \sigma_a = 3,12 - 0,116 \lg N. \quad (2.7)$$

Показатель наклона левой ветви кривой усталости

$$m_\sigma = 1/|a| = 1/0,116 \approx 8,6.$$

Следовательно, уравнение типа (2.1) для исследованной стали будет

$$\sigma_a^{8,6} N = \text{const},$$

где в соответствии с (2.1) $\text{const} = 260^{8,6} \cdot 10^6$, $N_G = 10^6$ циклов.

Уравнение (2.7) может применяться для расчетной оценки долговечности N образцов при заданных напряжениях σ_a .

2.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

2.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 2.1.

2.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание одного образца на механическую усталость.

2.2.4. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ и защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под усталостью материала?
2. Что называют циклом напряжений, и какие виды циклов напряжений существуют?
3. При каком цикле напряжений обычно ведут испытания на механическую усталость? Назовите его основные характеристики.
4. Поясните термин «коэффициент асимметрии цикла».
5. Назовите объект испытаний при механической усталости.
6. Как ведется расчет напряжений при консольном изгибе?
7. Расскажите, как производят испытания на механическую усталость.
8. В результате чего возникает повреждение при испытаниях на МУ?
9. Поясните термин «кривая усталости». Как ее построить для исследуемого материала?
10. Что такое базовое число циклов, и чему оно равно при испытаниях на механическую усталость?
11. Назовите основной критерий достижения ПС при механической усталости.
12. Назовите основные параметры кривой усталости — основные характеристики сопротивления механической усталости.
13. Запишите уравнение кривой механической усталости.
14. Что такое предел выносливости (σ_{-1})?
15. Поясните термин «циклическая долговечность элемента конструкции».
16. Опишите процедуру оценки параметров кривой усталости методом наименьших квадратов.
17. Запишите формулу, по которой определяется показатель наклона левой ветви кривой механической усталости m_{σ} . Как она выводится?

Лабораторная работа № 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ С ТРЕЩИНОЙ

Цель работы. Экспериментально определить циклическую долговечность гладких стальных образцов с трещиной при заданных уровнях напряжений и построить наклонный участок (левую ветвь) кривой усталости таких образцов.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 23–30; 10, с. 26, 34–37, 43–44; 11: Т. 1, с. 17–42, 53–54, 216–218].

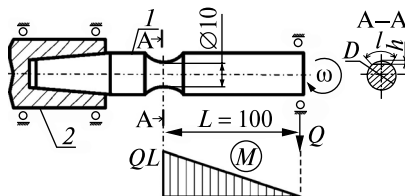
3.1. ПРИМЕР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ С ТРЕЩИНОЙ

В лабораторных исследованиях на испытательном центре SZ-01 используются стандартные образцы с предварительно нанесенным одно-сторонним V-образным надрезом глубиной h (в примере равной 0,5 мм) и длиной l (в примере равной 4,36 мм). Схема нагружения образца с надрезом изображена на рис. 3.1.

Серия из четырех образцов с надрезом-трещиной из стали 18ХГТ была подвергнута испытаниям на механическую усталость. Результаты

Рис. 3.1. Схема испытаний консольного образца с надрезом на механическую усталость с основными размерами:

l – образец (элемент конструкции); 2 – шпindelь



испытаний представлены в таблице и на рис. 3.2 в виде точек. Каждая точка соответствует амплитуде напряжения и количеству циклов в момент разрушения образца; экспериментальные точки аппроксимированы сплошной линией методом графической интерполяции. Фото одного из разрушенных в процессе испытаний образцов дано на рис. 3.3.

**Результаты испытаний на усталость образцов
с надрезом из стали 18ХГТ и их обработка**

| Номер образца | σ_a , МПа | N , цикл | $y_i = \lg \sigma_a$ | $x_i = \lg N$ | x_i^2 | $x_i y_i$ |
|---------------|------------------|-------------------|----------------------|---------------|---------|-----------|
| 1 | 255 | $3,25 \cdot 10^5$ | 2,4065 | 5,5119 | 30,3810 | 13,2644 |
| 2 | 331 | $4,31 \cdot 10^4$ | 2,5198 | 4,6345 | 21,4786 | 11,6780 |
| 3 | 357 | $2,52 \cdot 10^4$ | 2,5527 | 4,4014 | 19,3723 | 11,2355 |
| 4 | 449 | $1,1 \cdot 10^3$ | 2,6522 | 3,0414 | 9,2501 | 8,0664 |
| $n = 4$ | Сумма Σ | | 10,1312 | 17,5892 | 80,482 | 44,2443 |

Используя данные таблицы, в соответствии с (2.5) имеем

$$a = \frac{4 \cdot 44,2443 - 17,5892 \cdot 10,1312}{4 \cdot 80,482 - 17,5892^2} = -0,0974;$$

$$b = \frac{10,1312 \cdot 80,482 - 44,2443 \cdot 17,5892}{4 \cdot 80,482 - 17,5892^2} = 2,9612.$$

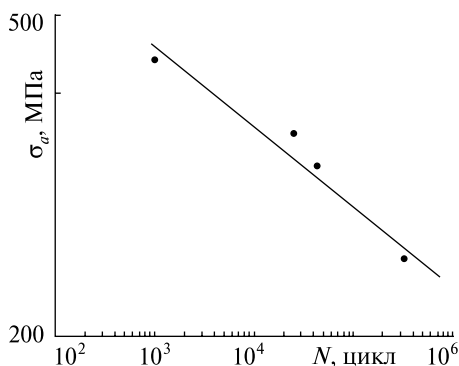


Рис. 3.2. Экспериментальная кривая механической усталости образцов из стали 18ХГТ с трещиной

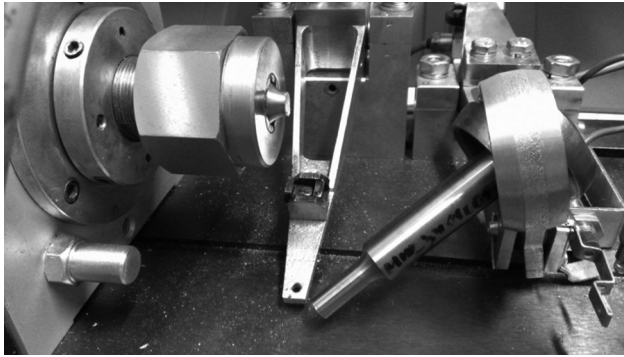


Рис. 3.3. Фото разрушенного образца

Используя уравнение кривой усталости (2.3) с учетом значений коэффициентов a и b , получим

$$\lg \sigma_a = 2,9612 - 0,0974 \lg N. \quad (3.1)$$

Показатель наклона левой ветви кривой усталости

$$m_\sigma = 1/|a| = 1/0,0974 \approx 10,27.$$

Следовательно, уравнение типа (2.1) для образцов из исследованной стали с трещиной будет

$$\sigma_a^{10,27} N = \text{const}. \quad (3.2)$$

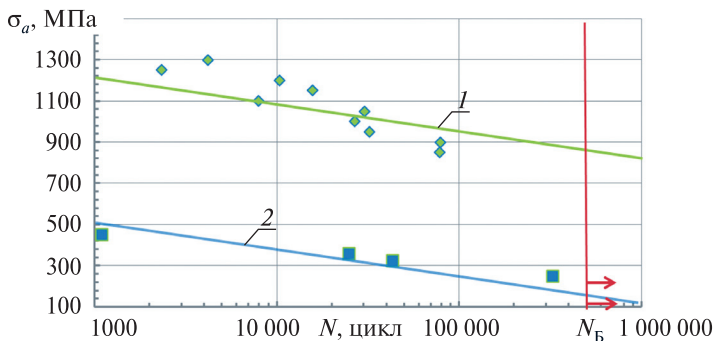


Рис. 3.4. Сравнение результатов испытаний на механическую усталость для гладких образцов и образцов с надрезом из стали 18ХГТ

Уравнения (3.1), (3.2) могут применяться для расчетной оценки живучести N образцов с трещиной при заданных напряжениях σ_a .

Для сравнения приведем уже известные результаты испытаний на механическую усталость гладких образцов из стали 18ХГТ и сравним их значения с полученными в результате эксперимента. Обратимся к рис. 3.4. Зелеными точками здесь изображены результаты испытаний гладких образцов, синими – результаты испытаний образцов с надрезом. Линии под номерами 1 и 2 показывают кривые усталости для гладкого образца и образца с надрезом соответственно. Вертикальной красной чертой указано значение количества циклов, при котором образец уже не сможет разрушиться, N_B , равное $5 \cdot 10^5$ циклов. Красными стрелками обозначены определенные опытным путем значения σ_a , при которых разрушение не наступило ($\sigma_1 = 120$ МПа, $\sigma_2 = 225$ МПа).

3.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

3.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные п. 3.1.

3.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание на живучесть одного образца с надрезом.

3.2.4. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ и защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под усталостью материала?
2. Что называют живучестью?
3. Как ведется расчет напряжений при консольном изгибе?
4. Что такое циклическая долговечность?
5. Как экспериментально определить живучесть образца?
6. Запишите уравнение кривой механической усталости.
7. Как построить экспериментальную кривую усталости для образца с надрезом-трещиной?
8. Опишите процедуру оценки параметров кривой усталости методом наименьших квадратов.

УСКОРЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Определить предел выносливости материала при механической усталости ускоренным методом.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 23–30; 10, с. 26, 34–37, 43–44; 11: Т. 1, с. 17–42, 53–54, 216–218].

4.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

4.1.1. Общие сведения об ускоренных методах определения предела выносливости

Экспериментально значение σ_{-1} определяют в ходе усталостных испытаний в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [2]. Такой способ дает более точные результаты, однако является весьма трудоемким и затратным, поскольку требует испытания как минимум 15 элементов конструкции. Между тем на практике довольно часто возникает потребность в ускоренной оценке σ_{-1} . Например, если необходимо быстро оценить тот или иной конструктивный вариант объекта с точки зрения его сопротивления усталости.

Поэтому разработаны методы, дающие возможность определить σ_{-1} за более короткое время и при испытании меньшего количества образцов, чем это следует из стандарта ГОСТ 25.502-79 [2]. Такие методы называются *ускоренными*. Они основаны на различных гипотезах накопления усталостных повреждений в материалах; учитывают различные физические процессы, происходящие в материалах при циклическом нагруже-

нии; дают экономию времени и средств; имеют различные области применения; в них используются разные расчетные схемы для определения σ_{-1} . В общей сложности методы ускоренной оценки σ_{-1} можно разбить на две группы: *расчетные* и *расчетно-экспериментальные*.

4.1.2. Расчетные методы

Расчетную оценку σ_{-1} производят с помощью эмпирических зависимостей, связывающих эту характеристику с другими характеристиками механических свойств материала (твердость HB , предел прочности σ_b , предел текучести σ_T и др.). Практическое применение подобных зависимостей ограничивается большой чувствительностью предела выносливости к различным технологическим, конструктивным и эксплуатационным факторам. Поэтому указанные эмпирические зависимости используются в основном для ориентировочной оценки σ_{-1} . Различают три основные расчетные методики.

Если механические свойства материала экспериментально не определены, то согласно *первой методике* значение σ_{-1} оценивают по известным номограммам. Пример определения σ_{-1} по номограмме показан на рис. 4.1. Процедура состоит в следующем: по измеренной величине диаметра отпечатка шарика d , используя функцию зависимости твердости по Бринеллю HB от диаметра d при заданной испытательной нагрузке Q , находят значение σ_b , по которому, используя функцию

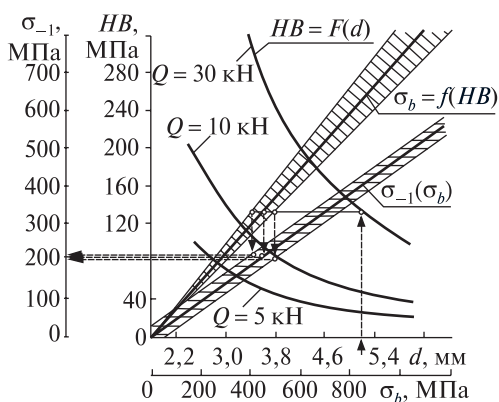


Рис. 4.1. Номограмма для экспрессной оценки σ_{-1} стали по диаметру отпечатка шарика при пробе на твердость по Бринеллю

зависимости предела выносливости от предела прочности, производят оценку $\sigma_{-1}^{(1)}$.

Вторая методика применима, когда известно значение σ_b . В данном случае предел выносливости σ_{-1} при изгибе с вращением имеет устойчивую пропорциональную связь с σ_b стали: $\sigma_{-1} = (0,4 - 0,6)\sigma_b$. Таким образом, можно сделать приближенную оценку σ_{-1} , принимая $\sigma_{-1}^{(2)} \approx 0,5\sigma_b$.

Более точную в сравнении со вторым методом оценку σ_{-1} получают по *третьей методике*, когда известны основные характеристики механических свойств материала. В данном случае расчет ведут по формуле

$$\sigma_{-1}^{(3)} = \frac{\sigma_b - \sigma_T}{0,75 \left[\frac{\delta}{\psi} \left(7,5 - 4,167 \frac{\delta}{\psi} \right) - 1 \right]}, \quad (4.1)$$

где δ и ψ – относительные удлинение и сужение после разрыва, %.

Когда оценка предела выносливости выполняется по всем трем методикам, для дальнейшего использования берут среднее арифметическое значение (медиану) σ_{-1}^* :

$$\sigma_{-1}^* = \frac{\sigma_{-1}^{(1)} + \sigma_{-1}^{(2)} + \sigma_{-1}^{(3)}}{3}. \quad (4.2)$$

4.1.3. Расчетно-экспериментальные методы

К расчетно-экспериментальным относятся: метод Локати, метод экстраполяции левой ветви кривой усталости, метод Субраманьяна, метод ступенчато повышаемых деформаций (*Dst*-метод), метод Про и др.

Наиболее простым и распространенным методом, предназначенным для ускоренной оценки среднего значения $\bar{\sigma}_{-1}$ в случаях, не требующих высокой точности, является метод Локати. Порядок проведения испытаний и обработку экспериментальных данных по данному методу регламентирует РД 50-686-89.

Метод основан на известной гипотезе линейного суммирования повреждений (гипотезе Пальмгрена – Майнера), возникающих в результате действия в материале повторно-переменных напряжений. В соответствии с данной гипотезой условие разрушения при ступенчатом программном изменении нагрузки на образец имеет вид

$$\sum_{i=1}^m (n_i/N_i) = 1, \quad (4.3)$$

где n_i – число циклов нагружения (наработка) при заданном уровне напряжений σ_i ; N_i – число циклов до разрушения образца при заданном σ_i , устанавливается графически по левой ветви кривой усталости (см. рис. 2.4) или расчетом; i – номер ступени нагружения; m – число уровней напряжения.

В методе Локати предполагается, что левая ветвь кривой усталости определена в вероятностном аспекте для изделий-аналогов (образцов) или одной из предшествующих партий исследуемого материала. В этом случае необходимо испытание как минимум одного изделия (образца), которое проводят при ступенчатом возрастании нагрузки до разрушения образца. В ходе испытаний образец нагружают начальным напряжением σ_{a0} и испытывают в течение n_0 циклов (рис. 4.2). Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на $\Delta\sigma_a = \text{const}$ до величины σ_{a1} , и на этом уровне напряжения испытания продолжают в течение $n_1 = n_0$ циклов и т. д. до наступления предельного состояния. Число циклов на последней ступени напряжения (n_k) определяют при разрушении образца. Оно может быть равно или меньше числу циклов нагружения на предыдущих ступенях, т. е. $n_k \leq n_i = \text{const}$, где $i = 1, \dots, k - 1$ (k – номер ступени, на которой происходит разрушение).

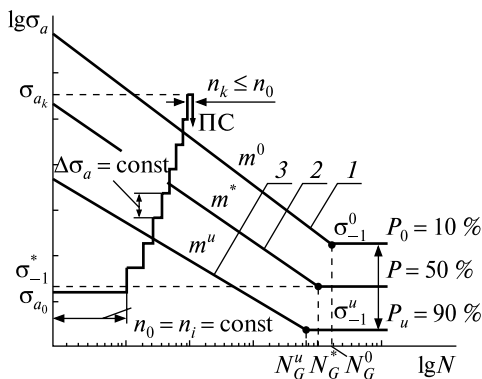


Рис. 4.2. Схематическое изображение программы нагружения по методу Локати и условных кривых усталости (1, 2, 3)

Оптимальный интервал начального уровня напряжения σ_{a0} задают неравенством

$$0,9\sigma_{-1}^* \leq \sigma_{a0} \leq 1,0\sigma_{-1}^*, \quad (4.4)$$

где σ_{-1}^* – ожидаемый предел выносливости.

Оценку значения ожидаемого предела выносливости σ_{-1}^* производят расчетным методом по формуле (4.2).

Оптимальный интервал приращения напряжений $\Delta\sigma_a$ выдерживают постоянным и определяют по уравнению

$$\Delta\sigma_a = 0,1\sigma_{a0}. \quad (4.5)$$

Продолжительность n_i испытаний на каждой ступени нагружения также принимают постоянной и вычисляют по уравнению

$$n_i = 7500\Delta\sigma_a \text{ для } \sigma_a = 0,9\sigma_{-1}^*; \quad (4.6)$$

$$n_i = 6700\Delta\sigma_a \text{ для } \sigma_a = \sigma_{-1}^*, \text{ где } \Delta\sigma_a \text{ в МПа.}$$

Для оценки $\bar{\sigma}_{-1}^*$ левая ветвь кривой усталости должна быть представлена статистически (необходимо определить границы переходной области – зоны, в которой при испытании до N_B либо происходит отказ, либо не происходит), т. е. наряду с m^* и N_G^* должны быть известны $m^u, m^0, N_G^u, N_G^0, \sigma_{-1}^u, \sigma_{-1}^0$. Результаты испытаний изображают на графике $\lg\sigma_a - \lg N$ (или $\sigma_a - \lg N$) в виде многоступенчатой диаграммы (см. рис. 4.2), на которую в последующем наносят кривые усталости.

Приближенно для $P_u = 90\%$ и $P_0 = 10\%$ можно принять, что

$$N_G^u = 2/3N_G^*, N_G^0 = 1,5N_G^*. \quad (4.7)$$

Значения σ_{-1}^u и σ_{-1}^0 могут быть получены с использованием меры рассеяния $T_{\sigma_{-1}} = \sigma_{-1}^u / \sigma_{-1}^0$ по формулам

$$\sigma_{-1}^u = \sigma_{-1}^* \frac{2T_{\sigma_{-1}}}{1 + T_{\sigma_{-1}}}; \quad (4.8)$$

$$\sigma_{-1}^0 = \sigma_{-1}^* \frac{2}{1 + T_{\sigma_{-1}}}. \quad (4.9)$$

Для каждой кривой усталости вычисляют суммы относительных долговечностей (накопленных повреждений) по уравнению

$$\left(\sum \frac{n_i}{N_{\sigma_i}} \right)^x = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_{\sigma_i}}, \quad (x = u, *, 0), \quad (4.10)$$

где

$$N_{\sigma_i}^x = \left\{ \begin{array}{l} N_G^x \left(\frac{\sigma_{-1}^x}{\sigma_a} \right)^{m^x} = N_G^x \left(\frac{\sigma_{-1}^x}{\sigma_{a0} + (i-1)\Delta\sigma_a} \right)^{m^x}, \sigma_{ai} \geq \sigma_{-1}^x; \\ \infty, \sigma_{ai} < \sigma_{-1}^x. \end{array} \right. \quad (4.11)$$

На основании сумм относительных долговечностей $\sum_{i=1}^m (n_i / N_i)$ и соответствующим им значениям пределов выносливости $\sigma_{-1}^0, \sigma_{-1}^*$ и σ_{-1}^u строится график в координатах $\lg \sum_{i=1}^m (n_i / N_i) - \sigma_{-1}$ (рис. 4.3).

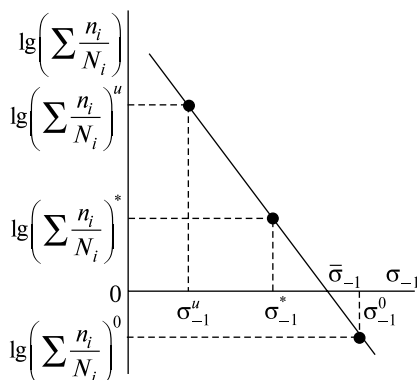


Рис. 4.3. Оценка медианы предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ по методу Локати

Оценку медианы предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1}$ производят графически или аналитически интерполяцией или экстраполяцией полученного графика.

4.1.4. Пример ускоренного определения предела выносливости

Испытанию на механическую усталость подвергался стальной образец со следующими характеристиками: $\sigma_b = 540$ МПа, $\sigma_T = 280$ МПа; $\delta = 17\%$; $\psi = 38\%$.

На *первом этапе* определяют значение ожидаемого предела выносливости σ_{-1}^* испытуемого образца, используя три ускоренные расчетные методики (см. п. 4.1.3).

Согласно первой методике по измеренному диаметру отпечатка шарика при пробе Бринелля ($d = 5,2$ мм) по номограмме (см. рис. 4.1)

определяют значение $\sigma_{-1}^{(1)}$. Получим, что $\sigma_{-1}^{(1)} = 200$ МПа. По второй методике получают $\sigma_{-1}^{(2)} \approx 0,5\sigma_b = 0,5 \cdot 540 = 270$ МПа. Согласно третьей методике по формуле (4.1)

$$\sigma_{-1}^{(3)} = (540 - 280) / \left(0,75 \left[\frac{17}{38} \left(7,5 - 4,167 \frac{17}{38} \right) - 1 \right] \right) = 228 \text{ МПа.}$$

Тогда среднее арифметическое ожидаемого предела выносливости σ_{-1}^* по формуле (4.2)

$$\sigma_{-1}^* = (200 + 270 + 228) / 3 = 233 \text{ МПа.}$$

На *втором этапе* определяют численное значение показателя наклона левой ветви кривой усталости m^* . Для этого принимают два допущения: 1) $N_G^* = N_B = 10^7$ циклов, т. е. координаты точки перелома кривой усталости $(\sigma_{-1}^*; N_B)$ или $(233; 10^7)$; 2) в области малоциклового усталости кривая проходит через точку, имеющую координаты $(\sigma_b; N_G')$ или $(540; 10^3)$. Полученные точки наносят на координатную сетку и из точки $(\sigma_{-1}^*; N_B)$ проводят горизонтальный участок кривой механической усталости, параллельный оси абсцисс (рис. 4.4). Таким образом, начинают строить условную кривую усталости, для которой, зная координаты двух точек $(\sigma_{-1}^*; N_B)$ и $(\sigma_b; N_G')$, по формуле (2.2) определяют m^* :

$$m^* = \text{ctg}\alpha = \frac{\lg N_B - \lg N_G'}{\lg \sigma_b - \lg \sigma_{-1}^*} = \frac{\lg 10^7 - \lg 10^3}{\lg 540 - \lg 233} \approx 11.$$

Принимают, что $m^u = m^0 = m^* = 11$. Затем по формуле (4.7) находят абсциссы точек перелома N_G^u и кривых:

$$N_G^u = 2/3 \cdot 10^7 = 6,67 \cdot 10^6, N_G^0 = 1,5 \cdot 10^7.$$

На *третьем этапе* производят построение левых ветвей трех условных кривых МУ: σ_{-1}^0 соответствует первой кривой, σ_{-1}^* — второй и σ_{-1}^u — третьей. Начинают с того, что для левой ветви второй кривой МУ составляют уравнение вида (2.4). Для определения параметра a используют выражение (2.6):

$$a = -1/m^* = -1/11 = -0,091.$$

Из уравнения (2.4) определяют параметр b_2 для второй кривой:

$$b_2 = \lg \sigma_{-1}^* + a \lg N_B = \lg 233 + 0,091 \cdot \lg 10^7 = 3,004.$$

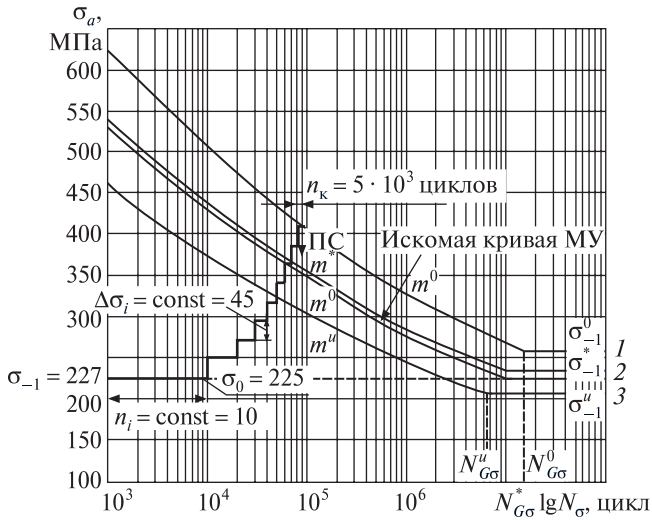


Рис. 4.4. Результаты обработки и испытаний образца из стали 45 по методу Локати

Далее, используя уравнение левой ветви второй кривой усталости, которое принимает вид $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg N_\sigma + 3,004$, определяют характерные точки на кривой, соответствующие долговечностям (N_σ) 10^4 , 10^5 и 10^6 . Результаты расчета представляют в виде табл. 4.1.

Согласно п. 4.1.3 значения σ_{-1}^u и σ_{-1}^0 определяют по формулам (4.8) и (4.9). Принимая $T_{\sigma_{-1}} = 0,8$, для третьей кривой усталости получают

$$\sigma_{-1}^u = 233 \frac{2 \cdot 0,8}{1 + 0,8} = 207 \text{ МПа},$$

а для первой кривой усталости

$$\sigma_{-1}^0 = 233 \frac{2}{1 + 0,8} = 259 \text{ МПа}.$$

Далее из уравнения (2.4) определяют параметр b для первой и третьей кривых, а также характерные точки для данных кривых усталости: для первой

$$b_1 = \lg 259 + 0,091 \cdot \lg 1,5 \cdot 10^7 = 3,066;$$

для третьей

$$b_3 = \lg 207 + 0,091 \cdot \lg 6,67 \cdot 10^6 = 2,937.$$

Таблица 4.1

**Определение характерных точек для построения
левых ветвей трех условных кривых усталости**

| N_{σ} , цикл | σ_a , МПа |
|---------------------|---|
| Для первой кривой | |
| 10^3 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^3 + 3,066 = 2,793 \Rightarrow \sigma_a = 621$ |
| 10^4 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^4 + 3,066 = 2,702 \Rightarrow \sigma_a = 504$ |
| 10^5 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^5 + 3,066 = 2,611 \Rightarrow \sigma_a = 408$ |
| 10^6 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^6 + 3,066 = 2,520 \Rightarrow \sigma_a = 331$ |
| $1,5 \cdot 10^7$ | 259 |
| Для второй кривой | |
| 10^3 | 540 |
| 10^4 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^4 + 3,004 = 2,640 \Rightarrow \sigma_a = 437$ |
| 10^5 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^5 + 3,004 = 2,549 \Rightarrow \sigma_a = 354$ |
| 10^6 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^6 + 3,004 = 2,458 \Rightarrow \sigma_a = 287$ |
| 10^7 | 233 |
| Для третьей кривой | |
| 10^3 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^3 + 2,937 = 2,664 \Rightarrow \sigma_a = 461$ |
| 10^4 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^4 + 2,937 = 2,573 \Rightarrow \sigma_a = 374$ |
| 10^5 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^5 + 2,937 = 2,482 \Rightarrow \sigma_a = 303$ |
| 10^6 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^6 + 2,937 = 2,391 \Rightarrow \sigma_a = 246$ |
| $6,67 \cdot 10^6$ | 207 |

Результаты расчета заносят в соответствующие поля табл. 4.1 и согласно им строят три условные кривые усталости (см. рис. 4.4).

На *четвертом этапе* проводят ускоренное испытание как минимум одного образца по методу Локати. Для выбора режимов нагружения определяют величину σ_0 согласно неравенству (4.4). Принимают, что $\sigma_{a0} = 0,965 \sigma_{-1}^* = 0,965 \cdot 233 = 225$ МПа.

Величину приращения напряжения $\Delta\sigma_a$ на каждой ступени нагружения определяют с учетом неравенства (4.5): $\Delta\sigma = 0,1\sigma_{a0} = 0,1 \cdot 225 = 22,5$ МПа. Следовательно, напряжение на второй ступени нагружения

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma = 225 + 22,5 = 247,5 \text{ МПа.}$$

С учетом полученных данных проводят следующий эксперимент: образец нагружают начальным напряжением $\sigma_0 = 225$ МПа и испытывают в течение $n_0 = 10^4$ циклов (для реализации разрушения в течение короткого времени значение n_0 принято не в соответствии с уравнением (4.6)). Без промежуточных пауз напряжение увеличивают на $\Delta\sigma_a = 22,5$ МПа = const до уровня σ_1 и на этом уровне напряжения испытывают в течение $n_1 = n_0 = 10^4$ циклов и т. д. до наступления ПС.

В результате проведенного эксперимента определяют количество ступеней i и число циклов на последней ступени n_k нагружения. Режимы нагружения и результаты испытания изображают на рис. 4.4. Видно, что ПС наступило на 9-й ступени нагружения по истечении $5 \cdot 10^3$ циклов.

Расчет долговечности $N_{\sigma i}$ для каждой кривой ведут, используя формулу (4.11). Произведя расчет $N_{\sigma i}$, подсчитывают значения $\Sigma n_i / N_{\sigma i}$ для каждой кривой (результаты вычислений представлены в табл. 4.2). На основании полученных данных строят график в координатах $\lg(\Sigma n_i / N_{\sigma i}) - \sigma_{-1}$ (рис. 4.5), по которому производят оценку медианы предела выносливости $\bar{\sigma}_{-1} = 227$ МПа, соответствующую условию (4.3) или $\lg(\Sigma n_i / N_{\sigma i}) = 0$.

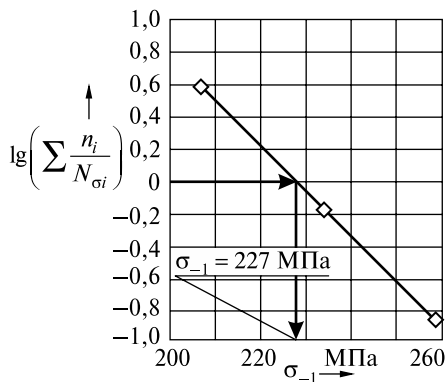


Рис. 4.5. Определение значения искомого предела выносливости по методу Локати

Таблица 4.2

Расчет сумм относительных долговечностей по условным кривым усталости

| σ_a , МПа | Число циклов $n \cdot 10^3$ | 1-я кривая, $\sigma_{-1} = 259$ МПа | | 2-я кривая, $\sigma_{-1} = 233$ МПа | | 3-я кривая, $\sigma_{-1} = 207$ МПа | |
|---------------------|-----------------------------------|--|--------------|--|--------------|--|--------------|
| | | N_σ , циклов | n/N_σ | N_σ , циклов | n/N_σ | N_σ , циклов | n/N_σ |
| 225,0 | 10 | ∞ | 0 | ∞ | 0 | $2,66 \cdot 10^6$ | 0,004 |
| 247,5 | 10 | ∞ | 0 | $5,15 \cdot 10^6$ | 0,002 | $9,34 \cdot 10^5$ | 0,011 |
| 270,0 | 10 | $9,49 \cdot 10^6$ | 0,001 | $1,98 \cdot 10^6$ | 0,005 | $3,59 \cdot 10^5$ | 0,028 |
| 292,5 | 10 | $3,94 \cdot 10^6$ | 0,003 | $8,19 \cdot 10^5$ | 0,012 | $1,49 \cdot 10^5$ | 0,067 |
| 315,0 | 10 | $1,74 \cdot 10^6$ | 0,006 | $3,63 \cdot 10^5$ | 0,028 | $6,58 \cdot 10^4$ | 0,152 |
| 337,5 | 10 | $8,15 \cdot 10^5$ | 0,012 | $1,70 \cdot 10^5$ | 0,059 | $3,08 \cdot 10^4$ | 0,325 |
| 360,0 | 10 | $4,01 \cdot 10^5$ | 0,025 | $8,35 \cdot 10^4$ | 0,120 | $1,51 \cdot 10^4$ | 0,660 |
| 382,5 | 10 | $2,06 \cdot 10^5$ | 0,049 | $4,29 \cdot 10^4$ | 0,233 | $7,77 \cdot 10^3$ | 1,286 |
| 405,0 | 5 | $1,10 \cdot 10^5$ | 0,046 | $2,29 \cdot 10^4$ | 0,219 | $4,15 \cdot 10^3$ | 1,206 |
| Σ | — | — | 0,141 | — | 0,678 | — | 3,739 |

Таблица 4.3

Определение характерных точек для построения
левой ветви истинной кривой усталости

| N_σ , цикл | σ_a , МПа, для искомой кривой |
|-------------------|---|
| 10^3 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^3 + 2,993 = 2,72 \Rightarrow \sigma_a = 525$ |
| 10^4 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^4 + 2,993 = 2,629 \Rightarrow \sigma_a = 426$ |
| 10^5 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^5 + 2,993 = 2,538 \Rightarrow \sigma_a = 345$ |
| 10^6 | $\lg \sigma_a = -0,091 \cdot \lg 10^6 + 2,993 = 2,447 \Rightarrow \sigma_a = 280$ |
| 10^7 | 227 |

Для построения искомой кривой усталости определяют коэффициент b и характерные точки для левой ветви, используя уравнение (2.4): $b = \lg 227 + 0,091 \times \lg 10^7 = 2,993$. Результат расчета представляют в виде табл. 4.3. По полученным данным строят уточненную кривую усталости (см. рис. 4.4), из которой определяют основные характеристики сопротивления механической усталости: $\sigma_{-1} = 227$ МПа; $N_{G\sigma} = 10^7$ циклов; $m_\sigma = 11$.

4.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

4.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 4.1.

4.2.3. Провести под руководством преподавателя испытание образца при ступенчато возрастающей нагрузке по методу Локати до разрушения. Выполнить анализ результатов испытаний.

4.2.4. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ и защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие методы ускоренной оценки предела выносливости вы знаете? Опишите их.

2. В чем заключается метод Локати, на какой гипотезе он основан?

3. Опишите процедуру обработки данных при реализации метода Локати.

Лабораторная работа № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Экспериментально определить характеристики трения и изнашивания при качении (контактной усталости) исследуемого материала.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 31–38; 11: Т.1, с. 83–88, 101–120, 159, 213, 214, 218].

5.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

5.1.1. Схема испытаний на контактную усталость. Цикл напряжений

Схема испытания на контактную усталость представлена на рис. 5.1.

Цилиндрический образец *1* закреплен в шпинделе *2* и вращается с угловой скоростью ω_1 . К его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N вращающийся ролик *3*. Основные размеры образца (тела) и контробразца (контртела), которые образуют пару трения, представлены на рис. 5.1.

В результате сжатия образца и контробразца контактной нагрузкой F_N образуется площадка контакта. Напряжения по данной площадке распределяются по закону полуэллипса (рис. 5.2, *а*). При этом каждая точка поверхности испытывает знакопеременный цикл напряжения. При вхождении в зону контакта напряжения начинают возрастать, в центре контактной площадки доходят до максимума, а затем уменьшаются до нуля. Таким образом, в зоне контакта образца с роликом возникают повторно-переменные контактные напряжения, хотя контактная нагрузка F_N при этом остается постоянной (рис. 5.2, *б*).

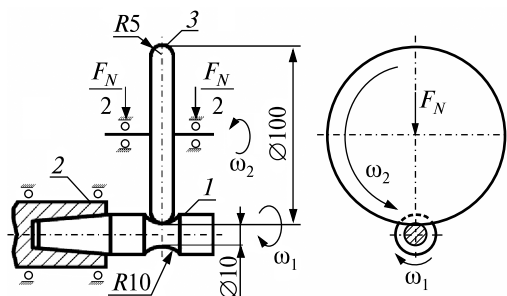


Рис. 5.1. Схема испытаний на контактную усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контробразец
(ролик с профильным радиусом)

Максимальные контактные напряжения p_0 в центре контактной площадки (согласно Р 50-54-30-87) определяют по формуле

$$p_0 = 0,365n_{\sigma} \left[F_N (\Sigma\rho/\eta)^2 \right]^{1/3}, \quad (5.1)$$

где n_{σ} – коэффициент, определяемый по Р 50-54-30-87 в зависимости от величины Ω , которую рассчитывают по формуле

$$\Omega = ((\rho_{11} - \rho_{12}) + (\rho_{21} - \rho_{22}))/\Sigma\rho, \quad (5.2)$$

где F_N – контактная нагрузка, Н; $\Sigma\rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}$ – сумма главной кривизны поверхностей соприкасающихся тел в точке первоначального контакта; $\rho = 1/R$ – главная кривизна поверхности. Она счи-

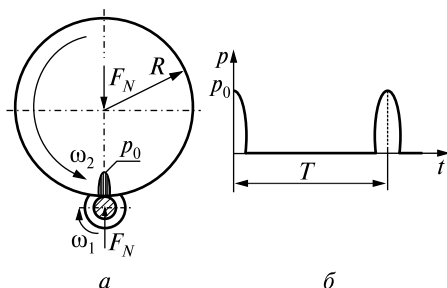


Рис. 5.2. Сечение испытываемой пары трения (а) и цикл изменения контактных напряжений p во времени t (б) при испытаниях на контактную усталость

тается положительной, если поверхность выпуклая, и отрицательной, если вогнутая; $\rho_{11} = 1/R_{11}$ и $\rho_{12} = 1/R_{12}$ – главная кривизна контробразца (рис. 5.3) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; $\rho_{21} = 1/R_{21}$ и $\rho_{22} = 1/R_{22}$ – главная кривизна образца (рис. 5.3) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; η – коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел

$$\eta = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2, \quad (5.3)$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов образца и контробразца; E_1 и E_2 – модули нормальной упругости материалов образца и контробразца, МПа.

Если образец и контробразец изготовлены из стали ($\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа), то формула (5.1) примет вид

$$p_0 = 837,5 n_\sigma F_N^{1/3} (\Sigma \rho)^{2/3}. \quad (5.4)$$

Для заданных размеров образца ($R_{21} = 5$ мм; $R_{22} = 10$ мм) и контробразца ($R_{11} = 50$ мм; $R_{12} = 5$ мм)

$$p_0 = 378,85 F_N^{1/3}. \quad (5.5)$$

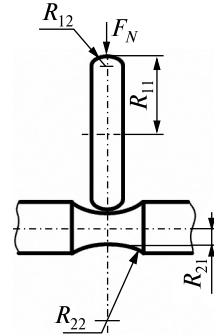


Рис. 5.3. К расчету напряжений в зоне контакта образца и контробразца

5.1.2. Построение кривой контактной усталости и определение ее параметров

Для определения характеристик сопротивления контактной усталости необходимо построить кривую контактной усталости (зависимость между максимальным контактным напряжением в центре контактной площадки и количеством циклов до достижения ПС испытываемой пары трения). Ее строят либо в двойных логарифмических координатах $\lg p_0 - \lg N_p$, либо в полулогарифмических координатах $p_0 - \lg N_p$ (рис. 5.4).

Для построения кривой контактной усталости в многоцикловой области испытывают не менее 12 одинаковых пар трения из исследуемого материала [7]. Испытания ведут непрерывно до достижения ПС или до N_B . Критериями (k_p) ПС в данном случае служат: критическая плотность ямок выкрашивания на поверхности трения; предельный износ (предельное сближение осей) образца и контробразца; образование

поверхностных волн пластичности; недопустимая вибрация в системе «образаец – контробразец». В интервале напряжений $0,95-1,05$ от предела контактной выносливости (p_f) испытывают не менее трех пар трения, причем как минимум две из них не должны достигать ПС до N_B (Р 50-54-30-87). N_B для определения p_f принимается 10^7 циклов (для металлов и сплавов с твердостью $HB \leq 200$, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости), $5 \cdot 10^7$ циклов (для металлов и сплавов с твердостью $HRC \leq 40$, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости), 10^8 циклов (для металлов и сплавов с твердостью $HRC > 40$, имеющих горизонтальный участок на кривой контактной усталости) или $2 \cdot 10^8 - 5 \cdot 10^8$ циклов (для металлов и сплавов, не имеющих горизонтального участка на кривой контактной усталости).

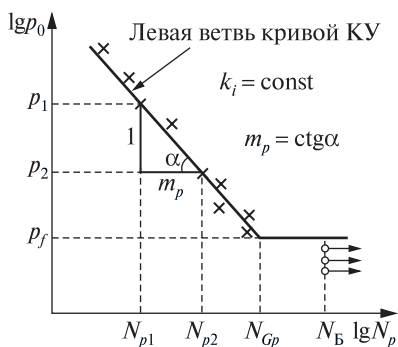


Рис. 5.4. Схема кривой контактной усталости

В пределах намеченной серии испытаний схема нагружения должна быть одинаковой, а частота циклов нагружения – постоянной. Принцип построения кривой контактной усталости такой же, как и при построении кривой механической усталости, отличие лишь в критериях достижения парой трения ПС. Поэтому, прежде чем приступать к испытаниям, необходимо выбрать один из критериев достижения ПС ($k_i = \text{const}$), одинаковый для всех испытываемых пар трения.

Из полученной кривой определяют следующие основные характеристики сопротивления контактной усталости: **предел контактной выносливости p_f** (максимальное контактное напряжение, которое может выдержать пара трения, не достигая ПС до N_B); **абсцисса точки перелома кривой контактной усталости N_{Gr}** ; **показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости m_p** .

Уравнение кривой контактной усталости имеет следующий вид:

$$p_0^{m_p} N_p = C_p = \text{const} = p_f^{m_p} N_{Gp}, \quad (5.6)$$

где C_p – константа сопротивления контактной усталости.

5.1.3. Метод многоступенчатого нагружения

Для экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала при контактной усталости в широком диапазоне изменения контактных напряжений используют **ускоренный метод многоступенчатого нагружения**.

Сущность метода пояснена на рис. 5.5, где показана **программа ступенчатого нагружения** – закон изменения во времени максимального контактного напряжения в центре контактной площадки p_0 .

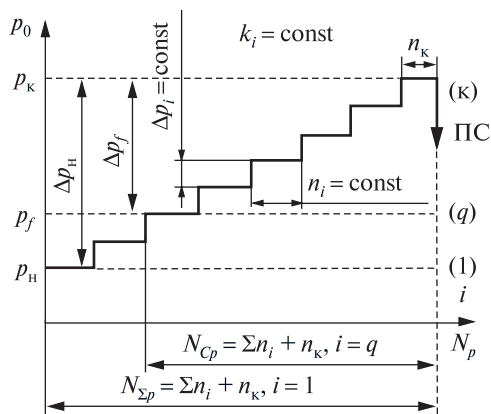


Рис. 5.5. Программа ступенчатого нагружения и основные характеристики сопротивления контактной усталости

Для реализации данной программы предварительно задают: критерий достижения ПС ($k_i = \text{const}$), начальный уровень напряжений p_H ; степень приращения напряжений $\Delta p_i = \text{const}$; продолжительность ступени нагружения $n_i = \text{const}$. Испытания проводят непрерывно, до достижения ПС по выбранному критерию. По результатам испытаний определяют следующие характеристики сопротивления контактной усталости: **предельное контактное напряжение p_K** ; **интервал нагруженности**

$\Delta p_H = p_K - p_H$; **интервал предельных контактных напряжений** $\Delta p_f = p_K - p_f$; **суммарная долговечность** $N_{\Sigma p} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i + n_k$ (**суммарная наработка**); **суммарная живучесть** $N_{Cp} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i + n_k$.

Для определения характеристик сопротивления контактной усталости рекомендуется проводить испытания трех одинаковых пар трения из исследуемых материалов с последующим усреднением результатов. В целях экономии времени допускается испытание одной пары трения. Получая характеристики сопротивления контактной усталости по выбранной программе, можно в течение короткого времени произвести выбор материала или технологии, которые обеспечивают необходимое сопротивление контактной усталости.

5.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

5.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы. Повторить правила техники безопасности.

5.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 5.1.

5.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание на контактную усталость одной пары трения методом многоступенчатого нагружения.

5.2.4. Выполнить обработку и анализ результатов испытания.

5.2.5. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ. Результаты испытания представить в виде графиков зависимостей $\psi(F_N)$ и $\psi(p_0)$. Схематически изобразить характер повреждения поверхности образца после проведения испытаний. Защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему повреждения при трении качения считают усталостными?
2. Дайте определение термину «контактная усталость».
3. Назовите объект испытания при контактной усталости.
4. Каким образом определяются максимальные контактные напряжения в центре контактной площадки образца и контрообразца?
5. Как определяют максимальные контактные напряжения для испытываемой пары трения?
6. Расскажите, как производятся испытания на контактную усталость.
7. Что такое кривая контактной усталости?

8. Как производится построение кривой контактной усталости для исследуемого сочетания материалов?

9. Чему равно базовое число циклов при испытаниях на контактную усталость?

10. Перечислите критерии достижения ПС при контактной усталости.

11. Назовите основные параметры кривой контактной усталости — основные характеристики сопротивления контактной усталости.

12. Запишите уравнение кривой контактной усталости.

13. Что такое предел контактной выносливости?

14. Что означают параметры N_{Gr} и m_p ?

15. В чем состоит сущность метода многоступенчатого нагружения при контактной усталости?

16. Опишите программу ускоренных испытаний при контактной усталости.

17. Какие характеристики сопротивления контактной усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения?

18. В чем отличие интервала нагруженности от интервала предельных контактных напряжений?

19. Как могут быть использованы результаты испытаний, полученные с использованием метода многоступенчатого нагружения при контактной усталости?

20. Каковы достоинства и недостатки метода многоступенчатого нагружения?

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Экспериментально определить характеристики трения и изнашивания исследуемого материала при контактно-механической усталости в случае реализации обратного эффекта.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [4; 8, с. 21–34, 39–40, 51–64; 10, с. 20–24, 27, 34–50; 11: Т. 1, с. 138–140, 146, 217–223; Т. 2, с. 153, 157–159].

6.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

6.1.1. Схема испытаний на контактно-механическую усталость. Цикл напряжений

При испытаниях на механическую усталость объект испытания – элемент конструкции, на контактную усталость – пара трения, а при испытаниях на контактно-механическую усталость – *трибофатическая (силовая) система (ТФС)*. Схема испытаний на контактно-механическую усталость и основные размеры образца и контрообразца, образующих ТФС, представлены на рис. 6.1. Согласно данной схеме цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (направлена вниз), а к его рабочей зоне ($d = 10$ мм) под действием контактной нагрузки F_N прижимается вращающийся ролик 3. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 .

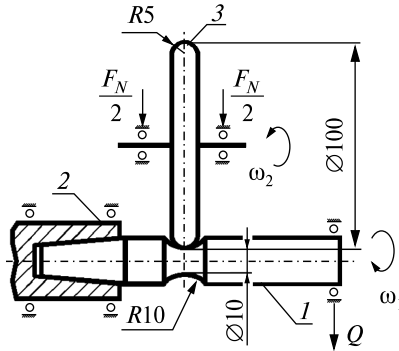


Рис. 6.1. Схема испытаний на контактно-механическую усталость:
1 – образец; 2 – шпindelь; 3 – контролбразец (ролик с профильным радиусом)

Особенностью проводимых испытаний является то, что в опасном сечении образца возникают напряжения от действия контактной F_N и изгибающей Q нагрузок. Результатом является комплексное повреждение – *излом плюс выкрашивание, изнашивание, пластические деформации*.

Цикл изменения во времени t напряжений σ и p , возникающих одновременно в опасном сечении образца и в центре контактной площадки при приложении Q и F_N , представлен на рис. 6.2.

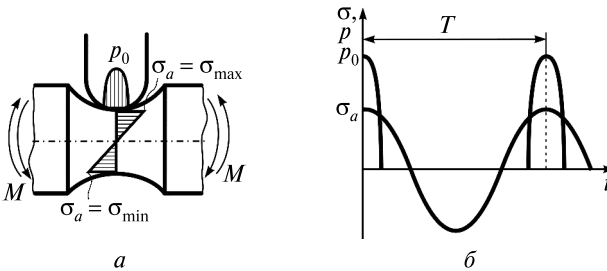


Рис. 6.2. Напряжения, действующие в зоне контакта испытуемой ТФС (а), и цикл изменения напряжений σ и p во времени t (б) при испытаниях на контактно-механическую усталость

Видно, что в центре контактной площадки ТФС одновременно возникают максимальные напряжения σ_a и p_0 (см. рис. 6.2).

6.1.2. Построение кривой контактно-механической усталости и определение ее параметров

Для определения характеристик сопротивления контактно-механической усталости необходимо построить кривую усталости. Уже известно, что при контактно-механической усталости на ТФС оказывают действие два напряжения, поэтому необходимо получить кривую, которая характеризует зависимость двух напряжений от количества циклов. Построить аналогичную кривую усталости (см. лаб. работу № 2, 5) в двумерном виде в данном случае нельзя. В связи с этим для построения кривой контактно-механической усталости в многоцикловой области строят либо *кривую механической усталости по параметру максимальных контактных напряжений* $N(\sigma_a, p_0 = \text{const})$ (рис. 6.3, а) — *прямой эффект* (ПЭ), либо *кривую контактной усталости по параметру амплитуды напряжений цикла* $N(p_0, \sigma_a = \text{const})$ (рис. 6.3, б) — *обратный эффект* (ОЭ). ПЭ — это влияние процессов и условий трения и изнашивания при качении (определяются уровнем p_0) на изменение характеристик сопротивления механической усталости ТФС и/или ее элементов. ОЭ — это влияние повторно-переменных напряжений (деформаций) (определяются уровнем σ_a) на изменение характеристик трения и изнашивания при качении ТФС и/или ее элементов.

Кривую механической усталости по параметру p_0 строят в полулогарифмических координатах $\sigma_a - \lg N_{сп}$ (см. рис. 6.3, а) или в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N_{сп}$. Кривую контактной усталости по параметру σ_a строят в полулогарифмических координатах $p_0 - \lg N_{р\sigma}$ (см. рис. 6.3, б) либо в двойных логарифмических координатах

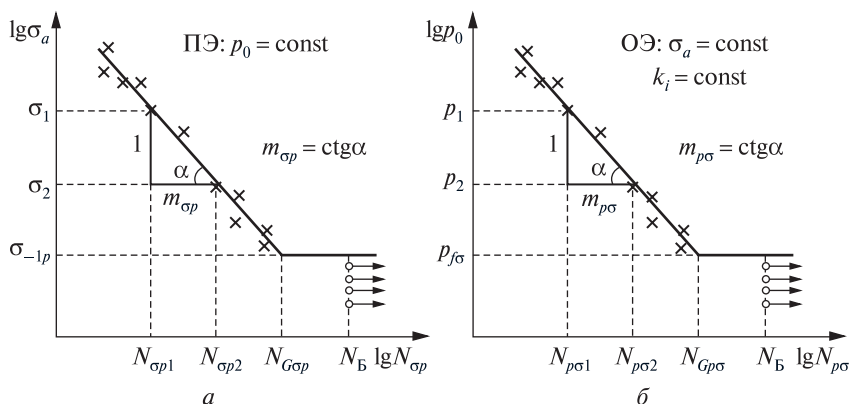


Рис. 6.3. Схемы кривых контактно-механической усталости: а — прямой эффект; б — обратный эффект

$\lg p_0 - \lg N_{p\sigma}$. Для построения каждой кривой контактно-механической усталости испытывают не менее 15 одинаковых ТФС. Испытания проводят непрерывно до наступления ПС или до достижения N_B .

При реализации ПЭ *основным критерием ПС* является излом образца, а *сопутствующими* – выкрашивание, износ, пластические деформации, вибрации; при ОЭ *главными критериями ПС* являются предельный износ, предельные пластические деформации, предельное выкрашивание, предельные вибрации, а *сопутствующий критерий* – излом образца. N_B составляет $2 \cdot 10^7$ циклов. В пределах намеченной серии испытаний число ТФС, критерий ПС ($k_i = \text{const}$) и схема нагружения должны быть одинаковыми, а частота циклов нагружения – постоянной. В интервале напряжений от 0,95 до 1,05 значения предела контактно-механической выносливости испытывают не менее четырех ТФС, как минимум два из них должны быть испытаны до N_B без достижения ПС.

Из кривой контактно-механической усталости при ПЭ определяют следующие основные характеристики: *предел выносливости σ_{-1p} по параметру максимальных контактных напряжений*; *абсцисса точки перелома кривой механической усталости*, построенная по параметру максимальных контактных напряжений $N_{G\sigma p}$; *показатель наклона левой ветви кривой механической усталости*, построенный по параметру максимальных контактных напряжений $m_{\sigma p}$. Из кривой контактно-механической усталости при ОЭ определяют: *предел контактной выносливости $p_{f\sigma}$ по параметру амплитуды напряжений цикла*; *абсциссу точки перелома кривой контактной усталости*, построенной по параметру амплитуды напряжений цикл $N_{Gp\sigma}$; *показатель наклона левой ветви кривой контактной усталости*, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла $m_{p\sigma}$.

Уравнение кривой контактно-механической усталости при ПЭ:

$$\sigma_p^{m_{\sigma p}} N_{\sigma p} = C_{\sigma p} = \text{const} = \sigma_{-1p}^{m_{\sigma p}} N_{G\sigma p};$$

при ОЭ:

$$p_{f\sigma}^{m_{p\sigma}} N_{p\sigma} = C_{p\sigma} = \text{const} = p_{f\sigma}^{m_{p\sigma}} N_{Gp\sigma},$$

где $C_{\sigma p}$ и $C_{p\sigma}$ – константы сопротивления контактно-механической усталости.

6.1.3. Метод многоступенчатого нагружения

Для экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала при контактно-механической усталости в широком диапазоне изменения определяющих параметров – контактных и циклических напряжений – применяется

ускоренный метод многоступенчатого нагружения. Полученные с помощью данного метода характеристики могут использоваться: 1) при выборе конструкционных материалов для ТФС и обосновании конструктивно-технологических решений; 2) контроле качества металлопродукции; 3) расчетах на этапе проектирования ТФС; 4) сертификации ТФС по критерию износоусталостного повреждения; 5) конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям.

Сущность этого метода пояснена на рис. 6.4, где показана программа ступенчатого нагружения: ПЭ – закон изменения во времени амплитуды напряжений в центре контактной площадки σ_a при постоянном действии $p_0 = \text{const}$ (см. рис. 6.4, а); ОЭ – закон изменения во времени максимального контактного напряжения в центре контактной площадки p_0 при постоянном действии $\sigma_a = \text{const}$ (см. рис. 6.4, б).

При изучении ПЭ испытания проводят методом ступенчатого повышения σ_a при заданном значении $p_0 = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают: регламентируемый уровень p_0 ($p_0 = 0,8p_f$; $p_0 = 1,0p_f$; $p_0 = 1,2p_f$ либо $p_0 = 0$, где p_f определяется по ГОСТ 30754-2001); начальный уровень амплитуды изгибных напряжений σ_n ($\sigma_n = 0,4\sigma_{-1}$, где σ_{-1} определяется по ГОСТ 30754-2001); длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const; интервал приращения амплитуды изгибных напряжений $\Delta\sigma_i = 0,2\sigma_{-1} = \text{const}$.

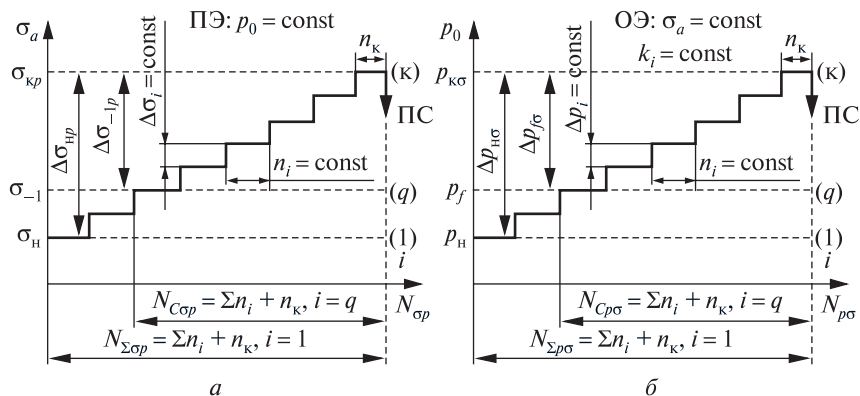


Рис. 6.4. Программа ступенчатого нагружения при контактно-механической усталости и основные характеристики сопротивления контактно-механической усталости: а – прямой эффект; б – обратный эффект

При изучении ОЭ испытания проводят методом ступенчатого повышения p_0 при заданном значении $\sigma_a = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают: критерий достижения ПС ($k_i = \text{const}$); регламентируемый уровень σ_a ($\sigma_a = 0,8\sigma_{-1}$; $\sigma_a = 1,0\sigma_{-1}$; $\sigma_a = 1,2\sigma_{-1}$ либо $\sigma_a = 0$, где σ_{-1} определяется по ГОСТ 30754-2001); начальный уровень максимальных контактных напряжений p_n ($p_n = 0,4p_f$, где p_f определяется по ГОСТ 30754-2001); длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const; интервал приращения максимальных контактных напряжений $\Delta p_i = 0,2p_f = \text{const}$.

Для двух методик начальные параметры могут задаваться в зависимости от поставленной задачи; число циклов на последней ступени нагружения (n_k) определяется достижением ПС; переход со ступени на ступень осуществляют без промежуточных пауз; испытания проводят непрерывно до наступления ПС.

По результатам испытаний определяют следующие основные характеристики сопротивления контактно-механической усталости: при ПЭ – **предельное напряжение при изгибе** σ_{kp} ; **интервал нагруженности** $\Delta\sigma_{np} = \sigma_{kp} - \sigma_n$; **интервал предельных напряжений при изгибе** $\Delta\sigma_{-1p} = \sigma_{kp} - \sigma_{-1}$; **суммарная долговечность (суммарная наработка)** $N_{\Sigma sp} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i (\sigma_a, p_0 = \text{const}) + n_k$ **суммарная живучесть**; при ОЭ – **предельное контактное напряжение** $p_{k\sigma}$; **интервал нагруженности** $\Delta p_{n\sigma} = p_{k\sigma} - p_n$; **интервал предельных контактных напряжений** $\Delta p_{f\sigma} = p_{k\sigma} - p_f$; **суммарная долговечность (суммарная наработка)** $N_{\Sigma p\sigma} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i (p_0, \sigma_a = \text{const}) + n_k$; **суммарная живучесть** $N_{Cp\sigma} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i (p_0, \sigma_a = \text{const}) + n_k$. Получая характеристики сопротивления контактно-механической усталости, по выбранной программе

**Характеристики долговечности и несущей способности,
полученные по результатам испытаний на контактно-механическую
усталость методом многоступенчатого нагружения**

| Характеристика свойств | Численное значение при реализации испытания в условиях | |
|--|--|-------------------|
| | прямого эффекта | обратного эффекта |
| $\sigma_{kp}, p_{k\sigma}$, МПа | 480 | 3200 |
| $\Delta\sigma_{np}, \Delta p_{n\sigma}$, МПа | 320 | 1800 |
| $\Delta\sigma_{-1p}, \Delta p_{f\sigma}$, МПа | 225 | 1440 |
| $N_{\Sigma sp}, N_{\Sigma p\sigma}$, цикл. | $8,04 \cdot 10^5$ | $1,0 \cdot 10^6$ |
| $N_{Csp}, N_{Cp\sigma}$, цикл. | $6,04 \cdot 10^5$ | $8,0 \cdot 10^5$ |

можно в течение короткого времени произвести выбор материала или технологии, которые обеспечивают необходимое сопротивление контактно-механической усталости.

В качестве примера на рис. 6.5 приведены результаты сравнительных испытаний методом многоступенчатого нагружения ТФС вал (сталь 45) – ролик (сталь 25ХГТ), которые проводились в условиях ПЭ ($p_0 = 3200 \text{ МПа} = \text{const}$, рис. 6.5, а) и в условиях ОЭ ($\sigma_a = 225 \text{ МПа} = \text{const}$, рис. 6.5, б). Численные значения полученных характеристик сопротивления контактно-механической усталости приведены в таблице (см. с. 79).

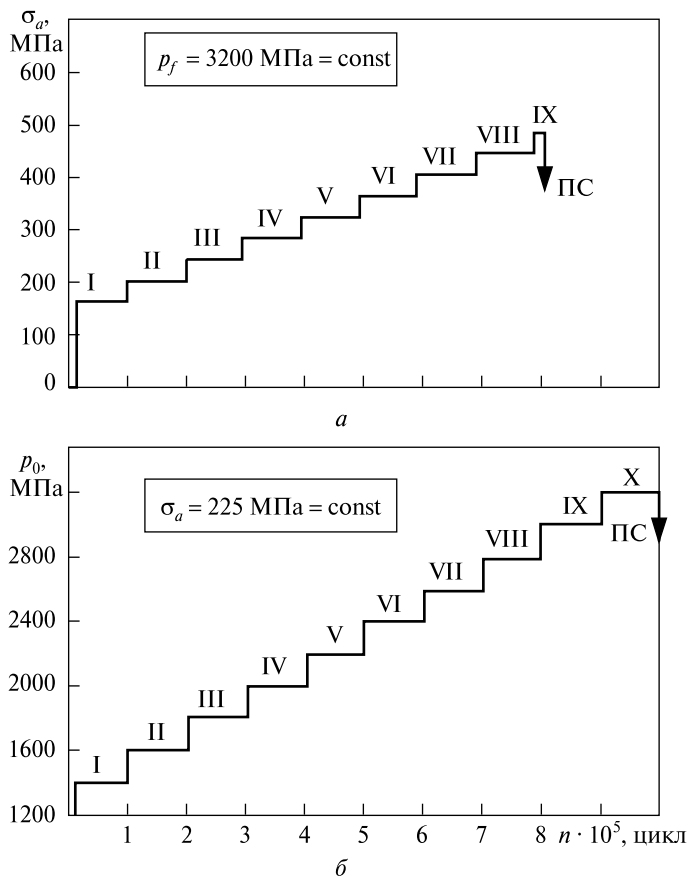


Рис. 6.5. Результаты испытаний на контактно-механическую усталость методом многоступенчатого нагружения при ПЭ (а) и при ОЭ (б)

6.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

6.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы. Повторить правила техники безопасности.

6.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 6.1.

6.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание на контактно-механическую усталость одной трибофатической (силовой) системы методом многоступенчатого нагружения.

6.2.4. Выполнить обработку и анализ результатов испытания.

6.2.5. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ. Результаты испытания представить в виде графиков зависимостей $\psi_{\sigma}(p_0)$ и $\psi_{\sigma}(n)$. Схематически изобразить характер повреждения поверхности образца после проведения испытаний. Защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое износоусталостные испытания и для чего они необходимы?

2. Дайте определение термину «контактно-механическая усталость».

3. Назовите объект испытания при контактно-механической усталости.

4. Расскажите, как производят испытания на контактно-механическую усталость при прямом и обратном эффектах.

5. Какие повреждения наблюдаются в ТФС после проведения испытаний на контактно-механическую усталость при прямом и обратном эффектах?

6. Что понимают под кривой контактно-механической усталости?

7. Как построить кривую контактно-механической усталости?

8. Дайте определение прямого и обратного эффектов при контактно-механической усталости.

9. Перечислите критерии достижения ПС при прямом и обратном эффектах.

10. Назовите основные параметры кривой контактно-механической усталости при прямом эффекте.

11. Назовите основные параметры кривой контактно-механической усталости при обратном эффекте.

12. Что такое σ_{-1p} и $p_{f\sigma}$?

13. Что такое параметры $m_{\sigma p}$ и $m_{p\sigma}$? По каким формулам они определяются?

14. Что такое $N_{G\sigma p}$ и $N_{Gp\sigma}$?

15. Напишите уравнение кривой контактно-механической усталости для прямого и обратного эффектов.

16. Для чего предназначен метод многоступенчатого нагружения при контактно-механической усталости?

17. В чем состоит процедура метода многоступенчатого нагружения при контактно-механической усталости?

18. Какие основные характеристики сопротивления контактно-механической усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения при прямом эффекте?

19. Какие основные характеристики сопротивления контактно-механической усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения при обратном эффекте?

20. Каковы достоинства и недостатки метода многоступенчатого нагружения?

Лабораторная работа № 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Экспериментально определить характеристики трения и изнашивания при скольжении (фрикционной усталости) исследуемого материала.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 39–44; 10, с. 26; 11: Т. 1, с. 67–83, 95–100, 138, 216, 217].

7.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

7.1.1. Схема испытаний на фрикционную усталость.

Цикл напряжений

Испытания на фрикционную усталость ведут по схеме, представленной на рис. 7.1, где также даны основные размеры образца и контробразца, образующих пару трения.

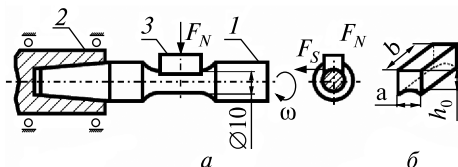


Рис. 7.1. Схема испытаний на фрикционную усталость:
а: 1 – образец, 2 – шпиндель, 3 – контробразец (частичный вкладыш); б: а – ширина, b – длина, h_0 – высота

Цилиндрический образец 1 закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω . К его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм под действием контактной нагрузки F_N прижимается закрепленный неподвижно контробразец 3 (частичный вкладыш). Частичный вкладыш прижимается к поверхности образца и в процессе испытания скользит по нему; так реализуется процесс трения скольжения. В направлении движения впереди контактной площадки материал образца испытывает сжимающие напряжения, а в зоне контакта и за контактной площадкой — растягивающие. Таким образом, при однократном проходе контробразца каждая точка образца подвергается двум знакопеременным циклам напряжений (рис. 7.2, а).

Отсюда следуют два важных вывода. *Во-первых*, хотя контактная нагрузка является статической (неизменной во времени: $F_N = \text{const}$), поверхностные слои материала в зоне трения деформируются циклически. При этом цикл деформаций оказывается наиболее опасным — знакопеременным. *Во-вторых*, наиболее опасные — растягивающие деформации — многократно превышают по величине сжимающие деформации, которые менее опасны для инициирования разрушения.

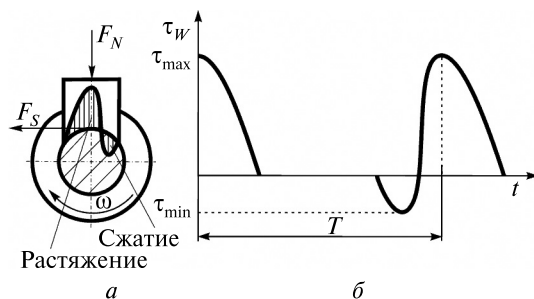


Рис. 7.2. Эпюра фрикционных напряжений τ , действующих в зоне контакта при трении скольжения (испытания на фрикционную усталость) (а), и цикл их изменения во времени t (б)

Общее заключение состоит в том, что процессы изнашивания обусловлены знакопеременными циклическими деформациями (напряжениями) при трении и, следовательно, разрушение поверхностных слоев материала в таких специфических условиях контактного взаимодействия имеет *усталостный характер*. В связи с этим повреждение и разрушение материала при трении скольжения называют фрикционной усталостью.

В процессе испытаний под действием контактной нагрузки F_N в зоне контакта образца с частичным вкладышем возникает контактное давление p_a (см. формулу (1.2)).

Так как реализуется процесс трения скольжения, то для его описания можно использовать закон Амонтона – Кулона:

$$F_S = f_S F_N, \quad (7.1)$$

где f_S – коэффициент трения скольжения; F_S – сила трения скольжения, Н.

При делении обеих частей уравнения (7.1) на величину A_a получают

$$F_S / A_a = f_S F_N / A_a = f_S p_a = \tau_w, \quad (7.2)$$

где τ_w – фрикционные напряжения (средняя удельная сила трения).

7.1.2. Построение кривой фрикционной усталости и определение ее параметров

Для определения характеристик сопротивления трению и изнашиванию при скольжении необходимо построить кривую фрикционной усталости (зависимость между фрикционными напряжениями τ_w и количеством циклов N_τ до наступления ПС). Ее строят в двойных логарифмических координатах $\lg \tau_w - \lg N_\tau$ или в в полулогарифмических координатах $\tau_w - \lg N_\tau$ (рис. 7.3), но с логарифмическими шкалами.

Для построения кривой фрикционной усталости в многоциклового области испытывают не менее 10 одинаковых пар трения из исследуемого материала. Испытания ведут непрерывно до достижения ПС или

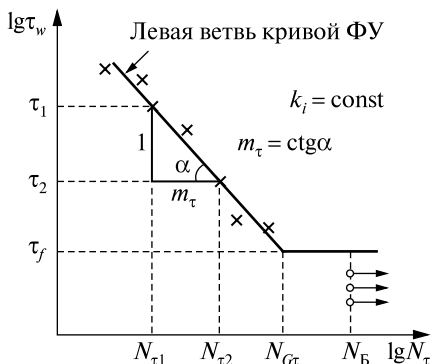


Рис. 7.3. Схема кривой фрикционной усталости

до N_B . Критериями (k_i) ПС в данном случае служат: *предельный износ контробразца* (металл-полимерная пара трения) *или образца и контробразца* (металл-металлическая пара трения); *недопустимая вибрация* (металл-металлическая пара трения); *недопустимая температура в зоне трения* (для металл-полимерной пары трения – *начало термодеструкции полимерного контробразца*). В интервале напряжений 0,95–1,05 от предела фрикционной выносливости (τ_f) испытывают не менее четырех пар трения, причем как минимум две из них не должны достигать ПС до N_B [13]. N_B для металл-металлической пары трения составляет 10^7 циклов, для металл-полимерной пары трения – $2 \cdot 10^7$ циклов.

В пределах намеченной серии испытаний схема нагружения должна быть одинаковой, а частота циклов нагружения – постоянной. Принцип построения кривой фрикционной усталости такой же, как и при построении кривой контактной усталости. Поэтому, прежде чем приступать к испытаниям, необходимо выбрать один из критериев достижения ПС ($k_i = \text{const}$), одинаковый для всех испытываемых пар трения.

Из полученной кривой определяют следующие основные характеристики сопротивления фрикционной усталости: *предел фрикционной выносливости* τ_f (*максимальное фрикционное напряжение, которое может выдержать пара трения, не достигая ПС до N_B*), *абсцисса точки перелома кривой фрикционной усталости* $N_{G\tau}$ и *показатель наклона левой ветви кривой фрикционной усталости* m_τ .

Уравнение кривой фрикционной усталости имеет следующий вид:

$$\tau_w^{m_\tau} N_\tau = C_\tau = \text{const} = \tau_f^{m_\tau} N_{G\tau}, \quad (7.3)$$

где C_τ – константа сопротивления фрикционной усталости.

7.1.3. Метод многоступенчатого нагружения

Для экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала при фрикционной усталости в широком диапазоне изменения фрикционных напряжений используют *ускоренный метод многоступенчатого нагружения*.

Сущность метода пояснена на рис. 7.4, где показана *программа ступенчатого нагружения* – закон изменения во времени максимальных фрикционных напряжений τ_w в центре контактной площадки.

Для реализации данной программы задают: критерий достижения ПС ($k_i = \text{const}$); начальный уровень фрикционных напряжений τ_n ; степень приращения фрикционных напряжений $\Delta\tau_i$; продолжительность ступени нагружения $n_i = \text{const}$. Испытания проводят непрерывно, до достижения ПС по выбранному критерию.

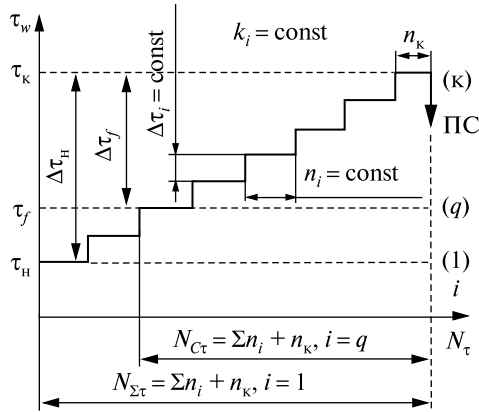


Рис. 7.4. Программа ступенчатого нагружения и основные характеристики сопротивления фрикционной усталости

По результатам испытаний определяют следующие характеристики сопротивления фрикционной усталости: **предельное фрикционное напряжение** τ_k ; **интервал нагруженности** $\Delta\tau_h = \tau_k - \tau_h$; **интервал предельных фрикционных напряжений** $\Delta\tau_f = \tau_k - \tau_f$; **суммарная долговечность (суммарная наработка)** $N_{\Sigma\tau} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i + n_k$; **суммарная живучесть** $N_{C\tau} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i + n_k$.

В процессе испытаний также измеряют массовую (I_m), объемную (I_V) или линейную (I_h) интенсивность изнашивания образца и/или контрообразца. Для металл-полимерной пары трения

$$I_h = \frac{(h_0 - h_i)}{L} = \frac{\Delta h}{2\pi r n}, \quad (7.4)$$

где h_0 – высота контрообразца перед началом испытаний, м; h_i – высота контрообразца после i -й ступени нагружения, м; Δh – толщина изношенного слоя, м; $L = 2\pi r n$ – путь трения, м; r – радиус стального образца, м; n – число циклов.

При расчете I_m и I_V в формулу (7.4) вместо Δh необходимо подставлять соответственно значения Δm (масса изношенного слоя) и ΔV (объем изношенного слоя).

Для определения характеристик сопротивления фрикционной усталости рекомендуется проводить испытания трех одинаковых пар трения из исследуемых материалов с последующим усреднением результатов. В целях экономии времени допускается испытание одной пары

трения. Получая характеристики сопротивления фрикционной усталости по выбранной программе, можно в течение короткого времени произвести выбор материала или технологии, которые обеспечивают необходимое сопротивление фрикционной усталости.

7.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы. Повторить правила техники безопасности.

7.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 7.1.

7.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание на фрикционную усталость одной пары трения методом многоступенчатого нагружения.

7.2.4. Выполнить обработку и анализ результатов испытания.

7.2.5. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ. Результаты испытания представить в виде графиков зависимостей $I_h(\tau_w)$ и $I_h(n)$. Схематически изобразить характер повреждения поверхности контробразца после проведения испытаний. Защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему повреждения при трении скольжения считают усталостными?
2. Дайте определение термину «фрикционная усталость».
3. Назовите объект испытания при фрикционной усталости.
4. Чем объект испытания при фрикционной усталости отличается от объекта испытаний при контактной усталости?
5. Как ведется расчет напряжений при фрикционной усталости?
6. Как производятся испытания на фрикционную усталость?
7. Что такое кривая фрикционной усталости?
8. Как производится построение кривой фрикционной усталости для исследуемого сочетания материалов?
9. Чему равно базовое количество циклов при испытаниях на фрикционную усталость?
10. Перечислите критерии достижения ПС при фрикционной усталости.
11. Назовите основные параметры кривой фрикционной усталости — основные характеристики сопротивления фрикционной усталости.
12. Запишите уравнение кривой фрикционной усталости.

13. Что такое предел фрикционной выносливости?
14. Что означают параметры $N_{G\tau}$ и m_τ ?
15. В чем состоит сущность метода многоступенчатого нагружения при фрикционной усталости?
16. Опишите программу ускоренных испытаний при фрикционной усталости.
17. Какие характеристики сопротивления фрикционной усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения?
18. Что такое I_h ? Какие еще виды интенсивности изнашивания известны?
19. Как можно использовать результаты испытаний, полученные с применением метода многоступенчатого нагружения при фрикционной усталости?
20. Каковы достоинства и недостатки метода многоступенчатого нагружения?

Лабораторная работа № 8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ

Цель работы. Экспериментально определить характеристики трения и изнашивания исследуемого материала при фрикционно-механической усталости в случае реализации обратного эффекта.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [8, с. 24–27, 40–51; 10, с. 20–24, 27, 51–70; 11: Т. 1, с. 138–140, 213–216; Т. 2, с. 154, 159–162].

8.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

8.1.1. Схема испытаний на фрикционно-механическую усталость. Цикл напряжений

При испытаниях на фрикционно-механическую усталость объектом испытания является ТФС. Схема испытаний на фрикционно-механическую усталость и основные размеры образца и контро образца, образующих ТФС, представлены на рис. 8.1.

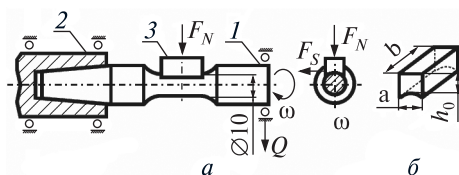


Рис. 8.1. Схема испытаний на фрикционно-механическую усталость
а: 1 – образец, 2 – шпиндель, 3 – контро образец (частичный вкладыш); б: а – ширина, б – длина, h_0 – высота

Согласно данной схеме цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (направлена вниз). К его рабочей зоне ($d = 10$ мм) под действием контактной нагрузки F_N прижимается закрепленный неподвижно контробразец 3 (частичный вкладыш). Особенностью проводимых испытаний является то, что в опасном сечении образца возникают напряжения от одновременного действия нагрузок F_N и Q . В результате в ТФС возникает комплексное повреждение – *повышение температуры в зоне трения, износ полимерного контробразца* (при испытании металл-полимерной ТФС), *одновременный износ образца и контробразца, повышение вибрации и температуры в зоне трения* (при испытании металл-металлической ТФС) и *излом* образца.

Цикл изменения во времени t напряжений σ и τ_w в центре контактной площадки при приложении F_N и Q представлен на рис. 8.2.

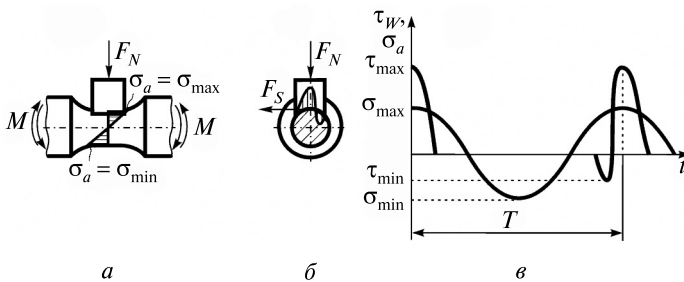


Рис. 8.2. Эпюры действующих в зоне контакта изгибных напряжений в образце (а) и фрикционных напряжений в контробразце (б), цикл изменения напряжений σ и τ во времени t (в) при испытаниях на фрикционно-механическую усталость

Из рис. 8.2, в видно, что в центре контактной площадки ТФС одновременно возникают максимальные напряжения σ_a и τ_{\max} .

8.1.2. Построение кривой фрикционно-механической усталости и определение ее параметров

Для определения характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости необходимо построить кривую фрикционно-механической усталости. Как и при контактно-механической усталости, для построения кривой фрикционно-механической усталости в много-

цикловой области строят либо **кривую механической усталости по параметру фрикционных напряжений** $N(\sigma_a, \tau_w = \text{const})$ (рис. 8.3, а) – ПЭ (влияние процессов и условий трения и изнашивания при скольжении (определяемых уровнем τ_w) на изменение характеристик сопротивления механической усталости ТФС и/или ее элементов), либо **кривую фрикционной усталости по параметру амплитуды напряжений цикла** $N(\tau_w, \sigma_a = \text{const})$ (рис. 8.3, б) – ОЭ (влияние повторно-переменных напряжений (деформаций) (определяемых уровнем σ_a) на изменение характеристик трения и изнашивания при скольжении ТФС и/или ее элементов).

Кривую механической усталости по параметру τ_w строят в полулогарифмических координатах $\sigma_a - \lg N_{\sigma\tau}$ (см. рис. 8.3, а) или в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N_{\sigma\tau}$. Кривую фрикционной усталости по параметру σ_a строят в полулогарифмических координатах $\tau_w - \lg N_{\tau\sigma}$ (см. рис. 8.3, б) либо в двойных логарифмических координатах $\lg \tau_w - \lg N_{\tau\sigma}$. Для построения каждой кривой фрикционно-механической усталости испытывают не менее 10 одинаковых ТФС. Испытания проводят непрерывно до наступления ПС или до достижения N_B .

При реализации ПЭ **основным критерием ПС** является излом образца, а **сопутствующими** – начало термодеструкции полимерного контробразца или его предельный износ (при испытании металл-полимерной ТФС); предельный износ образца и/или контробразца, недопустимые вибрации и температура в зоне трения (при испытании металл-металлической ТФС). При реализации ОЭ **главными критериями ПС**

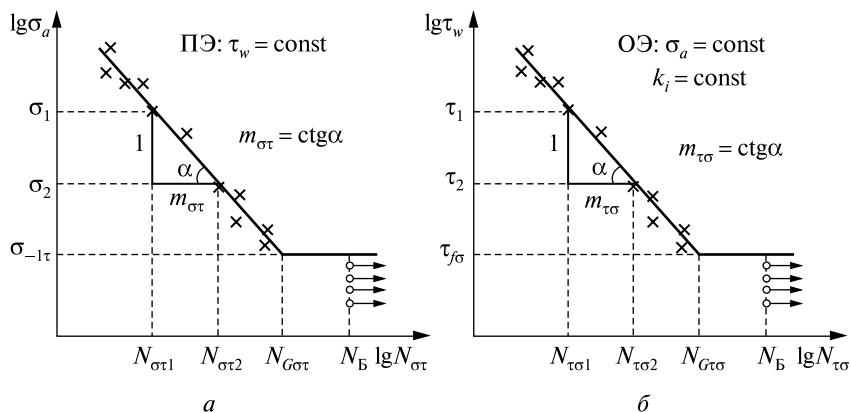


Рис. 8.3. Схемы кривых фрикционно-механической усталости:
а – прямой эффект; б – обратный эффект

являются: начало термодеструкции полимерного контробразца или его предельный износ (при испытании металл-полимерной ТФС); предельный износ образца и/или контробразца, недопустимые вибрации и температура в зоне трения (при испытании металл-металлической ТФС), а *сопутствующий критерий* – излом образца. N_B составляет $2 \cdot 10^7$ циклов для металл-полимерной ТФС и 10^7 циклов для металл-металлической ТФС. В пределах намеченной серии испытаний число ТФС, критерий ПС ($k_i = \text{const}$) и схема нагружения должны быть одинаковыми, а частота циклов нагружения – постоянной. В интервале напряжений от 0,95 до 1,05 значения предела фрикционно-механической выносливости испытывают не менее четырех ТФС, как минимум два из них должны быть испытаны до N_B без достижения ПС.

Из кривой фрикционно-механической усталости при ПЭ определяют следующие основные характеристики: *предел выносливости* $\sigma_{-1\tau}$ по параметру фрикционных напряжений; *абсцисса точки перелома кривой механической усталости*, построенной по параметру фрикционных напряжений $N_{G\sigma\tau}$; *показатель наклона левой ветви кривой механической усталости*, построенной по параметру фрикционных напряжений $m_{\sigma\tau}$. Из кривой фрикционно-механической усталости при ОЭ определяют: *предел фрикционной выносливости* $\tau_{f\sigma}$ по параметру амплитуды напряжений цикла; *абсциссу точки перелома кривой фрикционной усталости*, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла $N_{G\tau\sigma}$; *показатель наклона левой ветви кривой фрикционной усталости*, построенной по параметру амплитуды напряжений цикла $m_{\tau\sigma}$.

Уравнение кривой фрикционно-механической усталости при ПЭ:

$$\sigma_{\tau}^{m_{\sigma\tau}} N_{\sigma\tau} = C_{\sigma\tau} = \text{const} = \sigma_{-1\tau}^{m_{\sigma\tau}} N_{G\sigma\tau};$$

при ОЭ:

$$\tau_{\sigma}^{m_{\tau\sigma}} N_{\tau\sigma} = C_{\tau\sigma} = \text{const} = \tau_{f\sigma}^{m_{\tau\sigma}} N_{G\tau\sigma},$$

где $C_{\sigma\tau}$ и $C_{\tau\sigma}$ – константы сопротивления фрикционно-механической усталости.

8.1.3. Метод многоступенчатого нагружения

Для экспериментального определения за короткий период времени характеристик работоспособности материала при фрикционно-механической усталости в широком диапазоне изменения определяющих параметров – фрикционных и циклических напряжений – используется

ускоренный метод многоступенчатого нагружения. Полученные с помощью данного метода характеристики могут использоваться: 1) при выборе конструкционных материалов для ТФС и обосновании конструктивно-технологических решений; 2) контроле качества металлопродукции; 3) расчетах на этапе проектирования ТФС, работающих в условиях фрикционно-механической усталости; 4) сертификации ТФС по критерию износоусталостного повреждения; 5) конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости.

Сущность этого метода пояснена на рис. 8.4, где показана программа ступенчатого нагружения: ПЭ – закон изменения во времени амплитуды напряжений σ_a при постоянном значении фрикционных напряжений $\tau_w = \text{const}$ (см. рис. 8.4, а); ОЭ – закон изменения во времени фрикционных напряжений τ_w при постоянном значении амплитуды напряжений $\sigma_a = \text{const}$ (см. рис. 8.4, б).

При изучении ПЭ испытания проводят методом ступенчатого повышения σ_a при заданном значении $\tau_w = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают начальный уровень амплитуды изгибных напряжений σ_n ; длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const; интервал приращения амплитуды изгибных напряжений $\Delta\sigma_i = \text{const}$.

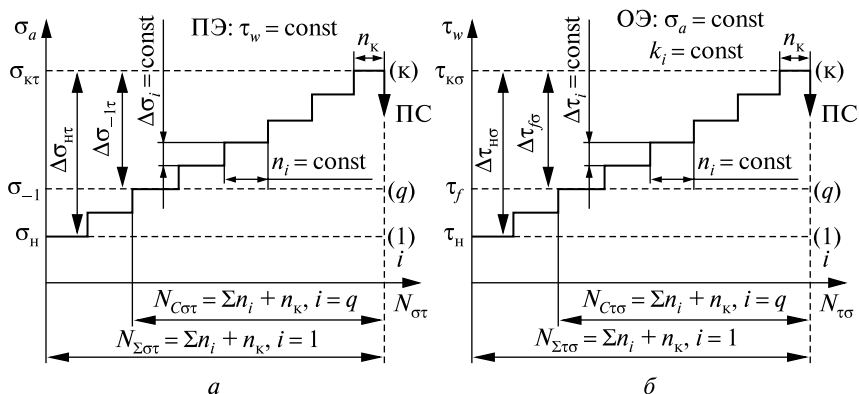


Рис. 8.4. Программа ступенчатого нагружения при фрикционно-механической усталости и основные характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости: а – прямой эффект; б – обратный эффект

При изучении ОЭ испытания проводят методом ступенчатого повышения τ_w при заданном значении $\sigma_a = \text{const}$ в течение всего времени испытания. Для реализации программы задают: критерий достижения ПС ($k_i = \text{const}$); начальный уровень фрикционных напряжений τ_w ; длительность ступени нагружения $n_i = 10^5$ циклов = const; интервал приращения фрикционных напряжений $\Delta\tau_i = \text{const}$.

Для двух методик начальные параметры устанавливаются в зависимости от поставленной задачи; число циклов на последней ступени нагружения (n_k) определяется достижением ПС; переход со ступени на ступень осуществляют без промежуточных пауз; испытания проводят непрерывно до наступления ПС.

По результатам испытаний определяют следующие основные характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости: при ПЭ – **предельное напряжение при изгибе** $\sigma_{кт}$; **интервал нагруженности**

$\Delta\sigma_{нт} = \sigma_{кт} - \sigma_n$; **интервал предельных напряжений при изгибе** $\Delta\sigma_{-1\tau} = \sigma_{кт} - \sigma_{-1}$; **суммарная долговечность (суммарная наработка)** $N_{\Sigma\sigma\tau} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i(\sigma_a, \tau_w = \text{const}) + n_k$;

суммарная живучесть $N_{C\sigma\tau} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i(\sigma_a, \tau_w = \text{const}) + n_k$;

при ОЭ – **предельное фрикционное напряжение** $\tau_{к\sigma}$; **интервал нагруженности**

$\Delta\tau_{н\sigma} = \tau_{к\sigma} - \tau_n$; **интервал предельных фрикционных напряжений** $\Delta\tau_{f\sigma} = \tau_{к\sigma} - \tau_f$;

суммарная долговечность (суммарная наработка) $N_{\Sigma\tau\sigma} = \sum_{i=1}^{k-1} n_i(\tau_w, \sigma_a = \text{const}) + n_k$;

суммарная живучесть $N_{C\tau\sigma} = \sum_{i=q}^{k-1} n_i(\tau_w, \sigma_a = \text{const}) + n_k$.

В процессе испытаний также можно измерять массовую ($I_{m\sigma}$, $I_{m\tau}$), объемную ($I_{V\sigma}$, $I_{V\tau}$) или линейную ($I_{h\sigma}$, $I_{h\tau}$) интенсивность изнашивания образца и/или контрообразца. Получая характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости по выбранной программе, можно в течение короткого времени произвести выбор материала или технологии, которые обеспечивают необходимое сопротивление фрикционно-механической усталости.

8.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

8.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы. Повторить правила техники безопасности.

8.2.2. Изучить краткие теоретические сведения, изложенные в п. 8.1.

8.2.3. Под руководством преподавателя провести испытание на фрикционно-механическую усталость одной пары трения методом многоступенчатого нагружения.

8.2.4. Выполнить обработку и анализ результатов испытания.

8.2.5. Оформить отчет по работе в журнале для лабораторных работ. Результаты испытания представить в виде графиков зависимостей $I_{h\sigma}(\tau_w)$ и $I_{h\sigma}(n)$. Схематически изобразить характер повреждения поверхности образца после проведения испытаний. Защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение термину «фрикционно-механическая усталость».

2. Назовите объект испытания при фрикционно-механической усталости.

3. Расскажите, как производят испытания на фрикционно-механическую усталость при прямом и обратном эффектах.

4. Какие повреждения наблюдаются в ТФС после проведения испытаний на фрикционно-механическую усталость при прямом и обратном эффектах?

5. Что понимают под кривой фрикционно-механической усталости?

6. Как построить кривую фрикционно-механической усталости?

7. Дайте определение прямого и обратного эффектов при фрикционно-механической усталости.

8. Перечислите критерии достижения ПС при прямом и обратном эффектах.

9. Назовите основные параметры кривой фрикционно-механической усталости при прямом эффекте.

10. Назовите основные параметры кривой фрикционно-механической усталости при обратном эффекте.

11. Что такое $\sigma_{-1\tau}$ и $\tau_{f\sigma}$?

12. Что такое параметры $m_{\sigma\tau}$ и $m_{\tau\sigma}$? По каким формулам они определяются?

13. Что такое $N_{G\sigma\tau}$ и $N_{G\tau\sigma}$?

14. Напишите уравнение кривой фрикционно-механической усталости для прямого и обратного эффектов.

15. Для чего предназначен метод многоступенчатого нагружения при фрикционно-механической усталости?

16. В чем состоит процедура метода многоступенчатого нагружения при фрикционно-механической усталости?

17. Какие основные характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения при прямом эффекте?

18. Какие основные характеристики сопротивления фрикционно-механической усталости определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения при обратном эффекте?

19. Какие виды интенсивностей изнашивания можно определить при испытании на фрикционно-механическую усталость?

20. Каковы достоинства и недостатки метода многоступенчатого нагружения?

Лабораторная работа № 9

АНАЛИЗ УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ ОБРАЗЦОВ

Цель работы. Провести анализ усталостных изломов лабораторных образцов.

Для выполнения работы рекомендуется изучить литературу [6, с. 23–30; 10, с. 26, 34–37, 43–44; 11: Т. 1, с. 17–42, 53–54, 216–218].

9.1. ПРИМЕР АНАЛИЗА УСТАЛОСТНЫХ ИЗЛОМОВ ОБРАЗЦОВ

Изучению усталостных изломов металлических образцов уделяется значительное внимание из-за важности получаемых в процессе исследования результатов. Характер излома металлического образца при

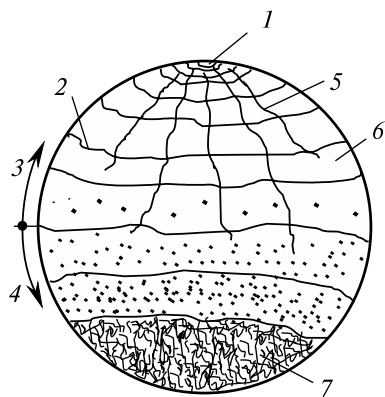


Рис. 9.1. Схема усталостного излома

его усталостном разрушении показан на рис. 9.1. Первичная усталостная трещина макроскопических размеров зарождается в очаге 1; здесь сопротивление материала разрушению оказывается наименьшим. По мере продвижения фронта 2 усталостной трещины вглубь на изломе обнаруживаются линии сброса 5, определяющие разные плоскости раздела 6. Зона 3 стабильного развития трещины переходит в зону 4 ее нестабильного роста, которая завершается мгновенным доломом (зона 7).

Усталостный излом образца с трещиной имеет свои отличительные чер-

ты: а) фокус разрушения (место зарождения трещины) всегда расположен со стороны надреза, поскольку трещина развивается от него; б) зона долома находится на противоположной от надреза стороне излома.

Для проведения лабораторной работы используются изломы образцов, испытанных в лабораторной работе № 3.

Измерение площадей характерных областей усталостных изломов образцов произвольно производится с помощью штангенциркуля.

Пусть F_0 – номинальная исходная площадь сечения образца, в котором развивается усталостная трещина; $F_{\text{л}}$ – площадь сечения, занятая надрезом; $F_{\text{д}}$ – площадь долома; $F_{\text{с}}$ и $F_{\text{н}}$ – площади сечения, занятые соответственно зоной стабильного развития трещины и зоной нестабильного развития трещины. Проанализируем влияние уровня номинальных напряжений на некоторые характеристики сопротивления усталости образцов с надрезом. Если F_0 – номинальная площадь сечения образца (до испытаний), F_l – площадь сечения образца, занятая трещиной длиной l , то $\omega_n = \frac{F_l}{F_0}$ есть мера локальной структурно-геометрической поврежденности образца усталостной трещиной за n циклов нагружения.

По излому можно определить следующие меры поврежденности:

$$\omega_{\text{нс}} = \frac{F_{\text{с}}}{F_0}; \quad (9.1)$$

$$\omega_{\text{нк}} = \frac{F_{\text{к}}}{F_0}; \quad (9.2)$$

$$\omega_{\text{нд}} = \frac{F_{\text{д}}}{F_0}, \omega_{\text{нн}} = \frac{F_{\text{н}}}{F_0}, \quad (9.3)$$

где $F_{\text{д}}$ – площадь излома; $F_{\text{к}} = F_{\text{с}} + F_{\text{н}}$ – площадь, занятая усталостной трещиной в момент разрушения.

Значения площадей характерных изломов, а также соответствующих мер поврежденности для испытанных в лабораторной работе № 3 образцов с надрезом приведены в таблице.

Вычислим значение коэффициента интенсивности напряжений для каждого образца. Для этого воспользуемся формулой

$$K_{\text{I}} = \sigma D^{1/2} Y, \quad (9.2)$$

где σ – номинальные напряжения в опасном сечении, МПа; D – диаметр рабочей части образца, м; Y – безразмерный коэффициент, зависящий от поврежденности образца трещиной ω .

**Расчет некоторых характеристик сопротивления усталости
образцов с надрезом $F_0 = 78,54 \text{ мм}^2$; $F_{10} = 1,47 \text{ мм}^2$**

| Характеристика | Численное значение характеристики для образца | | | |
|---|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 |
| σ , МПа | 255 | 332 | 357 | 449 |
| N , цикл | 325000 | 43100 | 25016 | 1100 |
| F_K , мм ² | 41,63 | 45,66 | 51,62 | 53,31 |
| F_D , мм ² | 36,91 | 32,88 | 26,92 | 25,23 |
| F_C , мм ² | 28,27 | 22,57 | 23,45 | 24,26 |
| F_H , мм ² | 13,36 | 23,09 | 28,17 | 29,05 |
| $\omega_{нк}$ | 0,530 | 0,581 | 0,657 | 0,678 |
| $\omega_{нд}$ | 0,470 | 0,419 | 0,343 | 0,321 |
| $\omega_{нс}$ | 0,360 | 0,287 | 0,299 | 0,308 |
| Y | 0,0678 | 0,0647 | 0,0652 | 0,0656 |
| K_I , МПа $\sqrt{\text{м}}$ | 1,22 | 1,52 | 1,65 | 2,08 |
| v_{FCP} , м ² /цикл | $1,28 \cdot 10^{-10}$ | $1,06 \cdot 10^{-9}$ | $2,06 \cdot 10^{-9}$ | $4,85 \cdot 10^{-8}$ |

Безразмерный коэффициент Y для цилиндрических образцов с односторонней трещиной определяют по выражению

$$Y = \left[1,102 \cdot 10^2 \frac{D^5}{L^2} (9,734 \cdot 10^{-8} D^4 \omega^2 + 6,043 \cdot 10^{-5} D^{2/3} \omega^{1/3}) \right]^{1/2}, \quad (9.3)$$

где D и L – соответственно диаметр рабочей части образца и расстояние от плоскости приложения нагрузки до плоскости опасного сечения образца, мм.

Следует заметить, что формула (9.2) для расчета коэффициента интенсивности напряжений получена с помощью линейной механики разрушений и может применяться до такого значения ω_n , при котором еще отсутствует пластическая деформация. При дальнейшем росте трещины расчет K_I производится с учетом соответствующей поправки на пластичность.

Поскольку стабильный рост трещины происходит при упругом деформировании металла, определим коэффициент интенсивности напряжений для $\omega = \omega_{нс}$ (см. таблицу).

Одной из важнейших характеристик сопротивления усталости материалов является скорость развития усталостной трещины. Для определения скорости роста трещины можно вместо длины трещины использовать ее площадь.

Тогда при увеличении площади сечения, занятого трещиной, на ΔF_l в течение $\Delta N_{ж}$ циклов скорости роста трещины за каждый бесконечно малый промежуток времени

$$v_F = \frac{dF_l}{dN_{ж}}. \quad (9.4)$$

Значения величины v_F в процессе роста трещины (при $\sigma = \text{const}$) изменятся. К моменту разрушения образца скорость развития трещины увеличивается по сравнению со своим начальным значением (в начале испытаний) на несколько порядков.

Так как в ходе лабораторных испытаний получить промежуточные данные для расчета v_F трудно, определим для каждого образца среднюю скорость роста трещины (см. таблицу):

$$v_{Fcp} = \frac{F_k}{N}. \quad (9.5)$$

По полученным значениям характеристик сопротивления усталости построим следующие зависимости: $\omega_{нк} - N_{ж}$, $\omega_{нд} - N_{ж}$, $\omega_{нс} - N_{ж}$, $\omega_{нс} - \sigma$, $\omega_{нс} - K_I$, $v_{Fcp} - N_{ж}$, $v_F^{cp} - \sigma$, $v_{Fcp} - K_I$ (рис. 9.2–9.4).

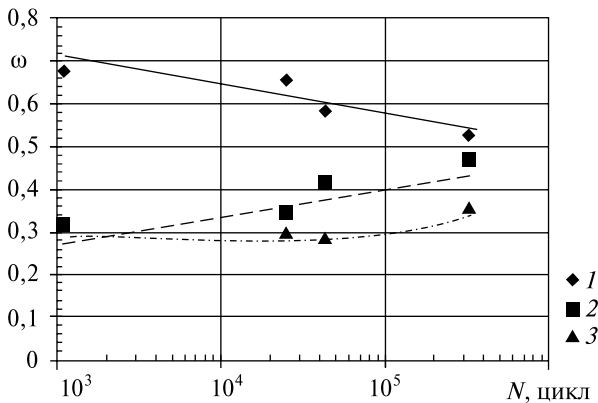


Рис. 9.2. Зависимость поврежденности $\omega_{нк}$ (1), $\omega_{нд}$ (2), $\omega_{нс}$ (3) от живучести для образцов с надрезом

По этим зависимостям можно выявить следующие закономерности:
 1) с увеличением числа циклов N величины $\omega_{нд}$ и $\omega_{нс}$ растут, а поврежденность $\omega_{нк}$ снижается (см. рис. 9.2);

2) зависимость $\omega_{нд} - N$ является симметричной по отношению к функции $\omega_{нк} - N$ (см. рис. 9.2);

3) при увеличении коэффициента интенсивности напряжений K_I величина $\omega_{нк}$ растет, а поврежденности $\omega_{нд}$ и $\omega_{нс}$ снижаются (см. рис. 9.3);

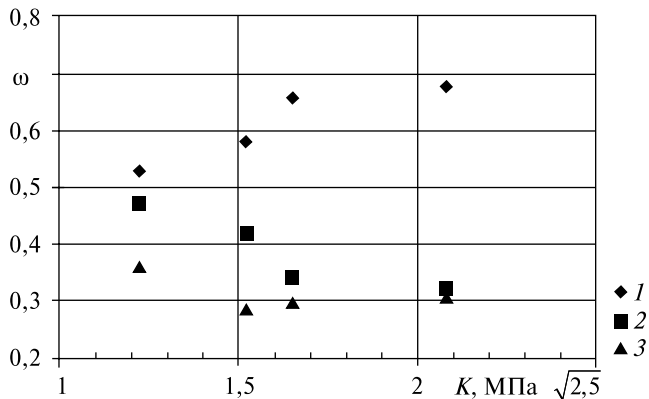


Рис. 9.3. Зависимость поврежденности $\omega_{нк}$ (1), $\omega_{нд}$ (2), $\omega_{нс}$ (3) от коэффициента интенсивности напряжений

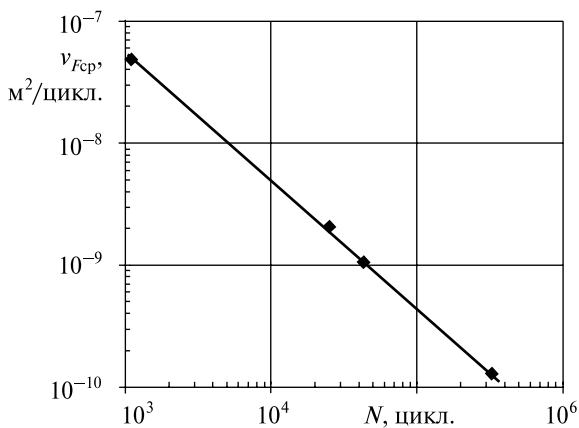


Рис. 9.4. Зависимость средней скорости роста трещины от величины N

4) скорость роста трещины с увеличением живучести N уменьшается, причем в двойных логарифмических координатах имеем линейную зависимость между v_{FCP} и N (см. рис. 9.4).

Воспользуемся полученными результатами для оценки пороговых значений КИН (коэффициент интенсивности) для стали 18ХГТ. Пороговые значения КИН K_{th} соответствуют такому максимальному значению K_{max} (или ΔK), при котором трещина не растет на протяжении 10^6 циклов и увеличение которого на 3 % приводит к его росту со скоростью, не превышающей $3 \cdot 10^{-7}$ мм/цикл. Если предположить, что предел выносливости представляет минимальные напряжения, при которых начинают развиваться трещины, размер a_c которых является для данного материала постоянной величиной, то значение порогового КИН можно оценить по выражению

$$K_{\text{max}th} = Y\sigma_{-1}\sqrt{\pi a_c}, \quad (9.6)$$

где a_c – критический размер микротрещин; Y – поправочный коэффициент, который принимают равным $Y = 0,65$ для поверхностной трещины в форме полукруга.

Поскольку пороговое значение КИН понижается с повышением прочности материала, а предел выносливости увеличивается с увеличением прочности, то критический размер микротрещин с увеличением прочности уменьшается. Это заключение достаточно хорошо согласуется с данными, которые показывают, что экспериментально наблюдаемые микротрещины на пределе выносливости для высокопрочных сталей составляют сотые, а для малопрочных пластичных – десятые доли миллиметра. Зависимость критической длины микротрещин от предела выносливости для сталей выражается формулой

$$a_c = 579,6(\sigma_{-1})^{-2,69}. \quad (9.7)$$

Подставляя полученное значение для σ_{-1} в формулы (9.6), (9.7), получим

$$a_c = 0,000132823 \text{ мм}, \quad K_{\text{max}th} = 3,90367 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

9.2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

9.2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

9.2.2. Изучить пример и краткие теоретические сведения, изложенные в п. 9.1.

9.2.3. Зарисовать излом образца с надрезом-трещиной.

9.2.4. Измерить площади характерных областей усталостных изломов образцов с надрезом, испытанных в лабораторной работе № 3.

9.2.5. Произвести расчет некоторых характеристик циклической трещиностойкости образцов с надрезом и построить зависимости: $\omega_{нк} - N_{Ж}$, $\omega_{нд} - N_{Ж}$, $\omega_{нс} - N_{Ж}$, $\omega_{нс} - \sigma$, $\omega_{нс} - K_I$, $v_{Fcp} - N_{Ж}$, $v_{Fcp} - \sigma$, $v_{Fcp} - K_I$. Защитить работу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое усталостный излом и усталостное разрушение?
2. Назовите характерные области усталостного излома.
3. Что такое коэффициент интенсивности напряжений и какова его размерность?
4. От каких факторов зависит коэффициент интенсивности напряжений?
5. Как определяется предельное значение коэффициента интенсивности напряжений?
6. Что такое скорость роста усталостной трещины?
7. Как зависят величины $\omega_{нк}$, $\omega_{нс}$, $\omega_{нд}$, v_{Fcp} , K_I образца с надрезом от уровня действующих номинальных напряжений?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения : ГОСТ 23207-78. — Введ. 01.01.79. — М. : Изд-во стандартов, 1981. — 48 с.
2. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытания на усталость : ГОСТ 25.502-79. — Введ. 01.01.81. — М., 1979. — 32 с.
3. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Термины и определения : ГОСТ 30638-99. — Введ. 01.07.2002. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. — 24 с.
4. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Методы износоустойчивых испытаний. Испытания на контактно-механическую усталость : ГОСТ 30754-2001. — Введ. 01.01.2003. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 40 с.
5. Межгосударственный стандарт. Трибофатика. Машины для износоустойчивых испытаний. Общие технические требования : ГОСТ 30755-2001. — Введ. 01.07.2002. — Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2002. — 16 с.
6. Основы трибофатики : лаб. практикум : в 2 ч. / А. В. Богданович [и др.] ; под общ. ред. Л. А. Сосновского. — Гомель : БелГУТ, 1999. — Ч. 1. — 44 с.
7. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость : Р50-54-30-87 : утв. приказом ВНИИНМАШ № 379 от 08.12.1987 ; введ. 08.12.1987. — Взамен ГОСТ 25.501-78. — М. : Гос. комитет СССР по стандартам ; ВНИИНМАШ, 1988. — 64 с.
8. *Сенько, В. И.* Основные идеи трибофатики и их изучение в техническом университете : учеб. пособие / В. И. Сенько, Л. А. Сосновский. — Гомель : БелГУТ, 2005. — 191 с.
9. *Сосновский, Л. А.* Введение в трибофатику : пособие / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. — Минск : БГУ, 2010. — 77 с.
10. *Сосновский, Л. А.* Механика износоустойчивого повреждения / Л. А. Сосновский. — Гомель : БелГУТ, 2007. — 434 с.

11. *Сосновский, Л. А.* Основы трибофатики : учеб. пособие : в 2 т. / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2003. – Т. 1. – 246 с. – Т. 2. – 235 с.
12. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). СТБ 1233-2000. – Введ. 23.06.2000. – Минск : Госстандарт, 2000. – 16 с.
13. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Испытания на фрикционно-механическую усталость (Стандарт Беларуси). СТБ 1448-2004. – Введ. 01.09.2004. – Минск : Госстандарт, 2004. – 20 с.
14. Испытательный центр SZ-01 : руководство по эксплуатации SZ.000.000 РЭ. – Гомель, 2013. – 74 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие | 3 |
| Лабораторная работа № 1. Машины для износоусталостных испытаний: устройство и принцип работы..... | 4 |
| Лабораторная работа № 2. Определение характеристик сопротивления механической усталости | 43 |
| Лабораторная работа № 3. Экспериментальное определение живучести образцов с трещиной | 51 |
| Лабораторная работа № 4. Ускоренное определение предела выносливости при механической усталости | 55 |
| Лабораторная работа № 5. Экспериментальное определение характеристик сопротивления контактной усталости..... | 67 |
| Лабораторная работа № 6. Экспериментальное определение характеристик сопротивления контактно-механической усталости | 74 |
| Лабораторная работа № 7. Экспериментальное определение характеристик сопротивления фрикционной усталости..... | 83 |
| Лабораторная работа № 8. Экспериментальное определение характеристик сопротивления фрикционно-механической усталости | 90 |
| Лабораторная работа № 9. Анализ усталостных изломов образцов..... | 98 |
| Библиографический список..... | 105 |

Учебное издание

Богданович Александр Вальдемарович
Щербаков Сергей Сергеевич
Мармыш Денис Евгеньевич

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ

Учебно-методическое пособие

Редактор *О. Н. Зорина*
Художник обложки *Т. Ю. Таран*
Технический редактор *Т. К. Раманович*
Компьютерная верстка *И. К. Ржеуцкой*
Корректор *Е. В. Гордейко*

Подписано в печать 30.06.2017. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 6,44.
Тираж 100 экз. Заказ 476.

Белорусский государственный университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/270 от 03.04.2014.
Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.

Республиканское унитарное предприятие
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.