



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Сельскохозяйственные машины»

ОСНОВЫ ТРИБОФАТИКИ

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 12 01
«Проектирование и производство
сельскохозяйственной техники»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2019

УДК 621.891(075.8)
ББК 34.41я73
О-75

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 7 от 25.06.2018 г.)*

Составители: В. Б. Попов, А. В. Голопятин

Рецензент: гл. конструктор по зерноуборочной технике НТЦК
ОАО «Гомсельмаш» П. П. Садов

О-75 **Основы** трибофатики : практикум по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» днев. и заоч. форм обучения / сост. В. Б. Попов, А. В. Голопятин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 43 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-431-5.

Рассмотрен порядок выполнения лабораторных работ по основным темам курса «Основы трибофатики». Приведены краткие теоретические сведения, методика, примеры исследования свойств материалов, справочный материал.

Для студентов специальности 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.891(075.8)
ББК 34.41я73

ISBN 978-985-535-431-5

© Попов В. Б., Голопятин А. В.,
составление, 2019
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2019

Лабораторная работа № 1

Машины серии СИ для износоусталостных испытаний: устройство и работа

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

Приборы и оборудование: испытательные машины серии СИ; различные типы образцов и контрообразцов; динамометры ДОСМ-3-0,5У; комплекты приспособлений для тарировки контактной и изгибной нагрузок.

1. Устройство и работа машин серии СИ

Машины серии СИ предназначены для проведения следующих видов испытаний:

1.1. Испытания на фрикционно-механическую усталость (рис. 1.1, а). Цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая нагрузка Q (вверх или вниз). А к его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N закрепленный неподвижно контрообразец 3, например, пластина или частичный вкладыш. Таким образом, в рабочей зоне образца одновременно возникают максимальные контактные и изгибные напряжения. Нетрудно видеть, что, имея машину для реализации схемы испытаний согласно рис. 1, а, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фрикционно-механическую усталость (рис. 1.1, а) с варьированием величин F_N , Q и ω ;
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рис. 1.1, б) 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. 1.1, в) с варьированием величин F_N и ω . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 с целью экономии материала делают укороченным.

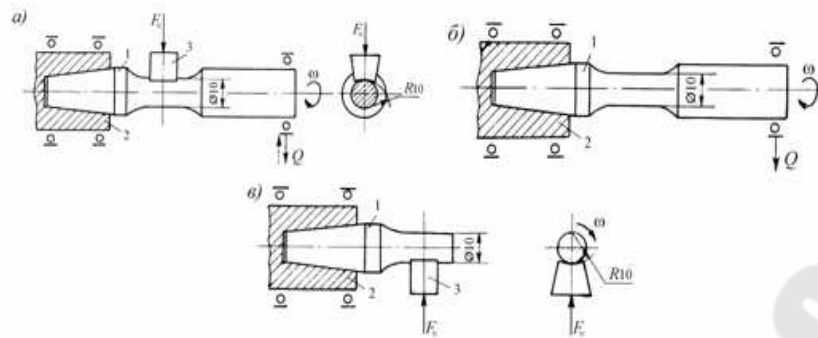


Рис. 1.1. Схемы испытаний на фрикционно-механическую усталость (а), механическую усталость (б) и трение скольжения (в)

1.2. Испытания на контактно-механическую усталость (рис. 1.2, а). Эта схема отличается от схемы испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.2, а) тем, что неподвижно закрепленный контрообразец заменен на вращающийся ролик 3. При этом образец и ролик могут в общем случае вращаться с разными угловыми скоростями ω_1 и ω_2 .

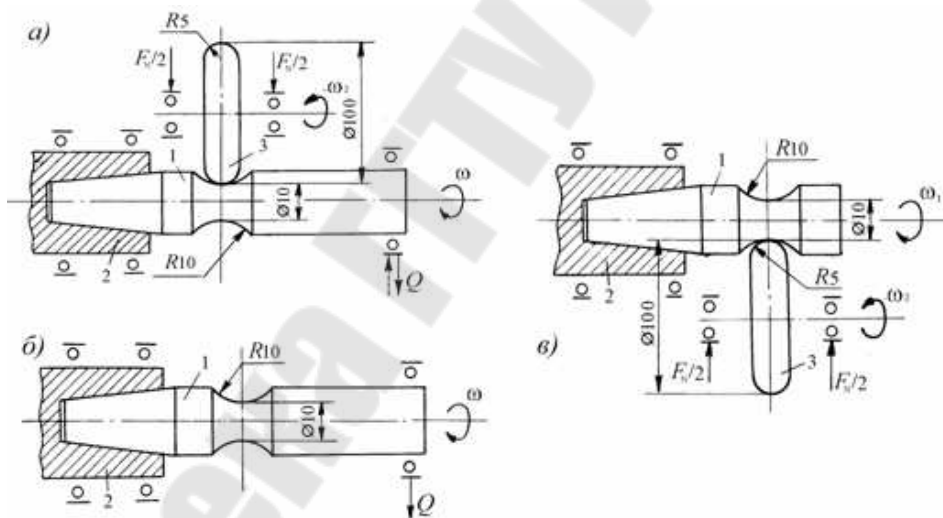


Рис. 1.2. Схемы испытаний на контактно-механическую усталость (а), механическую усталость (б) и трение качения (в)

Имея машину для реализации схемы испытаний согласно 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, б) с варьированием величин Q и ω_1 . В этом случае ролик 3 снимают, так что $F_N = 0$ и $\omega_2 = 0$;

– испытания на трение качения или трение качения с проскальзыванием (рис. 1.2, *в*) с варьированием величин F_N , ω_1 и ω_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 с целью экономии материала делают укороченным.

1.3. *Испытания на фреттинг-усталость* (рис. 1.3, *а*). В отличие от схем испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.1, *а*) и контактно-механическую усталость (см. рис. 1.2, *а*), в этом случае (см. рис. 1.3, *а*) к рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца 1 , изгибаемого нагрузкой Q , прижимают диаметрально противоположной контактной нагрузкой F_N два контрообразца 3 , называемых мостиками фреттинга. Мостикам фреттинга можно сообщать окружное (со скоростью v_1) или осевое (со скоростью v_2) колебательное движение малой амплитуды либо возбуждать оба движения одновременно.

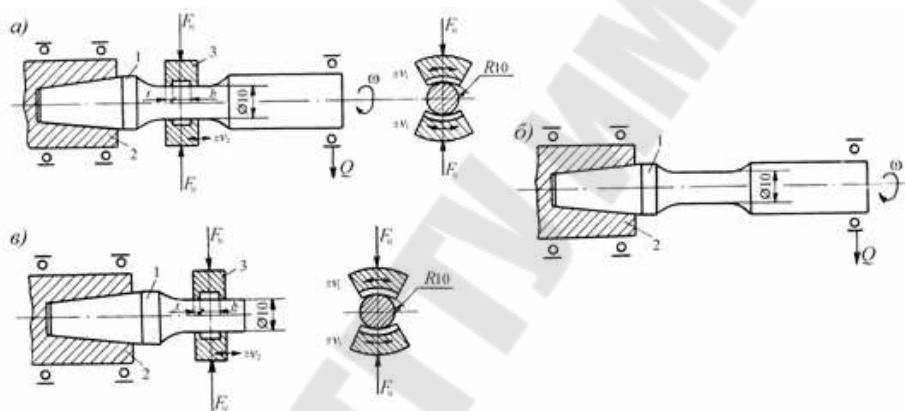


Рис. 1.3. Схемы испытаний на фреттинг-усталость (*а*), механическую усталость (*б*) и фреттинг (*в*)

Имея машину для реализации схемы испытаний согласно рис. 1.3, *а*, можно проводить:

– износоусталостные испытания на фреттинг-усталость (см. рис. 1.3, *а*) с варьированием величин F_N , Q , ω , v_1 и v_2 ;

– испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рис. 1.3, *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 (рис. 1.3, *в*) с варьированием величин F_N , v_1 и v_2 . В этом случае изгибающая нагрузка отсутствует ($Q = 0$), а образец 1 с целью экономии материала делают укороченным.

Для проведения износоусталостных испытаний используют следующее испытательное оборудование:

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

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

Общий вид машин СИ-01, СИ-02, СИ-03 показан на рис. 1.4, а их технические характеристики приведены в табл. 1.1.

Машины серии СИ состоят из следующих модулей (см. рис. 1.4):

- испытательной установки 3, которая содержит узлы и механизмы, необходимые для закрепления и испытания образцов или моделей силовых систем;
- специальных столов 1 и 6;
- электрошкафа 4, встроенного в тумбу стола и содержащего силовую пускорегулирующую аппаратуру, электронные блоки управления приводами образца, контробразца и нагрузателей;
- блока информационно-управляющей системы (ИУС) 2, включающего 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.

Взаимосвязь составных частей испытательной установки машины СИ-03 показана на схеме (рис. 1.5).

Электрошпиндель 1 привода образца вращает вал, в котором закреплен испытываемый образец 19. Электродвигатель 13 привода контробразца через гибкий вал 3 вращает вал, на котором закреплен контробразец – ролик 2. В этом случае на машине реализуется трение качения. Электродвигатель 13 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.

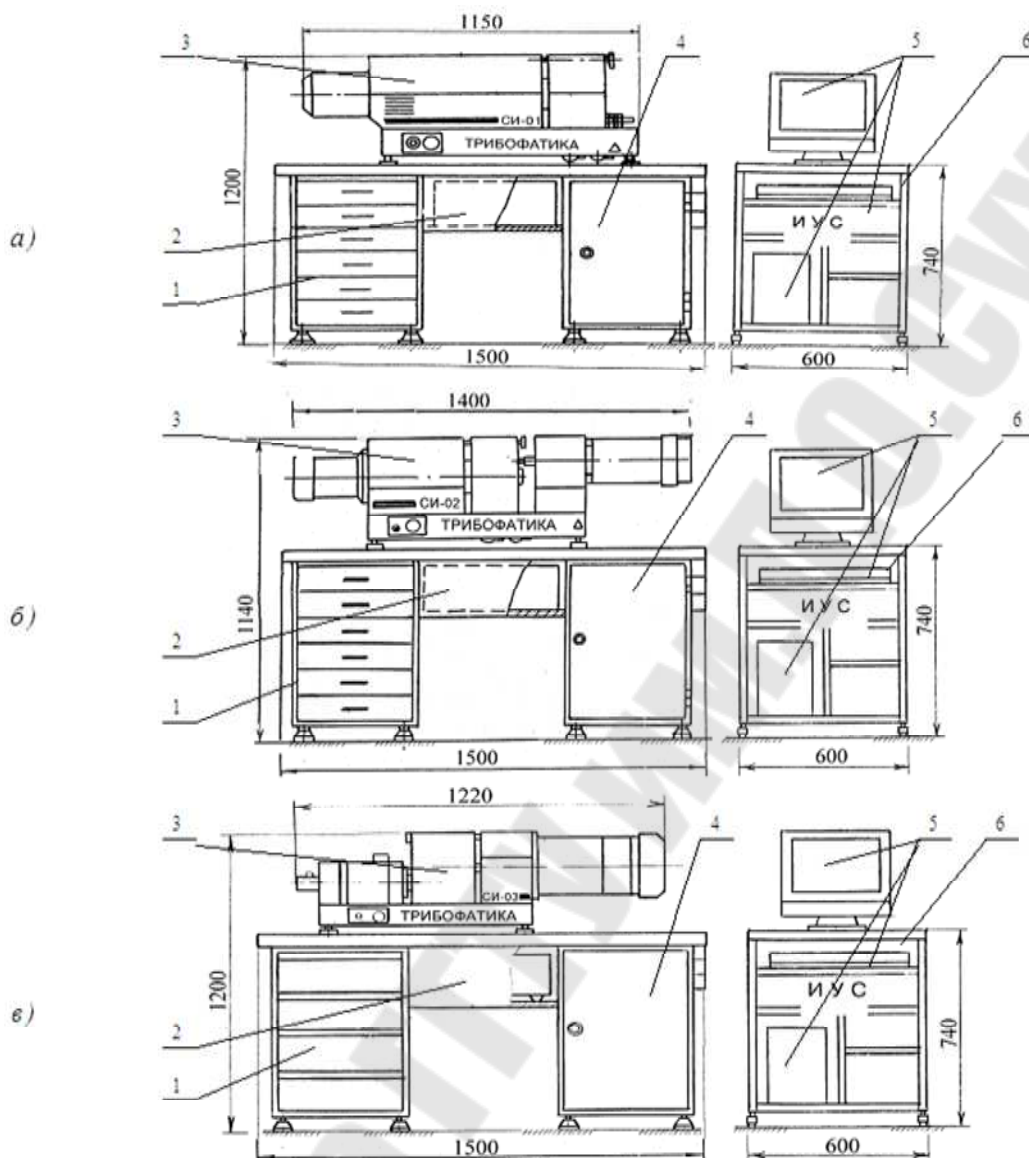


Рис. 1.4. Общий вид модульных машин серии СИ:
 а – СИ-01; б – СИ-02; в – СИ-03

Контробразец 2 прижимается к рабочей поверхности образца 19 с помощью электромеханизма 16 через систему рычагов 17, 7, 5, создавая заданную контактную нагрузку.

Вместо вращающегося контробразца – ролика 2 на рычаге 4 может быть установлена кассета с неподвижным контробразцом 2' или динамометрическое кольцо 20 с мостиками фреттинга 2''. В этом случае в используемой на машине силовой системе (образец–контробразец) реализуется трение скольжения или фреттинг.

Изгибные напряжения в образце создаются электромеханизмом 15 через систему рычагов 11, 10, 9, 18 и обойму 6 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 тензодатчиков 5 и 8, наклеенных на нагружающие пружины 4 и 9. Частота вращения контробразца измеряется с помощью датчика 14. Линейный износ либо сближение осей пары трения измеряется с помощью индуктивного датчика, параметры вибрации – виброакселерометром, установленным на рычаге 4 в зоне крепления контробразца. Момент трения измеряется с помощью моментомера 12, смонтированного на валу электродвигателя 13. Отличие машины СИ-01 для испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рис. 1.4, а) от машины СИ-03 состоит в том, что испытуемый образец приводится во вращение двигателем постоянного тока с бесступенчатым регулированием.

Таблица 1.1

Технические характеристики машин серии СИ

Наименование показателей	Значение		
	Машина СИ-01	Машина СИ-02	Машина 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	70–700
Диапазон контактных нагрузок, Н	10–500	50–1000	10–1000
Диапазон измерения суммарного износа образца и контробразца, мкм	10–3000	10–3000	10–3000
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

Привод контрообразца на этой машине отсутствует, так как в процессе испытаний реализуется только трение скольжения.

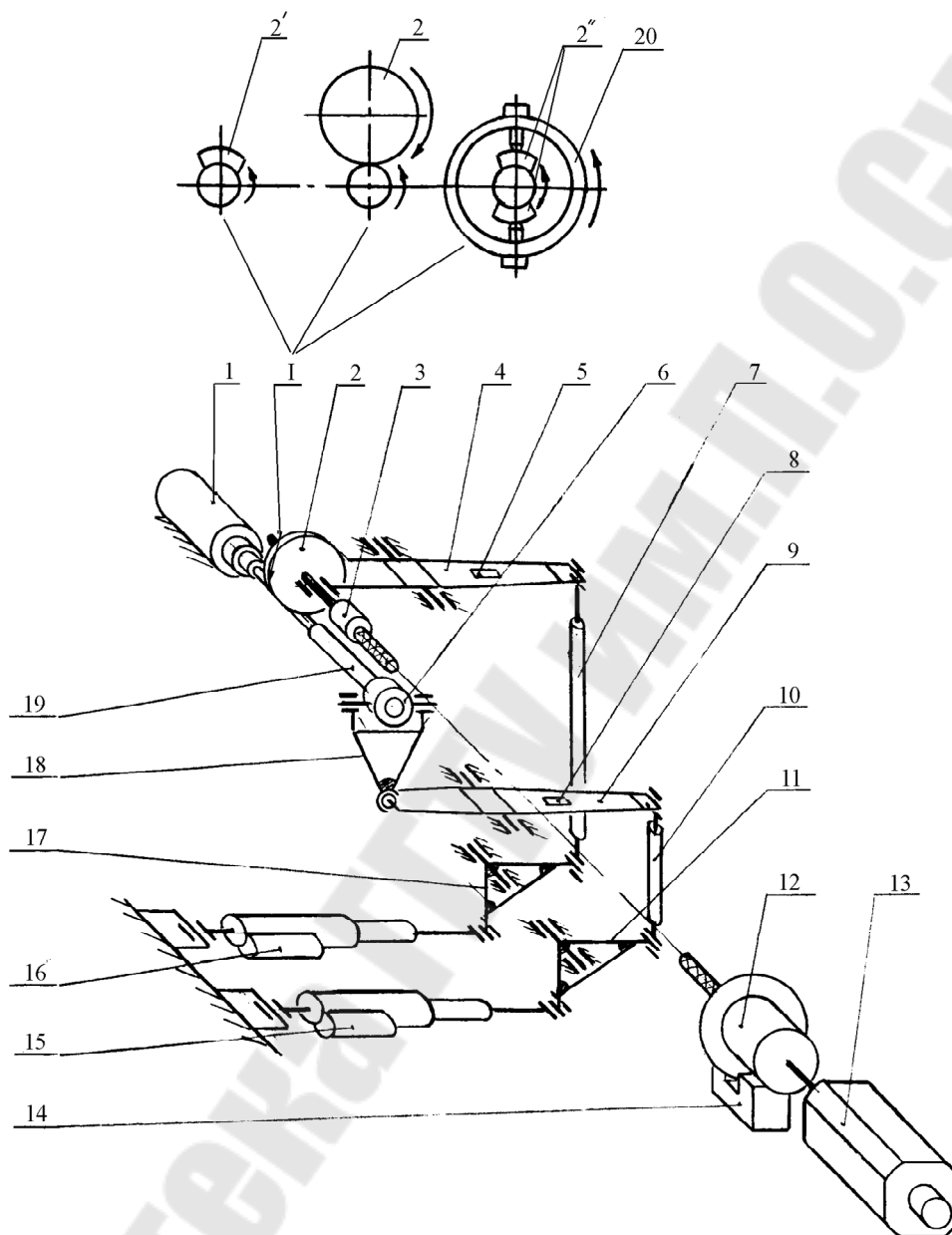


Рис. 1.5. Принципиальная схема испытательной установки машины СИ-03

Отличие машины СИ-02 для испытаний на контактно-механическую усталость (см. рис. 1.4, б) от машины СИ-03 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 контрообразца – ролика.

2. Тарировка изгибной и контактной нагрузок

Для того чтобы параметры испытательных машин серии СИ соответствовали заданным требованиям, при вводе их в эксплуатацию, а также в процессе эксплуатации с заданной периодичностью (не реже одного раза в год) выполняют настройку (тарировку) всех механических и электронных систем этих машин. При этом руководствуются программами-методиками первичной и периодической аттестаций.

2.1. Тарировка контактной нагрузки. Схема тарировки контактной нагрузки в диапазоне 100–500 Н представлена на рис. 1.6.

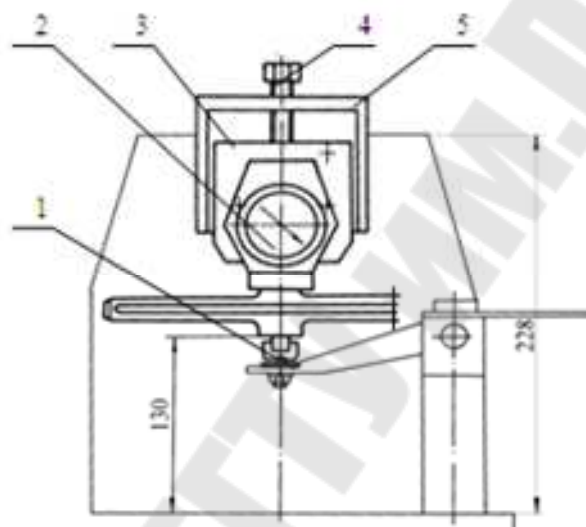


Рис. 1.6. Тарировка контактной нагрузки:
1 – контробразец; 2 – динамометр ДОСМ-3-0,5У (0,5 кН);
3 – корпус; 4 – упорный винт; 5 – кронштейн

При тарировке вращением тяги механизма контактной нагрузки задают проверяемое значение величины F_N и сверяют его с показаниями ИУС машины. Затем увеличивают контактную нагрузку до следующего проверяемого уровня, снова сверяя с показаниями ИУС машины. Процедуру повторяют, пока не достигнут максимального проверяемого значения F_N . Далее в обратном порядке, последовательно уменьшая контактную нагрузку до минимального проверяемого значения, выполняют сравнение в тех же реперных точках, что и при увеличении F_N .

Измерения в каждой точке проводят не менее трех раз как при нагружении, так и при разгрузке, и их результаты заносят в протокол (табл. 1.2). Среднее значение отсчета принимают за градуировочную точку.

Погрешность определяют по формуле

$$\delta = (X_{\text{норм}} - X_m) 100/X_{\text{норм}},$$

где δ – погрешность, %; $X_{\text{норм}}$ – нагрузка, измеренная динамометром, Н; X_m – среднее значение (градуировочная точка) нагрузки, измеренное проверяемой системой, Н.

Таблица 1.2

Протокол тарировки системы измерения контактной нагрузки

Проверяемое значение нагрузки, Н	Показания динамометра, делений			Показания ИУС, Н, для номера измерений						Среднее значение нагрузки, Н	Погрешность, %
				1		2		3			
	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р			
10											
30											
50											

Примечание. Н – при нагружении пружины; Р – при разгрузке пружины.

Погрешность в диапазоне 50–500 Н не должна превышать $\pm 2\%$. Если погрешность выше допустимой, выполняют проверку и техническое обслуживание исполнительных механизмов, производят настройку ИУС машины.

2.2. Тарировка изгибной нагрузки. Схемы тарировки изгибной нагрузки Q при направлении ее приложения вверх и вниз представлены на рис. 1.7, а и б соответственно.

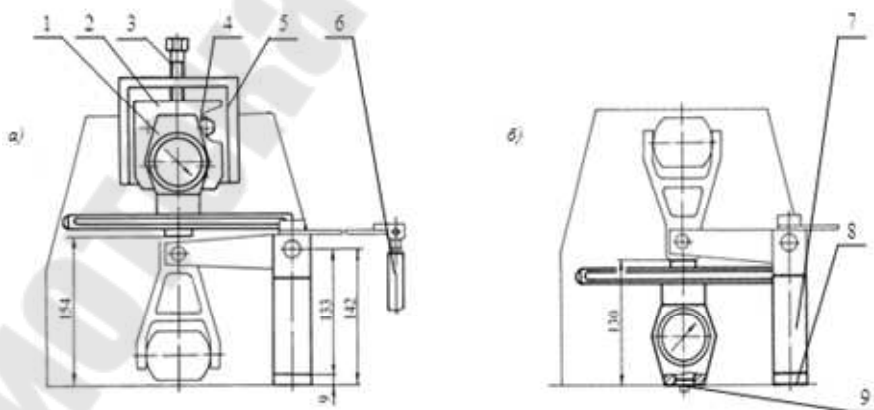


Рис. 1.7. Тарировка изгибной нагрузки «ВВЕРХ» (а) и «ВНИЗ» (б):

- 1 – динамометр; 2 – корпус; 3 – упорный винт; 4 – болт;
- 5 – кронштейн; 6 – стяжка; 7 – стойка; 8 – подкладка; 9 – пята

Погрешность во всем диапазоне не должна превышать $\pm 2\%$.

Результаты тарировки изгибной нагрузки заносят в протокол (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Протокол тарировки системы измерения изгибной нагрузки

Проверяемое значение нагрузки, Н	Показания динамометра, делений		Показания ИУС, Н, для номера измерений						Среднее значение нагрузки, Н	Погрешность, %
			1		2		3			
	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р		
100										
300										
500										

Примечание. Н – при нагружении пружины; Р – при разгрузке пружины.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

3.2. Изучить правила техники безопасности.

3.3. Изучить конструкцию и принцип работы испытательной установки машины СИ-03.

3.4. Изучить конструкцию и принцип работы испытательной установки машины СИ-01.

3.5. Изучить конструкцию и принцип работы испытательной установки машины СИ-02.

3.6. Выполнить тарировку контактной нагрузки на одной из машин серии СИ.

3.7. Выполнить тарировку изгибной нагрузки на одной из машин серии СИ.

3.8. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Содержание отчета

4.1. Рисунок со схематичным изображением общего вида одной из машин серии СИ с указанием основных ее элементов.

4.2. Рисунок принципиальной схемы одной из машин серии СИ.

4.3. Описание конструкции и принципа работы испытательной установки одной из машин серии СИ.

4.4. Результаты тарировки изгибной и контактной нагрузок на одной из машин серии СИ в форме протоколов (см. табл. 1.2, 1.3).

4.5. Выводы по проделанной работе.

5. Пример тарировки нагружающих устройств

Были проведены тарировки контактной нагрузки и изгибной нагрузки на машине СИ-01. Результаты тарировок представлены в табл. 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4

Протокол тарировки системы измерения контактной нагрузки

Проверяемое значение нагрузки, Н	Показания динамометра, делений		Показания ИУС, Н, для номера измерений						Среднее значение нагрузки, Н	Погрешность, %
			1		2		3			
	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р		
10	2,18	2,18	9,82	10,21	9,80	10,23	9,78	10,22	10,01	0,10
30	4,45	4,54	29,58	30,31	29,67	30,22	29,70	30,62	30,03	0,10
50	6,88	6,88	49,48	49,48	50,02	50,02	49,84	49,84	49,75	1,05

Примечание. Н – при нагружении пружины; Р – при разгрузке пружины.

Таблица 1.5

Протокол тарировки системы измерения изгибной нагрузки

Проверяемое значение нагрузки, Н	Показания динамометра, делений		Показания ИУС, Н, для номера измерений						Среднее значение нагрузки, Н	Погрешность, %
			1		2		3			
	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р		
100	2,18	2,18	100,3	100,6	101,4	99,8	101,8	98,7	100,4	0,45
300	4,54	4,54	301,2	299,1	302,4	298,8	302,1	299,4	300,4	0,15
500	6,88	6,88	502,4	502,4	501,6	501,6	500,2	500,2	501,4	0,30

Примечание. Н – при нагружении пружины; Р – при разгрузке пружины.

Как видно из табл. 1.4 и 1.5, погрешности при тарировке нагружающих устройств не превышают ± 2 %. Это соответствует требованиям СТБ 1067–97.

Контрольные вопросы

1. Какие виды испытаний реализуются на машинах серии СИ?
2. В чем отличие износоусталостных испытаний от обычных испытаний на механическую усталость или на трение?
3. Расскажите о конструктивных особенностях машины СИ-03.
4. Расскажите о конструктивных особенностях машины СИ-01.
5. Расскажите о конструктивных особенностях машины СИ-02.
6. Опишите принцип работы испытательной установки машины СИ-03.
7. Опишите принцип работы испытательной установки машины СИ-01.
8. Опишите принцип работы испытательной установки машины СИ-02.
9. Какие системы называют силовыми?
10. Какие объекты можно испытывать на машинах серии СИ?
11. Расскажите об устройстве и принципе действия механизмов нагружения.
12. Опишите способы и устройства для закрепления испытуемых объектов.
13. Расскажите о методах тарировки нагружающих устройств.

Лабораторная работа № 2

Информационно-управляющие системы машин серии СИ: принципы построения и работа

Цель работы: изучить принципы построения информационно-управляющих систем машин серии СИ, а также методы измерения и регистрации параметров износоусталостного повреждения.

Приборы и оборудование: используются испытательные машины серии СИ, различные типы образцов и контрообразцов.

1. Структура информационно-управляющих систем машин серии СИ и особенности их работы

Информационно-управляющие системы (ИУС) модульных машин СИ-01, СИ-02 и СИ-03 созданы на базе ПЭВМ. ИУС построены по принципу: испытательная установка – система управления/измерения – ПЭВМ. Структура ИУС представлена на рис. 2.1.

Как видно из рис. 2.1, ИУС модульных машин состоит из двух основных частей: управляющей ПЭВМ и блока измерения и управления, связанного с ПЭВМ стандартным кабелем. Необходимые измерительно-преобразовательные устройства выполнены в виде электронных плат и модулей, устанавливаемых непосредственно в блоке измерения и управления.

Информационно-управляющая система имеет четыре канала управления устройствами испытательной машины. Они используются для управления:

- скоростью вращения образца;
- скоростью вращения контрообразца;
- 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).

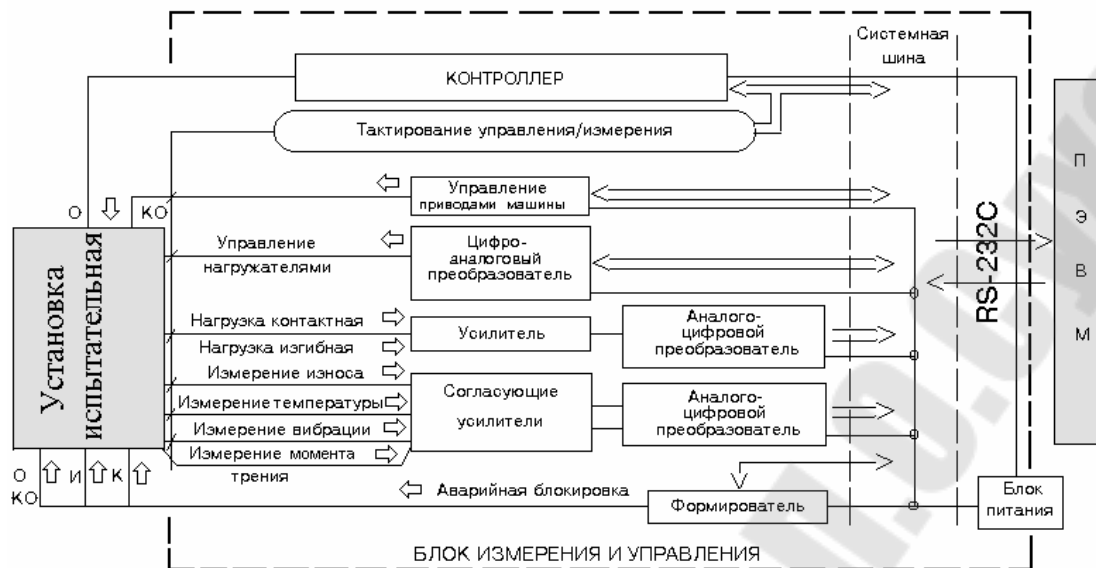


Рис. 2.1. Информационно-управляющая система модульных машин:
 О, КО, К, И – соответственно приводы образца, контрообразца,
 контактной и изгибной нагрузок

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.

Информационно-управляющая система 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 обработки установленного задания исполнительными устройствами (регуляторы частоты вращения образца и контрообразца, приводы нагрузателей).

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

2. Порядок выполнения работы

2.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

2.2. Повторить правила техники безопасности (см. лабораторную работу № 1).

2.3. Изучить принципы построения и работу ИУС модульных машин серии СИ.

2.4. Произвести под руководством преподавателя или зав. лабораторией настройку и включение ИУС и оборудования машины СИ-01. Подготовить ИУС к работе. Осуществить запуск процесса испытаний с помощью ИУС. В режиме калибровки проверить рабочие диапазоны датчиков системы измерения. Произвести серию экспериментальных измерений по указанию преподавателя. Произвести измерения и регистрацию износа в восьми точках опасного сечения образца. Осуществить просмотр и печать записанных кинетических данных.

3. Содержание отчета

3.1. Рисунок структуры ИУС машин серии СИ. Особенности их работы.

3.2. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Каковы общие принципы и устройство информационно-управляющих систем машин серии СИ?
2. Изобразите блок-схему ИУС машин серии СИ.
3. Какие исполнительные механизмы имеют машины серии СИ?
4. Какие параметры испытаний измеряются на машинах серии СИ?
5. Как регистрируются параметры испытаний на машинах серии СИ?
6. Каковы особенности методов измерения интегральных параметров повреждения на машинах серии СИ?
7. Каковы особенности методов измерения дискретных параметров повреждения на машинах серии СИ?
8. Какие применены методы и средства измерения момента трения на машинах серии СИ?
9. Как регистрируются параметры испытаний в ИУС машин серии СИ?
10. Как задают режим испытания на машинах серии СИ?

Лабораторная работа № 3

Экспериментальное определение характеристик сопротивления механической усталости

Цель работы: экспериментально определить основные характеристики сопротивления усталости.

1. Схема испытаний. Испытательное оборудование. Образцы

Для проведения лабораторной работы используют любую из испытательных машин серии СИ.

Схема испытаний показана на рис. 3.1.

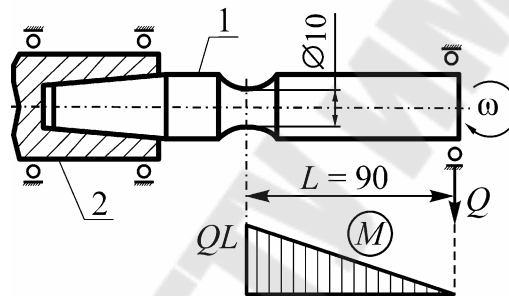


Рис. 3.1. Схема испытаний стального образца на механическую усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины

Испытания на механическую усталость ведут при симметричном цикле напряжений – консольный изгиб с вращением образца круглого сечения. На рис. 3.2 показан цикл изменения номинальных напряжений σ во времени t в рабочем (опасном) сечении образца при приложении изгибающей нагрузки Q . На рис. 3.2 σ_{\max} и σ_{\min} – это максимальное и минимальное напряжения цикла, σ_m – среднее напряжение цикла, σ_a – амплитуда напряжений, T – период цикла.

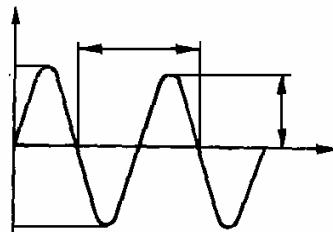


Рис. 3.2. Цикл напряжений при испытаниях на механическую усталость

Расчет напряжений, МПа, ведут по формуле

$$\sigma_a = \sigma_{\max} = M/W,$$

где $M = QL$ – изгибающий момент в опасном сечении образца, Н · м; $W = \pi d^3/32$ – момент сопротивления опасного сечения образца, м³; Q – изгибающая нагрузка, Н; L – расстояние от оси приложения изгибающей нагрузки до опасного сечения образца, мм; d – диаметр рабочей части образца.

Для заданных размеров образца $d = 10$ мм и $L = 100$ мм имеем соотношение между амплитудой напряжений и величиной изгибающей нагрузки

$$\sigma_a = 1,02Q.$$

2. Порядок проведения испытаний

2.1. Произвести испытания на усталостную долговечность.

2.1.1. Образец установить в шпиндель машины и закрепить.

2.1.2. На образец надеть обойму для задания изгибающей нагрузки.

2.1.3. Включить рубильник на силовом шкафу испытательной машины и тумблер блока ИУС.

2.1.4. Включить ПЭВМ и загрузить управляющую программу.

2.1.5. На ПЭВМ задать программу испытаний (заданное время эксперимента, режим регистрации данных, частоту вращения образца, уровень изгибающей нагрузки).

2.1.6. Начать испытания.

2.1.7. При заданном напряжении испытания вести до достижения предельного состояния, которое характеризуется разделением образца на две части. При завершении программы испытаний машину отключить. Определить усталостную долговечность – число циклов до разрушения образца.

2.1.8. Если необходимо прекратить испытание преждевременно, то нажать клавишу «ESC» или красную кнопку «СТОП» – машина выключится.

2.1.9. Аналогично произвести испытания образцов.

2.1.10. Выключить ПЭВМ. Выключить тумблер блока ИУС и рубильник машины.

2.1.11. Снять образец.

- 2.1.12. Произвести визуальный осмотр изломов образца.
- 2.2. Произвести испытание на усталость методом Локати.
 - 2.2.1. На ПЭВМ задать программу испытаний (заданное время эксперимента, режим регистрации данных, частоту вращения образца, ожидаемый предел выносливости $\sigma_{-1}^{ож}$, начальный уровень напряжений σ_0 , оптимальный интервал приращения напряжения $\Delta\sigma$, продолжительность испытания на каждой ступени n_i).

3. Порядок выполнения работы

- 3.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.
- 3.2. Повторить правила техники безопасности.
- 3.3. Провести под руководством преподавателя испытание.
- 3.4. Выполнить обработку и анализ результатов испытаний.
- 3.5. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Содержание отчета

- 4.1. Схема испытаний образцов на механическую усталость.
- 4.2. Результаты испытаний на усталость в виде таблицы и кривой усталости (см. рис. 3.3).
- 4.3. Программа нагружения и результаты испытаний по методу Локати в виде графиков.
- 4.4. Характеристики сопротивления усталости.
- 4.5. Выводы по проделанной работе.

5. Пример

Серию из шести стальных образцов (малоуглеродистая сталь Ст. 3) подвергли испытаниям на усталостную долговечность на универсальной машине СИ с частотой вращения 50 Гц. Для испытаний приняли уровни напряжений в интервале 235–342 МПа, при этом долговечность образцов изменялась в диапазоне от 6900 до 525300 циклов (табл. 3.1). Результаты испытаний представили также в графическом виде в координатах $\sigma_a - N$ с логарифмическими шкалами соответствующими точками (рис. 3.3).

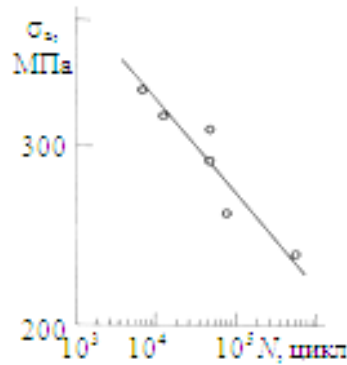


Рис. 3.3. Левая ветвь экспериментальной кривой усталости образцов из стали Ст. 3

Далее выполнили анализ экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Опытные данные описывали линейной зависимостью. В табл. 3.1 представлена процедура вычислений для оценки коэффициентов a и b .

Таблица 3.1

Обработка результатов испытаний по способу наименьших квадратов

Шифр образца	σ_a , МПа	N , цикл	$y_i = \lg \sigma_a$	$x_i = \lg N$	x_i^2	$x_i y_i$
1	342	6900	2,5340	3,8389	14,7372	9,7278
2	321	11300	2,5065	4,0531	16,4276	10,1591
3	310	41500	2,4914	4,6181	21,3268	11,5055
4	289	45200	2,4609	4,6551	21,6700	11,4557
5	257	75100	2,4099	4,8756	23,7715	11,7497
6	235	525300	2,3714	5,7204	32,7230	13,5654
Σ	–	–	14,7741	27,7612	130,6561	68,1632

Эти коэффициенты определили по следующим формулам:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{14,7741 \cdot 130,6561 - 68,1632 \cdot 27,7612}{6 \cdot 130,6561 - (27,7612)^2} = 2,8700;$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} = \frac{6 \cdot 68,1632 - 27,7612 \cdot 14,7741}{6 \cdot 130,6561 - (27,7612)^2} = -0,0881.$$

Таким образом, с учетом полученных значений коэффициентов уравнение кривой усталости примет вид:

$$\lg \sigma_a = -0,0881g N + 2,8700.$$

Показатель наклона левой ветви кривой усталости определяем:

$$m_\sigma = 1/|a| = 1/0,0881 = 11,4.$$

На рис. 3.3 изображена левая ветвь кривой усталости. Видно, что она достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальные точки. Погрешность этой аппроксимации ΔN , %, оценим, сопоставив расчетные N_p и экспериментальные $N_э$ значения долговечности в виде табл. 3.2 по формуле

$$\Delta N = \frac{N_p - N_э}{N_p}.$$

Таблица 3.2

Оценка погрешности аппроксимации

σ_a , МПа	N_p , цикл	$N_э$, цикл	Погрешность ΔN , %	σ_a , МПа	N_p , цикл	$N_э$, цикл	Погрешность ΔN , %
342	6510	6900	-6,0	289	44016	45200	-2,7
321	13364	11300	15,4	257	166763	75100	55,0
310	19853	41500	-109,0	235	460519	525300	-14,1

Из табл. 3.2 видно, что разброс значений усталостной долговечности может быть весьма значительным.

Для ускоренной оценки предела выносливости методом Локати составили программу испытаний, т. е. в координатной плоскости $\sigma_a - N$ изобразили полученную выше экспериментально левую ветвь кривой усталости. Правую горизонтальную ветвь кривой провели на уровне ожидаемого значения $\sigma_{-1}^{ож} = 170$ МПа предела выносливости, которое оценивали расчетным методом. Начальный уровень амплитуды напряжений при испытаниях выбрали равным $\sigma_0 = 160$ МПа, приращение напряжений при переходе со ступени на ступень – $\Delta\sigma_a = 21,5$ МПа = = const. Длительность ступени задали равной $n_i = 104$ цикла.

Результаты проведенного испытания методом Локати образца из стали Ст. 3 по составленной программе получены, из чего видно, что

разрушение образца произошло на 8-й ступени, число циклов на которой составило $0,15 \cdot 10^4$.

Оценку предела выносливости выполнили на основе гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений, согласно которой усталостное разрушение произойдет, когда сумма накопленных повреждений $\sum (n_i / N_i)$ достигнет единицы.

Для каждой из трех кривых усталости подсчитали суммы относительных долговечностей $\sum (n_i / N_i)$ для каждого уровня напряжений (табл. 3.3). На основании расчета построили график в координатах $\sum (n_i / N_i) - \sigma_{-1}$, из которого нашли уточненное значение предела выносливости $\sigma_{-1} = 169$ МПа при $\sum (n_i / N_i) = 1$.

Таблица 3.3

Расчет сумм относительных долговечностей по условным кривым усталости

σ_a , МПа	Число циклов $n \cdot 10^3$	1-я кривая, $\sigma_{-1} = 160$ МПа		2-я кривая, $\sigma_{-1} = 170$ МПа		3-я кривая, $\sigma_{-1} = 180$ МПа	
		N , циклов	n/N	N , циклов	n/N	N , циклов	n/N
160	10	$9 \cdot 10^6$	0,001	∞	0	∞	0
181	10	$2,7 \cdot 10^6$	0,004	$5,6 \cdot 10^6$	0,002	$1,2 \cdot 10^7$	0,001
203	10	$7,9 \cdot 10^5$	0,013	$1,9 \cdot 10^6$	0,005	$4,5 \cdot 10^6$	0,002
225	10	$2,1 \cdot 10^5$	0,048	$6 \cdot 10^5$	0,017	$1,6 \cdot 10^6$	0,006
246	10	$8,4 \cdot 10^4$	0,119	$2,5 \cdot 10^5$	0,040	$7,5 \cdot 10^5$	0,013
267	10	$3,2 \cdot 10^4$	0,313	$1 \cdot 10^5$	0,100	$3,3 \cdot 10^5$	0,030
289	10	$1,3 \cdot 10^4$	0,769	$4,5 \cdot 10^4$	0,222	$1,6 \cdot 10^5$	0,063
310	1,5	$5,6 \cdot 10^3$	1,786	$2,2 \cdot 10^4$	0,455	$8,5 \cdot 10^4$	0,118
Σ	–	–	3,053	–	0,841	–	0,233

Теперь, принимая уточненное значение предела выносливости σ_{-1} и совмещая его с левой ветвью кривой усталости, построенной по результатам испытаний, получили искомую кривую усталости и все основные характеристики сопротивления усталости:

- предел выносливости $\sigma_{-1} = 169$ МПа;
- абсциссу точки перелома кривой усталости $N_{\sigma G} = 1,2 \cdot 10^7$ циклов;
- показатель наклона левой ветви кривой усталости $m_{\sigma} = 11,4$.

Контрольные вопросы

1. Что называют кривой механической усталости?
2. Как построить кривую усталости для исследуемого материала?
3. Назовите основные параметры кривой усталости – характеристики сопротивления усталости.
4. Напишите уравнение кривой усталости.
5. Что такое предел выносливости?
6. Как определяется предел выносливости по стандартной методике в ходе усталостных испытаний?
7. Какие Вы знаете методы ускоренной оценки предела выносливости?
8. На какой гипотезе основан метод Локати?

Лабораторная работа № 4

Экспериментальное определение характеристик трения и изнашивания при качении металл–металлической пары трения

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

1. Схема испытаний. Испытательное оборудование. Образцы

Для проведения лабораторной работы используют испытательные машины СИ-02 или СИ-03, устройство и работа которых описаны в лабораторных работах № 1 и 2.

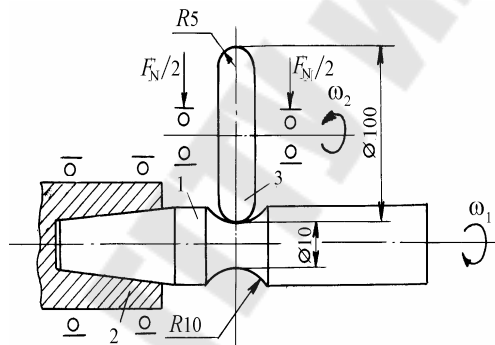


Рис. 4.1. Схема испытаний на контактную усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины; 3 – ролик

Схема испытаний показана на рис. 4.1. Там же даны основные размеры образца 1, закрепленного в шпинделе 2 испытательной машины и контробразца (ролика) 3. Оба элемента пары трения изготавливают из стали.

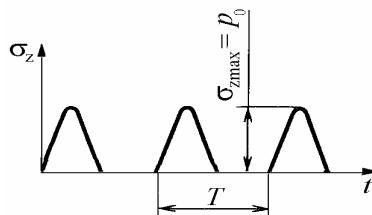


Рис. 4.2. Цикл напряжений при испытаниях на контактную усталость
(T – период цикла)

На рис. 4.2 показан цикл изменения во времени t контактных напряжений σ_z в центре контактной площадки при приложении контактной нагрузки F_N . Максимальные контактные напряжения $\sigma_{z\max} = p_0$ определяют согласно методике по формуле

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

где n_σ – коэффициент, определяемый в зависимости от величины Ω , которую рассчитывают по формуле

$$\Omega = \frac{(\rho_{11} - \rho_{12}) + (\rho_{21} - \rho_{22})}{\Sigma\rho};$$

F_N – контактная нагрузка, Н; $\Sigma\rho = \rho_{11} + \rho_{12} + \rho_{21} + \rho_{22}$ – сумма главных поверхностей соприкасающихся тел в точке контакта; $\rho = 1/R$ – главная кривизна поверхности, обратная радиусу кривизны R . Считается положительной, если поверхность выпуклая, и отрицательной, если поверхность вогнутая; $\rho_{11} = 1/R_{11}$ и $\rho_{12} = 1/R_{12}$ – главные кривизны контробразца (рис. 4.3) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; $\rho_{21} = 1/R_{21}$ и $\rho_{22} = 1/R_{22}$ – главные кривизны образца (см. рис. 4.3) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях; η – коэффициент, учитывающий упругие характеристики материалов контактирующих тел:

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2},$$

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

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

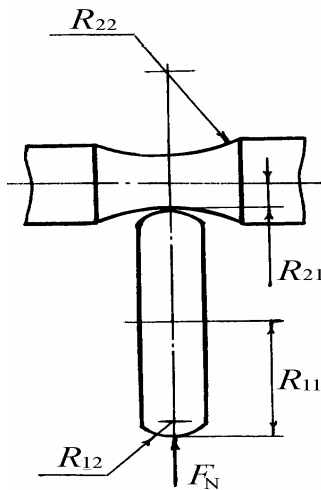


Рис. 4.3. К расчету напряжений в зоне контакта образца и контробразца

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

$$p_0 = 378,85F_N^{1/3},$$

где F_N выражена в ньютонах.

По результатам испытаний определяют следующие характеристики трения и изнашивания при качении:

- уровень напряжений p_k , соответствующий предельному состоянию (предельное контактное давление);
- суммарную наработку $N_{\Sigma p} = \sum n_j + n_k$ до достижения предельного состояния (суммарную долговечность);
- сближение осей пары трения $\delta_c(p_k)$, соответствующее предельному состоянию (критическое сближение осей);
- коэффициент трения качения f_R .

Кроме того, строят зависимости δ_c , M_T и f_R от контактных напряжений p_0 .

Для определения характеристик трения и изнашивания рекомендуется проводить испытания трех одинаковых пар трения из исследуемых сталей с последующим усреднением результатов. В целях экономии времени допускается испытание одной пары трения.

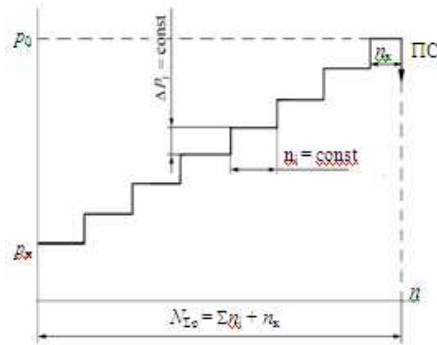


Рис. 4.4. Программа ступенчатого нагружения при контактной усталости

2. Порядок проведения испытаний

- 2.1. Образец установить в шпиндель машины и закрепить.
- 2.2. Установить ролик и закрепить его.
- 2.3. Включить рубильник на силовом шкафу испытательной машины и тумблер блока ИУС.
- 2.4. Включить ПЭВМ.
- 2.5. На ПЭВМ задать программу испытаний (заданное время эксперимента; режим регистрации данных; контактную нагрузку, соответствующую начальному уровню напряжений p_n ; величину ступени приращения напряжений Δp_j , продолжительность ступени нагружения $n_j = \text{const}$).
- 2.6. Начать испытания.
- 2.7. Испытания вести до достижения предельного состояния по одному или одновременно нескольким критериям. При завершении программы испытаний машину отключить.
- 2.8. Если необходимо прекратить испытание преждевременно, то нажать клавишу «ESC» или красную кнопку «СТОП» – машина выключится.
- 2.9. Выключить рубильник машины и тумблер блока ИУС. Выключить ПЭВМ.
- 2.10. Снять образец и контрообразец.
- 2.11. Провести визуальный осмотр поверхностей трения образца и контрообразца.

3. Порядок выполнения работы

- 3.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

- 3.2. Повторить правила техники безопасности.
- 3.3. Подготовить программу испытаний (величины p_n , Δp_j , n_j указывает преподаватель).
- 3.4. Провести под руководством преподавателя испытания образцов.
- 3.5. Выполнить обработку и анализ результатов испытаний.
- 3.6. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Содержание отчета

- 4.1. Схема испытаний образцов на контактную усталость.
- 4.2. Программа ступенчатого нагружения для ускоренных испытаний на контактную усталость.
- 4.3. Расчет необходимых для реализации программы испытаний контактных нагрузок.
- 4.4. Характеристики трения и изнашивания при качении (в виде таблицы).
- 4.5. Результаты испытаний в виде графиков.
- 4.6. Выводы по проделанной работе.

5. Пример

Образцы для испытаний были изготовлены из нормализованной стали 45, а ролики – из стали 25ХГТ. Испытания проводили на машине СИ-02 по схеме, представленной на рис. 4.1. Частота нагружения – 50 Гц. В зону контакта подавали капельным способом (12–14 капель в минуту) минеральное масло МГЕ-46.

При формировании программы ступенчатого нагружения (рис. 4.5) приняли следующие значения исходных параметров:

- начальный уровень напряжений $p_n = 1400$ МПа;
- степень приращения напряжений $\Delta p_j = 200$ МПа;
- продолжительность ступени нагружения $n_j = 10^5$ циклов.

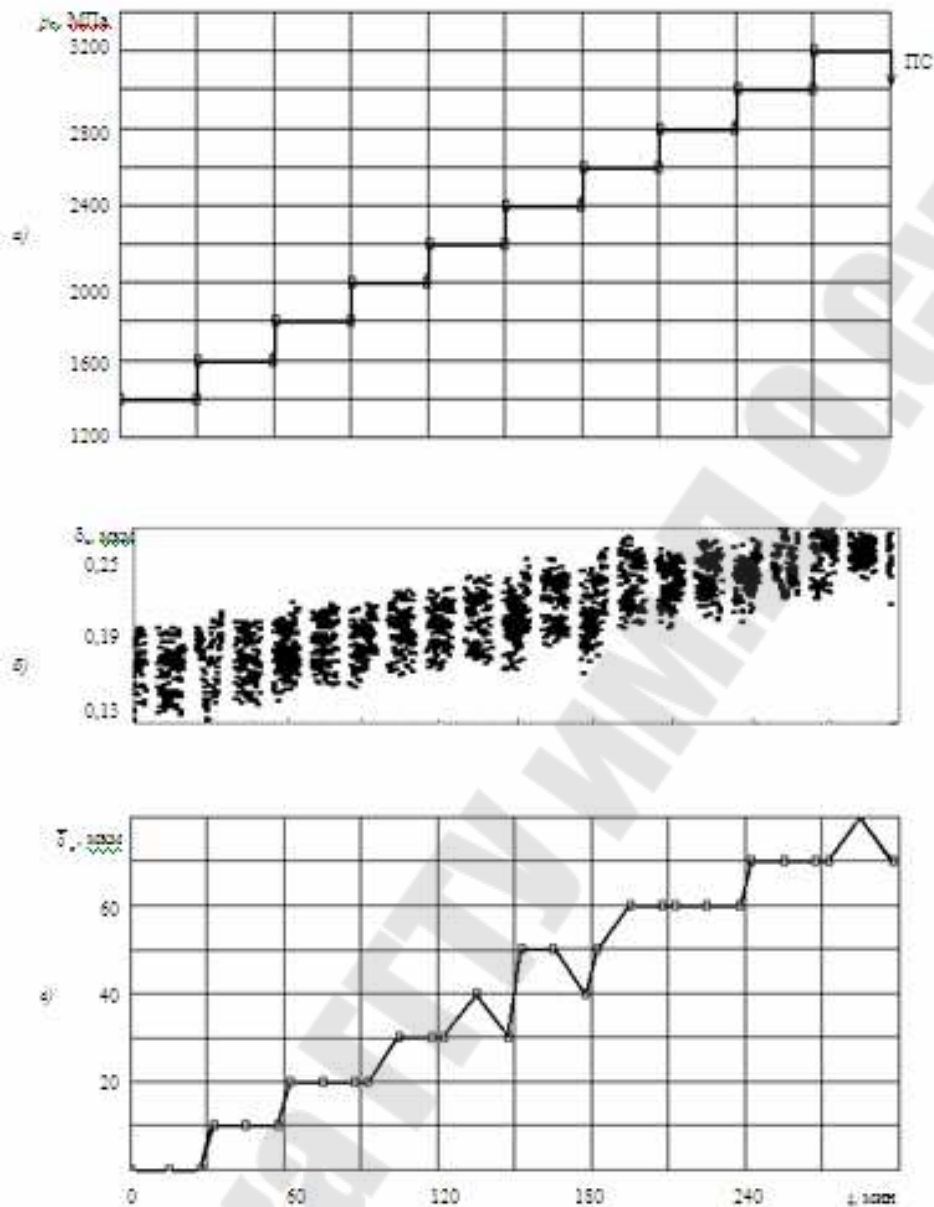


Рис. 4.5. Программа ступенчатого нагружения (а) и сближение осей пары трения во времени: б – полоса рассеяния; в – средние значения

Испытания проводили непрерывно, до достижения предельного состояния, в качестве которого приняли недопустимый уровень вибрации в системе образец – контрообразец. Предельное состояние наступило на $k = 10$ -й ступени нагружения при $p_k = 3200$ МПа (рис. 4.6, а). Критические значения характеристик трения и изнашивания при качении представлены в табл. 4.1.

**Экспериментальные характеристики трения
и изнашивания при качении**

Характеристика	Обозначение	Значение
Предельное контактное давление, МПа	p_k	3200
Суммарная долговечность, цикл	$N_{\Sigma p} = \sum n_j$	10^6
Критическое сближение осей пары трения (среднее значение), мкм	$\bar{\delta}_c$	80
Коэффициент трения (среднее значение)	\bar{f}_R	0,07

Поскольку было реализовано десять ступеней нагружения ($j = 1-10$), причем $n_k = n_j$, суммарная долговечность составила

$$N_{\Sigma p} = \sum_{j=1}^{10} n_j = \sum_{j=1}^{10} 10^5 = 10^6 \text{ циклов.}$$

На рис. 4.5, б представлена полученная с помощью ПЭВМ интегральным методом кинетическая полоса рассеяния сближения осей δ_c пары трения. По существу, на рис. 4.5, б изображен случайный процесс накопления повреждений в различных точках поверхности опасного сечения образца при трении качения.

С помощью ПЭВМ можно рассмотреть малый фрагмент величины δ_c , растянутый по осям координат. Количественные характеристики рассеяния величин δ_c на временном интервале испытаний от 102,3 до 103,8 мин при контактных напряжениях $p_0 = 2000 \text{ МПа} = \text{const}$ составляют:

- минимальное значение $\min \delta_c = 160 \text{ мкм}$;
- максимальное значение $\max \delta_c = 220 \text{ мкм}$;
- размах $R_{\delta} = \max \delta_c - \min \delta_c = 220 - 160 = 60 \text{ мкм}$;
- среднее значение $\delta_c = 190 \text{ мкм}$.

Обратим внимание, что это рассеяние величин δ_c получено при испытании только одной пары трения, следовательно, оно характеризует индивидуальные свойства исследованной пары трения. Речь идет, таким образом, о рассеянии на микроуровне – в отличие от «обычного» рассеяния, традиционно изучаемого по результатам испытаний большого количества номинально идентичных объектов.

График на рис. 4.6, в получен путем усреднения кинетической полосы сближения осей (рис. 4.6, б) на заданных временных интервалах измерения.

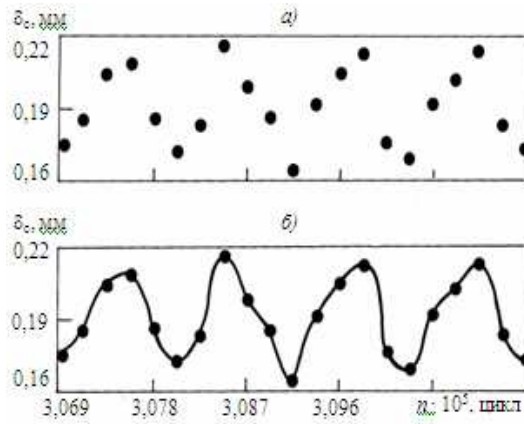


Рис. 4.6. Случайный процесс контактного повреждения стали 45 при трении качения в малом интервале времени испытания при $p_0 = 2000 \text{ МПа} = \text{const}$: а – распечатаны величины δ_c , измеренные через каждые 225 циклов испытаний; б – экспериментальные точки аппроксимированы кривой

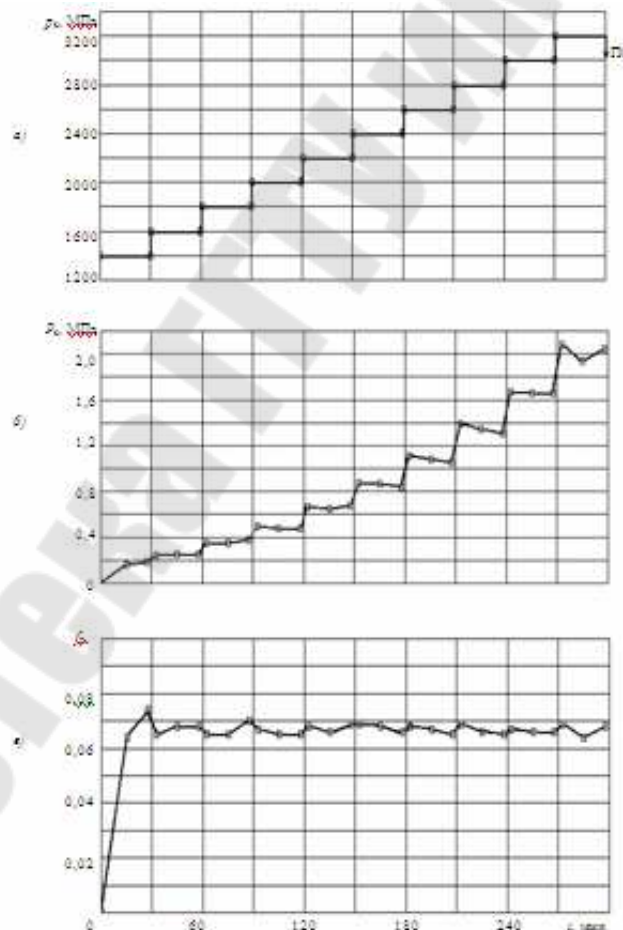


Рис. 4.7. Программа ступенчатого нагружения (а), изменение во времени t момента трения M_T (б) и коэффициента трения (в) в паре трения образце (сталь 45) – ролик (сталь 25) ХГТ

Зависимости момента трения и коэффициента трения от времени, полученные в ходе испытаний, изображены на рис. 4.8, б и в.

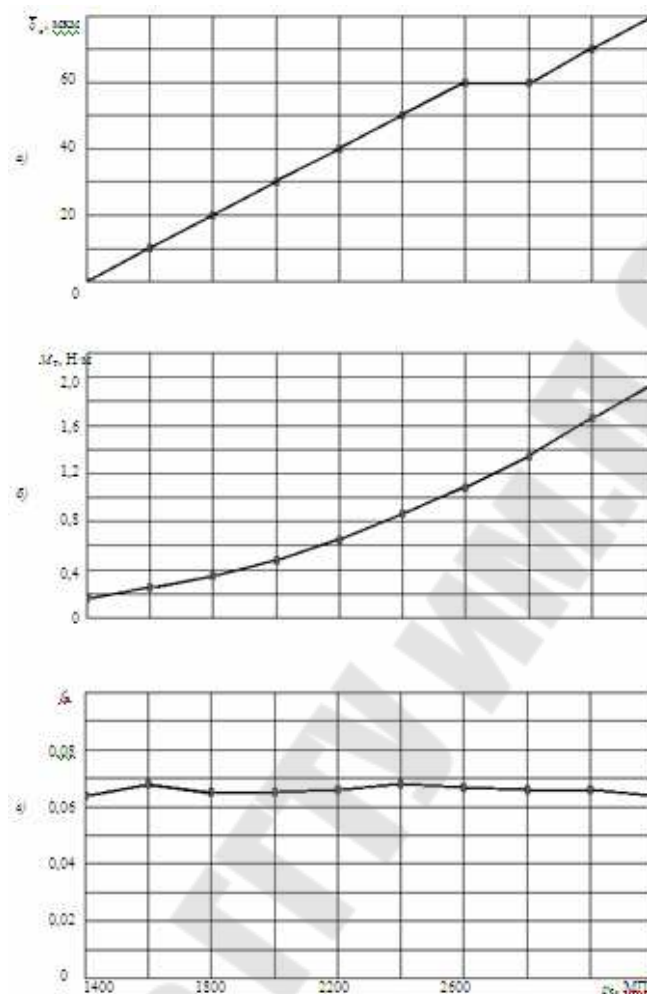


Рис. 4.8. Зависимость сближения осей пары трения (а), момента трения (б) и коэффициента трения (в) от контактного давления p_0 для пары трения *образец* (сталь 45) – *ролик* (сталь 25 ХГТ) методом ступенчатого нагружения

Коэффициент трения на каждой j -й ступени нагружения рассчитывали по формуле

$$f_{R(j)} = \frac{M_{\tau(j)}}{F_{N(j)} R_{\text{kob}}},$$

где $f_{R(j)}$ – расчетный коэффициент трения на j -й ступени нагружения; $M_{\tau(j)}$ – момент трения на j -й ступени нагружения, Н · м; $F_{N(j)}$ – контактная нагрузка на j -й ступени нагружения, Н; $R_{\text{kob}} = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$ – радиус контробразца (ролика).

На рис. 4.8 построены зависимости основных характеристик трения и изнашивания при качении от контактных напряжений. Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

- сближение осей пары трения с ростом контактных напряжений увеличивается (см. рис. 4.8, *a*);
- момент трения с ростом контактных напряжений увеличивается (рис. 4.8, *б*);
- коэффициент трения качения от контактных напряжений не зависит, и его значение остается практически неизменным в течение всего времени испытания (рис. 4.8, *в*). Среднее значение коэффициента трения составляет $\bar{f}_R = 0,07$ (см. табл. 4.1).

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики сопротивления трению и изнашиванию при качении определяют при построении кривой контактной усталости?
2. В чем сущность метода многоступенчатого нагружения?
3. Каковы его достоинства?
4. Какие характеристики трения и изнашивания при качении определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения?
5. Какие Вы знаете критерии предельного состояния при трении качения?
6. Проведите расчет напряжений в зоне контакта образца и контробразца.
7. Каким образом на машинах серии СИ измеряют контактную и изгибающую нагрузки?
8. Каким образом на машинах серии СИ измеряют сближение осей образца и контробразца?
9. Каким образом на машинах серии СИ измеряют момент трения?
10. Как определяют коэффициент трения, если измерен момент трения?
11. Что означает каждая точка на кинетической полосе рассеяния сближения осей?
12. Как зависит момент трения от контактной нагрузки?
13. Как зависит коэффициент трения от контактной нагрузки?
14. Что такое рассеяние на микроуровне?

Лабораторная работа № 5

Экспериментальное определение характеристик трения и изнашивания при скольжении металл–полимерной пары трения

Цель работы: экспериментально определить характеристики трения и изнашивания при скольжении полимера по стали (фрикционной усталости полимера).

1. Схема испытаний. Испытательное оборудование. Образцы

Для проведения лабораторной работы используются испытательные машины СИ или СИ-01, устройство и работа которых описаны в лабораторных работах № 1 и 2.

Схема испытаний показана на рис. 5.1. Там же даны основные размеры стального образца и полимерного контрообразца.

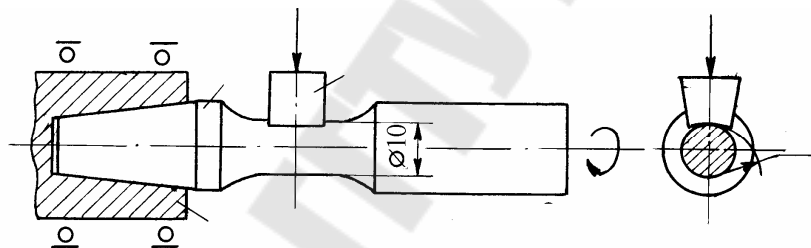


Рис. 5.1. Схема испытаний на фрикционную усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины; 3 – контрообразец

Если контрообразец прижимается к образцу контактной нагрузкой F_N , то можно вычислить среднюю удельную силу трения, МПа:

$$\tau_n = f_s p_a,$$

где f_s – коэффициент трения скольжения; $p_a = F_N/A_a$ – контактное давление, МПа (F_N – контактная нагрузка, Н; A_a – номинальная площадь контакта, м²).

2. Порядок проведения испытаний

- 2.1. Образец установить в шпиндель и закрепить.
- 2.2. Установить в обойму полимерный контрообразец и закрепить его.

2.3. Включить рубильник на силовом шкафу испытательной машины и тумблер блока ИУС.

2.4. Включить ПЭВМ.

2.5. На ПЭВМ задать программу испытаний (заданное время эксперимента, режим регистрации данных, частоту вращения образца, начальный уровень контактной нагрузки F_n , величину ступени приращения контактной нагрузки ΔF_j , продолжительность ступени нагружения $n_j = \text{const}$).

2.6. Начать испытания.

2.7. Испытания вести до наступления предельного состояния полимерного образца по одному или одновременно двум критериям. При завершении программы испытаний машину отключить.

2.8. Если необходимо прекратить испытание преждевременно, то нажать клавишу «ESC» или красную кнопку «СТОП».

2.9. Выключить рубильник машины и тумблер блока ИУС. Выключить ПЭВМ.

2.10. Снять образец и контрообразец.

2.11. Провести осмотр поверхностей трения образца и контрообразца.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучить литературу, рекомендуемую для данной лабораторной работы.

3.2. Повторить правила техники безопасности.

3.3. Подготовить программу испытаний (величины F_n , ΔF_j , n_j указывает преподаватель).

3.4. Провести под руководством преподавателя испытания.

3.5. Выполнить обработку и анализ результатов испытаний.

3.6. Оформить отчет по лабораторной работе.

4. Содержание отчета

4.1. Схема испытаний на фрикционную усталость.

4.2. Программа ступенчатого нагружения для ускоренных испытаний на фрикционную усталость.

4.3. Характеристики трения и изнашивания полимера при скольжении.

4.4. Результаты испытаний в виде графиков согласно рис. 5.2–5.4.

4.5. Выводы по проделанной работе.

5. Пример

Были проведены испытания пары трения *образец* (сталь 45) – *контр-образец* (стеклонаполненный полиамид ПА – 66КС). Испытания проводили на машине СИ по схеме, представленной на рис. 5.1. Размеры полимерного контртела – $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$. Частота нагружения – 50 Гц.

При формировании программы ступенчатого нагружения приняли следующие значения исходных параметров:

- начальный уровень контактной нагрузки $F_n = 10 \text{ Н}$;
- степень приращения контактной нагрузки $\Delta F_j = 30 \text{ Н}$;
- продолжительность ступени нагружения $n_j = 2 \cdot 10^5$ циклов.

Испытания проводили непрерывно, до достижения предельного состояния, в качестве которого приняли износ полимера, равный $i_{\text{lim}} = 1000 \text{ мкм}$. ПС наступило на VI ступени нагружения при $F_k = 240 \text{ Н}$. Критические значения характеристик трения и изнашивания полимера при скольжении приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Экспериментальные характеристики трения и изнашивания при скольжении

Характеристика	Обозначение	Значение
Предельная контактная нагрузка, Н	F_k	240
Суммарная долговечность, цикл	$N_{\Sigma F} = \sum n_j + n_k$	$1,001 \cdot 10^6$
Линейная интенсивность изнашивания	I_h	$3,18 \cdot 10^{-8}$
Максимальное значение коэффициента трения	$\max f_s$	0,83
Интервал изменения коэффициента трения	$\min f_s \dots \max f_s$	0,37–0,83

Было реализовано пять полных ступеней нагружения. ПС наступило на шестой ступени при $n_k = 1 \cdot 10^3$ циклов. Следовательно, суммарная долговечность составила:

$$N_{\Sigma F} = \sum n_j + n_k = \sum 200000 + 1000 = 1001000 \text{ циклов.}$$

По результатам испытания были построены графики зависимости контактной нагрузки и износа от числа циклов нагружения (рис. 5.4), а также зависимость момента трения от контактной нагрузки (рис. 5.2).

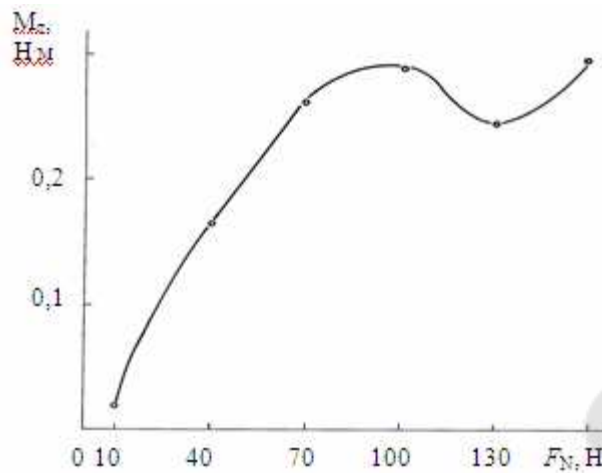


Рис. 5.2. Зависимость момента трения M_T от контактной нагрузки F_N для пары трения *образец* (сталь 45) – *контробразец* (стеклонаполненный полиамид ПА – 66КС)

Рассчитывали линейную интенсивность изнашивания I_h . Величину I_h определяли для каждой ступени нагружения (рис. 5.3). Так, на ступени V имеем:

$$I_h = h / L = 0,355 / (2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^5) = 5,33 \cdot 10^{-8}.$$

Результаты аналогичных расчетов представлены в табл. 5.2.

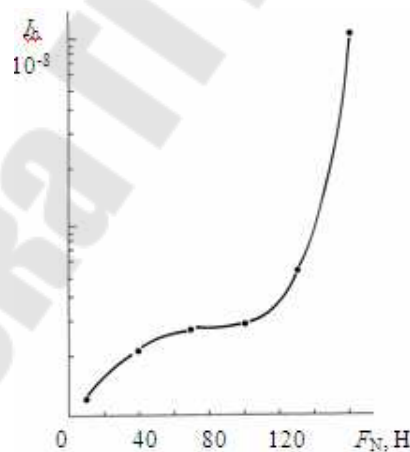


Рис. 5.3. Зависимость интенсивности изнашивания I_h от контактной нагрузки F_N для пары трения *образец* (сталь 45) – *контробразец* (стеклонаполненный полиамид ПА – 66КС)

Линейная интенсивность изнашивания за все время испытания

$$I_h = h / L = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 1,001 \cdot 10^6) = 3,18 \cdot 10^{-8}.$$

Рассчитываем коэффициент трения f_s полимера при скольжении. Величину f_s определяли для каждой ступени нагружения (рис. 5.4). Так, на ступени III имеем:

$$f_s = \frac{M_t}{F_N r} = \frac{0,263}{(70 \cdot 0,005)} = 0,75.$$

Результаты аналогичных расчетов для других ступеней представлены в табл. 5.2.

По вычисленным значениям построили графики зависимости линейной интенсивности изнашивания (см. рис. 5.3) и коэффициента трения (см. рис. 5.4) от контактной нагрузки.

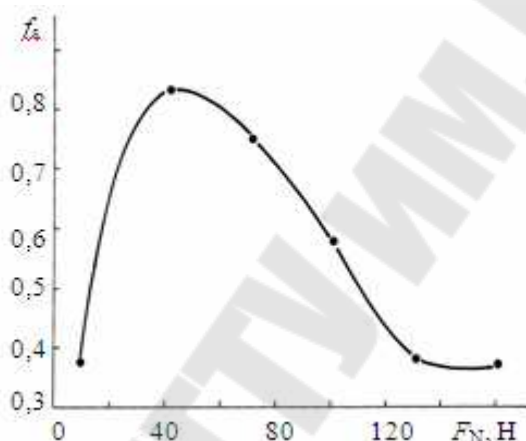


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента трения при скольжении f_s от контактной нагрузки F_N для пары трения *образец* (сталь 45) – *контробразец* (стеклонаполненный полиамид ПА – 66КС)

Таблица 5.2

Линейная интенсивность изнашивания, момент трения и коэффициент трения при скольжении полимера, определенные по результатам испытаний

Номер ступени	Контактная нагрузка F_N , Н	Линейная интенсивность изнашивания I_h	Момент трения M_t , Н · м	Коэффициент трения f_s
I	10	$1,27 \cdot 10^{-8}$	0,019	0,38
II	40	$2,15 \cdot 10^{-8}$	0,166	0,83
III	70	$2,71 \cdot 10^{-8}$	0,263	0,75
IV	100	$2,87 \cdot 10^{-8}$	0,290	0,58
V	130	$5,33 \cdot 10^{-8}$	0,247	0,38
VI	160	$1,06 \cdot 10^{-6}$	0,296	0,37

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

– линейная интенсивность изнашивания с ростом контактной нагрузки представляется сложной функцией: до $F_N = 70$ Н она растет, затем в диапазоне 70–100 Н ее значение остается почти постоянным, а при $F_N > 100$ Н имеет место резкий рост интенсивности изнашивания;

– в отличие от коэффициента трения f_R при качении стали по стали (см. лабораторную работу № 4) коэффициент трения f_s при скольжении полимера по стали зависит от величины приложенной контактной нагрузки. В диапазоне $\sim 10 < F_N < \sim 30$ Н наблюдается резкое увеличение коэффициента трения, затем рост f_s замедляется и кривая $f_s(F_N)$ достигает максимума $f_s = 0,83$ при $F_N \approx 40$ Н. При дальнейшем увеличении контактной нагрузки происходит постепенное, достаточно плавное, снижение величины f_s , и при $F_N > 130$ Н наступает стабилизация коэффициента трения $f_s \approx 0,37$. Описанный характер зависимости $f_s(F_N)$ может быть объяснен следующим образом. При относительно малых контактных нагрузках реализуется так называемое нормальное трение, когда коэффициент трения растет за счет более интенсивного увеличения момента трения M_T , чем увеличения нагрузки F_N . При этом растет и температура в зоне контакта. Когда температура достигает величины ~ 70 °С (имеет место максимальный f_s), происходит разрушение поверхностных слоев полиамида и «намазывание» его на сталь. Таким образом, происходит трение полимера по слою этого же полимера, «намазанного» на сталь, что и обуславливает снижение коэффициента трения.

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики сопротивления трению и изнашиванию определяют при построении кривой фрикционной усталости полимера?
2. В чем сущность метода многоступенчатого нагружения?
3. Каковы его достоинства?
4. Какие характеристики трения и изнашивания при скольжении определяют по результатам испытаний методом многоступенчатого нагружения?
5. Какие Вы знаете критерии предельного состояния полимера при трении по стали?
6. Каким образом на машинах серии СИ измеряют контактную и изгибающую нагрузки?
7. Каким образом на машинах серии СИ измеряют износ?

8. Каким образом на машинах серии СИ измеряют момент трения?
9. Как рассчитать интенсивность изнашивания?
10. Как рассчитать коэффициент трения?
11. Как зависит коэффициент трения от нагрузки? Объясните эту зависимость.
12. В чем отличие коэффициента трения при скольжении от коэффициента трения при качении?
13. Как зависит линейная интенсивность изнашивания полимера от контактной нагрузки? Опишите характерные участки этой зависимости.
14. Как изменяется величина износа от времени испытания при многоступенчатом нагружении?

Содержание

<i>Лабораторная работа № 1. Машины серии СИ для износоусталостных испытаний: устройство и работа.....</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Информационно-управляющие системы машин серии СИ: принципы построения и работа</i>	<i>15</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Экспериментальное определение характеристик сопротивления механической усталости</i>	<i>19</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Экспериментальное определение характеристик трения и изнашивания при качении металл–металлической пары трения.....</i>	<i>26</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Экспериментальное определение характеристик трения и изнашивания при скольжении металл–полимерной пары трения.....</i>	<i>36</i>

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ОСНОВЫ ТРИБОФАТИКИ

**Практикум
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-36 12 01
«Проектирование и производство
сельскохозяйственной техники»
дневной и заочной форм обучения**

Составители: **Попов Виктор Борисович**
Голопятин Александр Владимирович

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *И. П. Минина*

Подписано в печать 30.12.19.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,22.
Изд. № 34.
<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель