

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

# ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛОВ НА УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

*Методические указания к лабораторной работе*



Волгоград  
2010

УДК 620.178.16:(075)

Рецензент

канд. техн. наук, доцент *А. А. Белов*

Издается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Испытание** металлов на усталостное изнашивание : метод. указания к лабораторной работе / сост. С. Н. Паршев. – Волгоград : Изд-во ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 16 с.

Излагаются вопросы усталостного изнашивания конструкционных металлических материалов при трении качения. Приводятся основные схемы испытаний на усталостное изнашивание на машине СМЦ-2 и методы обработки результатов эксперимента.

Предназначены для студентов дневной, вечерней и заочной форм обучения, изучающих курсы «Сопротивление материалов», «Прикладная физика (триботехника)» и «Механические свойства металлов». Могут быть использованы при выполнении соответствующей лабораторной работы.

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2010

**Цель работы:** экспериментальное определение величины и характера износа при испытаниях пар трения по схеме ролик по ролику (трение качения). Расчет основных параметров усталостного изнашивания и построение графиков износа. Анализ влияния коэффициента скольжения на усталостное изнашивание.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Характерным повреждением катящихся под нагрузкой или с проскальзыванием металлических поверхностей являются раковины, ямки, оспинки (так называемые питтинги). Поверхность приобретает местное выкрашивание.

Питтинг — это особый вид повреждения поверхности при перемещающемся контакте под действием переменных напряжений, превышающих некоторый предел для данного материала. Иначе говоря, питтинг — это процесс контактной усталости поверхностей при качении или при качении со скольжением. Необходимым условием образования питтинга является некоторая степень металлического контакта смазанных поверхностей. При его отсутствии выкрашивание не наступает даже при переменных контактных напряжениях, вдвое превышающих длительный предел контактной выносливости.

При некотором числе циклов напряжений и достаточном контактном напряжении образуется первичная микротрещина. При изотропном материале зарождение ее следовало бы отнести к точке, в которой действует наибольшее касательное напряжение или наибольшее приведенное напряжение. Нормальной силе соответствуют симметричное распределение напряжений относительно линии ее действия и наибольшее касательное напряжение в точке, расположенной на некоторой глубине от поверхности. Однако субповерхностный слой в большей мере, чем при неподвижном контакте, подвергается пластическому деформированию, результатом чего является

неоднородность структуры и остаточные напряжения, что отразится на твердости.

Трещина может зародиться на глубине и на поверхности в зависимости от соотношения между нормальной и тангенциальной составляющими силы в контакте и от изменений физико-механических свойств материала в поверхностном слое. Часто трещина начинается на поверхности, на границе зерен.

Если трещина зародилась на глубине, то на известной стадии ее развития она может выйти на поверхность. Первичная трещина распространяется, независимо от пункта ее зарождения, наклонно к поверхности в соответствии с направлением приведенного напряжения и приобретенной благодаря пластической деформации анизотропии материала. В трещину с поверхности проникает масло. Когда открытый конец трещины вступает в контакт с сопряженной поверхностью, выход для масла закрывается. В масле под нагрузкой в контакте возникает высокое давление, распирающее стенки трещины. При повторных нагружениях трещина углубляется, а затем выходит на поверхность, отделяя выкрашивающийся объем металла (рис. 1).



Рис. 1. Схема образования усталостной раковины

На поверхностях с постоянным направлением обкатывания раковины имеют веерообразную форму. Исследования выкрошившихся частиц показали, что поверхность первичной трещины гладкая или ступенчатая, в то время как остальная ее поверхность рваная. Под электронным микроскопом у гладкой поверхности обнаруживается изменение исходной структуры. Выявлены подповерхностные трещины в основном материале в зоне выкрашивания.

При отсутствии масла образуются начальные трещины такого же характера, но вследствие износа вершин неровностей, на которых начинаются трещины, последние не успевают распространиться вглубь. Поэтому в открытых зубчатых передачах, в которых мало смазочного материала и на поверхности трения оседают абразивные частицы, питтинг наблюдается редко.

При качении со скольжением опережающая поверхность имеет, по различным данным, на 30 ... 100 % более высокий предел выносливости, чем отстающая поверхность из той же стали, мягкой или средней твердости. Г. К. Трубин дал такое объяснение этому факту [2]. Силы трения в контакте на опережающей поверхности направлены против, а на отстающей — по скорости скольжения. Сообразно действию касательных сил, в контакте развиваются поверхностные трещины, направление которых показано на рис. 2.

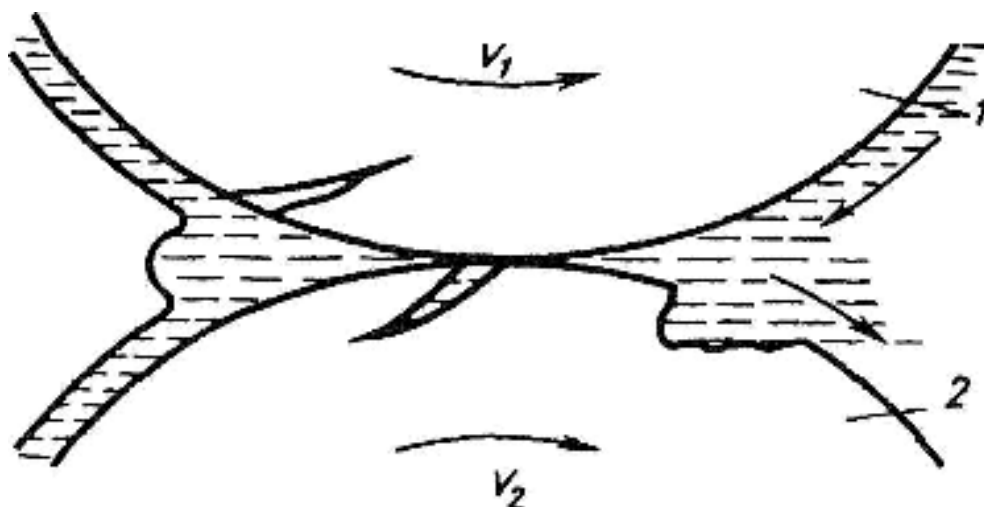


Рис. 2. Схема роста поверхностных трещин при обкатке поверхностей со скольжением (направление сил трения показано стрелками)

Раскрытая трещина на отстающей поверхности 2 развивается навстречу направлению действия. Масло с большой скоростью поступает в трещину и производит на ее стенки распирающее действие, близкое к ударному. Вслед за этим трещина закрывается, и давление на стенки еще больше возрастает.

На опережающей поверхности  $I$  гидродинамическое давление в слое смазочного материала выдавливает масло из трещины. Поэтому на опережающей поверхности питтинг либо совсем не развивается, либо развивается со значительным замедлением. Это проявляется, в частности, в том, что при близких по механическим свойствам материалах зубчатых колес язвины образуются на ножках зубьев отстающей поверхности, а на опережающей поверхности повреждения отсутствуют или незначительны.

В принципе нельзя говорить о контактной усталости только материала, поскольку в процессе обкатки участвуют два твердых тела и смазочный материал.

Контактная усталость материалов в реальной конструкции определяется физико-механическими свойствами материала, скоростью качения, удельной скоростью скольжения, режимом нагружения, вязкостью масла, способом его подачи, шероховатостью поверхностей и др.

Различают выкрашивание начальное и прогрессирующее. Иногда в начальной стадии работы контактирующихся поверхностей наблюдается выкрашивание, которое затем прекращается, а образовавшиеся ямки заплывают металлом. Происходит своего рода самозалечивание. Такое выкрашивание называют начальным в отличие от прогрессирующего, которое не прекращается.

В зубчатых передачах различают также прогрессирующее и ограниченное, или местное, выкрашивание. На мягких поверхностях зубьев в начальной стадии их работы часто наблюдается выкрашивание на ограниченных участках, являющихся зонами концентрации напряжений вследствие наличия местных выступов или других причин. Выкрашивание продолжается до тех пор, пока в результате его и износа нагрузка не распространится на большую поверхность. Влияет также наклеп поверхности. После завершения ограниченного выкрашивания работу зубчатой передачи можно считать вполне надежной.

Выкрашивание твердых рабочих поверхностей, как правило, не бывает ограниченным. После появления мельчайшей оспины материал вследствие его хрупкости скалывается с ее стенок, и оспина разрастается до крупной язвины. Однако передача может еще работать сотни часов до полного повреждения поверхности в результате выкрашивания.

Длительность начального выкрашивания может быть очень большой и исчисляться даже миллионами циклов. Подтверждением может служить такой пример. У мощного зубчатого редуктора зубья колес тихоходной ступени выкрашивались; на каждом полушевроне за сотни часов вся рабочая поверхность покрывалась язвами. Затем поверхность наклепалась и выгладилась, и редуктор был доведен до полной проектной нагрузки.

Другим видом повреждения деталей под действием переменных контактных напряжений является отслаивание, т.е. отлущивание чешуек, имеющих иногда весьма заметные размеры. Отслаивание возникает в результате образования и развития продольной трещины на некоторой глубине с выходом ее на поверхность.

Отслаивание твердой корки металла наблюдается в деталях, которые азотированы, цементованы, цианированы или подвергнуты поверхностной закалке. Касательные напряжения на стыке твердой корки с сердцевиной приводят к разрушению ее тем быстрее, чем больше касательные напряжения внутри корки. Это объясняется определенным соотношением сопротивления усталости сердцевины и упрочненного слоя. Увеличивая его толщину, часто удается ликвидировать отслаивание. Однако встречается отслаивание прокатных валков, подвергнутых поверхностной закалке, у которых при прокатке в связи с большими тангенциальными силами в контакте зона наибольших касательных напряжений почти подходит к поверхности; это свидетельствует о действии дополнительных факторов. На разрушения, происходящие под поверхностью, помимо контактных

напряжений, влияют остаточные напряжения от термической или термохимической обработки и напряжения от общей деформации детали.

Кроме того, причиной отслаивания может быть значительное пластическое деформирование неупрочненной поверхности детали под действием контактной нагрузки. При качении без смазочного материала или с пластичным смазочным материалом возникающие на поверхности усталостные трещины залечиваются (слипаются) при пластической деформации, а на глубине, в связи с неоднородностью структуры, появляются опасные остаточные напряжения.

Отслаиванию могут способствовать и дефекты металла в виде неметаллических включений, наличия свободного цементита и др.

Отслаивание весьма малой глубины обязано локальной пластической деформации отдельных неровностей поверхности, а также образованию пластически деформированных объемов металла, насыщенного кислородом воздуха, смазочным материалом или углеродом смазочного материала.

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ, ОБРАЗЦЫ, МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Испытания на усталостное изнашивание проводятся на специальных машинах, одной из них является машина СМЦ-2, схема которой представлена на рис. 3.

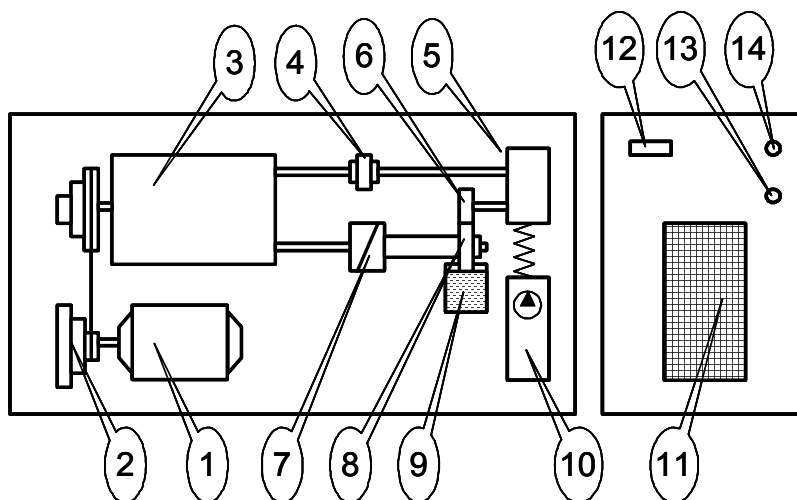


Рис. 3. Схема машины СМЦ-2 для испытаний на изнашивание



Машина СМЦ-2 состоит из механической части и электронного блока управления и контроля. Основными узлами механической части является электродвигатель 1, ременная передача 2, редуктор 3, муфта 4, закрытая зубчатая передача 5, индуктивный датчик момента трения 7, ванночка для смазки или охлаждения 9 и механизм нагружения 10. На валах редуктора и зубчатой передачи установлены образец 8 и контртело 6. В блок управления и контроля входят кнопки «ПУСК» 13 и «СТОП» 14, электрический счетчик числа циклов 12 и электронный самопишущий потенциометр 11, регистрирующий изменение момента трения в процессе испытаний. Установкой ремней на ту или другую пару шкивов ременной передачи изменяют частоту вращения образца, которая может составлять  $5,0 \text{ с}^{-1}$ ;  $8,3 \text{ с}^{-1}$ ;  $16,6 \text{ с}^{-1}$ . При испытаниях на усталостное изнашивание по схеме ролик по ролику (трение качения), вращение на верхний ролик, являющийся контртелом передается через муфту и зубчатую передачу, изменением передаточного отношения в которой (имеется комплект сменных зубчатых колес) устанавливается процент проскальзывания в паре трения (0, 5, 10 и 20%). Контактное давление в паре трения обеспечивается усилием, создаваемым механизмом нагружения в интервале 0 – 5 кН.

В качестве испытуемых образцов используются диски (рис. 4) с наружным диаметром  $D=40 \text{ мм}$ , внутренним диаметром (посадочным отверстием)  $d=16 \text{ мм}$  и шириной  $b=10 \text{ мм}$ . Биение наружной поверхности относительно оси и торцевое биение должно не превышать  $0,01 \text{ мм}$ .

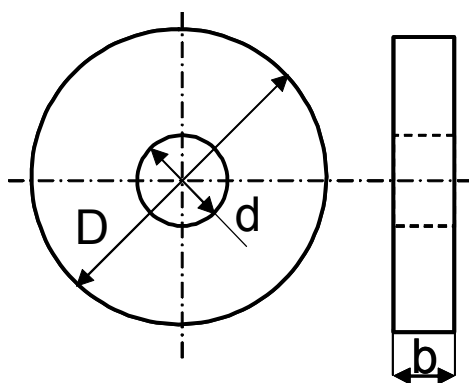


Рис. 4. Образец для испытаний на усталостное изнашивание

Схема испытаний на усталостное изнашивание на машине СМЦ-2 показаны на рис. 5. Схема «ролик по ролику» применяется для испытаний на изнашивание в условиях трения качения или трения качения с проскальзыванием. При этом, основным видом изнашивания является усталостное выкрашивание (питтинг). Такие испытания позволяют определить контактную выносливость (усталость) металла. Величина износа по массе определяется путем взвешивания образцов на аналитических весах с точностью до 1 мг, а , линейный износ, – путем измерения диаметра образца микрометром с точностью до 1 мкм, через определенное число циклов испытаний, например, через  $10^5$  циклов. Предварительно, образцы очищаются от смазки, обезжириваются и охлаждаются до комнатной температуры. Это необходимо для обеспечения точности измерений.

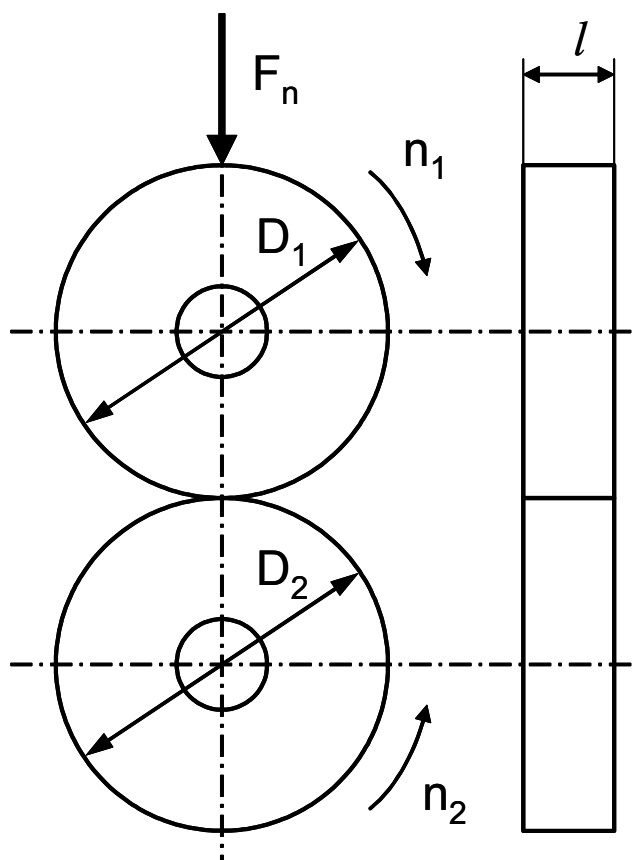


Рис. 5. Схема испытаний на усталостное изнашивание

Линейный износ и износ по массе рассчитываются по формулам:

$$h_i = \frac{D_i - D_{i+1}}{2}, \quad (2.1)$$

$$g_i = G_i - G_{i+1}, \quad (2.2)$$

где  $D$  и  $G$  – диаметр и масса образца, соответственно,  $i$  – точка измерений.

### 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты взвешиваний и измерений диаметра образца через каждые  $10^5$  циклов изнашивания заносятся в протокол испытаний и на их основании рассчитывается линейный износ и износ по массе.

#### Протокол испытаний на изнашивание

Марка \_\_\_\_\_ испытательной  
машины \_\_\_\_\_

Схема \_\_\_\_\_  
испытаний \_\_\_\_\_

Условия испытаний:

- Скорость \_\_\_\_\_ (частота \_\_\_\_\_ вращения)
- Скорость \_\_\_\_\_ (частота \_\_\_\_\_ вращения)
- Нормальное \_\_\_\_\_ усилие \_\_\_\_\_ (давление) \_\_\_\_\_ в  
контакте \_\_\_\_\_
- Охлаждение \_\_\_\_\_  
(смазка) \_\_\_\_\_
- Процент \_\_\_\_\_  
проскальзывания \_\_\_\_\_

Материал \_\_\_\_\_ и \_\_\_\_\_ механические свойства \_\_\_\_\_ образца

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Материал \_\_\_\_\_ и \_\_\_\_\_ механические свойства \_\_\_\_\_  
контртела \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Число циклов $N_c \cdot 10^{-5}$	Износ по массе			Линейный износ		
	$G_i$ , г	$g_i$ , мг	$\Sigma g_i$ , мг	$D_i$ , мм	$h_i$ , мкм	$\Sigma h_i$ , мкм
0		0	0		0	0
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

На основании данных таблицы строятся графики зависимостей  $\Sigma g_i = f(N_u)$  и  $\Sigma h_i = f(N_u)$ , по которым устанавливается область установившегося износа (линейные участки кривых).

Для определения работы трения по необходимо найти полуширину полоски контакта:

$$b_H = 1,552 \cdot \sqrt{\frac{k_d \cdot F_n \cdot R_{np}}{l \cdot E_{np}}}, \quad (2.3)$$

где  $K_d = 1$  – динамический коэффициент, для безударного циклического

нагружения;  $R_{np} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 \pm r_2}$  – приведенный радиус (+ для внешнего, – для

внутреннего контакта),  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы испытываемых образцов;

$E_{np} = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$  – приведенный модуль ( $E_1$  и  $E_2$  – модули нормальной

упругости испытываемых материалов).

Максимальное циклическое контактное напряжение

$$p_{max} = \sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{k_d \cdot F_n \cdot E_{np}}{l \cdot R_{np}}}, \quad (2.4)$$

где  $l$  – длина контакта испытываемых образцов.

Путь трения –  $S = 2b_H \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot n \cdot t$ , где  $V_1$  и  $V_2$  – линейные скорости

образцов:

$V_1 = \frac{p \cdot n}{30} \cdot \frac{D_1}{2}$ ;  $V_2 = V_1 \cdot c$ , где  $c$  – коэффициент проскальзывания.

Работа трения –  $W = F_f \cdot S$ , где  $F_{mp} = F_n \cdot f$ ,  $F_n$  – нормальная сила,  $f$  – коэффициент трения (для трения качения сталь по стали может быть принят 0,01-0,015). Время изнашивания  $t = \frac{N_u}{n}$ , где  $N_u$  – число циклов нагружения;  $n$  – частота вращения образца.

На основании проведенных расчетов и эксперимента определяются интенсивности изнашивания:  $I_h = h/S$  – интенсивность линейного изнашивания;  $I_G = G/S$  – интенсивность изнашивания по массе;  $I_W = V/W$  – энергетическая интенсивность изнашивания;  $I_{h(t)} = h/t$  – скорость изнашивания

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

1. Сформулируйте цель исследования.
2. В теоретической части работы кратко опишите основные понятия и расчетные формулы, относящиеся к испытаниям металлов на усталостное изнашивание
3. В разделе «Оборудование. Образцы. Методика испытаний на изнашивание» приведите технические характеристики машины СМЦ-2, вид испытываемого образца и основные схемы испытаний, методику проведения испытаний, измерений износа образца и обработки экспериментальных данных.
4. В разделе «Обработка результатов экспериментов» занесите данные измерения износа образца и последующих вычислений в таблицу,

постройте графики линейного износа и износа по массе, покажите области установившегося износа, вычислите интенсивности и скорость изнашивания.

5. Сделайте выводы согласно поставленной цели исследования.

#### **5. ПРАВИЛА ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**

- ✓ Допускается работа на машине только одного экспериментатора.
- ✓ Машина находится под напряжением 380В! Проверьте заземление! Не касайтесь токоведущих проводов и вращающихся частей! Ременная передача должна быть закрыта защитным кожухом!
- ✓ Образец для измерений снимать только при полностью остановившейся машине!
- ✓ При появлении посторонних шумов и вибрации немедленно выключить машину и сообщить преподавателю!

#### **6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. При каких условиях трения происходит усталостное изнашивание.
2. К какому виду относится усталостное изнашивание, в каких узлах трения оно происходит.
3. Каков механизм разрушения поверхностного слоя при усталостном изнашивании
4. Дайте определения и напишите формулы линейной, объемной, массовой, энергетической интенсивностям износа.
5. Дайте определения пути трения, работы трения, силы трения, коэффициента трения, напишите соответствующие формулы.
6. Что называется циклом испытаний на изнашивание, как определить интенсивность изнашивания за один цикл?
7. Как определить полуширину полосы линейного контакта.

8. Как определить приведенный радиус, приведенный модуль нормальной упругости.
  9. Как определить максимальное контактное напряжение при линейном контакте.
  10. Какова роль смазки в процессах усталостного изнашивания.
  11. Приведите технические характеристики машины СМЦ-2, Перечислите основные узлы и укажите их назначение.
  12. Какая схема испытаний на усталостное изнашивание применяются на машине СМЦ-2.
  13. Какие средства используются для экспериментального определения линейного и массового износа образца. Приведите формулы для определения линейного и массового износа.
  14. В каких координатах строятся графики износа (интенсивности изнашивания), как установить по графикам область установившегося изнашивания?
- 

#### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991, 320 с.
2. Шапочкин В. И. Износостойкость деталей машин. Волгоград: Перемена, 1994, 97 с.
3. Износостойкость сопрягающихся деталей механического оборудования наземных транспортных систем. Н. В. Асеев, Е. Н. Асеева, Э. Ф. Крейчи, М. М. Матлин. Волгоград, РПК «Политехник», 2000, 99 с.
4. Д. Мур Основы и применения трибоники М.: Мир, 1978, 488 с.
5. Справочник по триботехнике (в 3-х томах) под ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе, М.: Машиностроение, 1990
6. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: МСХА, 2002, 630 с.
7. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология, Самара, СамГТУ, 2000 268 с.
8. «Поверхностная прочность и изнашивание материалов узлов трения» /С.Н. Паршев, Н.Ю. Полозенко // Волгоград, РПК «Политехник», 2009, 54 с.
9. Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005, 536 с.

Учебное издание

Сергей Николаевич **Паршев**

**ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛОВ  
НА УСТАЛОСТНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ**

*Методические указания к лабораторной работе*

Темплан 2010 г. (учебно-методическая литература). Поз. № 139.  
Подписано в печать 26.05.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93.  
Тираж 10 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.  
400131, г. Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.  
400131, г. Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.