

УДК 620.178.16; 620.178.3

Ю.М. Плескачевский¹⁾, Н.А. Махутов²⁾, Ю.Н. Дроздов²⁾, Л.А. Сосновский³⁾,
М.М. Гаденин²⁾, А.В. Богданович⁴⁾, С.А. Тюрин⁵⁾, В.В. Воробьев⁶⁾

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗНОСОУСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ*

¹⁾ НАН Беларуси, Минск, Беларусь

²⁾ Белорусский национальный университет транспорта, Гомель, Беларусь

³⁾ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

⁴⁾ Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь

⁵⁾ Институт механики и надежности машин НАНБ, Минск, Беларусь

⁶⁾ РУП «ГОМЕЛЬТРАНСНЕФТЬ ДРУЖБА», Гомель, Беларусь

В машиностроении сложилась и получила широкую реализацию концепция приоритетности натуральных испытаний – от отдельных деталей и узлов до агрегатов и машин в целом. Уже на первых этапах создания новой машины бывает ясно, какие узлы должны быть испытаны на специальных стендах. Обычно это все виды коробок передач, элементы гидросистемы и моторная установка. В отношении других узлов такой ясности нет, и перечень объектов для стендовых испытаний появляются лишь после испытаний опытного образца машины. Полнокомплектные испытания, проводимые на уникальных стендах в лабораторных условиях, позволяют выявлять такие узлы гораздо раньше и начать их доработку еще до эксплуатационных испытаний. Однако трудоемкость и стоимость таких испытаний весьма велики. К тому же они обладают одним серьезным техническим недостатком: при выходе из строя любого узла, агрегата или даже отдельной детали машины, испытания останавливаются на время анализа причин поломки, принятия решения и восстановления работоспособности. В силу этого коэффициент использования стенда для полнокомплектных испытаний существенно снижается. Поэтому полнокомплектные испытания в обязательном порядке дополняются испытаниями агрегатов и узлов, проводимыми на автономных стендах. Все это ведет как к удорожанию испытаний, так и к увеличению сроков их проведения. В результате время, потребное на создание и доводку машины по критериям надежности, растет.

Стендовые испытания узлов и агрегатов обнаруживают, в свою очередь, еще один существенный недостаток: результаты испытаний имеют ограниченное значение, они относятся лишь к тем типоразмерам объекта, которые предусмотрено испытывать на данном стенде. Если появляются иные типоразмеры объекта, надо строить новый стенд со всеми вытекающими последствиями.

Процедуру анализа силовых систем современных машин проиллюстрируем применительно к механизмам движения комплекса для заготовки кормов производства РУП «Гомсельмаш». Если выполнить подобный анализ по всем механизмам движения комплекса К-Г-6 «Полесье», который состоит из универсального энергетического средства (УЭС) «Полесье-250» и полунавесного кормоуборочного комбайна «Полесье-3000» с набором адаптеров, то можно установить, что в них содержится 125 типоразмеров силовых систем, которые можно классифицировать всего по трем видам износоусталостного повреждения (таблица 1): 85 – силовых систем работают в условиях фреттинг-усталости, 36 – в условиях контактно-механической усталости и 4 – в условиях фрикционно-механической усталости.

* Работа выполнена при поддержке Белорусского и Российского фондов фундаментальных исследований

На фреттинг-усталость работают, как правило, соединения. В механизмах движения комплекса для заготовки кормов применяются 5 типов соединений: шлицевые, зубчатые, шпоночные, безззорные, шпоночные конусные. На контактно-механическую усталость работают зубчатые передачи и шипы крестовин в игольчатых подшипниках. На фрикционно-механическую усталость работают червячные передачи и узлы с подшипниками скольжения.

В этой связи практически полезной представляется идея модельных испытаний относительно небольших объектов. И тогда оказывается, что вместо 125 силовых систем комплекса для заготовки кормов достаточно проводить ускоренные лабораторные испытания лишь трех типоразмерных моделей – по типу износоусталостного повреждения: фреттинг-усталость, контактно-механическая усталость и фрикционно-механическая усталость.

Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов трения и механической усталости на работоспособность материалов и моделей силовых систем в сложных условиях нагружения разработаны специальные методы износоусталостных испытаний [1- 5].

В лабораторных условиях сопротивление износоусталостным повреждениям изучают, как правило, при испытании малоразмерных моделей силовых систем. В результате испытаний определяют количественные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям. Эти характеристики могут быть использованы:

- при выборе конструкционных материалов для силовых систем и обосновании конструктивно-технологических решений;
- при контроле качества материалов;
- при расчетах на этапе проектирования силовых систем;
- при сертификации силовых систем по критерию износоусталостных повреждений;
- при конструировании и создании материалов с заданными физико-механическими свойствами для обеспечения требуемых характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям.

Один из путей разработки методов комплексных (износоусталостных) испытаний – совмещение известных методов испытания на механическую усталость и методов испытания на трение и изнашивание. На рисунке 1 в качестве примера показан принцип такого формирования в том случае, когда базовым методом испытания на усталость принимают изгиб с вращением. Заметим, что вращательное движение наиболее характерно для современных машин, поэтому методы, представленные на рисунке 1, являются практически важными.

Таблица 1

Сводные данные о силовых системах комплекса для заготовки кормов

Износоусталостное повреждение	Силовые системы (натура)	Материал		Модель
		вала	втулки	
Фреттинг-усталость	Соединения: – шлицевые; – зубчатые; – шпоночные; – шпоночные	40X, 45X, 18ХГТ, 25ХГТ, 20Х23Н18	20, 40, 40Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 12Х18Н10Т	Вал / втулка

	конусные; – беззазорные			
	Всего 85 типоразмеров	Всего 8 марок стали		
Контактно-механическая усталость	Зубчатые передачи	25ХГТ		<i>Ролик / ролик</i> <i>Вал / ролик</i>
	Шипы крестовины в игольчатых подшипниках	20Х (вал)		
	Всего 36 типоразмеров	Всего 2 марки стали		
Фрикционно-механическая усталость	Червячные передачи	40Х	ВЧ 55 (чугун)	<i>Вал / втулка</i>
	Узлы с подшипниками скольжения	20Х	25ХГТ ЛО90-1 (латунь)	
		40Х		
	Всего 4 типоразмера	35	35Л	
		Всего 6 марок		

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.

Основные схемы испытаний

Если испытания проводят на механическую усталость, то объектом испытания является элемент конструкции, например, цилиндрический образец определенной геометрии (см. рисунок 2, в). Если испытания производят на трение при скольжении либо качении, то объектом испытания является пара трения (см. рисунок 2, б, г), состоящая из образца 1 и контробразца 2; их называют также телом и контртелом. Заметим, что здесь мы образцом (телом) всегда называем 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 модели силовых систем, состоящие из двух элементов 1 и 2 (см. рисунок 2, а, д).

Необходимо отметить, что все методы износоусталостных испытаний (рисунок 2) базируются на едином основном образце - так называемом гладком цилиндрическом образце с рабочим диаметром $d = 2r = 10$ мм. Он идентичен стандартному образцу [6]. Это обеспечивает как преемственность испытаний, так и сравнимость их результатов.

Испытания на фрикционно-механическую усталость (рисунок 2, д). Цилиндрический образец 1 одним концом закреплен в шпинделе 2 и вращается с угловой скоростью ω_1 . На другом его конце приложена вертикальная изгибающая (внеконтактная) нагрузка Q (вверх или вниз). А к его рабочей зоне диаметром $d = 10$ мм прижимается под действием контактной нагрузки F_N невращающийся контробразец 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 рисунок 2, д, можно проводить:

- износоусталостные испытания на фрикционно-механическую усталость (рисунок 2, *д*) с варьированием величин F_N , Q и ω_1 ;
- испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рисунок 2, *е*) с варьированием величин Q и ω_1 . В этом случае контролль образец 3 снимают, так что $F_N = 0$;
- испытания на трение и изнашивание при скольжении (рисунок 2, *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.

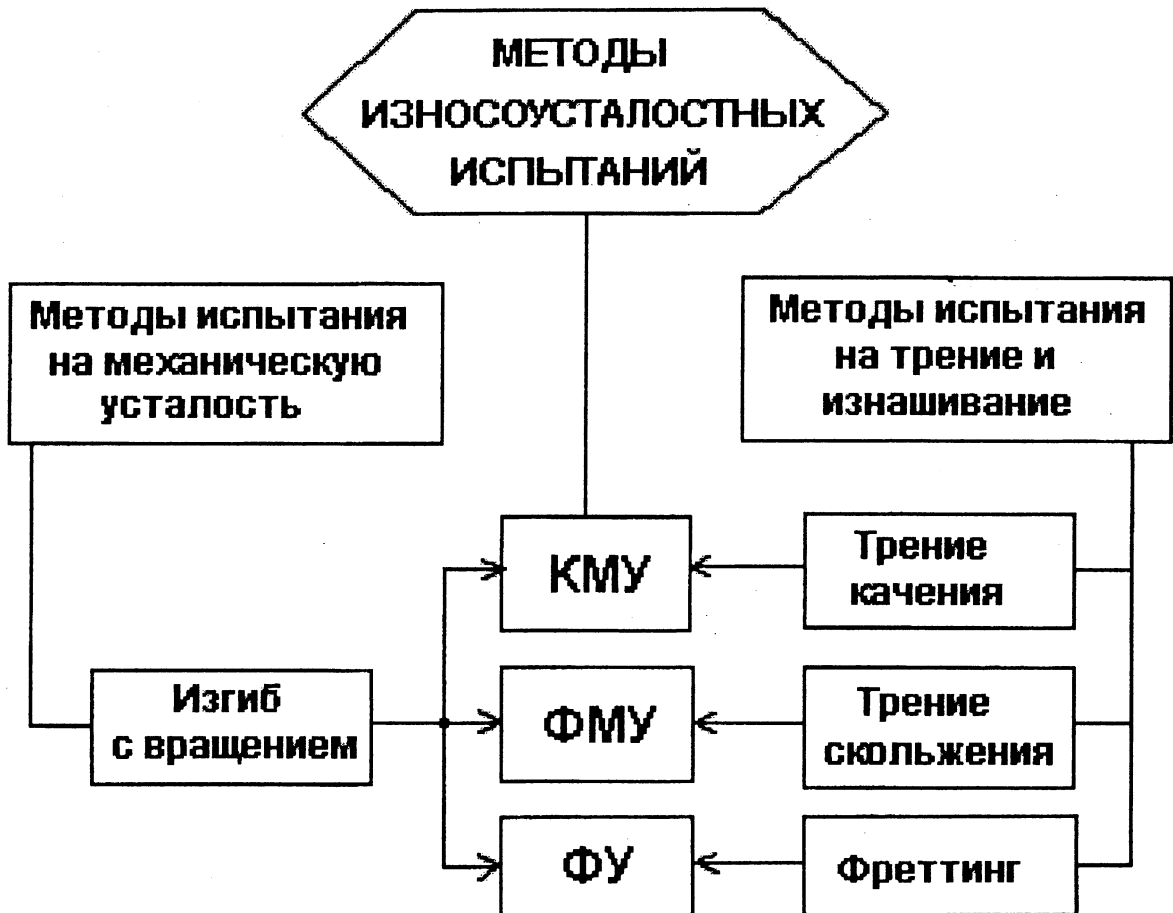


Рисунок 1. Формирование методов износоусталостных испытаний при главном вращательном движении: КМУ – контактно-механическая усталость; ФМУ – фрикционно-механическая усталость; ФУ – фреттинг-усталость

Итак, если, согласно рисунка 1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение скольжения, то получим схему испытаний на фрикционно-механическую усталость на рисунка 2, *д* (см. широкую пунктирную стрелку, направленную вниз).

При испытания на трение при скольжении (см. рисунок 2, *з*) контактная нагрузка F_N аналогично может быть статической, т. е. постоянной во времени, но действующие контактные напряжения тоже являются циклическими. В этой связи испытания на трение при скольжении согласно схеме, показанной на рисунке 2, *з* – это, по-существу, испытания на фрикционную усталость (в условиях асимметричного растяжения–сжатия).

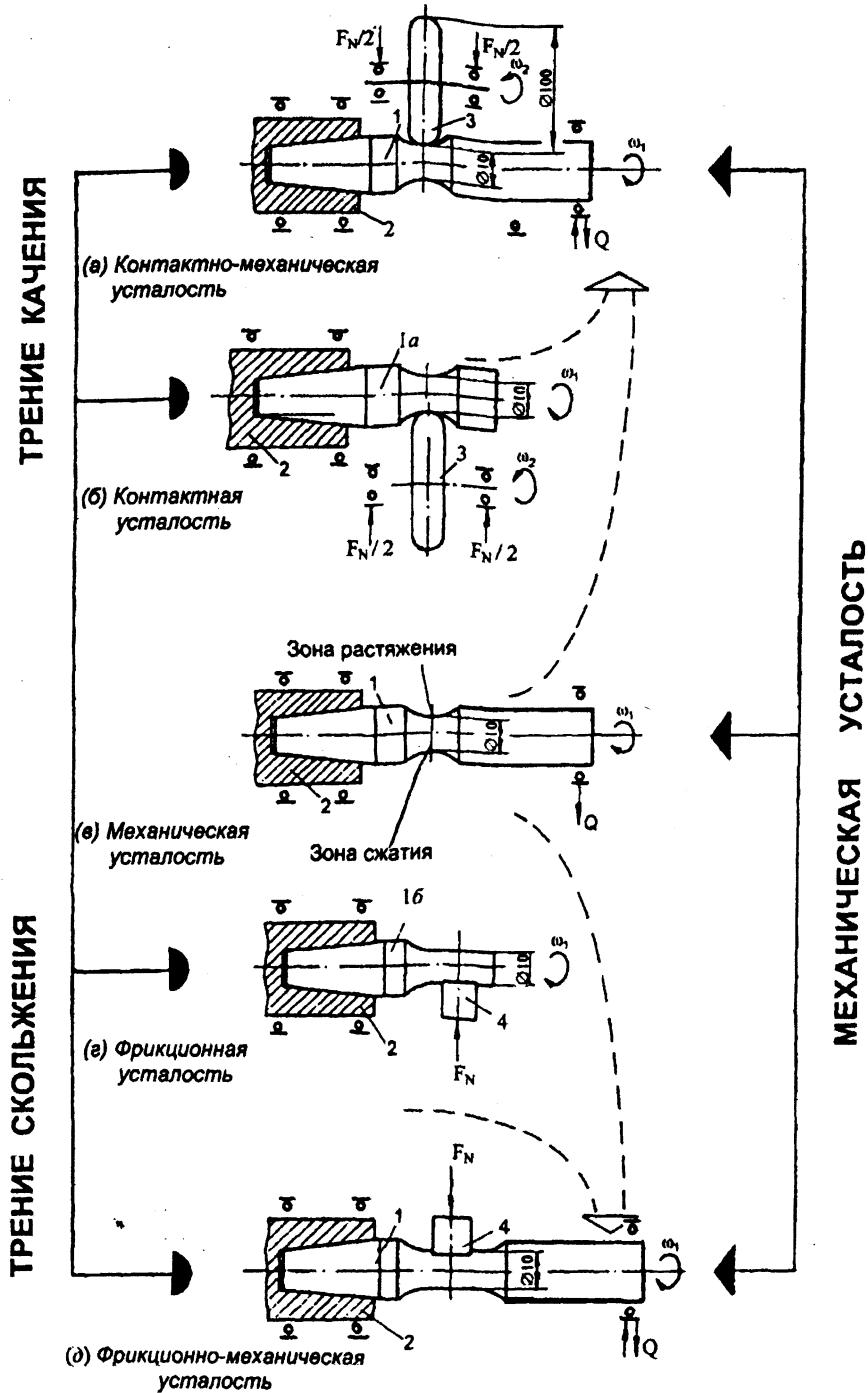


Рисунок 2. Типичные схемы износоусталостных испытаний: 1, 1а, 1б – образец; 2 – шпindel испытательной машины; 3, 4 – контрообразец; Q – изгибающая нагрузка; F_N – контактная нагрузка; ω_1, ω_2 – скорость вращения образца, контрообразца

Испытания на контактно-механическую усталость (рисунок 2, а). Эта схема отличается от схемы испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рисунок 2, д) 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 и в различных направлениях. При реализации схемы испытаний согласно рисунку 2, а, можно проводить:

– износоусталостные испытания на контактно-механическую усталость (рисунок 2, а) с варьированием величин F_N , Q , ω_1 и ω_2 ;

– испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (рисунок 2, в) 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 (рисунок 2, б) 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.

Итак, если, согласно рисунок 1, объединить (совместить) известные схемы испытаний на механическую усталость и на трение при качении, то получим схему испытаний на контактно-механическую усталость на рисунке 2, а (см. широкую пунктирную стрелку, направленную вверх).

Испытания на фреттинг-усталость (рисунок 3, а). В отличие от схем испытаний на фрикционно-механическую усталость (см. рисунок 2, д) и контактно-механическую усталость (см. рисунок 2, а), в этом случае (см. рисунок 3, а) к рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца 1, изгибаемого нагрузкой Q , прижимают контактной нагрузкой F_N два контрообразца 3, называемые мостиками фреттинга. Последним можно сообщать окружное (со скоростью v_1) или осевое (со скоростью v_2) колебательное движение малой амплитуды либо возбуждать оба движения одновременно. При реализации схемы испытаний согласно рисунка 3, а, можно проводить:

– износоусталостные испытания на фреттинг-усталость (см. рисунок 3, а) с варьированием величин F_N , Q , ω , v_1 и v_2 ;

– испытания на механическую усталость при изгибе с вращением (см. рисунок 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 (см. рисунок 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.

Основные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям

Основные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям определяют в результате износоусталостных испытаний соответствующих объектов.

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

На рисунке 4 в качестве примера показаны 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.

При испытаниях на механическую усталость критерием предельного состояния принято разделение образца на части. При испытаниях на контактную усталость критерием предельного состояния служила 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.

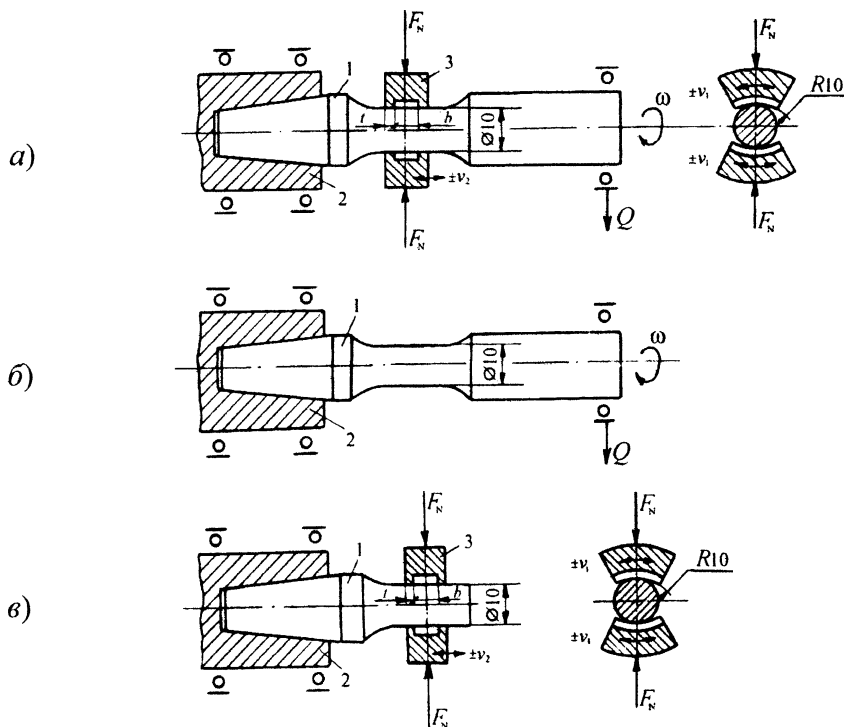


Рисунок 3. Схемы испытаний на фреттинг-усталость (а), механическую усталость (б) и фреттинг (в)

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

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

По-существу, коэффициент K_D является прочностной характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на рисунке 4, имеем $K_D = 256/165 = 1,62$.

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

$$K_B = p_{f\sigma} / p_f . \quad (2)$$

По-существу, коэффициент K_B является трибологической характеристикой. В условиях опытов, результаты которых представлены на рисунке 4, имеем $K_B = 2200/1760 = 1,25$.

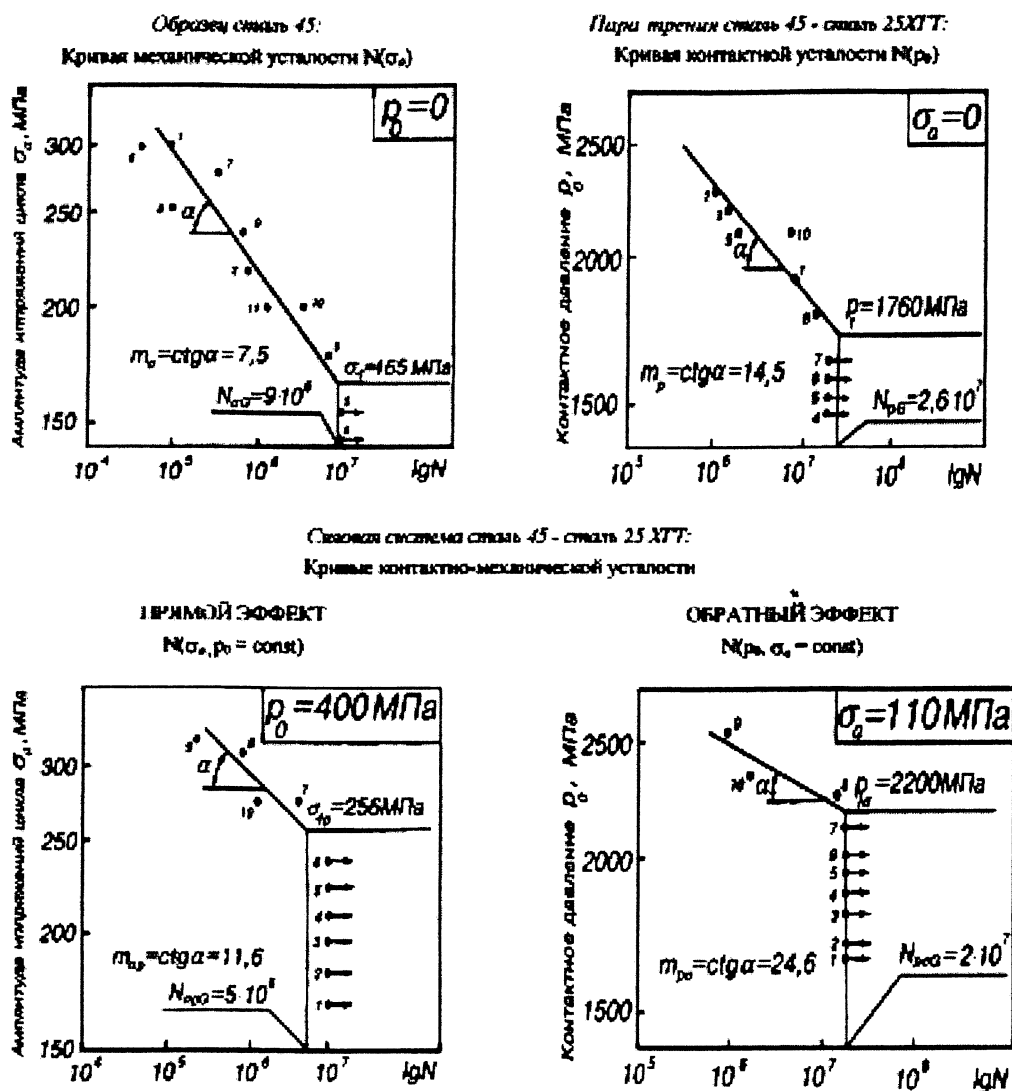


Рисунок 4. К определению основных характеристик износоусталостного повреждения (номер точки указывает последовательность испытаний)

В таблице 2 даны система обозначений и численные значения всех параметров, устанавливаемых по кривым усталости, представленным на рисунке 4. Изучая эти экспериментальные результаты, можно сделать следующие основные выводы:

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

(б) показатель наклона увеличивается, если переходят от кривой механической усталости к соответствующей кривой контактно-механической усталости ($m_{cp} \gg m_\alpha$) и если переходят от кривой контактной усталости к соответствующей кривой контактно-механической усталости ($m_{p0} \gg m_p$).

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

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	$N_{G\sigma} = 9 \cdot 10^6$	$N_{Gp} = 2,6 \cdot 10^7$	$N_{G\sigma p} = 5 \cdot 10^6$	$N_{Gp\sigma} = 2 \cdot 10^7$
Показатель наклона кривой усталости	$m_\sigma = 7,5$	$m_p = 14,5$	$m_{\sigma p} = 11,6$	$m_{p\sigma} = 24,6$

Методика исследования износоусталостных повреждений

Износоусталостные повреждения 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 проскальзыванием, проскальзывание); 2) уровень контактной нагрузки; 3) амплитуда проскальзывания (при фреттинге), степень проскальзывания (при трении качения); 4) скорость трения (при качении, при 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 износоусталостных повреждений 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 эффекта.

Изучить прямой эффект экспериментально можно двумя методами:

(D1) *Метод комплексных испытаний*, который состоит 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.);

(D2) *Метод последовательных испытаний*, состоящий из двух этапов, поэтому его можно назвать и 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:

(В1) *Метод комплексных испытаний* состоит 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.).

(В2) *Метод последовательных (или 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.

Машины для износоусталостных испытаний

Закономерности комплексных – износоусталостных повреждений можно изучать лишь экспериментально. Поэтому на базе ряда изобретений СССР был создан новый класс испытательного оборудования – машины для износоусталостных испытаний серии СИ в результате сотрудничества специалистов ООО «НПО ТРИБОФАТИКА» и трех академических институтов: НЦ ПММ НАН Беларуси, ИПП НАН Украины, ИМАШ РАН. На рисунке 5 показан общий вид одной из последних модификаций машин, в таблице 3 даны технические характеристики базовых машин серии СИ, а на рисунках 6 и 7 можно видеть принципиальную схему машины, систему ее управления и измерения основных параметров в процессе испытания.

Основные достоинства машин серии СИ:

- а) полная автоматизация процессов испытания и обработки результатов (на базе ПЭВМ);
- б) блочно-модульный принцип компоновки ряда специализированных машин настольного исполнения;
- в) уникальные возможности изучения процессов износоусталостного повреждения и разрушения;
- г) высокая точность измерений;
- д) возможность проведения многих видов испытаний на одной машине, что обуславливает их высокую экономичность.

Так, на машине СИ-03М можно проводить испытания на

- механическую усталость;
- трение скольжения;
- трение качения;
- контактно-механическую усталость;
- фрикционно-механическую усталость;

–фреттинг-усталость.



Рисунок 5. Универсальная машина СИ-03М

Поскольку все методы испытания реализуются на одном типоразмере испытуемых объектов – образцах диаметром 10 мм (см. таблицу 3 и рисунки 2-3), тем самым обеспечивается уникальная возможность корректного сравнения и анализа результатов испытания в различных условиях. Таким образом, машины серии СИ – это наукоемкая продукция для реализации новых и высоких технологий испытаний.

К настоящему времени методы комплексных износоусталостных испытаний разработаны, внедрены и доведены до стандартного исполнения. В результате таких испытаний не только получают комплекс характеристик сопротивления износоусталостным повреждениям, но и определяют ряд параметров, которые входят в определяющие уравнения, описывающие уровень поврежденности и предельное состояние силовых систем [27].

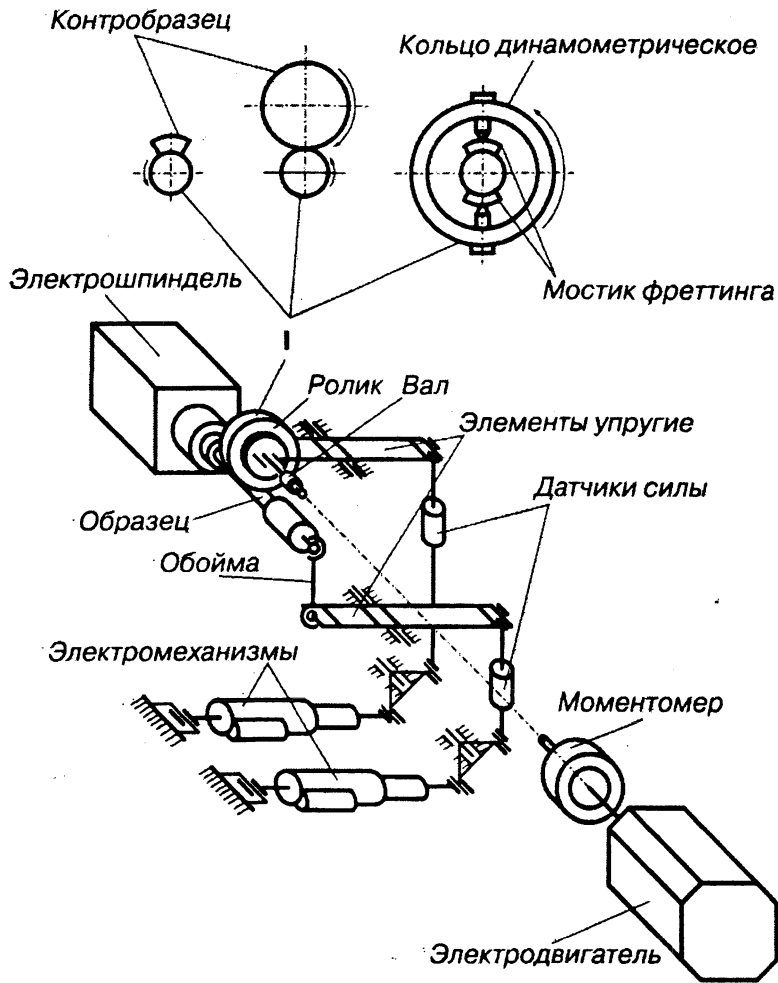


Рисунок 6. Принципиальная схема испытательной установки машины СИ-03М

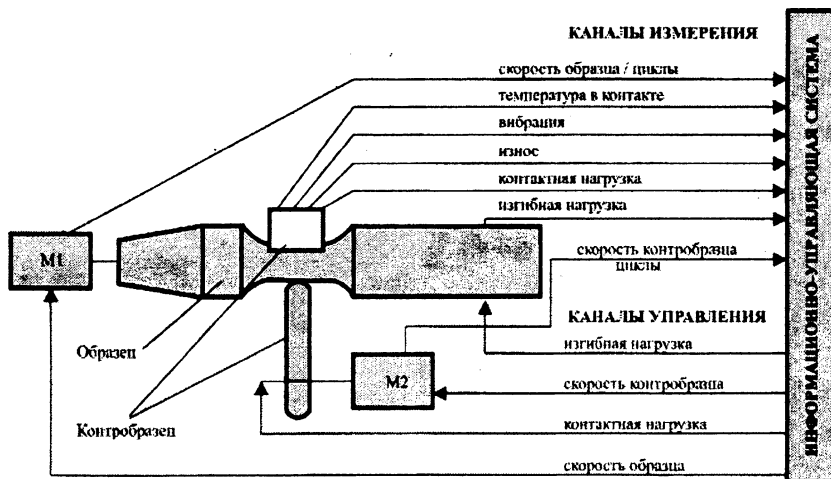


Рисунок 7. Электромеханическая схема расположения датчиков в машине СИ-03М: M1, M2 – приводы образца и контробразца соответственно

Технические характеристики машин серии СИ

Наименование показателей	Значение		
	Машина СИ-01	Машина СИ-02	Машина СИ-03 М
Основная пара трения	Цилиндр-колодка	Цилиндр-ролик	Цилиндр-колодка, цилиндр-ролик
Диаметр рабочей части образца, мм	10		
Размеры контробразца, мм	10×10×11,5	∅ 100	10×10×11,5 ∅ 100
Режим смазки контробразца, мм	капельный		
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	10–1000	10–2000
Предел допускаемой погрешности измерения нагрузок, %	2	2	1
Диапазон измерения суммарного износа образца и контробразца, мкм	10–2000	10–3000	10–4000
Предел допускаемой погрешности измерения суммарного износа образца и контробразца, %, не более	± 3	± 3	± 1
Диапазон измерения момента трения, Н·м: – при трении скольжения – при трении качения	0,01–1,2 –	– 0,2–20	0,01–1,5 0,2–30
Предел допускаемой погрешности измерения момента трения, %, не более	3	3	2
Установленная мощность электрооборудования, кВт	2	2,5	2,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский Л.А. Методы износоусталостных испытаний силовых систем и их моделей// Трение и износ. –1993. –Т.14. –№ 5. –С.937-952;
2. Трибофатика-95: Ежегодник. Под общ. ред. Л.А. Сосновского/ Вып. 2: Вопросы стандартизации. Хроника. Под ред В.Н. Корешкова. –Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 1996. –87 с;
3. Фролов К. В., Махутов Н. А. Новые машины и методы испытаний// Заводская лаборатория. –1995. –№ 5. –С.32-33;
4. Высоцкий М. С., Махутов Н. А., Корешков В. Н., Сосновский Л. А., Богданович А. В., Андронов П. В., Тюрин С. А., Марченко А. В. К разработке методов –стандартных –износоусталостных испытаний// Заводская лаборатория. –1995. –№ 5. –С.35-38;
5. Махутов Н. А., Богданович А. В., Андронов П. В., Марченко А. В., Тюрин С. А., Сосновский Л. А. Методы износоусталостных испытаний и их реализация на машине СИ// Заводская лаборатория. –1995. –№ 6. –С.17-42;
6. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. –М.:

Изд-во стандартов, 1980. –32 с; 7. Трибофатика-95: Ежегодник. Под общей ред. Л.А. Сосновского// Вып.1: Машины серии СИ для износоусталостных испытаний. Под ред. М.С. Высоцкого/ Авт.: Белиц Ф.Ю., Богданович А.В., Высоцкий М.С., Еловой О.М., Замятин В.О., Индман Н.Л., Ковалев В.В., Лагойкин А.Н., Марченко А.В., Махутов Н.А., Ожигар Г.П., Рождественский А.Ю., Сосновский Л.А., Тюрин С.А., Циммерман В.В. –Гомель: НПО "Трибофатика", 1996. –80 с; 8. Высоцкий М.С., Сосновский Л.А., Ожигар Г.П., Еловой О.М. Автоматизированный модульный комплекс для испытания на надежность материалов и моделей силовых систем // Надежность и безопасность технических систем (Материалы Международной научно-технической конференции, 28-29 октября 1997 г.). –Минск: Белоргстанкинпромиздат, 1997. –С.85-87; 9. Высоцкий М.С., Ожигар Г.П., Сосновский Л.А. О создании суперскоростной машины для износоусталостных испытаний// Современные проблемы машиноведения (Материалы Международной научно-технической конференции, 1-3 июля 1998 г.). –Гомель: ГПИ, 1998. Том 1. –С.50-52; 10. Vysotsky M.S., Yelovoy O.M., Ozhigar G.P. Computerized modular si-series machines for wear-fatigue tests// Proc. of the III International Symposium on Tribo-Fatigue (Beijing, China, October 22-26, 2000). –Beijing: Hunan University Press, 2000. –P.287-292; 11. Износоусталостные повреждения и их прогнозирование (трибофатика). Научный редактор Сосновский Л.А./ Авт.: Л.А.Сосновский, В.Т. Трощенко, Н.А. Махутов, Гао Ван-Чжэн, А.В. Богданович, С.С. Щербаков. – Гомель, Киев, Москва, Ухань, 2001. –170 с; 12. Высоцкий М.С., Ожигар Г.П. Машины серии СИ для износоусталостных испытаний материалов, моделей элементов конструкций, пар трения и силовых систем/ Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23-27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)/ Отв. Ред. В.Т. Трощенко. –Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –С. 99-105; 13. Высоцкий М.С., Корешков В.Н., Сосновский Л.А., Индман Н.Л. Машины серии СИ для износоусталостных испытаний// II Международный симпозиум по трибофатике, Москва, 15-17 октября 1996 г. (Тезисы докладов). –Москва: НПО "ТРИБОФАТИКА", "СПАС", 1996. –С.47-48; 14. Высоцкий М.С., Жмайлик В.А., Еловой О.М., Ожигар Г.П., Сосновский Л.А.// Механика-99 (Тезисы докладов 2-го белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике, Минск, 23-28 июня 1999 г.). –Минск, 1999. –С.62-63; 15. Высоцкий М.С., Еловой О.М., Ожигар Г.П. Модульные автоматизированные машины серии СИ для износоусталостных испытаний// Проблемы безопасности на транспорте (Тезисы докладов Международной научно-практической конференции, 18-20 октября 2000 г.). Ред. В.Я. Негрей. –Гомель: БелГУТ, 2000. –С.181; 16. Фролов К.В., Махутов Н.А. Новые машины и методы испытаний// Заводская лаборатория. –1995. –№ 5. –С.32-33; 17. Ожигар Г.П., Махутов Н.А., Сосновский Л.А. О построении машины для испытаний на фрикционно-механическую усталость в широком частотном диапазоне// Заводская лаборатория. – 1998. –№ 12. –С.43-50; 18. Gromov V.V., Yelovoy O.M., Kashalov G.I. Principles of configuring information-controlling systems of the SI series machines// Proc. of the III International Symposium on Tribo-Fatigue (Beijing, China, October 22-26, 2000). –Beijing: Hunan University Press, 2000. –P.622-625; 19. Еловой О.М. Специализированные стенды для экспериментального исследования износоусталостных повреждений моделей узлов и агрегатов автомобилей и тракторов/ Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23-27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)/ Отв. Ред. В.Т. Трощенко. –Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –С. 206-210; 20. Ожигар Г.П. Динамика испытательных машин серии СИ/ Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23-27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)/ Отв. Ред. В.Т. Трощенко. –Тернополь: Тернопольский государственный технический университет

имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –С. 250-255; 21. Ожигар Г.П., Замятин В.О., Федоров Ю.Н. Высокоскоростная машина для испытаний на фрикционно-механическую усталость/ Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)/ Отв. Ред. В.Т. Трощенко. –Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –С. 216-220; 22. Еловой О.М., Стукачев В.Н. Измерение и регистрация дискретных параметров износоусталостных повреждений моделей силовых систем мобильной техники/ Тр. 4-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 4), 23–27 сентября 2002 г., Тернополь (Украина)/ Отв. Ред. В.Т. Трощенко. –Тернополь: Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, 2002. –Т. 1. –С. 129-134; 23. Yelovoy O.M., Stukachev V.N., Zamyatnin V.O. Methods of measurement of the parameters of wear-fatigue tests using the SI-series machines// Proc. of the III International Symposium on Tribo-Fatigue (Beijing, China, October 22-26, 2000). – Beijing: Hunan University Press, 2000. –P.208-212; 24. Рождественский А.Ю., Ковалев В.В., Еловой О.М., Белиц Ф.Ю. Измерительно-управляющая система машины СИ// Заводская лаборатория. –1995. –№ 6. –С.42-44; 25. Индман Н.Л., Ожигар Г.П., Сосновский Л.А. Конструктивные особенности машины СИ// Заводская лаборатория. – 1995. –№ 6. –С.44-48; 26. Замятин В.О., Лагойкин А.Н., Тюрин С.А., Марченко А.В. Методы тарировки универсальной машины СИ// Заводская лаборатория. –1995. –№ 7. – С.26-29. 27. Сосновский Л.А. Основы трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2003. –Т.1. –246 с., –Т.2. –234 с.

УДК 621

Л.Г. Красневский

РОЛЬ НАУКОЕМКИХ КОМПОНЕНТОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

*Институт механики и надежности машин НАН Беларуси
Минск, Беларусь*

Машиностроение относится к числу наиболее наукоемких отраслей экономики промышленно развитых стран. Наукоемкость машиностроения определяется высокой сложностью продукции и массовостью ее производства. Глобальные объемы производства обеспечивают отчисление огромных средств на НИОКР, что позволяет быстро аккумулировать новейшие научные достижения, создавая условия для высоких темпов научно-технического прогресса. Наряду с продукцией, предназначенной для конечных потребителей, достижения научно-технического прогресса используются для создания средств производства в новых отраслях. В связи с этим стратегическое значение машиностроения сохраняется даже при смене технологических укладов. Ему также принадлежит ведущая роль в решении глобальных проблем экономии материальных ресурсов и энергии, поскольку основными их потребителями являются машины и оборудование.

По имеющимся данным, доля мировых затрат машиностроения на НИОКР превысила 70% от затрат обрабатывающей промышленности в целом.

Передовое положение в машиностроении развитых стран занимает автомобильная промышленность как наиболее наукоемкий и массовый вид производства, который стимулирует, аккумулирует и финансирует исследования во