



*И.И. Комиссарова, С.В. Яняк, И.О. Берсеев*  
*Вологодский государственный университет*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

В работе представлены принципиальные конструктивные решения и расширенные технические возможности новой установки для экспериментальной оценки износа (износостойкости) материалов с моделированием сложных условий изнашивания. Разработана методика подготовки, проведения и обработки результатов экспериментально-математического моделирования износа. Установка и методика прошли апробацию при оценке износа экспериментальных твердых сплавов с железной связкой. Для интерпретации результатов использованы методы металлографического и фрактографического анализа.

Износостойкость, условия изнашивания, моделирование износа.

Наряду с прочностью и твердостью износостойкость относится к важным эксплуатационным механическим свойствам материалов. Все основные свойства материалов имеют ограничения и условия существования. Например, при определении твердости (сопротивления пластической деформации) следует ограничить величину силы, приложенной к индентору; трещины вокруг отпечатка являются признаками разрушения материала, а не его пластической деформации, делают результат оценки твердости неадекватным. При определении прочности (сопротивления разрушению) для адекватной её оценки следует учитывать вид нагружения и свойства материала.

Износостойкость (сопротивление изнашиванию) является еще более сложным свойством, находящимся в зависимости от большого количества факторов и условий. Износостойкость в большей степени чем твердость и прочность зависит от структуры материалов (особенно гетерогенных): от размера зерна, от прочности межфазовых границ, от индивидуальных свойств структурных составляющих (микротвердости и др.). Износостойкость находится в нелинейной зависимости от основных факторов (от контактного давления, скорости скольжения, от температуры и др.). Большую чувствительность износостойкость проявляет к условиям изнашивания, которые при реальной эксплуатации отличаются большим разнообразием. Зачастую показатели износостойкости, полученные в одних условиях, некорректны в других.

Наиболее достоверна оценка износостойкости материалов в натурных или производственных испытаниях в составе реальных объектов. Недостатками этого метода являются: техническая сложность оценки износа, высокая стоимость длительной эксплуатации объекта, продолжительность испытания. Этот метод целесообразно использовать на заключительной стадии отработки и контроля объекта.

На начальных и промежуточных стадиях проектирования и изготовления объекта рационально применение лабораторных методов оценки износостойкости материалов с переносом результатов на реальные детали. Лабораторные испытания имеют лучшее техническое оснащение, проводятся в сжатые сроки, позволяют применить к изнашиваемым образцам различные методы тонкого анализа. Самым главным требованием к лабораторным исследованиям износостойкости является соблюдение условий изнашивания, характерных для натурных испытаний объектов.

Условия изнашивания складываются из механизма изнашивания и режимов изнашивания. К механизмам изнашивания относятся:

1. Трение скольжение;
2. Трение качение;
3. Ударное изнашивание;
4. Трение в жидкой среде;
5. Абразивное изнашивание;
6. Микрорезание и другие.

К режимам изнашивания относятся варьируемые факторы:

1. Сила контактного взаимодействия образца (детали) и контртела;
2. Скорость скольжения образца по контртелу;
3. Скорость качения носителя образцов по контртелу;
4. Амплитуда (энергия) ударного воздействия образца на контртело;
5. Жидкая среда, которая может использоваться в качестве смазки или в качестве носителя абразива. Варьируется состав и количество жидкости;
6. Абразивный материал (состав, размер, количество);
7. Шероховатость поверхности контртела и образца;
8. Площадь контакта образца и контртела;
9. Свойства материала.

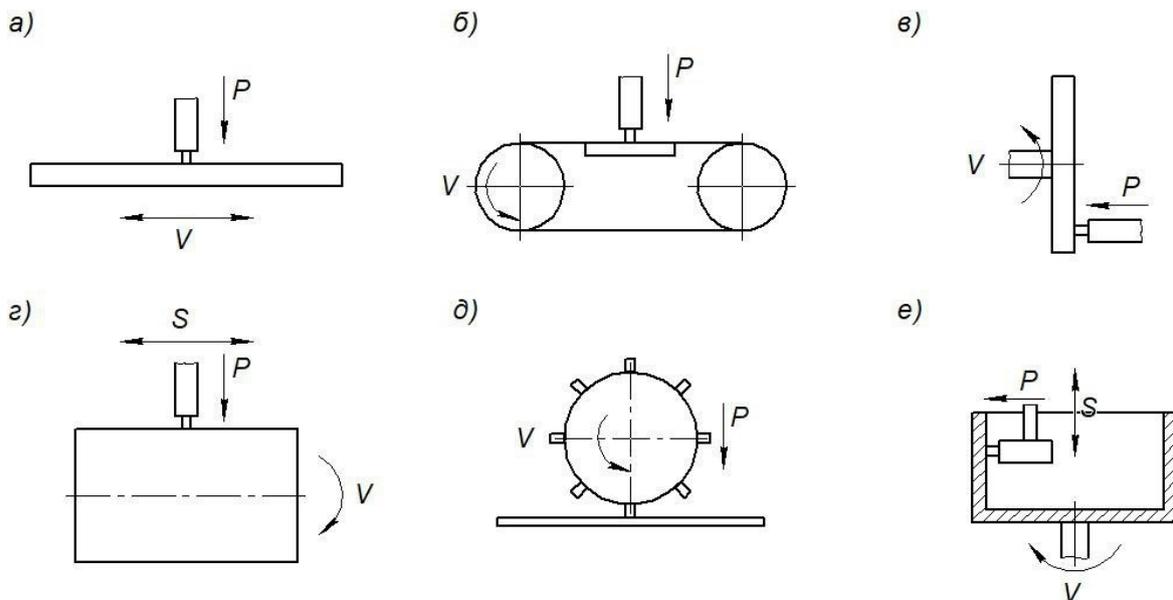


Рис. 1. Принципиальные схемы рабочих движений установок для исследования износостойкости

Принципиальные схемы рабочих движений, используемые в известных лабораторных установках (рис. 1).

Большой проблемой для экспериментальной оценки износа (износостойкости) является создание условий изнашивания в жидкой, коррозионной, абразивной средах. Приведенные выше принципиальные схемы установок сложно совместить с сосудом для рабочей среды. «Наружное» расположение и изнашивание образца приводит к трудноуправляемому разлетанию изнашивающей среды и продуктов износа.

При выборе принципиальной схемы установки мы исходили, прежде всего, из возможности создания наибольшего количества механизмов изнашивания, варьирования в широких пределах изнашивающих факторов. Учтены требования к технологичности конструкции (с минимумом затрат на проектирование и изготовление), требования по ресурсу (сроку службы, надежности), требования по надежности оценки износа, возможность модернизации конструкции на неизменяемой базе основных узлов, возможность использования готовых приводов.

Разработанная установка адаптирована к токарному станку. На шпиндель станка через сменный фланец устанавливается барабан. В суппорт станка устанавливается устройство держателя образца, состоящее из плиты, на которой базируется привод осциллирующей подачи. Механизм подачи через ползун осуществляет перемещения держателя образца вдоль оси вращения барабана [1].

Принцип действия установки основан на изнашивающем воздействии контртела. Контртело размещается внутри барабана, к нему с варьируемым усилием прижимается образец, закрепленный в держателе. Барабан совершает вращательное движение, имитирующее движение реальной детали (контртела), контактная поверхность образца выступает в роли поверхности исследуемой детали. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 2. 3D-модель установки представлена на рисунке 3. На прототипе установки без привода осциллирующей подачи (рис. 4) выполнена оценка износостойкости безвольфрамовых твердых сплавов [3, 4].

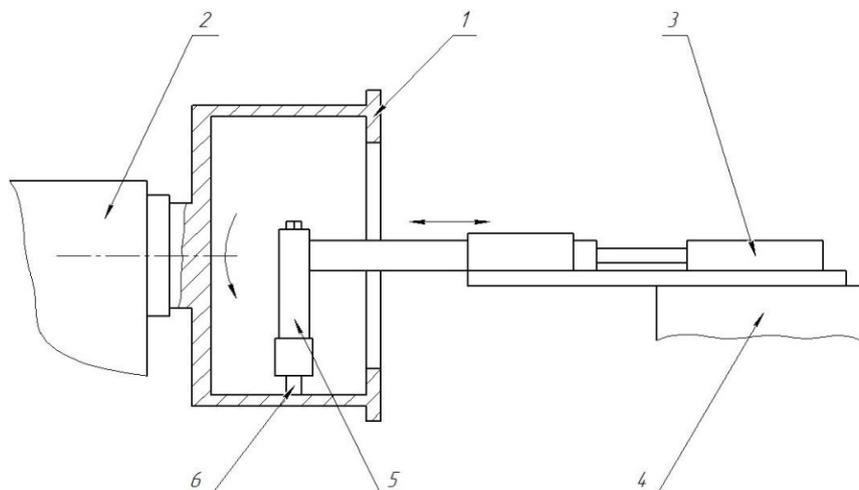


Рис. 2. Установка для исследования износостойкости: 1 – барабан; 2 – шпиндель токарного станка; 3 – механизм подачи образцов; 4 – суппорт токарного станка; 5 – держатель образцов; 6 – образец

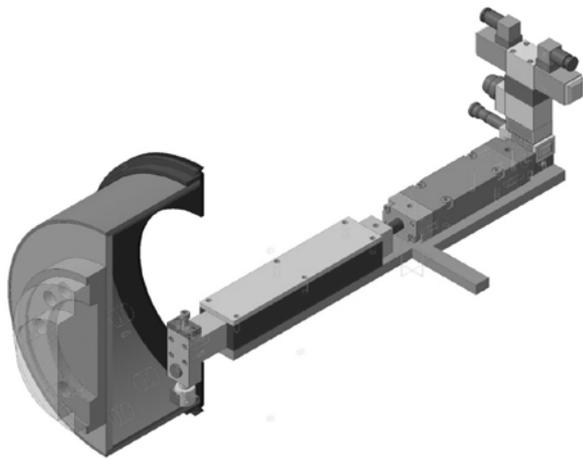


Рис. 3. 3D-модель установки для исследования износостойкости

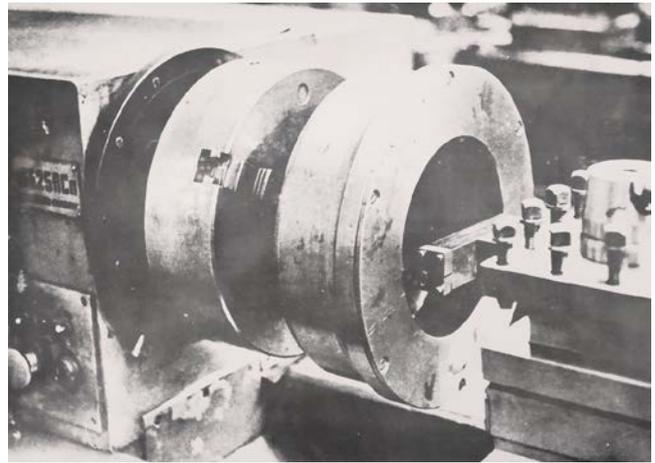


Рис. 4. Прототип установки для экспериментального исследования износостойкости

Нами выполнена экспериментальная оценка основных механических свойств твердых сплавов с железной связкой. Определены: износ абразивом, предел прочности при изгибе, твердость сплавов, содержащих 70, 80, 85, 90% по массе карбида титана, остальное – железо. Методом металлографического анализа

установлены средний размер карбидного зерна и пористость сплавов. Результаты приведены в таблице 1.

По результатам испытаний построена диаграмма механических свойств в зависимости от содержания карбида титана в сплаве (рис. 5).

Таблица 1

Свойства твердых сплавов с железной связкой

№ п/п	Состав сплава, % масс.		Оптимальная температура спекания, °С	Пористость, %	Средний размер карбидного зерна, мкм	Предел прочности при изгибе, МПа	Твердость, HRA	Износ абразивом, мг
	TiC	Fe						
1	70	30	1600	3,4	4	790	86	20,2
2	80	20	1600	4,0	5	700	88,5	14,5
3	85	15	1650	4,5	7	560	89,5	9,0
4	90	10	1650	5,0	6	430	89,5	9,6

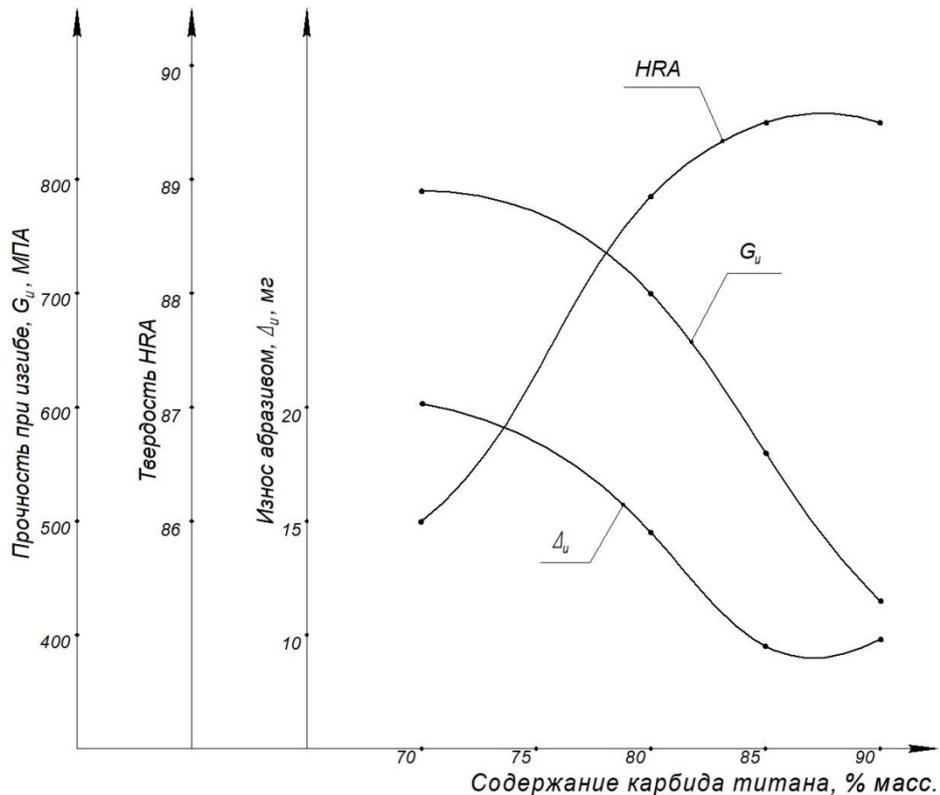


Рис. 5. Влияние содержания карбида титана на механические свойства сплавов

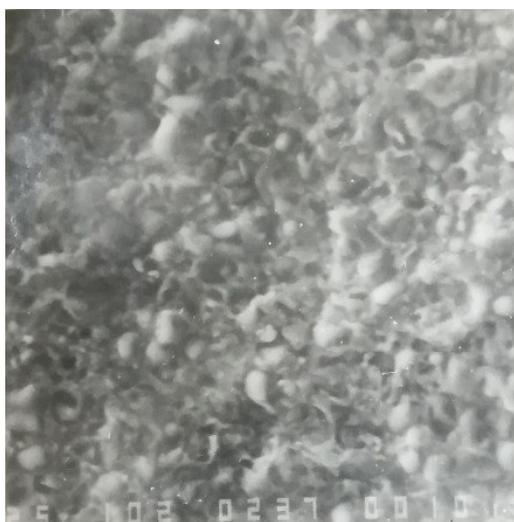
При увеличении содержания TiC износ абразивом уменьшается от 20,2 мг при 70% TiC до 9 мг при 85% TiC, затем незначительно увеличивается до 9,6 мг при 90% TiC. Металлографический анализ обнаруживает в сплаве с 90% TiC повышение пористости в связи с нехваткой железной связки для заполнения промежутков между округлыми зернами карбида титана, что является основной причиной усиления износа. Уже при 85% TiC карбидные зерна срастаются в сложный карбидный каркас, оказывающий общее сопротивление изнашиванию абразивом. Связи между зернами лучше сопротивляются выкрашиванию отдельных зерен карбида титана, чем пластичная железная связка.

Фрактографический анализ поверхности износа (выполненный на электронном микроскопе JSM-35,

Япония) показывает существенные различия характера износа сплавов на основе 70% и 85% TiC (рис. 6).

На изношенной поверхности сплава 70% TiC, 30% Fe обнаруживаются многочисленные следы выкрашивания зерен и частично обнаженные зерна после «выцарапывания» пластичной связки абразивом (основной механизм – выкрашивание карбидных зерен). На изношенной поверхности сплава 85% TiC, 15% Fe следов выкрашивания зерен мало, карбидные зерна, объединенные в каркас, значительно дольше сопротивляются царапающему воздействию абразива (основной механизм – равномерный износ зерен абразивом).

По экспериментальным данным обнаруживаются корреляционные связи износа абразивом с твердостью сплавов (рис. 7а) и с размером карбидных зерен (рис. 7б).



а)



б)

Рис. 6. Микрорельеф изношенных абразивом поверхностей сплавов  
а) 70% TiC, 30% Fe, б) 85% TiC, 15% Fe,  
(увеличение в 1000 раз)

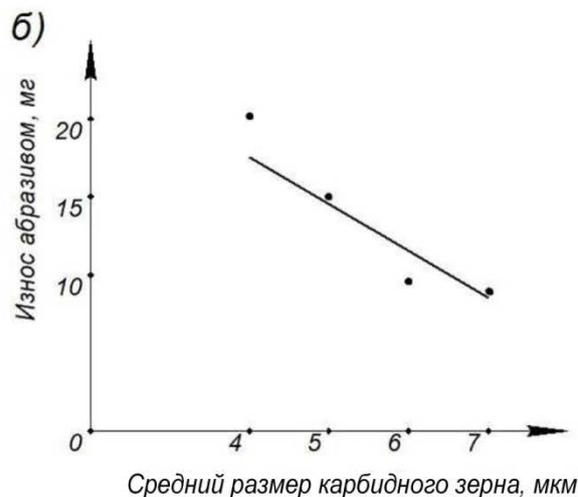
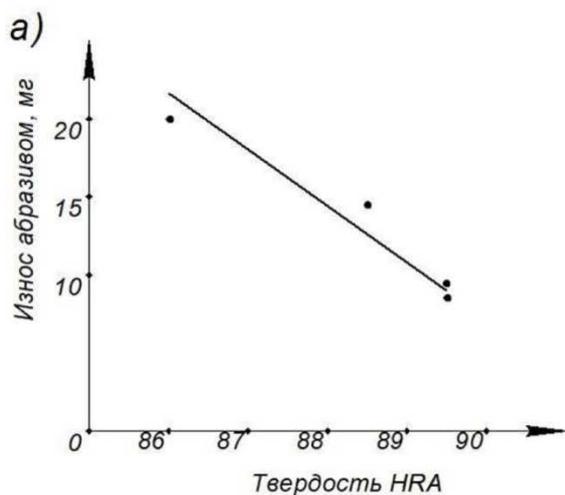


Рис. 7. Графики корреляционной зависимости износа от:  
а) твердости материала; б) среднего размера карбидного зерна

С увеличением твердости от HRA 86 у сплава 70% TiC, 30% Fe до HRA 89,5 у сплава 85% и 90% TiC – Fe износ абразивом значительно уменьшается с 20,2 мг до 9,0-9,6 мг. Это является следствием увеличения в сплавах доли высокотвердого и износостойкого карбида титана.

Увеличение размеров карбидного зерна с 4 до 7 мкм затрудняет выкрашивание зерен абразивными частицами величиной до 50 мкм и совместно с другими (более важными) факторами способствует уменьшению износа абразивом. Рост карбидных зерен при увеличении содержания TiC вызван увеличением оптимальной температуры спекания сплавов TiC – Fe.

На разработанной установке оценку износостойкости можно проводить по различным методикам: методом однофакторного эксперимента (с отдельным варьированием факторов), по методике экспериментально-математического моделирования [2].

По разработанной методике экспериментально-математического моделирования была выполнена серия опытов оценки износостойкости твердых сплавов с железной связкой (табл. 2). Режимы испытания: электрокорундовый шлифпорошок Э5 (24А5) в количестве 100 г, масло индустриальное – 50 мл, частота вращения барабана – 400, 1000, 1600 об/мин (линейная скорость скольжения образца – 6; 15; 24 м/с), сила прижима образца – 7,5; 20; 32,5 Н. Продолжительность изнашивания – 5 мин. Величина износа у эталона из стали У8А, HRC 63 составила 52±3 мг (±6%), у эталона из твердого сплава Т15К6 – 5,5±0,8 мг (±15%) при скорости 24 м/с и контактной силе 7,5 Н.

Таблица 2

План-матрица, результаты опытов и вычислений

№ п/п	X <sub>1</sub> (P)	X <sub>2</sub> (V)	X <sub>3</sub> (Fe)	y (Δ <sub>и</sub> ) мг опыт	y (Δ <sub>и</sub> ) мг результат	Коэффициенты
1	-	-	-	1,8	1,8	B <sub>1</sub> = 14,675
2	+	-	-	8,1	8,1	B <sub>2</sub> = 15,175
3	-	+	-	9,6	9,6	B <sub>3</sub> = 8,9
4	-	-	+	4,2	4,2	C <sub>12</sub> = 9,225
5	+	+	-	39,4	39,4	C <sub>13</sub> = 5,65
6	+	-	+	19,7	19,7	C <sub>23</sub> = 5,4
7	-	+	+	20,2	20,2	C <sub>123</sub> = 3,35
8	+	+	+	86	86	
9	0	0	0	22,8	23,625	A = 23,625

По результатам проведенных опытов были записаны:

1. Формализованная модели (уравнения регрессии):

$$y = 23,625 + 14,675X_1 + 15,175X_2 + 8,9X_3 + 9,225X_1X_2 + 5,65X_1X_3 + 5,4X_2X_3 + 3,35X_1X_2X_3, \text{ мг};$$

2. Натурализованная математической модели:

$$\Delta_U = 23,625 + 1,174(P - 20) + 1,686(V - 15) + 0,89(Fe - 20) + 1,979(P - 20)(V - 15) + 1,045(P - 20)(Fe - 20) + 1,5(V - 15)(Fe - 20) + 1,762(P - 20)(V - 15)(Fe - 20), \text{ мг}.$$

Увеличение по отдельности всех факторов приводит к росту износа. Влияние контактной силы связано с увеличением глубины царапины и более интенсивным выкрашиванием сплава. Влияние скорости связано с пропорциональным увеличением пути образца по контртелу, а также с тепловым разупрочнением железной связки. Влияние содержания железа связано с уменьшением содержания высокотвердых карбидов титана. Большое значение парных и тройного коэффициентов свидетельствует о взаимном усилении износа: произведение силы на скорость создает дополнительную мощность изнашивания, совместное дополнительное влияние на износ оказывает также одновременное увеличение силы и содержания железа, скорости и содержания железа, а также совместное действие всех трех факторов.

Разработанная установка и методика проведения эксперимента хорошо зарекомендовали себя как надежное средство для оценки износостойкости материалов.

#### Литература

1. Яняк, С. В. Метод и установка для достоверной оценки износостойкости / С. В. Яняк, Е. А. Брынин, А. А. Пименов // Вузовская наука – региону: материалы пятой всерос. науч.-техн. конф., 21 февр. 2007 г.: [в 2 т.]. Т. 1 / [отв. ред. В. А. Шорин]. – Вологда, 2007. – С. 117–118.

2. Яняк, С. В. Методика экспериментально-математического моделирования / С. В. Яняк, И. И. Комиссарова, И. В. Стратий // Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов: сборник материалов Всерос. заоч. науч.-практ. конф. – Биробиджан, 2015. – С. 208–214.

3. Яняк, С. В. Исследование износостойкости безвольфрамовых твердых сплавов со стальной связкой, легированных карбидом ванадия / С. В. Яняк, И. И. Комиссарова, Ю. Н. Груздев // Вузовская наука – региону: материалы седьмой всерос. науч.-техн. конф., 27 февр. 2009 г.: [в 2 т.]. Т. 1 / [отв. ред. А. А. Плеханов]. – Вологда, 2009. – С. 185–187.

4. Яняк, С. В. Исследование износостойкости безвольфрамовых твердых сплавов со стальной связкой, легированных карбидом хрома / С. В. Яняк, И. И. Комиссарова, Е. А. Брынин, А. А. Пименов // Вузовская наука – региону: материалы шестой всерос. науч.-техн. конф., 29 февр. 2008 г.: в 2 т. Т. 1 / [отв. ред. А. А. Плеханов]. – Вологда, 2008. – С. 176–178.

I.I. Komissarova, S.V. Yanyak, I.O. Bersenev

Vologda State University

## EXPERIMENTAL ESTIMATION AND ANALYSIS OF MATERIALS WEAR-RESISTANCE

The paper presents the principal design solutions and extended technical capabilities of a new installation for the experimental evaluation of wear (wear-resistance) of materials with modeling of complex wear conditions. The technique of preparation, carrying out and processing of results of experimental-mathematical modeling of wear is developed. The installation and technique have been tested in the evaluation of the wear of experimental hard alloys with an iron bond. Methods of metallographic and fractographic analysis were used to interpret the results.

Wear-resistance, wear conditions, wear modeling.