

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Научно-технологический комплекс «Фан ва Тараккиёт»
при Ташкентском Государственном Техническом Университете
им. Абу Райхана Беруни

Тураев Мухаммаджон Узакович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Специальность: 05.02.04 – Трение и износ в машинах

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Хачатурьян С.В.

Ташкент – 2005

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1. Природа внешнего трения и механизм разрушения материалов при фрикционном взаимодействии.....	9
1.2. Абразивное разрушение поверхностных слоев материала при трении	12
1.3. Критерии оценки прочности поверхностных слоев материала при абразивном изнашивании	14
1.3.1. Механические критерии оценки абразивного изнашивания материалов	15
1.3.2. Структурные критерии оценки абразивной износостойкости материалов.....	19
1.3.3. Энергетические критерии оценки абразивной износостойкости материалов.....	22
1.4. Цели и задачи исследования.....	37
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЛИЯНИЯ ЕЁ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	38
2.1. Энергетические представления о поверхностной прочности материалов при фрикционном взаимодействии.....	38
2.2. Аналитическая оценка величины скрытой энергии, накапливаемой в поверхностных слоях материала при пластической деформации.....	46
3.3. Определение коэффициента деформационного упрочнения по стандартным механическим характеристикам материалов и установление аналитической зависимости для оценки относительной износостойкости	53

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	61
3.1. Методика эксперимента.....	62
3.2. Экспериментальная установка.....	63
3.3. Обоснование выбора материалов и подготовка образцов	66
3.4. Методика обработки экспериментальных данных	69
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	71
4.1. Исследование взаимной связи износостойкости металлических материалов с коэффициентом деформационного упрочнения.....	71
4.2. Анализ результатов исследований и их сопоставление с экспериментальными данными других исследователей	80
ГЛАВА 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ	94
5.1. Разработка рекомендации и методики оценки относительной износостойкости при абразивном изнашивании коэффициентом деформационного упрочнения.....	95
5.2. Перспективы использования результатов исследования и их внедрение.....	99
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	102
ЛИТЕРАТУРА	104
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Выступая на XIV сессии Олий Мажлиса Республики Узбекистан первого созыва, И.А. Каримов выделил шесть пунктов по структурным преобразованиям в экономике республики, в которых указывается на необходимость ускоренного развития наукоемких производств, таких как автомобилестроение, самолетостроение, железнодорожный транспорт и др.

Одной из важнейших концепций глубокой перестройки хозяйственного механизма Республики Узбекистан является создание эффективной и гибкой системы экономического развития и реализация на этой основе программы повышения технического уровня и качества машин с увеличением их экономичности, производительности и долговечности на основе научного подхода к вопросам проектирования и изготовления техники.

Для региона Центральной Азии, где расположена наша страна, характеризуемого сухим климатом и повышенным содержанием пыли в воздухе, проблема борьбы с абразивным износом деталей машин стоит еще более остро. Так, как абразивное изнашивание является характерным для почвообрабатывающих, строительно-дорожных, горнодобывающих и других машин, долговечность и надежность которых, определяется исключительно работоспособностью их деталей, испытывающих абразивное воздействие.

Несмотря на большой объем исследований в области трения и износа, проблема повышения абразивной износостойкости и прогнозирования свойств материалов для работы в абразивных средах остается на сегодняшний день **актуальной**.

Дело в том, что борьба с износом деталей и узлов машин разработкой рациональных методов эксплуатации и ремонта на сегодняшний день оказалась недостаточно эффективной. Анализ последних работ в области трения и износа и наши исследования показывают, что регулированием и управлением процесса изнашивания деталей машин необходимо заниматься ещё в более ранних стадиях, т.е. в стадиях проектирования и изготовления.

В настоящее время накоплен большой фактический материал по выявлению причин, обуславливающих развитие процессов абразивного изнашивания. Обстоятельные исследования в области абразивного изнашивания выполнены отечественными исследователями для различных пар трений и среды: в условиях гидродинамического взаимодействия поверхностей трения академиком Лебедевым О.В.; для пар металл-хлопок академиком Махкамовым Р.Г.; для пар полимер-хлопок академиком Негматовым С.С.; для опор скольжения шпинделей хлопкоуборочных машин академиком Юлдашевым Ш.У.; в условиях резания профессором Балабековым М.Т.; в условиях с участием абразивных частиц в парах металл-металл профессором Икрамовым У.А., которые являются продолжением развития исследований видных зарубежных ученых Арчарда Д.Ф., Клейса И.Р., Крагельского И.В., Сорокина Г.М., Тенебаума М.М., Хрущева М.М. и многими другими учеными.

Одним из направлений исследований в области трения и изнашивания материалов является энергетический подход к описанию процессов разрушения поверхностных слоев материала при трении. Развивая исследования с использованием энергетических методов оценки износостойкости зарубежных ученых Берщадского Л.И., Костецкого Б.И., Кузнецова В.Д., Погодаева Л.И., Попова В.С., Протасова Б.В., Федорова В.В., Флайшера Г. и др., достигнуты определенные успехи учеными нашей страны: профессорами Джумабаевым А.Б., Махкамовым К.Х., Федоровым

В.В. по изучению закономерностей трения и изнашивания различных трибосистем; профессорами Аликуловым Ж.Е., Меликовым В.В., Мухаммедовым А.А. по разработке износостойких материалов и технологии их получения.

Приведенный обзор, позволил сделать вывод, что исследования энергетических соотношений при внешнем трении весьма перспективны и на основе их можно получить много ценного и интересного материала для объяснения ряда явлений сложной природы внешнего трения, использовать эти материалы для разработки соответствующих теоретических положений и способов применения, в частности, прогнозирования и оценки эксплуатационных свойств узлов трения машин в стадии их проектирования и изготовления, развиваемый Иргашевым А. и Хачатурьяном С.В.

Нами сделана попытка оценить поверхностное разрушение материалов при фрикционном взаимодействии коэффициентом деформационного упрочнения, полученным на основе энергетического подхода к проблеме абразивного изнашивания.

В связи с этим **целью** настоящей работы является исследование взаимосвязей абразивной износостойкости конструкционных материалов с их деформационно-прочностными характеристиками и разработка методики оценки относительной абразивной износостойкости с помощью коэффициента деформационного упрочнения на стадии проектирования узлов трения машин.

В соответствии с намеченной целью в работе были поставлены следующие задачи:

- разработать и освоить методику экспериментальных исследований.
- провести экспериментальные исследования по выявлению закономерностей изнашивания материалов с изменением коэффициента деформационного упрочнения.

- провести анализ взаимной связи между закономерностями изнашивания и коэффициентом деформационного упрочнения.
- сделать обобщающие выводы по результатам исследования и дать теоретические объяснения наблюдаемых явлений и закономерностей.
- рассмотреть вопрос о перспективах использования результатов исследования для расчета относительной износостойкости деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Научная новизна. На основе энергетического подхода к процессам трения и изнашивания предложен новый критерий для оценки относительной абразивной износостойкости конструкционных материалов – коэффициент деформационного упрочнения, величина которого определяется по стандартным механическим характеристикам при испытаниях на растяжение.

Анализом экспериментальных исследований абразивной износостойкости некоторых конструкционных материалов установлена взаимная связь относительной абразивной износостойкости с коэффициентом деформационного упрочнения, который может служить одним из оценочных критериальных факторов.

Сопоставлением полученных результатов исследования с экспериментальными данными других авторов подтверждена правомерность оценки относительной абразивной износостойкости предложенным критерием.

Выявлением неизменности относительной износостойкости конструкционных материалов (твердость которых повышена в результате наклепа) с помощью коэффициента деформационного упрочнения предложена единая аналитическая зависимость для различных материалов: металлов и сплавов в отожженном и термически обработанном состоянии, наклепанных и не наклепанных.

Практическая ценность работы. Разработана методика и рекомендации для прогнозирования относительной абразивной износостойкости деталей на стадии проектирования, что позволяет сократить сроки разработки новых узлов трения машин, работающих в абразивной среде, сэкономить трудовые и энергетические ресурсы.

Реализация результатов исследования. Результаты настоящей работы переданы для использования в производственных условиях и внедрены в учебный процесс Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта, Ташкентского Государственного Технического Университета и Андижанского Государственного Университета.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на международной конференции «Проблемы механики и сейсродинамики сооружений», Ташкент, 2004; на республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Современные проблемы механики. Актуальные проблемы развития наземной транспортной системы.», Ташкент, 2004; научно-технических конференциях и семинарах НТК «Фан ва тараккиёт» в 2001-2005 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 6 в центральных изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Она изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 18 рисунков, 7 таблиц и 98 наименований литературных источников.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Природа внешнего трения и механизм разрушения материалов при фрикционном взаимодействии

К настоящему времени наука о трении накопила громадный опыт, исследователями предложены различные гипотезы и теории, объясняющие природу и механизм изнашивания материалов трущихся поверхностей.

В ранних работах по исследованию процессов трения и изнашивания преобладали чисто механические представления [1]. Природа внешнего трения объяснялась как результат механического взаимодействия неровностей, имеющих на поверхности трения.

Позже появились представления о молекулярной природе трения, согласно которой трение обусловлено силами молекулярного взаимодействия поверхностей [2-3].

В настоящее время всеобщее признание получила молекулярно-механическая теория трения и износа, сформулированная И.В. Крагельским, которая объясняет природу трения как взаимным механическим внедрением, так и силами молекулярного взаимодействия [4,5].

Ф. Боуден и Д. Тейбор рассматривают процесс фрикционного взаимодействия как развитие пластической деформации на дискретных пятнах контакта, образования «мостиков сварки» и разрушения этих «мостиков» в процессе перемещения сопрягаемых поверхностей [6].

Г.Н.Елифанов характеризует трение, как сопротивление сдвигу тонких поверхностных слоев [7].

Различными исследователями даются разные объяснения механизма изнашивания материалов при фрикционном взаимодействии.

Хрущев М.М. с сотрудниками [8] различные виды изнашивания объединяет в следующие группы:

I. Механическое взаимодействие, сопровождающееся резанием частиц, пластическим деформированием и т.д.

1. Абразивное изнашивание;
2. Изнашивание вследствие пластического деформирования, проявляющееся в изменении размеров детали без какой либо потери веса ;
3. Изнашивание при хрупком разрушении, заключающееся в наклепывании поверхностного слоя, охрупчивании и разрушении;
4. Усталостное разрушение.

II. Молекулярно- механическое изнашивание:

1. Адгезионное изнашивание, характеризующееся схватыванием металлов на некотором участке мгновенной поверхности контакта и разрушение связи.
2. Тепловое изнашивание, связанное с нагревом поверхностных участков трущихся деталей до высоких температур с образованием схватывания.

III. Коррозионно-механическое изнашивание:

1. Окислительное изнашивание, характеризующееся взаимодействием кислорода воздуха с металлом и образованием окисных пленок.
2. Изнашивание в условиях агрессивного действия жидкой среды.
3. Фреттинг - коррозия, возникающая при очень малых повторных относительных перемещениях.

Крагельский И.В. различает 5 видов нарушения фрикционных связей в зависимости от величины сил адгезии и глубины внедрения выступов контактирующих тел [5]:

1. упругое оттеснение материала;
2. пластическое оттеснение материала;
3. срез внедрившегося материала;
4. схватывание пленок, образующихся на поверхности трущихся тел и их разрушение;
5. схватывание поверхностей трения, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Первые три вида имеют место при механическом взаимодействии поверхностей и зависят от относительной глубины внедрения материала и величины сил адгезии. Последние два характеризуют молекулярное взаимодействие и зависят от соотношения прочности пленки и основного материала, а также от напряженного состояния.

В работе [5] выдвигается усталостная концепция износа. На основании металлографического, рентгеноструктурного, химического и термического исследований сущности явлений в тонких поверхностных слоях пары трения, Костецкий Б.И. предлагает следующую классификацию видов изнашивания деталей машин [9]:

1. Изнашивание схватыванием I рода;
2. Окислительное изнашивание;
3. Тепловое изнашивание (схватывание II рода);
4. Абразивное изнашивание;
5. Осповидное (усталостное изнашивание).

Ребиндер П.А. и его ученики рассматривают процесс износа как результат многократной пластической деформации, приводящей к упрочнению и усталостному разрушению. Адсорбционно-химическое воздействие окружающей среды, по их мнению, интенсифицирует этот

процесс, облегчая пластическое деформирование и последующее хрупкое разрушение материала поверхности [10,11].

М.М.Тененбаум [12] различает четыре основных вида разрушения поверхностного слоя при внешнем трении:

1. Разрушение материала путем среза;
2. Разрушение материала путем отрыва;
3. Усталостное разрушение материала;
4. Полидеформационный процесс разрушения материалов в результате многократного деформирования материалов, вызывающего остаточные искажения решетки. При этом достигается такое предельное состояние, когда дальнейшее деформирование и поглощение энергии невозможно. Материал теряет пластичность, становится хрупким и разрушается.

Энергетический подход к процессам трения и изнашивания развивается в работах Кузнецова В.Д. (13), Костецкого Б.И. (14-15), Федорова В.В. (16), Махкамова К.Х. (17), Хачатурьяна С.В. (18), Флайшера Т. (19), Погодаева Л.И. (20), Протасова Б.В. (21), Попова В.С. (22).

1.2. Абразивное разрушение поверхностных слоев материала при трении

Несмотря на многочисленные исследования абразивного изнашивания на сегодняшний день нет единого мнения о механизме абразивного изнашивания. Механизм абразивного изнашивания, по мнению Кузнецова В.Д. [13] довольно простой и сводится к сумме большого числа элементарных процессов царапания.

Хрущов М.М. [8] процесс абразивного изнашивания тоже представляет как царапание металла зернами абразива, большинство из которых оставляет

пластически выдавленный след, а меньшая часть с благоприятно расположенными гранями снимает стружку.

Крагельский И.В. [5] считает, что основным процессом, вызывающим абразивный износ, является повторное деформирование (“передеформирование”) поверхностного слоя, в результате чего резко увеличивается число дефектов, возникают усталостные трещины и происходит хрупкое отделение частиц металла.

Аналогичного мнения придерживается Львов П.Н. [23]. Он определил, что даже при однократном прохождении абразивного зерна материал по краям выдавленной царапины является настолько предразрушенным, что легко отделяется другими абразивными зернами. Основным процессом, по его мнению, состоит в производстве выдавленных царапин.

В работе Икрамова У.А. [24], рассмотрены механизмы изнашивания свободными абразивными частицами, попавшими в сопряжение деталей. Исследователями установлено, что не все абразивные частицы взаимодействуют с поверхностью трения, вызывая упругопластические деформации и износ.

В работе [20] показано, что в условиях эксплуатации и в лабораторных исследованиях износ при гидроабразивном изнашивании происходит в основном в результате циклического усталостного передеформирования материала. Моменту отделения продуктов износа соответствует наибольшая степень накопления пластической деформации и максимальное упрочнение поверхностного слоя.

Зайцев А.К. [25] считает, что абразивное изнашивание представляет из себя процесс резания, но с мельчайшей или витой стружкой- для вязких материалов и стружкой скалывания — для хрупких.

По мнению Костецкого В.И., абразивное изнашивание есть специфический процесс резания, связанный с малыми сечениями срезаемой стружки [32].

В.Н. Ткачев [26] выделяет три основных вида разрушения поверхностей при взаимодействии с абразивом: микрорезание, многократное передеформирование, коррозионно-механическое истирание. По его мнению, отделение частиц износа является вторичным процессом, которому предшествует предельное искажение кристаллической решетки и структуры металла в связи с многократной пластической деформацией.

Анализируя опубликованные работы можно сделать вывод, что основными факторами, влияющими на процесс абразивного изнашивания, являются:

1. природа и форма структурных составляющих сплава;
2. природа и твердость абразивного материала;
3. размеры и форма абразивных частиц;
4. степень закрепленности абразивных частиц;
5. скорость движения частиц;
6. давление на абразивную частицу.

1.3. Критерии оценки прочности поверхностных слоев материала при абразивном изнашивании

В настоящее время в изучении трения и износа и в частности абразивного изнашивания наметилось три направления: механо-математическое, металлофизическое и энергетическое. Ни один из этих подходов не является универсальным. Каждый из них дополняет друг друга, расширяет и углубляет представления об абразивном изнашивании и дает

возможность выработать наиболее эффективные методы повышения долговечности деталей машин.

В соответствии с развиваемыми подходами предлагаются механические, структурные и энергетические критерии для оценки абразивной износостойкости.

1.3.1. Механические критерии оценки абразивного изнашивания материалов

Механо-математический подход к изучению абразивного изнашивания устанавливает закономерности между механическими свойствами металлов и сплавов и их износостойкостью. Чаще всего в качестве критерия износостойкости материалов при абразивном изнашивании используется твердость.

В фундаментальной (по абразивному изнашиванию) работе Хрущева М.М. и Бабичева М.А. [8] показано, что для технически чистых металлов и стали (за исключением кремния и германия) в отожженном состоянии относительная износостойкость прямо пропорциональна их твердости

$$\varepsilon = bH, \quad (1.1)$$

где ε - относительная износостойкость, отнесенная к условному

эталону в виде свинцово-оловянного сплава БМ;

b - коэффициент пропорциональности;

H - твердость по Бринеллю.

Однако для сплавов с одинаковой твердостью, полученной разными способами (термообработка, химико-термическая обработка, легирование, наклеп и т.д.) влияние твердости не равноценно.

Для термически обработанных сталей после закалки и отпуска на разные температуры относительная износостойкость ε выражается зависимостью

$$\varepsilon = \varepsilon + b'(H + H) \quad (1.2)$$

где ε , H - относительная износостойкость и твердость стали в отожженном состоянии;

b' - угловой коэффициент, зависящий от марки стали;

H - твердость стали перед испытанием.

Повышение твердости металлов и сплавов механическим наклепом не ведет к повышению их относительной износостойкости [8], а в некоторых случаях приводит даже к снижению абразивной износостойкости.

В работе [22] указывается, что износостойкость сплавов со стабильной структурой, не упрочняющиеся в процессе взаимодействия с абразивом зависит от твердости, а для сплавов с нестабильной аустенитной основой прямая пропорциональная связь между износостойкостью и твердостью отсутствует.

Савицкий К.В. [27-28] исследовал изнашивание металлов об абразивную шкурку и нашел, что весовой износ пропорционален силе трения, что связь между весовым износом и твердостью отсутствует, однако удельная работа изнашивания соответствует твердости по Бринеллю.

Тененбаум М.М. [21] показал, что при уменьшении различий твердости абразива и стали линейная зависимость износостойкости от твердости нарушается при отношении твердости абразива и металла равным 1,6 — 2,0.

Для большого числа материалов, различающихся по природе, структуре и твердости лучшее соответствие было обнаружено, между относительной износостойкостью и модулем нормальной упругости, выражаемой уравнением

$$\varepsilon = 4,9 E^{1,3}, \quad (1.3)$$

где E — модуль нормальной упругости, Па.

Аналогичного взгляда придерживается В.Н.Кашеев [29]. Он считает, что износостойкость отожженных технически чистых металлов линейно связана с модулем упругости. Строгой однозначной зависимости между износостойкостью и твердостью не существует. По его мнению износостойкость более тесно связана с модулем упругости, чем с твердостью. Вместе с тем, термически обработанные стали не следуют этой зависимости, так как в результате закалки их износостойкость существенно повышается, в то время как модуль упругости почти не изменяется.

Сопоставление величины относительной износостойкости с параметром θA , характеризующим силы связи в решетке, показало, что для технически чистых металлов имеется зависимость

$$\varepsilon = 0,25 \cdot 10^{-10} (\theta^2 A)^{1,7}, \quad (1.4)$$

где θ - характеристическая температура по Дебаю в $^{\circ}\text{K}$;

A - атомный вес.

В.Д. Кузнецовым [13] было предложено оценивать абразивную износостойкость материалов методом царапания, поскольку, по его мнению, процесс абразивного изнашивания можно рассматривать как сумму большого числа элементарных актов царапания и между ними должна существовать глубокая связь.

В МИНХ и ГП им. Губкина под руководством проф. Сорокина Г.М. проводятся систематические исследования влияния стандартных механических характеристик (твердости $H V$, предела прочности σ_B , предела текучести σ_T : относительного удлинения δ , относительного сужения Ψ_K , ударной вязкости a_k , напряжения среза τ_{cp}) на износостойкость при ударе и скольжению по абразиву [30, 31].

Установлено, что различные механические свойства по-разному влияют на износостойкость и не всегда однозначно в хрупкой и вязкой областях разрушения.

Увеличение твердости является основным и эффективным средством повышения износостойкости при скольжении по абразиву, При этом сохраняется непрерывная зависимость износостойкости от твердости в вязкой и хрупкой областях разрушения. При ударно-абразивном изнашивании прямой связи износостойкости с твердостью не наблюдается. Существенное влияние на износостойкость оказывает энергия удара.

Износостойкость стали пропорциональна пределу прочности. При скольжении по абразиву максимальная износостойкость зафиксирована на границе хрупко-вязкого разрушения, а в области хрупкого разрушения с увеличением σ_B , износостойкость падает. При ударно-абразивном изнашивании повышение предела прочности в хрупкой области положительно влияет на износостойкость. В вязкой области зависимости износостойкости от σ_B имеет сложный характер.

При скольжении по абразиву с повышением предела текучести в хрупкой и вязкой областях разрушения износостойкость увеличивается, причем в переходной зоне наблюдается скачок в увеличении износостойкости. При ударе по абразиву в хрупкой области повышение предела текучести снижает износостойкость, а в вязкой области износостойкость неоднозначна и зависит от энергии удара.

При скольжении по абразиву увеличение пластичности стали (δ , a_k , Ψ_k) снижает ее износостойкость, при ударе в хрупкой области износостойкость увеличивается, а в вязкой — снижается.

Выявленная высокая чувствительность сопротивления сталей при скольжении по абразиву к прочностным характеристикам позволила авторам считать, что в механизме разрушения абразивом лежит прочностная основа и

механический фактор является ведущим [31]. Однако, стали одного класса, но разного химического состава при одних и тех же значениях механических свойств имеют различную износостойкость,

Попытка оценки абразивной износостойкости комплексом физико-механических свойств материалов сделана в работе [32] :

$$\varepsilon = k \frac{nS_k^2}{\sigma_T f} \quad (1.5)$$

где ε - относительная износостойкость;

k - коэффициент,

n - твердость при царапании;

f - коэффициент трения;

S_k - истинное напряжение разрушения;

σ_T - предел текучести;

Таким образом, в настоящее время нет механической характеристики или комплекса механических свойств материала, которые могут рассматриваться как универсальные критерии для оценки износостойкости конструкционных материалов и использоваться для расчета долговечности работы машин.

1.3.2. Структурные критерии оценки абразивной износостойкости материалов

Под действием пластической деформации исходная структура тонкого поверхностного слоя материала претерпевает значительные изменения, связанные с искажениями кристаллической решетки, выделением новых фаз,

образованием карбидов, мартенситными превращениями и др. Металлофизический метод изучает закономерности абразивного изнашивания в зависимости от структуры в исходном состоянии и ее изменений в процессе трения.

Феррито-перлитные сплавы характеризуются низкой абразивной износостойкостью. Обладая высокой пластичностью, недостаточной прочностью и малой способностью к упрочнению феррит даже при высокой степени легирования имеет низкую абразивную износостойкость [20]. Перлитная структура обладает более высокой износостойкостью, чем ферритная, из-за наличия в структуре карбидов. Однако, в перлите при пластической деформации могут зарождаться трещины, что снижает его износостойкость при абразивном изнашивании. Пластинчатый перлит имеет более высокую абразивную износостойкость, чем зернистый. [22].

Высокая прочность и твердость мартенсита обеспечивает высокую износостойкость мартенситных углеродистых, инструментальных и легированных сталей в абразивной среде. Наивысшей износостойкостью обладает структура мартенсита отпуска, хуже сопротивление изнашиванию у троостита, сорбита, перлита. Однако в работе [34] показано, что стали с мартенситно-карбидной структурой и максимальной твердостью имеют значительно меньшую износостойкость, чем нестабильные аустенитно-карбидные стали с небольшим количеством мартенсита и карбидов.

Считается, что аустенитные стали при одинаковой твердости превосходят по износостойкости мартенситные и ферритокарбидные. Высокая износостойкость аустенитных сталей по мнению Попова В.С. [22,34] существенно зависит от степени чувствительности аустенита к превращениям под действием абразивных тел.

Карбиды значительно повышают абразивную износостойкость, однако, оптимальное их содержание в сплавах должно составлять не более 20 - 30 %,

при отсутствии динамических нагрузок допускается увеличение карбидной фазы до 45%.[33] . Высокая абразивная износостойкость объясняется более высокими механическими свойствами карбидов, выполняющих функцию барьеров, при столкновениями с которыми абразивные частицы полностью или частично разрушаются, тем самым предотвращая повреждения матрицы. Кроме того, карбиды выполняют роль барьеров на пути движения дислокаций при деформации и тем самым повышают энергоёмкость материала [22,34]. Аналогичное влияние на абразивную износостойкость оказывают неметаллические включения, однако если механические свойства этих включений низкие, то это может привести к снижению сопротивлению абразивному изнашиванию [22, 34].

Оценка абразивной износостойкости металлов и сплавов по структурным параметрам носит в основном качественный характер. В последнее время появились работы, в которых предпринята попытка количественной оценки влияния структурных параметров на абразивную износостойкость [35].

На основании многочисленных исследований износостойкости при абразивном изнашивании были разработаны рекомендации об оптимальной структуре сплавов.

Однако практика показала, что при самом строгом выполнении норм, имеет место повышенный износ узлов трения, увеличение же нагрузки и скорости скольжения может привести и к уменьшению износа. Начиная с какого-то этапа работы на трение, определяющей оказалась не исходная структура, а структура, формирующаяся при трении.

В связи с этим в работах И.М. Любарского [36] рассматривается динамика структурных и фазовых превращений при трении.

1.3.3. Энергетические критерии оценки абразивной износостойкости материалов

В процессе абразивного изнашивания механическая энергия абразивных частиц затрачивается на пластическую деформацию и разрушение поверхностных слоев материала. В деформируемых слоях генерируются дефекты кристаллического строения (дислокации, точечные, двойники, дисклинации и др.) образуются новые фазы, новые поверхности, происходят мартенситные превращения и другие процессы. Механическая энергия превращается в другие виды энергии электромагнитную, акустическую, тепловую. Энергетический подход к изучению абразивного изнашивания основан на выявлении закономерностей между износостойкостью и термодинамическими параметрами энергетическими характеристиками процесса трения.

Впервые энергетическую сторону внешнего строения начал изучать Кузнецов В.Д.[13]. Он считал, что "кинетическое трение следует рассматривать с точки зрения энергии или работы, которая затрачивается при трении". Работа трения A затрачивается на образование теплоты A_1 , собственно на разрушение трущихся поверхностей A_2 , на пластические деформации A_3 и на образование шума и звука A_4 .

$$A = \sum A_i \quad (1.6)$$

Кузнецов В.Д. и Бессонов Н.А.[13, 37] впервые поставили опыт по определению энергетического баланса при шлифовании различных граней кристаллов каменной соли. Ими исследовались соотношения между работой и теплотой, возникающей в процессе шлифования, а также поверхностной энергией продуктов износа.

Отожженный кристалл каменной соли шлифовался пластинкой абразива в процессе возвратно-поступательного движения или различных режимах трения (удельной нагрузке и скорости шлифования).

Эксперимент показал, что:

1. Величина работы A_3 , идущая на пластическую деформацию кристаллической решетки (скрытая энергия деформаций) составляет 16...30% от затраченной на шлифование энергии A , а выделенная теплота A_1 , соответственно — 84...70%.

2. Работа, расходуемая собственно на диспергирование A_2 , т.е. на увеличение поверхностной энергии составляет ничтожную часть ($10^{-4}...10^{-5}$) от всей затраченной работы A .

3. Скрытая энергия деформаций A_3 возрастает с увеличением скорости шлифования.

Согласно энергетическому подходу к процессу трения, развиваемым в работе Дубинина А.Д. [38] механическая энергия поступательного движения трущегося тела E_T превращается в колебательную и волновую энергию субмикроскопических E_c и микроскопических E_m частиц поверхностного слоя и частично расходуется на механическое разрушение материала трущихся поверхностей $E_{разр}$:

$$E_m = E_c + E_m + E_{разр} \quad (1.7)$$

По мнению автора в субмикроскопическом поверхностном слое (толщиной несколько микрон) механическая энергия непосредственно превращается в энергию возбуждения атомов и кристаллической решетки E_c и выражается уравнением:

$$E_c = E_e + E_a + E_p + E_e \quad (1.8)$$

где E_e - энергия электронного газа,

E_a - внутренняя энергия атомов,

E_p - энергия решетки,

E_b - энергия взаимодействия атомов в решетке.

Энергия, воспринимаемая микроскопическими частицами E_m , связывается с рассеянием и превращением части механической энергии в тепло.

Энергия разрушения $E_{разр}$, по мнению автора, "не связана с природой трения, вносится в процесс трения извне и эти потери могут быть полностью устранены".

Исследования энергетического баланса процесса трения, впервые выполненные Кузнецовым В.Д. и Бессоновым М.Н. [37] были продолжены Костецким Б.И. и Линником Ю.И. [39]. В этой работе методом тонких калориметрических исследований заснимался энергетический баланс процесса трения металлических материалов, обладающих различными свойствами: арможелеза, меди, сплава АМцМ, отожженной и закаленной стали 45.

Испытания проводились на кольцевых образцах при торцевом трении в условиях граничного трения в активной и инактивной средах при нормальной нагрузке от 0 до 62 кг/см, скорости вращения вала 245 об/мин и различных путях трения.

Проведенные исследования показали, что в общем случае, большая часть работы трения превращается в теплоту, меньшая идет на образование скрытой энергии деформаций (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1.

Металл пар трения	Теплота трения %		Скрытая энергия %	
	Вазелиновое масло	Вазелиновое масло +0,2% олеиновой кислоты	Вазелиновое масло	Вазелиновое масло +0,2% олеиновой кислоты
АМцМ-АМцМ	93	84,9	7	15,9
Cu	96	89,3	4	10,7
Fe	97,5	93,8	2,5	6,2
Сталь 45 (закаленная)	100	100	-	-

Проведенные исследования энергетического баланса процесса внешнего трения позволили авторам сформулировать принцип, согласно которому для заданных условий трения (P, V, среда, материал) существует интервал, в котором отношение запасенной ΔE , (скрытой) энергии к работе сил трения A имеет минимальное значение

$$\int \frac{\Delta E}{A} = \min \quad (1.9)$$

В качестве критерия для оценки износостойкости в работе [40] предлагается удельная работа износа

$$A_u = \frac{A}{\Delta U} \quad (1.10)$$

где ΔU - изношенная масса материала.

Неудачи и кажущаяся бесперспективность при использовании удельной работы трения в качестве критерия износостойкости объясняется, по мнению Костецкого Б.И. с сотрудниками [40] тем, что считали, ее универсальной

характеристикой и распространяли на все случаи поверхностного диспергирования, без учета природы, механизмов и энергетики конкретных процессов изнашивания. Только строгое разделение процессов разрушения по механизмам и динамике протекания делает этот критерий перспективным инструментом для оценки износостойкости. Ниже приведены значения удельной работы износа в зависимости от видов износа и повреждаемости [40].

Таблица 1.2.

Виды износа и повреждаемости	Удельная работа износа и повреждаемости, Дж/мм ³
Нормальный механический износ	10 ⁵ - 10 ⁶
Механическая форма абразивного износа	10 ⁴ - 10 ⁵
Фреттинг-коррозия	10 ³ - 10 ⁴
Схватывание II рода	10 ² - 10 ³
Схватывание I рода	10 - 10 ²
Механическая форма абразивного износа	1 - 10

По Погодаеву Л.И [20] при гидроабразивном изнашивании общая энергия $E_{вн}$, затраченная в течение периоде времени t на образование продуктов износа $V_{из}$ будет равна

$$E_{вн} = E_{деф} + Q + E_{дис} = \alpha V_{из} (E_{уд} + \beta\sigma) \quad (1.11)$$

где $E_{деф}$ - энергия, затраченная на пластическое деформирование материала;

Q - часть общей энергии, превратившаяся в теплоту ;

$E_{дис}$ - энергия, затраченная на образование поверхностей (энергия диспергирования} ;

α - коэффициент пропорциональности между $E_{вн}$ и энергией, необратимо поглощаемой материалом к моменту образования продуктов износа объемом $V_{из}$;

β - коэффициент, зависящий от размеров частиц износа;

σ - поверхностная энергия;

$E_{уд}$ - удельная энергоемкость материала в условиях малоциклового усталостного разрушения поверхностных слоев при гидроабразивном изнашивании.

Связь между внешним воздействием, которое можно оценить мощностью удара или мощностью трения и степенью износа устанавливается при помощи критерия износостойкости $W_{кр}$, названного авторами [20] критической плотностью потока мощности деформации.

Рассматривая процесс гидроабразивного изнашивания как усталостный, авторы считают, что после критического числа импульсов воздействия $N_{кр}$ или периода времени $\tau_{акк}$, в определенных объемах изнашиваемого материала плотность скрытой энергии деформации достигает критического уровня. При этом реализуются предельные свойства материала в данных условиях нагружения и происходит разрушения с образованием продуктов износа.

Этому моменту времени будет соответствовать критическая плотность потока мощности деформации $W_{кр}$, характеризующая суммарную энергию, прошедшую через рассматриваемое сечение материала в период нагружения. Так как равномерность распределения внутренней (скрытой) энергии в деформируемых объемах зависит от условий внешнего нагружения и природы изнашиваемых материалов, то $W_{кр}$ представляет из себя осредненный критерий износостойкости, который зависит от конкретных условий нагружения напряженного состояния и комплекса свойств тонких изнашиваемых слоев материала.

Величина критической плотности потока мощности деформации определяется как

$$W_{кр} = 1/3 E_{уд} V_{кр}, \quad (1.12)$$

где $V_{кр}$ - критическая скорость удара, при котором происходит мгновенное разрушение материала.

$E_{уд}$ - энергоемкость материала, представляющая собой энергию, затраченную на деформирование единицы объема материала вплоть до разрушения.

Суть энергетического подхода к проблеме трения и изнашивания, развиваемая в работе Протасова Б.В [21] заключается в том, что трение рассматривается как результат поведения "третьего тела", в котором трансформируется энергия трения.

Структура энергетического баланса трения представляется равенством:

$$\Delta A = \Delta Q + \Delta U_d + \Delta U_k + \Delta U_b, \quad (1.13)$$

где ΔA - энергия, затраченная на трение за данный промежуток времени,

Q - выделившееся тепло,

ΔU_d - энергия диспергирования,

ΔU_k - энергия колебаний и внешних полей,

ΔU_b - приращение внутренней энергии тел.

Для приработанных поверхностей в условиях "нормального" установившегося режима трения автор пренебрегает энергиями диспергирования ΔU_d , колебаний и внешних полей ΔU_k , приращением внутренней энергии ΔU_b считает, что вся механическая работа затрачивается на генерацию тепла.

$$\Delta A \approx \Delta Q \quad (1.14)$$

Выражение (1.14) используется автором для определения долевого распределения энергии трения между телами трибосопряжения в разных состояниях через парциальный коэффициент ε , величина которого зависит от условия теплопередачи.

В качестве критерия для оценки изнашивания автором принимается функция ξ

$$\xi = \varphi / E_n \quad (1.15)$$

где φ - коэффициент, учитывающий часть механической энергии, связанной с приращением внутренней энергии в поверхностных слоях трибосопряжения;

E_n - удельная энергия материала, соответствующая его энергетическому насыщению в данных условиях.

По мнению автора, в каждом поверхностном слое происходит постоянное накопление дефектов, увеличивающих внутреннюю энергию, величина которой пропорциональна трансформированной энергии A . Разрушенный объем ΔV определяется из выражения

$$\Delta V = A \varphi / E_n \quad (1.16)$$

Изношенные объемы для первого ΔV_1 и второго ΔV_2 тел для установившегося режима трения

$$\Delta V_1 = N V_c f (1 - \varepsilon) \frac{\varphi_1}{E_{n1}} \quad (1.17)$$

$$\Delta V_2 = N V_c f \varepsilon \frac{\varphi_2}{E_{n2}} \quad (1.18)$$

где N - нагрузка

V_c - скорость скольжения,

f - коэффициент трения,

Функция φ/E_n изменяется в широких пределах (на несколько порядков) в зависимости от условия трения.

Флайшер Г. разработал энергетическую теорию трения и износа [41]

На базе первого закона термодинамики сделан качественный анализ энергетического баланса процесса трения. Согласно Флайшеру Г. [41] энергетический баланс трения твердых тел представляет из себя:

$$W_R = \sum_{n=1}^{12} W_i, \quad (1.19)$$

где W_R - работа трения,

W_ε - энергия упругих (либо пластических деформации),

W_{m-ph} - энергия, затрачиваемая на образование частиц износа,

W_{ph} - энергия, необходимая для изменения фаз,

ΔW_v - энергия, связанная с термическим изменением объема,

ΔW_{WL} - энергия, связанная с теплопроводностью системы;

ΔW_{WU} - энергия связанная с конвективным теплообменом

(при наличии жидкости или газа).

ΔW_{WK} - энергия, связанная с охлаждающим влиянием текучей жидкости;

W_{wst} - энергия, связанная с тепловой радиацией;

W_{st} - энергия, связанная с электромагнитным излучением;

W_{el} - энергия электрического поля;

W_{ch} - энергия химических реакций;

W_{de} - энергия десорбции поверхностных слоев.

Энергетические представления Флайшера Г. базируются на понятии энергии трения e_R , под которой подразумевается отношение работы, расходуемой на преодоление силы трения W_R , к объему материала V_R , воспринимающего механическую нагрузку при трении.

$$e_R = \frac{W_R}{V_R}, \quad (1.20)$$

$$\text{где } V_R = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3}, \quad (1.21)$$

здесь V_{R1} , V_{R2} , V_{R3} – деформируемые объемы, принадлежащие к первому и второму телу трения и смазочному материалу соответственно. При жидкостном режиме трения $V_{R1} = 0$ и $V_{R2} = 0$, при абразивном $V_{R1} = 0$ и $V_{R3} = 0$, при трении без смазки $V_{R3} = 0$.

В качестве критерия износостойкости материала принимается критическая (мнимая) плотность энергии e_R^*

$$e_R^* = \frac{W_R}{\Delta V}, \quad (1.22)$$

где ΔV - объем продуктов износа.

Из-за дискретности контакта тела могут многократно воспринимать импульсы энергии. Если импульсы энергии на фактических пятнах контакта достигают критического уровня e_R^* , то разрушение происходит в результате одного акта взаимодействия – микрорезания. Если энергия импульса мала, то часть ее аккумулируется в телах трения W_{SP} , а другая часть рассеивается в окружающей среде W_{DIS}

$$W_R = W_{SP} + W_{DIS} \quad (1.23)$$

Аккумулированная энергия, постепенно накапливаясь в поверхностных слоях, приводит в конечном счете к разрушению материала. Диссипированная энергия рассеивается в окружающей среде в основном в виде тепла.

Автор предлагает следующую классификацию видов трения и изнашивания по энергетическим характеристикам баланса:

I класс — трение без аккумуляции механической и тепловой энергии (абразивный износ).

II класс — процессы трения с механическим, без термического аккумулирования энергии (износ при пластическом и упругом контакте}.

III класс — процессы трения с механическим и термическим аккумулированием энергии (трибологические процессы, характеризуются внутренней динамикой и образованием диссипативных структур).

Автор считает, что из-за кратковременности процесса контактной нагрузки не происходит нагрева объема вещества и не наблюдается процесс теплоотдачи и все члены баланса кроме связанной с образованием частиц износа выпадают, т.е. вся работа трения затрачивается на разрушение. Эта энергия, по подсчетам авторов несколько меньше, но одного порядка с энергией сублимации. Поскольку частицы износа не есть отдельные атомы, на которые вещество распадается при сублимации, а состоят из некоторой совокупности атомов, то энергия разрушения по мнению авторов должна быть меньше энергии сублимации.

Энергетический подход к абразивному изнашиванию, аналогичный развиваемому в работе [41], рассматривается в работе [42]. Износ представляется как результат работы, затраченной на срез (образование частицы износа) на фактической площади контакта объем продуктов износа принимается пропорциональным работе среза (W_s).

В качестве критерия для оценки абразивной износостойкости в работе [43] принимается специфическая энергия царапания e

$$e = E / W, \quad (1.24)$$

где E - энергия, затраченная при царапании;

W - объем продуктов износа.

Опыты проводились на маятниковом копре, оснащенном наконечником в виде усеченной пирамиды. Энергия и износ фиксировались по результатам одноактного взаимодействия наконечника с образцом.

В работе дается подробный качественный анализ механизмов и физики процесса изнашивания.

Специфическая энергия царапание рассматривается авторами состоящей из:

$$e = eh + ed + eph + es + em, \quad (1.25)$$

где eh — составляющая, связанная с выделением теплоты поверхностей трения;

ed — составляющая, связанная с повышением внутренней энергии за счет структурных несовершенств (дислокации, двойников и др).

eph — составляющая связанная с затратами энергии на фазовые превращения,

es — составляющая, связанная с образованием новых поверхностей,

em —составляющая, учитывающая механические потери в установке (принимается const).

На основании экспериментов в работе [43] делается вывод, что чем больше специфическая энергия царапания e , тем выше износостойкость материала при абразивном изнашивании. Установлена качественная корреляция этой энергии с твердостью по Виккерсу, микротвердостью и динамической твердостью.

С.В.Хачатуряном [18] на основании термодинамической теории прочности, развиваемой в работах В.В.Федорова [16], получена расчетно-

аналитическая зависимость для оценки изнашивания материалов при абразивном изнашивании.

$$\bar{V} = \frac{\delta f P V t}{U_* - U_{e0} - U_T} ; \quad (1.26)$$

где \bar{V} - объемный износ,

δ - относительная величина скрытой энергии,

P - нормальное давление,

V - скорость скольжения,

U_* - критическая плотность внутренней энергии,

U_0 - начальная плотность внутренней энергии,

U_T - плотность тепловой составляющей внутренней энергии,

t - время изнашивания.

За критерий разрушения материала принимается плотность внутренней энергии U_* , накапливаемой в деформируемых объемах поверхности трения, величина которой не зависит от условий изнашивания, а является физической константой материала.

$$U(t) = U_0 + \Delta U_e + \Delta U_T \leq U_*,$$

где $U(t)$ – плотность внутренней энергии к моменту времени разрушения поверхности t ,

ΔU_0 – изменение плотности скрытой энергии к моменту времени t ,

ΔU_T – изменение плотности тепловой составляющей внутренней энергии к моменту времени t .

Исследования [18] показали, что из всех энергетических характеристик процесса изнашивания только плотность внутренней энергии материала не зависела от условий изнашивания (удельной нагрузки и скорости скольжения). Более того, эта характеристика хорошо коррелирует с теплотой

плавления исследованных материалов (отожженных металлических сплавов: сталей У8А, 40Х, чугуна СЧ-18-36 и бронзы ОЦС 3-12-5).

Поэтому автор [18] считает, что для оценки абразивного изнашивания можно использовать плотность внутренней энергии материала.

Анализ энергетических критериев предложенных различными авторами для оценки абразивного изнашивания, показывает, что чаще всего в качестве такового принимают работу, затраченную на образование единицы массы или (объема) продуктов износа [13, 16-22, 40], хотя называют его по-разному: удельная работа износа, мнимая плотность энергии трения, специфическая энергия царапания и др.

По мнению Хрущова М.М. [8] нельзя отождествлять работу трения с работой разрушения при трении. Работа разрушения составляет очень малую долю работы трения и поэтому между ними не может быть количественной зависимости за редким исключением.

Еще Давиденков Н.Н. [44], подытоживая работы многих исследований отмечал, что пропорциональность между износом и работой трения справедлива только для хрупких тел, только при постоянном коэффициенте трения и только при условии непрерывного удаления продуктов износа.

В работе [45] отмечается, что при исследовании по абразивной шкурке пропорциональность между износом и работой трения соблюдается только для хрупких металлов и кристаллов солей в определенном температурном интервале условий испытаний. Таким образом, удельная работа изнашивания не является константой материала. Этот критерий изменяется в широких пределах в зависимости от условий трения (P, V, T) даже в режимах одного и того же вида изнашивания.

В качестве другого критерия для оценки абразивной износостойкости принимается энергоемкость материала, т.е. способность материала воспринимать пластическую деформацию вплоть до разрушения [20,22,34].

Каждый из рассмотренных методов в отдельности не является универсальным, т.к. не может объяснить некоторых явлений, наблюдаемых при изнашивании трущихся деталей.

Комплексное же использование различных методов исследования изнашивания материалов при фрикционном взаимодействии расширяет и углубляет наши представления о природе разрушения поверхностных слоев пар трения и, тем самым, дает возможность выработать наиболее эффективные методы повышения износостойкости и долговечности деталей машин.

С другой стороны, приведенный краткий обзор, позволяет сделать вывод, что исследования энергетических соотношений при внешнем трении весьма перспективны и на основе их можно получить много ценного и интересного материала для объяснения ряда явлений сложной природы внешнего трения и использовать эти материалы для разработки соответствующих теоретических положений и способов применения их в практике эксплуатации машин и механизмов.

В данной работе автором сделана попытка оценить поверхностное разрушение материалов при фрикционном взаимодействии коэффициентом деформационного упрочнения, полученным на основе энергетического подхода к проблеме абразивного изнашивания.

1.4. Цели и задачи исследования

Целью настоящего исследования являются:

1. Теоретическое исследование возможности оценки относительной износостойкости материалов при абразивном изнашивании коэффициентом деформационного упрочнения.

2. Экспериментальная проверка предлагаемого критерия оценки относительной износостойкости материалов при абразивном изнашивании.

3. Разработка методики для оценки относительной износостойкости при абразивном изнашивании.

В соответствии с намеченной целью в работе поставлены следующие задачи:

6. Разработать и освоить методику экспериментальных исследований.

7. Провести экспериментальные исследования по выявлению закономерностей изнашивания материалов с изменением коэффициента деформационного упрочнения.

8. Провести анализ взаимной связи между закономерностями изнашивания и коэффициентом деформационного упрочнения.

9. Сделать обобщающие выводы по результатам исследования и дать теоретические объяснения наблюдаемых явлений и закономерностей.

10. Рассмотреть вопрос о перспективах использования результатов исследования для расчета относительной износостойкости деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЛИЯНИЯ ЕЁ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вопрос расчетно-аналитической оценки изнашивания материалов при внешнем трении является одним из трудных в современной науке и инженерной практике. Поиски ответов на вопросы, относящиеся к указанной области, неразрывно связаны с глубоким и всесторонним изучением физико-химической природы и механизмов явлений, протекающих в реальных материалах в процессе их деформирования и разрушения. Очевидно, решение задач, связанных с разработкой расчетно-аналитических методов оценки изнашивания материалов при внешнем трении, должно основываться на современных, достоверных и хорошо подтвержденных экспериментально теориях прочности и разрушения твердого тела.

2.1. Энергетические представления о поверхностной прочности материалов при фрикционном взаимодействии

По современным молекулярно-кинетическим представлениям разрушение реальных материалов является процессом, развивающимся во времени независимо от природы материала и характера его нагружения. С точки зрения кинетики этого процесса, отмечается, что моменту образования трещины критического размера, способной распространяться самопроизвольно предшествует постоянное накопление в материале очагов разрушений - субмикроскопических нарушений сплошности. Разрушение материала наступает тогда, когда плотность повреждений достигает критической величины.

Микроскопические механизмы зарождения и развития в деформируемых объемах материалов дефектов и повреждений описываются теорией дислокаций [46]. В соответствии с теорией дислокаций пластическая деформация представляет собой движение, размножение и разрядку дислокаций и других дефектов и имеет двойственный характер, который обусловлен двумя одновременно протекающими и конкурирующими процессами: упрочнением и разупрочнением.

По мере развития процесса деформации количество генерированных в материале дефектов увеличивается и при накоплении в том или ином объеме критической плотности дефектов зарождаются субмикроскопические нарушения сплошности, которые в дальнейшем разрастаются в микро- и макротрещины, фиксирующие разрушение материала.

Каждая дислокация и другие дефекты и повреждения создают вокруг себя поле упругих напряжений и поэтому являются носителями избыточной потенциальной энергии, что приводит локальные объемы материала в неустойчивое термодинамическое состояние. Поэтому накопление в материале дефектов не может продолжаться беспредельно, т.к. одновременно с этим идет процесс разупрочнения, связанный с выходом дислокаций на поверхность, аннигиляцией дислокаций и других дефектов, а также с "залечиванием" субмикроскопических нарушений сплошности. Этот процесс вызван тепловым движением элементарных частиц и протекает по законам термодинамики, т.к. всякая система, выведенная из состояния равновесия, стремится к нему вернуться. В результате потенциальная энергия деформаций трансформируется в другие виды энергии (в основном в тепловую).

Процесс деформирования и разрушения твердого тела, связанный с необратимыми процессами изменения структуры материала и накопления в его объемах дефектов и повреждений обуславливает необратимое

поглощение материалом энергии деформаций. Разрушение материала наступает тогда, когда в объемах материала, ответственных за разрушение, накапливается критическая плотность дефектов [46].

Обычно считалось, что вся работа деформации превращается в тепло. Однако в 1906 году Хорт Х. предположил и доказал, что часть затраченной на пластическую деформацию работы остается в металле в виде скрытой энергии деформаций. Удаление усилия, создающего деформацию, не освобождает эту энергию. Она остается в металле до высвобождения в процессе возврата и рекристаллизации.

С тех пор выполнено большое количество исследований по определению величины скрытой энергии и объяснению физической природы этого явления [47-55].

Наклепанный материал отличается от не наклепанного многими свойствами. Наклеп меняет распределение несовершенств, имеющих в решетке в отсутствие наклепа, и создает новые несовершенства. Наклеп повышает внутреннюю энергию материала и делает его нестабильным по отношению к не наклепанному или отожженному. Эта нестабильность выражается в увеличении скрытой энергии и склонности наклепанного металла к процессам возврата и рекристаллизации [47].

Процесс пластической деформации твердого тела, в соответствии с I законом термодинамики, можно представить соотношением

$$U=W-Q, \quad (2.1)$$

где U - внутренняя энергия,
 W – работа деформации,
 Q – тепловой эффект деформации.

При постоянном давлении изменение внутренней энергии может быть принято равным скрытой энергии деформаций [48].

Многочисленные экспериментальные исследования [47-55] показывают, что большая часть энергии, затраченной на деформацию, превращается в тепло и лишь небольшая часть (несколько процентов) аккумулируется в материале в виде дефектов кристаллической решетки. Малые значения величин скрытой энергии затрудняют ее экспериментальное определение.

Обстоятельный обзор по скрытой энергии деформаций сделан в работах М. А. Большаниной и В.Е.Панина [49] и Э.Л. Титченера и М.Б. Бевера [49].

По литературным данным [47-55] можно составить следующее представление о скрытой энергии деформаций:

- скрытая энергия с увеличением степени деформации возрастает сначала быстро, а затем медленно с тенденцией к насыщению;
- при идентичных условиях деформации абсолютное значение скрытой энергии тем больше, чем выше температура плавления металла;
- отношение скрытой энергии к работе деформаций тем больше, чем выше температура плавления металла и меньше чистота металла;
- чем больше скорость деформации при одинаковых степенях деформации, тем больше скрытая энергия деформаций;
- металл, предварительно деформированный при большой скорости, при последующей деформации менее способен к накоплению энергии, чем медленно деформированный металл.

Энергия, запасенная при наклепе, складывается из следующих составных частей [48]:

1. энергии упругой деформации, вклад которой в скрытую энергию деформаций мал даже для высокопрочных металлов;

2. энергии, связанной с возникновением, перераспределением и взаимодействием дислокаций друг с другом или с точечными дефектами. Она составляет основную часть запасенной энергии в металле;

3. энергии, обусловленной образованием точечных дефектов, вклад которых ощутим при низких температурах;

4. энергии, обусловленной особыми механизмами (образование дефектов упаковки, двойников и др.)

Из обзорных статей [48,49,55] видно, что величина скрытой энергии деформаций колеблется в широких пределах (от нескольких Дж до 850 Дж/г атом) и определение предельной величины скрытой энергии по этим данным не представляется возможным.

В большей части опубликованных работ величина затраченной работы деформации не приводится, условия деформации и их величина очень разнообразны, различен химический состав исследованных материалов, поэтому величины скрытой энергии деформаций, полученные разными авторами, не совпадают между собой [48, 49].

Исследований по определению скрытой энергии при внешнем трении очень мало [13,18, 39,56].

Процесс изнашивания материалов при внешнем трении обычно рассматривают как процесс пластической деформации и разрушения, характеризующийся локализацией в поверхностных слоях материала пары трения. Этот процесс осуществляется в условиях сложного, неоднородного и переменного во времени напряженно-деформированного состояния приповерхностных слоев материала и осложняется физико-химическим взаимодействием деформируемых объемов материала с окружающей средой.

Кроме того, указанные процессы являются необратимыми, сопровождающимися затратами механической энергии и ее превращениями в другие виды энергии. Это обуславливает стремление многих исследователей

к использованию энергетического подхода к описанию закономерностей разрушения поверхностных слоев материала при фрикционном взаимодействии.

Рассматривая процесс абразивного изнашивания при внешнем трении как частный случай пластической деформации и разрушения, обусловленный конкуренцией двух одновременно протекающих и взаимосвязанных процессов: упрочнения и разупрочнения, термодинамические представления о прочности и разрушении твердых тел, развитые в работе [16] были распространены на процессы разрушения при внешнем трении [57].

Концепция упрочнения и разупрочнения при трении рассматривается в работе Крагельского И.В., Любарского И.М., Гусякова А.А.[58]. В ней отмечается, что трение и износ определяется не только и не столько окислительными процессами, как процессами упрочнения и разупрочнения, происходящими в материале пары трения. Окислительные пленки препятствуют развитию упрочнения и разупрочнения, но не устраняют их.

В работе [5] Крагельский И.В. отмечает, что пленки смазки защищают основной металл от глубинного вырывания, однако не защищают материал от деформации, не устраняют нагрузку, а лишь выравнивают ее.

Уилман Х. показал, что для абразивного износа только 10 % материала удаляются путем микро резания и что пропахивание не столько средство износа, сколько упрочнения поверхности [66].

Костецкий Б.И. отмечает, что общей, характерной чертой разрушения при трении является наличие неомогенной пластической деформации [9].

Необратимо поглощаемую энергию деформаций поверхностных слоев материала пары трения можно разделить на две части [18] (рис.2.1).

Первая значительная (до 70-90%) работы трения вследствие колебательного движения и процессов возврата (уничтожения) дефектов и

повреждений необратимо трансформируется в тепло Q , т.е. связана с тепловым эффектом трения. Эта энергия характеризует разупрочненное состояние материала. Она участвует в разрушении постольку, поскольку нагревает поверхностные слои материала, уменьшая силы связи между атомами. Если температура поверхности трения невысокая, тепло, выделившееся в результате аннигиляции дефектов кристаллического строения, проходит через пару трения как бы транзитом, не принимая участия в разрушении. При высоких значениях температуры на поверхности трения вклад этой составляющей может оказаться существенным или даже решающим, если температура на поверхности достигнет температуры плавления материала [57].

Вторая, сравнительно небольшая часть, (до 30%) обусловлена накоплением в деформируемых объемах материала и продуктах износа скрытой энергии U , которая связана с зарождением и задержкой в деформируемых объемах различного рода дефектов (дислокаций, вакансий и др.) и повреждений (субмикроскопических нарушений сплошности) и их развитием в микро- и макротрещины, которые, прорастая, смыкаются и образуют частицы износа. Многочисленные исследования [27,59-60] показывают, что в процессе трения поверхностные слои упрочняются (наклепываются) до предела и когда исчерпывается способность материала к пластической деформации, происходит износ. Причем в работе [27] отмечается, что независимо от степени предварительного упрочнения поверхностные слои наклепываются до предела. Исследования энергетического состояния поверхностных слоев материала показало, что плотность дислокаций, т.е. величины скрытой энергии, в зоне трения достигала насыщения [22,59]. На этом, заключительном этапе деформирования поверхностных слоев происходит образование продуктов износа. Этому моменту соответствует наибольшая степень накопленной

пластической деформации и максимальное (критическое) упрочнение (наклеп) [16,18,20].

Плотность скрытой энергии в деформированных поверхностных слоях материала пары трения неодинакова. Самый верхний приповерхностный слой насыщен дефектами до предела. Он уже не способен воспринять пластическую деформацию и в результате последующего фрикционного взаимодействия в нем возникают трещины, которые, смыкаясь, образуют частицы износа. По мере продвижения вглубь плотность скрытой энергии в деформированном слое снижается и на границе, разделяющей упрочненные и не упрочненные объемы, становится равной плотности скрытой энергии материала в исходном (до деформирования) состоянии.

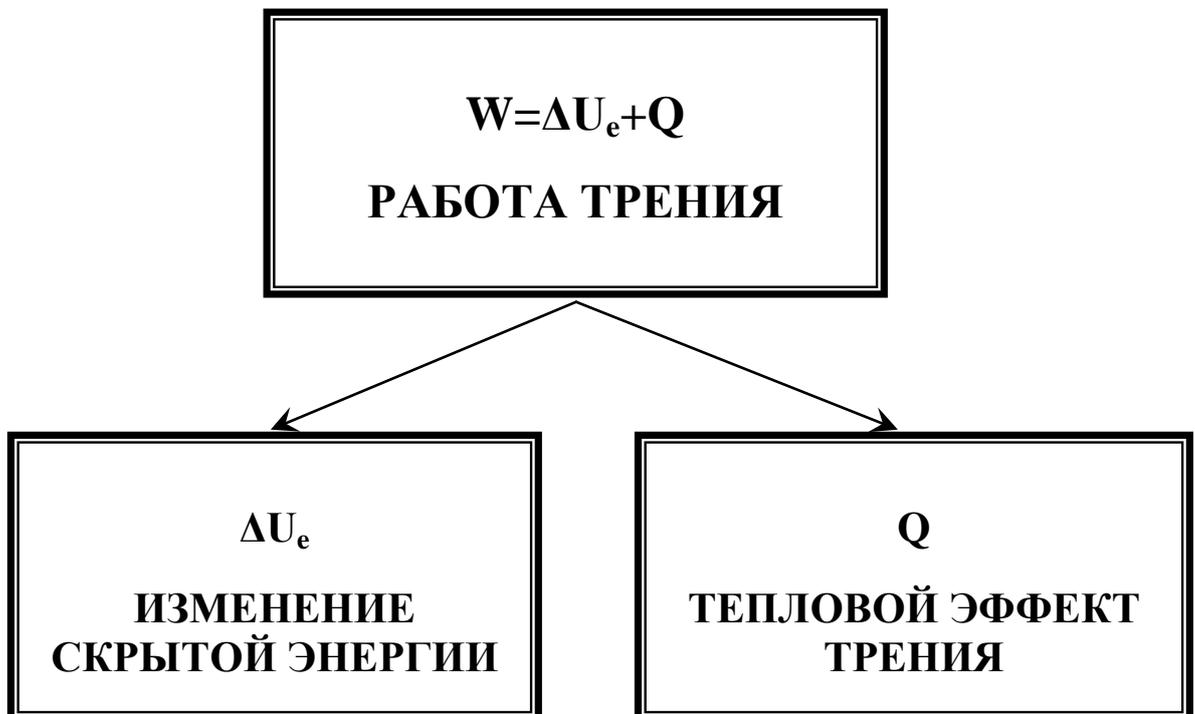


Рис. 2.1. Энергетический баланс процесса трения [16].

Способность к упрочнению у разных металлов и сплавов не одинакова и зависит от их природы и структурного состояния.

Скрытая энергия характеризует упрочненное состояние материала. Она является мерой повреждаемости материала и ответственна в основном за разрушение материала.

2.2. Аналитическая оценка величины скрытой энергии, накапливаемой в поверхностных слоях материала при пластической деформации

По мнению Попова В.С. [22] высокая абразивная износостойкость может быть достигнута при увеличении чувствительности стали к упрочнению в процессе эксплуатации, поскольку доля энергии, потребной на упрочнение для сталей, чувствительных к превращениям, достигает 90-95% в балансе всех энергетических затрат на изнашивание.

Количество энергии, поглощаемой рабочей поверхностью и в значительной степени определяющей способность к сопротивлению изнашиванию абразивными телами, зависит от энергоемкости процессов, осуществляющихся в металле при взаимодействии с абразивами. Величина износа тем меньше, чем больше энергии может поглотить сплав к моменту разрушения [22].

Аналогичного мнения придерживается Погодаев Л.И. [20]. Он также связывает процесс поверхностного разрушения при абразивном воздействии с энергоемкостью материала, т. е. с его способностью накапливать в деформируемых объемах скрытую энергию к моменту разрушения. Чем больше энергии способен накопить материал в деформируемых объемах к моменту разрушения, тем больше его износостойкость.

Исходя из вышесказанного можно записать:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_{k1}}{U_{k2}} \quad (2.2)$$

где, ε - износостойкость материала;

U_k - скрытая энергия деформаций, накопленная к моменту разрушения.

Экспериментальные исследования энергетического баланса процесса изнашивания [13,18,39,52] показали, что величина скрытой энергии деформаций незначительна, ее экспериментальное определение представляет определенные трудности [48]. Поэтому в настоящей работе сделана попытка оценить величину скрытой энергии деформаций аналитическим методом [65].

В работе [48] отмечается, что кривая, характеризующая процесс накопления скрытой энергии в деформированных объемах материала от работы деформации соответствует истинной диаграмме растяжения при одноосном нагружении. Используя эту аналогию, можно определить скрытую энергию, накопленную к моменту разрушения образца при растяжении (рис.2.2).

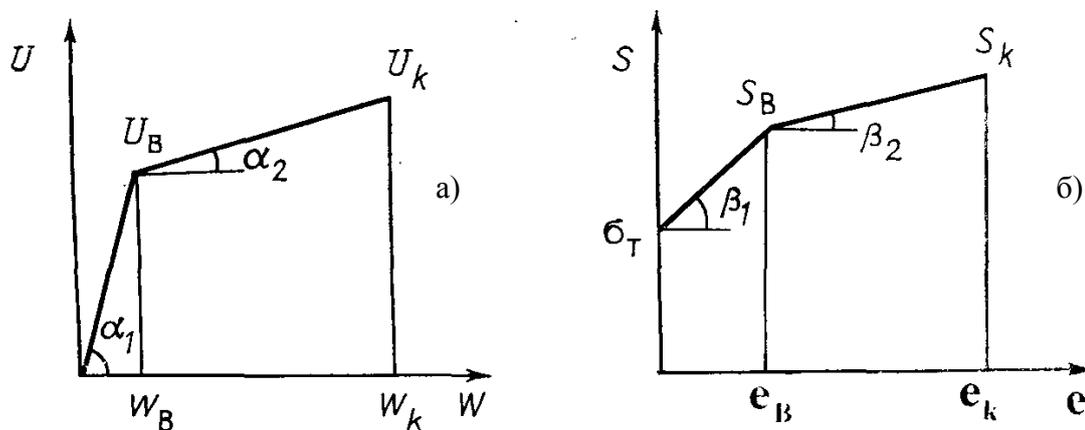


Рис. 2.2. Зависимость накопления скрытой энергии U от работы деформации W /а/ и истинная диаграмма растяжения /б/.

Если принять (рис 2.2), что

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = k_1 \operatorname{tg} \beta_2, \quad (2.3)$$

где α, β - углы наклона кривых;

k – коэффициент, $(\text{МПа})^{-1}$.

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{U_B}{W_B}$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{S_B - \sigma_T}{e_B}$$

Тогда

$$\frac{U_B}{W_B} = k_1 \frac{S_B - \sigma_T}{e_B} \quad (2.4)$$

где U_B - удельная скрытая энергия деформации, накопленная в объеме

материала при равномерной деформации, $\text{МДж} / \text{м}^3$;

W_B - удельная работа деформирования при равномерной

деформации, $\text{МДж} / \text{м}^3$;

S_B - истинное временное сопротивление, МПа ;

σ_T - предел текучести, МПа ;

e_B - истинная равномерная деформация.

Известно, что площадь под кривой растяжения, представляет из себя удельную работу деформирования [61]. Поэтому из рис. 2.2, б имеем

$$W_B = \frac{S_B + \sigma_T}{2} e_B. \quad (2.5)$$

После подстановки этого выражения в уравнение (2.4) получим

$$U_B = k_1 \frac{S_B - \sigma_T}{e_B} W_B = k_1 \frac{S_B - \sigma_T}{e_B} \cdot \frac{S_B + \sigma_T}{2} \cdot e_B$$

$$U_B = \frac{S_B^2 - \sigma_T^2}{2} k_1 \quad (2.6)$$

Далее принимаем

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = k_2 \operatorname{tg} \beta_2 \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{U_k - U_B}{W_k - W_B} \quad (2.8)$$

где W_k - удельная работа деформирования к моменту разрушения, МДж / м³;

U_k - удельная скрытая энергия деформаций, накопленная к моменту разрушения образца при растяжении, МДж / м³.

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{S_k - S_B}{e_k - e_B}. \quad (2.9)$$

где S_k - истинное сопротивление разрыву, МПа;

e_k - истинная деформация к моменту разрушения.

Из равенств (2.7) - (2.9) имеем

$$U_k = \frac{S_k - S_B}{e_k - e_B} (W_k - W_B) k_2 + U_B. \quad (2.10)$$

Так как (рис. 2.2, б)

$$W_k - W_B = \frac{S_k + S_B}{2} (e_k - e_B) \quad (2.11)$$

то, подставив это равенство в уравнение (2.10), получим

$$U_k = k_2 \cdot \frac{S_k - S_B}{e_k - e_B} \cdot \frac{S_k + S_B}{2} \cdot (e_k - e_B) + k_1 \cdot \frac{S_B^2 - \sigma_T^2}{2}.$$

$$U_k = \frac{S_k^2 - S_B^2}{2} k_2 + \frac{S_B^2 - \sigma_T^2}{2} k_1 \quad (2.12)$$

Если принять $k_1 = k_2$, то удельная скрытая энергия к моменту разрушения составит

$$U_k = \frac{S_k^2 - \sigma_T^2}{2} k = \frac{(S_k + \sigma_T)(S_k - \sigma_T)e_k}{2e_k} k$$

$$U_k = kW_k D \quad (2.13)$$

где $D = \frac{S_k - \sigma_T}{e_k}$ – коэффициент деформационного упрочнения, МПа.

Коэффициент деформационного упрочнения D , имея размерность напряжений, служит истинной мерой пластического упрочнения при растяжении [61]. Величина коэффициента деформационного упрочнения определяется по стандартным механическим характеристикам материала: пределу текучести - σ_T , пределу прочности - σ_B , относительному сужению - ψ_k .

В отличие от простого одноосного нагружения при растяжении разрушение поверхностных слоев при абразивном изнашивании осуществляется в условиях сложного напряженного состояния. Однако, если воспользоваться принятым в теории пластичности [62] положением о существовании единой кривой деформирования, то полученные зависимости можно распространить на условия абразивного разрушения.

Подставив (2.13) в (2.2), получим

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{W_{k1} D_1 k_1}{W_{k2} D_2 k_2} \quad (2.14)$$

Приняв $k_1 = k_2$, и учитывая, что при оценке относительной износостойкости условия нагружения идентичны, принимаем $W_{k1} = W_{k2}$, тогда из (2.14) имеем

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad (2.15)$$

т.е. между износостойкостью ε и коэффициентом деформационного упрочнения D имеется прямая пропорциональная зависимость.

При испытаниях материалов на относительную износостойкость предполагается, что условия изнашивания (нагрузка, скорость, среда, абразив) одинаковы, т. е. можно считать, что и напряженное состояние поверхностных слоев будет одинаковым. Деформируемые слои при абразивном воздействии находятся в сложно – напряженном состоянии, при котором напряжения меняются как по величине, так и по направлению. Однако, можно ожидать, что при каждом цикле взаимодействия, на фактических пятнах контакта действует некоторое усредненное, эквивалентное напряжение σ_{ε} , которое будет одинаковым для всех образцов.

В работе [63] отмечается, что при пластической деформации акты зарождения дислокаций увеличивают внутренние напряжения σ_s . В этом случае действие внешнего касательного напряжения σ_i уменьшается на величину внутренних напряжений σ_s и на источник образования дислокаций действует эффективное напряжение

$$\sigma_{\varepsilon} = k_t(\sigma_i - \sigma_s) \quad (2.16)$$

По Оровану [64]

$$\sigma_s = h\varepsilon_p, \quad (2.17)$$

где $h = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ - коэффициент деформационного упрочнения.

Следовательно, чем больше коэффициент деформационного упрочнения h , тем больше величина внутренних напряжений σ_s (2.17), тем меньше эффективное напряжение σ_{ε} (2.16) при одинаковом внешнем

напряжении σ_i . Уменьшение эффективного напряжения σ_e , действующего на источник образования дислокаций, снижает скорость накопления дефектов поверхностном слое, а, значит, увеличивает износостойкость.

Таким образом, коэффициент деформационного упрочнения характеризует способность деформируемых объемов материала сопротивляться накоплению дефектов кристаллического строения (вакансий, дислокаций и др.). Поэтому, чем больше коэффициент деформационного упрочнения, тем больше должна быть стойкость против абразивного разрушения.

Разработанная методика определения энергоемкости материалов выгодно отличается от методик, предлагаемых в работах Попова В.С.[22,34] и Погодаева Л.И.[20].

В работе Попова В.С. [34] для определения энергоемкости сплавов использовался метод рентгеноструктурного анализа с послойным сравнением упрочненных поверхностных объемов материала.

В работе Погодаева Л.И.[20] критерий износостойкости – критическая плотность потока мощности деформации, определялся из выражения:

$$W_{кр}^* = k (H_0 - H_{max}) (H_0 + H_{max})^{\frac{1}{2}} e^{\frac{3}{2} \epsilon_{пред}} \quad (2.18)$$

где H_0 – исходная микротвердость поверхности изнашивания,

H_{max} – максимальная микротвердость поверхности изнашивания,

$\epsilon_{пред}$ – предельная деформация,

$k = 0,33 \{ 10^6 [4(H / \sigma_T) \rho_m]^{-1} \}^{\frac{1}{2}}$ - коэффициент,

здесь H - микротвердость поверхности изнашивания,

σ_T - предел текучести,

ρ_m - плотность материала.

Для определения H_0 , H_{\max} и $\epsilon_{\text{пред}}$ строятся диаграммы твердости материалов по методу Вассаускаса С.С.[20]. Предел текучести σ_T определяется по диаграмме растяжения образца.

В предлагаемой нами методике используются стандартные механические характеристики (σ_B - предел прочности, σ_T - предел текучести, ψ_K - относительное сужение), имеющиеся в справочной литературе, что значительно упрощает и ускоряет процесс оценки износостойкости материалов.

Следует отметить, что рассматриваемая методика с успехом применена для оценки относительной износостойкости рельсовой стали [1].

В полученной формуле (2.15) для оценки относительной износостойкости материалов не присутствует в явном виде параметры, характеризующие энергетическую суть предлагаемого подхода, хотя сам критерий оценки поверхностной прочности получен исходя из энергетических предпосылок.

3.3. Определение коэффициента деформационного упрочнения по стандартным механическим характеристикам материалов и установление аналитической зависимости для оценки относительной износостойкости

Для вычисления коэффициента деформационного упрочнения необходимо условную диаграмму растяжения $\sigma = f(\epsilon)$ (рис. 2.3) преобразовать в истинную $S=f(e)$ (рис. 2.4.)

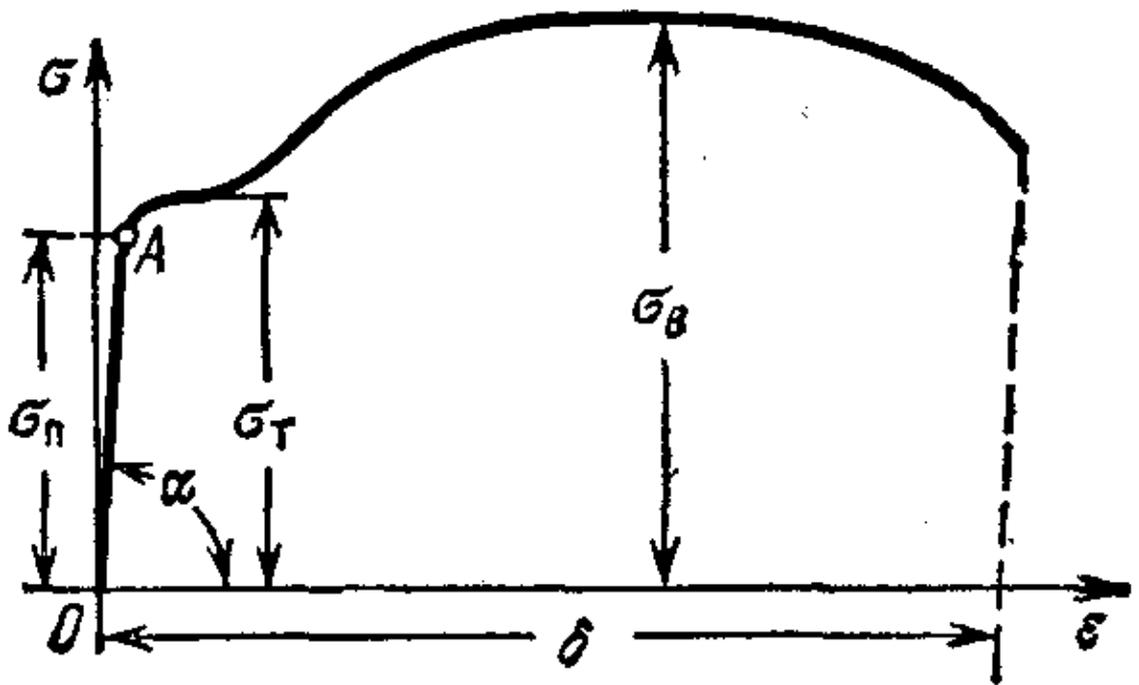


Рис. 2.3. Условная диаграмма растяжения

Кривые растяжения в координатах (рис. 2.3) напряжение - относительное удлинение (σ , ϵ) не представляют зависимости истинного сопротивления металла от величины деформации при растяжении. Подобные кривые на участке развития шейки образца приобретают даже прямо противоположную действительности особенность, показывая, например, падение условного напряжения при прогрессирующей, перед разрывом, пластической деформации, в то время как истинное напряжение растет [67].

Диаграмму напряжений при растяжении, можно рассматривать как характеризующую свойства данного материала при растяжении.

Эта характеристика механических свойств материала является, однако, условной. Если в начале испытания площадь поперечного сечения образца почти не изменяется, то, начиная с напряжений, равных пределу текучести, наступает заметное уменьшение этой площади, сначала равномерное по всей

длине, а с момента перехода за предел прочности — местное. Таким образом, ординаты кривой на участке за пределом текучести представляют собой условные напряжения, отнесенные не к действительной площади сечения, а первоначальной.

Точно так же абсциссы диаграммы до достижения предела прочности зависят лишь от способности материала удлиняться; после же образования шейки величина относительного удлинения зависит и от соотношения размеров образца (длины и диаметра) и, таким образом, не является уже характеристикой только материала. Поэтому, чтобы получить график, более точно характеризующий свойства самого материала, строят так называемую диаграмму истинных напряжений. Она иллюстрирует связь между напряжениями и деформациями в том сечении образца, где происходит разрыв.

Для построения диаграммы истинных напряжений необходимо отмечать в разные моменты опыта величину силы, растягивающей образец, и одновременно измерять поперечные размеры образца в наиболее суженном месте.

Таким образом, если обозначить истинное напряжение S , а истинную площадь поперечного сечения в наиболее суженном месте F_i , то

$$S = P_i / F_i \quad (2.19)$$

При больших деформациях начальная длина образца тоже значительно изменяется. В связи с этим истинное удлинение e должно быть отнесено к действительной длине стержня в данный момент испытания и может быть вычислено по формуле

$$e = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} \quad (2.20)$$

где l_0 — первоначальная длина, а l_1 — длина в момент измерения. При больших значениях истинного удлинения оно обозначается e .

Установим зависимости между истинными и условными деформациями и истинными и условными напряжениями. При равномерной деформации по длине образца

$$e = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \quad (2.21)$$

Окончательно

$$e = \ln(1 + \varepsilon), \quad (2.22)$$

где $\varepsilon = \Delta l / l_0$ условная относительная деформация.

Формула (2.21) при неравномерной деформации не может быть использована, так как затруднено измерение Δl для вычисления ε .

При неравномерной деформации, с началом образования шейки, опыт показывает, что объем образца почти не меняется. Этот закон постоянства объема может быть записан так:

$$F_0 l_0 = F_i l_i \quad (2.23)$$

где F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения. Далее получим

$$F_0 l_0 = (F_0 - \Delta F) (l_0 + \Delta l) \quad (2.24)$$

после деления на $F_0 l_0$;

$$1 = \frac{F_0 - \Delta F}{F_0} \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \quad (2.25)$$

или

$$(1 - \psi)(1 + \varepsilon) = 1 \quad (2.26)$$

$$1 + \varepsilon = \frac{1}{1 - \psi} \quad (2.27)$$

Отсюда, подставив последнее равенство в формулу (2.21), окончательно получим

$$e = \ln \frac{1}{1-\psi} \quad (2.28)$$

Отметим, что величина ψ определяется по самому узкому месту шейки.

Для получения зависимости между истинными и условными напряжениями учтем, что

$$P = \sigma F_0 = S F_i \quad (2.29)$$

где σ — условное напряжение, т. е. отнесенное к первоначальной площади поперечного сечения. Далее,

$$\sigma = S \frac{F_i}{F_0} = S \frac{F_0 - \Delta F}{F_0} = S (1 - \psi) \quad (2.30)$$

Таким образом, учитывая полученную ранее зависимость между ϵ и ψ , при равномерной деформации по длине образца

$$S = \sigma (1 - \epsilon) \quad (2.31)$$

При неравномерной деформации, с началом образования шейки, истинное напряжение определяется непосредственно по формуле (2.19), так как нахождение условных напряжений в этой стадии работы образца бессмысленно из-за значительной разницы между F и F_0 .

Диаграмма в координатах истинные напряжения — истинные деформации изображена на рис. 2.4.

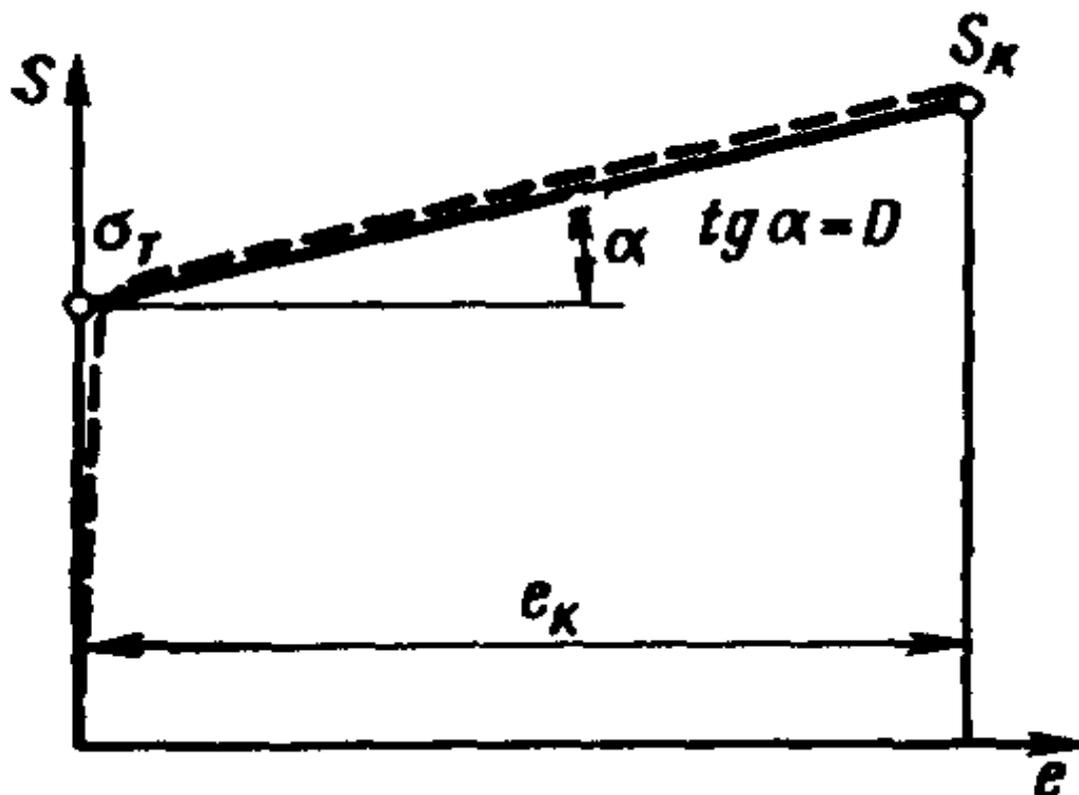


Рис. 2.4. Истинная диаграмма напряжений.

Значение

$$\sigma_T = P_T / F_0$$

Величина истинного предела прочности или истинного временного сопротивления S_B , определяется по формуле (2.31).

Значение истинного напряжения при разрыве определяется по формуле (2.19)

$$S_K = P_K / F_K$$

Величина истинного равномерного удлинения находится по формуле (2.22), т. е.

$$e_B = \ln (1 - \varepsilon_B)$$

где ε_B - есть условное относительное удлинение в момент начала образования шейки.

Наконец, значение полного истинного удлинения в момент разрыва определяется по формуле (2.28),

$$e_k = \ln \frac{1}{1 - \psi_k}, \quad (2.32)$$

где ψ_k вычисляется для места разрыва:

Как видно из диаграмм, представленных на рис.2.3 и 2.4, напряжение возрастает до самого разрыва, сначала быстро, после же достижения наибольшего значения нагрузки (напряжение S_B) менее резко. В момент разрыва напряжение, отнесенное к действительной площади сечения, оказывается большим предела прочности, вычисленного обычным способом.

Ординаты истинной диаграммы характеризуют способность материала сопротивляться пластической деформации.

Для продолжения пластической (остаточной) деформации нам приходится давать материалу все большее и большее напряжение; по мере роста пластической деформации материал оказывает ей все большее сопротивление. Это явление называется упрочнением. Способность материала к упрочнению характеризуется крутизной подъема истинной диаграммы, величиной $\operatorname{tg} \alpha$,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S_k - \sigma_T}{e} = D, \quad (2.33)$$

где D – коэффициент деформационного упрочнения.

В работе [68] на основании обширного экспериментального материала были установлены для вычисления S_k следующие зависимости

$$S_k = \sigma_B (1 + 1,35 \psi_k) \quad \text{при} \quad \psi_B \leq 0,15, \quad (2.34)$$

$$S_k = \sigma_B (0,8 + 2,06 \psi_k) \quad \text{при} \quad \psi_B > 0,15 \quad (2.35)$$

Возможное отклонение вычисленных по ним значений S_K от экспериментально установленных в среднем составляет $\pm 6\%$ [68].

Следовательно, относительная величина скрытой энергии, накопленной в материале рельса к моменту разрушения, легко может быть определена по стандартным механическим характеристикам рельсовой стали σ_B - пределу прочности, σ_T - пределу текучести, относительному сужению - ψ_K .

То обстоятельство, что коэффициент деформационного упрочнения рассчитывается по стандартным механическим характеристикам металлов, позволило широко использовать в качестве экспериментального обоснования предложенного критерия данные, полученные другими исследователями.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изложенный подход к сравнительной оценке абразивного изнашивания металлических материалов при фрикционном взаимодействии позволяет аналитически связать относительную износостойкость пары трения с коэффициентом деформационного упрочнения, величина которого определяется по стандартным механическим характеристикам материала:

σ_B - пределу прочности, σ_T - пределу текучести, ψ_K - относительному сужению.

Такой метод позволяет выявить работоспособность узла трения, не рассматривая детально структуру и сложную природу механизмов и явлений, происходящих в реальных материалах при их деформировании и разрушении.

Целью исследования является экспериментальная проверка возможности оценки относительной износостойкости металлических сплавов в процессе абразивного изнашивания коэффициентом деформационного упрочнения. Экспериментальная проверка заключалась в:

- определении механических характеристик металлических материалов, подвергнутых различным видам термической обработки;
- определении закономерностей изнашивания этих сплавов;
- выявлении взаимной связи (корреляции) закономерностей изнашивания материалов с коэффициентом деформационного упрочнения.

3.1. Методика эксперимента

В соответствии с поставленными задачами методика экспериментальных исследований взаимной связи абразивной износостойкости с коэффициентом деформационного упрочнения должна отвечать следующим требованиям:

1. Методика должна быть простой и удобной для массовых испытаний.
2. Экспериментальные исследования должны дать возможность определить сравнительную износостойкость в идентичных условиях изнашивания (при одинаковых скоростях скольжения и нормальных нагрузок, абразивности среды и пути или времени изнашивания). Постоянство нормальной нагрузки и скорости скольжения обеспечивается конструкцией выбранной для проведения эксперимента установки. Стабильный расход абразивного материала (предварительно высушенного и просеянного) обеспечивается калиброванным отверстием в системе подачи абразива в зону трения.
3. Точность определения механических свойств и замеров износа должна быть достаточно высокой.

В соответствии с поставленными задачами в ходе экспериментальных исследований необходимо определять:

- σ_B - предел прочности,
- σ_T - предел текучести,
- ψ_K - относительное сужение.
- G - весовой износ.

3.2. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментальных исследований использована установка, воспроизводящая схему машины Бринелля [69] (рис. 3.1). Фотография экспериментальной установки приведена на рис. 3.2 .

На горизонтальном валу закреплен резиновый диск 4, толщиной мм и диаметром 120 мм. Вал приводится во вращение от асинхронного электродвигателя 6 через зубчатый редуктор 5 и делает $n = 60$ об/мин., окружная скорость диска на поверхности трения $V = 0,38$ м/с.

Образец 2, имеющий форму цилиндра, зажимается в центрах. При помощи центрирующих болтов образец может перемещаться в вертикальном направлении. Нагрузка на образец осуществляется грузами, которые устанавливаются на нагрузочном рычаге 1.

Для обеспечения идентичности условий изнашивания, необходимо было установить образец таким образом, чтобы плоскость, проходящая через вертикальную ось цилиндрического образца 2, была перпендикулярна трущейся поверхности резинового диска 4 и проходила через середину его толщины. С этой целью рычаг нагрузочного устройства 1 фиксируется в опоре в определенном положении, а образец зажимается в центрах.

Абразив в виде порошка определенной зернистости, предварительно просушенный и просеянный через сито с ячейкой мм, насыпается в бункер 3 откуда через калиброванное отверстие поступает в приемник, представляющий из себя трубку, которая подает абразив на трущиеся поверхности. В качестве абразива использован обычный речной песок.

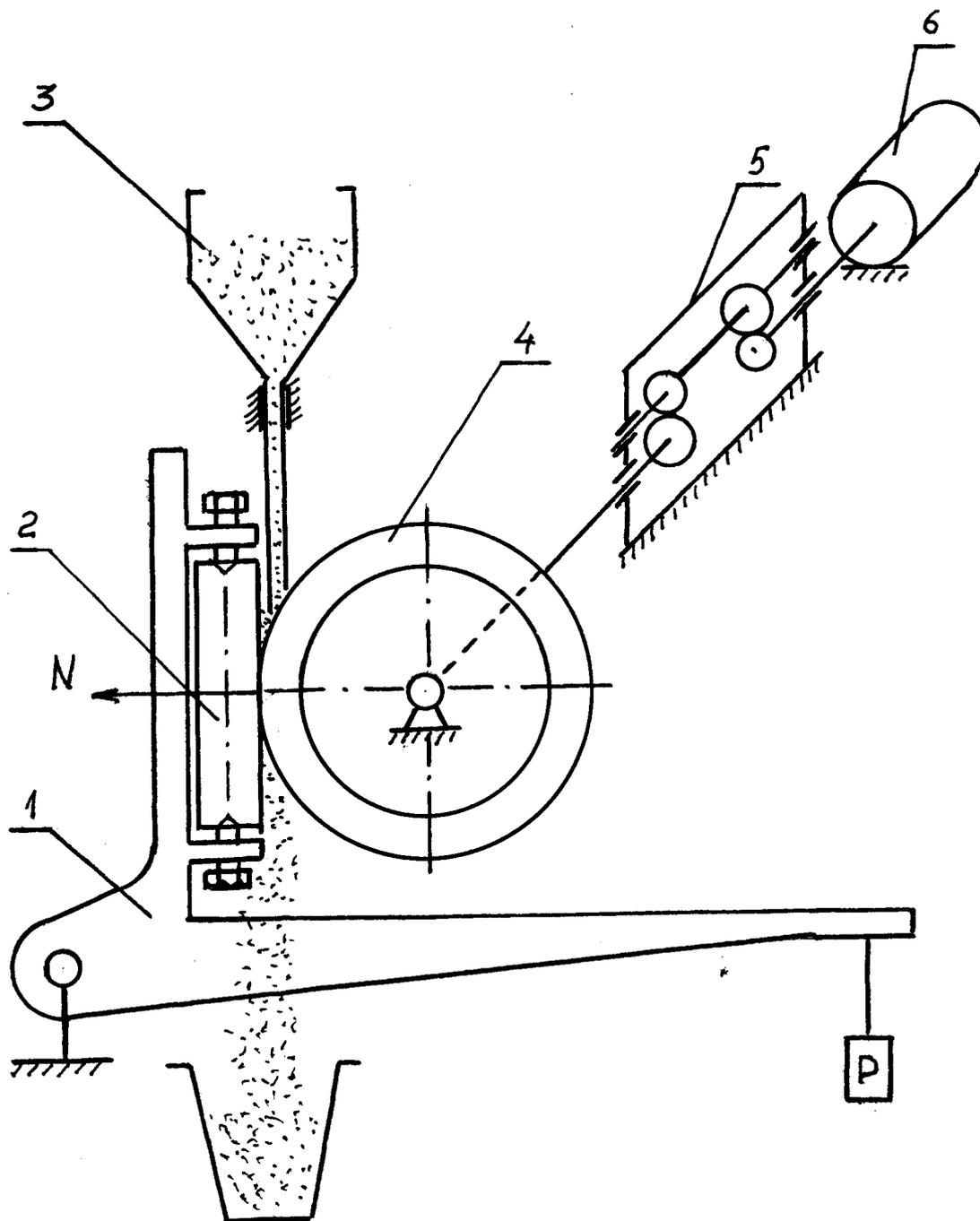


Рис. 3.1 Схема испытания на абразивное изнашивание:
 1 – нагрузочное устройство, 2 – образец, 3 – воронка, 4 – диск резиновый,
 5 – редуктор, 6 – электродвигатель, 7 – бункер.

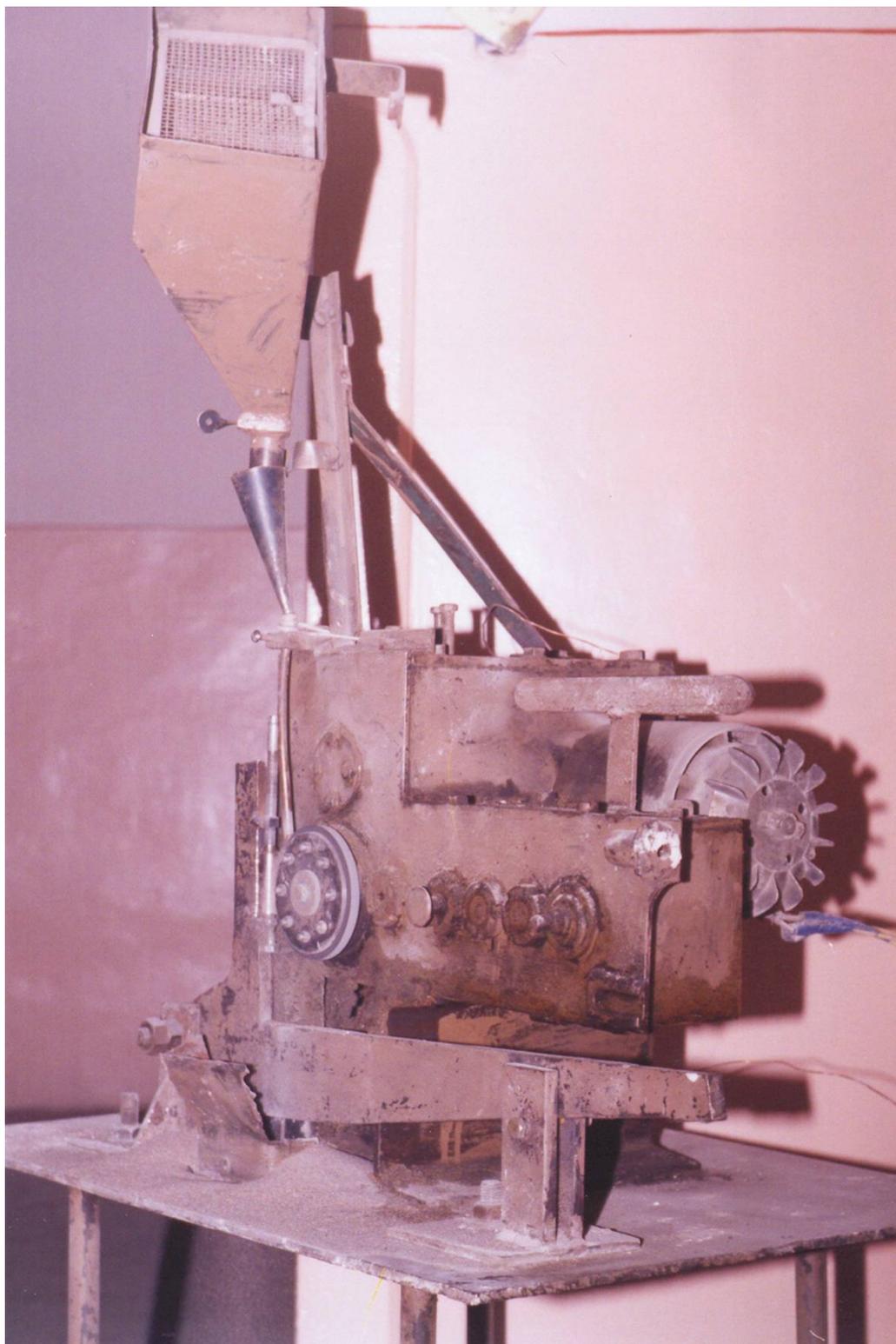


Рис. 3.2. Фотография экспериментальной установки.
1 – нагрузочное устройство, 2 – образец, 3 – воронка, 4 – диск резиновый,
5 – редуктор, 6 – электродвигатель, 7 – бункер.

При такой схеме испытаний на абразивное изнашивание:

- абразив удерживается и амортизирует в резине, что лимитирует внедрение абразива в образец;
- вследствие применения резинового диска, абразивные зерна меньше подвергаются дроблению;
- по этой же причине удельная нагрузка в процессе испытания мало изменяется.

Расход песка – 110 г/мин.;

Резина – хлоробутил;

Твердость резины – Durometer A 60;

Частота вращения вала – 60 об/мин;

Скорость скольжения 0,38 м / с;

Нагрузка 90 Н;

Продолжительность испытания – 30 мин.

Износ образцов определялся взвешиванием на технических весах. Точность измерения 10 мг.

Каждая точка величины износа получена как среднее из четырех опытов.

В качестве образцов для испытания на изнашивание применялась утолщенная цилиндрическая часть образца, использованного при испытании на статическую прочность, устанавливаемая в захваты машины.

3.3. Обоснование выбора материалов и подготовка образцов

Материалы для проведения экспериментальных исследований были выбраны, исходя из поставленных целей и задач исследований.

Для эксперимента были выбраны металлические сплавы с сильно различающимися химическим составом механическими и физическими

свойствами: углеродистая У8 и легированная 30ХГСНА стали и титановый сплав ВТ3-1, подвергнутые закалке и отпуску при различных температурах.

Форма, размеры и основные требования к изготовлению образцов для статических испытаний на растяжение соответствовали ГОСТ 1497-73. [70] (рис. 3.3.)

Для уменьшения рассеяния свойств из-за различия в химическом составе образцы изготавливались из стали одной плавки. Каждая партия образцов состояла из трех групп, отличающихся по термообработке. Характеристика режимов термообработки приведена в таб.3.1.

С целью получения более точных значений коэффициента относительного сужения ψ_K , входящего в расчетные формулы, были использованы цилиндрические образцы.

Для определения характеристик статической прочности при растяжении использовались машины, отвечающие требованиям ГОСТ 1497-73 и ГОСТ 7855-74 [70,71].

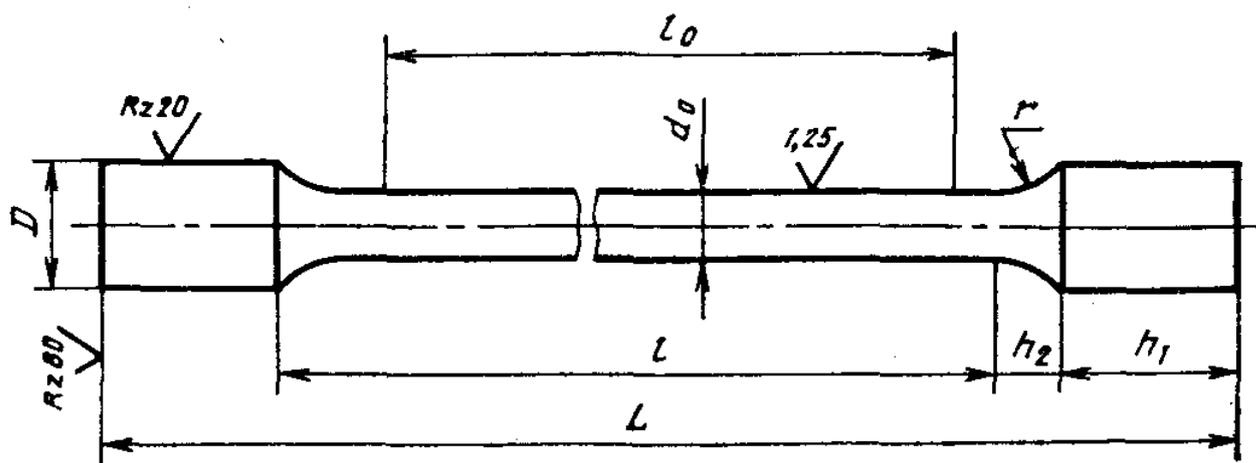


Рис.3.3. Образец для испытаний на растяжение

Таблица 3.1

Характеристика режимов термообработки образцов

№ группы образцов	Материал	Шифр режима термообработки	Термообработка
1	30ХГСНА	О	Отжиг 900 ⁰ С
2		ЗВО	Закалка от 900 ⁰ С, отпуск при 520 ⁰ С.
3		ЗНО	Закалка от 900 ⁰ С, отпуск при 290 ⁰ С.
1	У8	О	Отжиг 740 - 760 ⁰ С.
2		ЗВО	Закалка от 800 ⁰ С, отпуск при 600 ⁰ С.
3		ЗСО	Закалка от 800 ⁰ С, отпуск при 450 ⁰ С.

Примечание: Закалка указанных сталей проводилась в масле.

С целью получения более точных значений коэффициента относительного сужения ψ_K , входящего в расчетные формулы, были использованы цилиндрические образцы.

Для определения характеристик статической прочности при растяжении использовались машины, отвечающие требованиям ГОСТ1497-73 и ГОСТ 7855-74.

3.4. Методика обработки экспериментальных данных

В результате проведения экспериментальных исследований были получены следующие первичные данные:

- характеристики статической прочности при растяжении;
- весовые износы образцов при испытаниях на абразивное изнашивание.

Для определения характеристик статической прочности выполнялись испытания до разрушения трех- четырех образцов из партии заданного материала. При этом для каждого из образцов замерялось:

- максимальная нагрузка P_B , которую выдерживает образец ;
- нагрузка P_T , соответствующая пределу текучести материала;
- нагрузка P_K , соответствующая моменту разрушения образца.

После разрушения образцов определялись диаметры образцов в месте разрыва d_k ; затем определялись площади соответствующих поперечных сечений:

- начальной площади $F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$,
- площади в момент разрушения $F_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$.

Расчетом для каждого образца в отдельности определялись следующие характеристики:

- предел прочности $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}$,
- предел текучести $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$,
- относительное сужение к моменту разрушения образца $\psi_K = \frac{F_0 - F_K}{F_0}$,
- истинное сопротивление разрыву $S_K = \frac{P_K}{F_K}$.

В тех случаях, когда точное определение истинного сопротивления разрыву S_K связано с методическими трудностями, использовались зависимости (2.34), (2.35), предложенные Марковцом М.П.[68]

По формуле (2.32) определяли истинное удлинение образца e_K

$$e_K = \ln \frac{1}{1 - \psi_K}$$

По формуле (2.33) определяли коэффициент деформационного упрочнения D

$$D = \frac{S_K - \sigma_T}{e_K}$$

После проведения экспериментальных исследований на машине трения были получены данные о весовом износе G за время изнашивания $t = 0,5$ час.

Расчетом определяли износостойкость ε

$$\varepsilon = \frac{1}{G}$$

С целью установления корреляционной зависимости между износостойкостью ε и коэффициентом деформационного упрочнения D экспериментальные данные обрабатывались методом наименьших квадратов (см. Приложение П.2.)

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Исследование взаимной связи износостойкости металлических материалов с коэффициентом деформационного упрочнения

Проведенные экспериментальные исследования износостойкости конструкционных материалов, имеющих различную структуру и механические свойства, дали возможность выявить связь износостойкости этих материалов с коэффициентом деформационного упрочнения (табл. 4.1.)

Таблица 4.1

Результаты экспериментальных исследований износостойкости стали
30ХГСНА

№	Термо обработка	Механические свойства						D	ε
		σ_B	σ_T	ψ_k	e	S_K	НВ		
1.	О	786	428	0,36	0,446	1169	2210	1659	2,22
2.	О	786	469	0,46	0,616	1274	2110	1307	2,13
3.	О	770	535	0,469	0,633	1258	2190	1142	2,04
4.	ЗОВ	1293	1083	0,495	0,683	2157	3850	1572	3,033
5.	ЗОВ	1284	1070	0,505	0,703	2159	3950	1549	3,23
6.	ЗОВ	1230	1010	0,515	0,723	2085	3780	1487	2,94
7.	ЗОВ	1239	1054	0,495	0,683	2067	3790	1483	2,86
8.	ЗОВ	1284	1081	0,515	0,723	2177	3760	1515	2,86
9.	ЗОС	1555	1420	0,505	0,703	2615	5370	1700	4,17
10.	ЗОС	1754	1433	0,485	0,57	2902	5410	2216	4,55
11.	ЗОС	1667	1401	0,515	0,723	2825	5190	1974	3,85
12.	ЗОС	1621	1336	0,45	0,598	2605	5360	2123	4,35
13.	ЗОС	1575	1306	0,505	0,703	2648	5290	1910	3,85

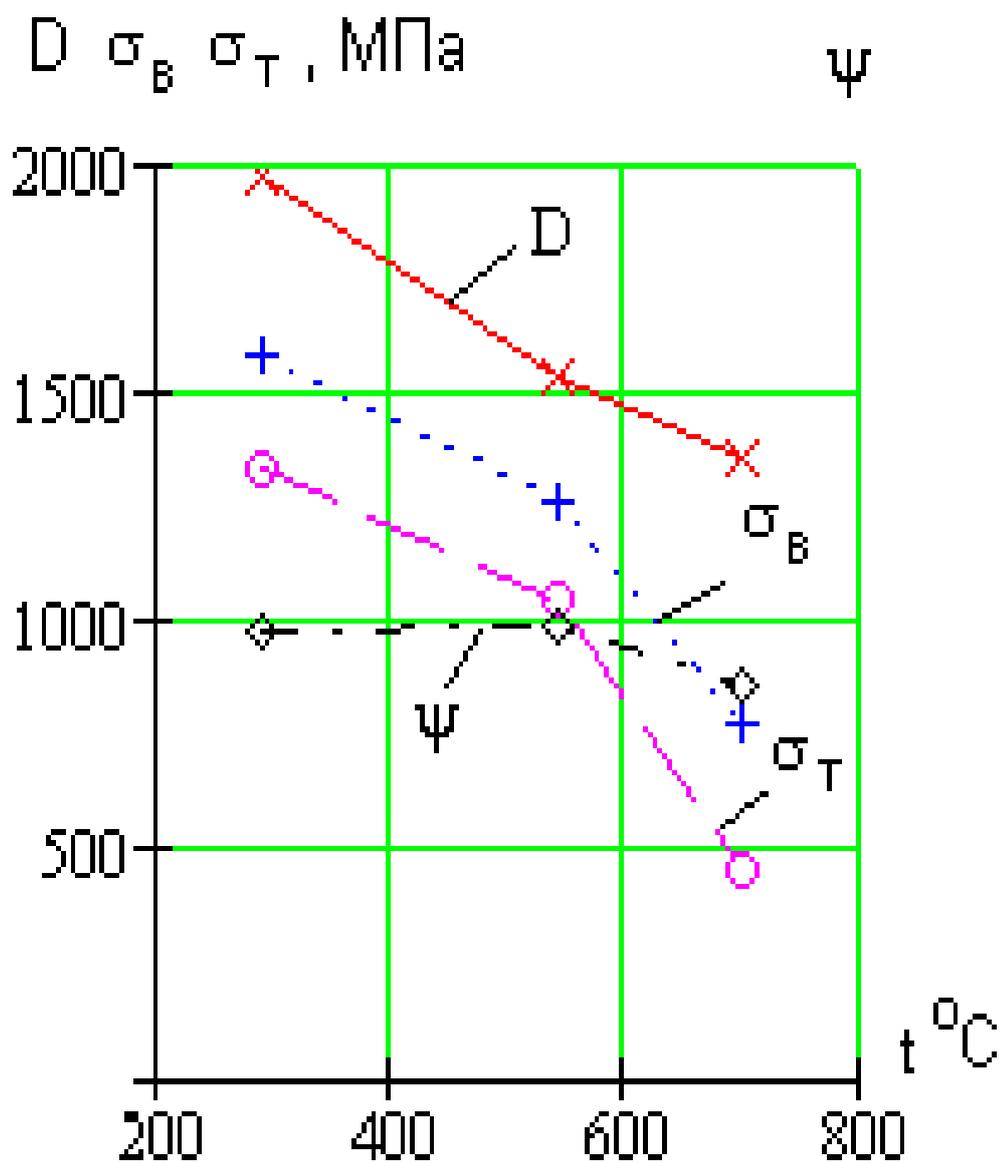


Рис. 4.1. Зависимость механических свойств стали 30ХГСНА от температуры отпуска t :

+ - предел прочности σ_B ;

0 - предел текучести σ_T ;

◇ - относительное сужение ψ ;

X - коэффициент деформационного упрочнения D.

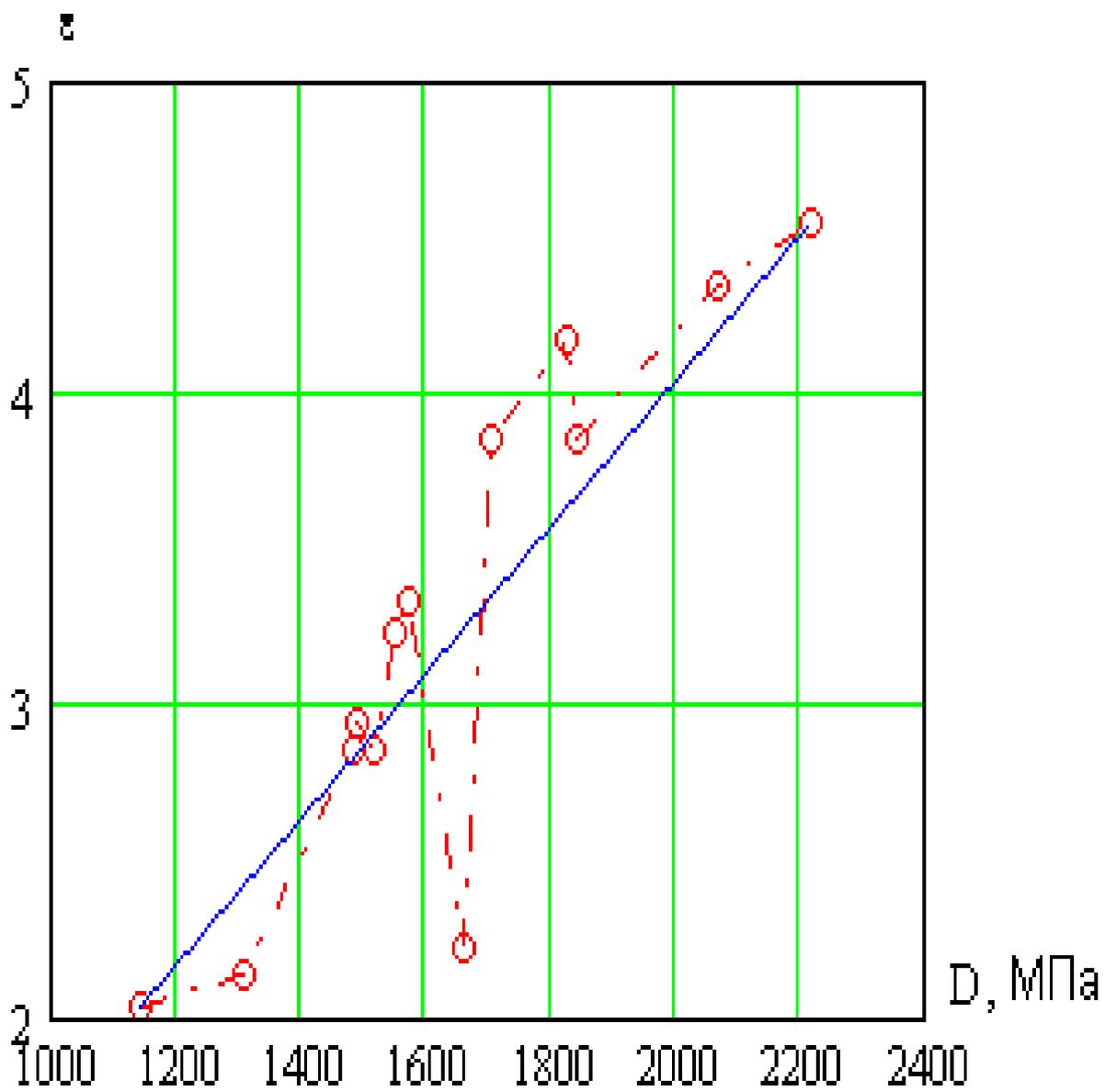


Рис. 4.2. Зависимость абразивной износостойкости ϵ от коэффициента деформационного упрочнения D (сталь 30ХГСА).

Обработка полученных данных методом наименьших квадратов (табл.П.3. приложение) показала, что коэффициент корреляции абразивной износостойкости с коэффициентом деформационного упрочнения для стали 30ХГСНА составил $r = 0.881$. Полученное значение коэффициента корреляции свидетельствует о сильной связи между абразивной износостойкостью ε и коэффициентом деформационного упрочнения D (Рис. 4.2).

В табл. 4.2 приведены экспериментальные данные механических свойств, коэффициента деформационного упрочнения и износостойкости стали У8.

Таблица 4.2

Результаты экспериментальных исследований износостойкости стали У8

	Термо обработка	Механические свойства						D	ε
		σ_B	σ_T	ψ_k	e	S_K	нв		
1.	О	749	541	0,351	0,43	1103	2140	1309	2,0
2.	О	741	533	0,36	0,446	1101	2060	1273	1,92
3.	О	714	539	0,345	0,42	1046	2040	1208	1,92
4.	ЗВО	917	822	0,283	0,33	1267	2620	1349	2,2
5.	ЗВО	853	770	0,26	0,3	1152	2370	1274	2,1
6.	ЗВО	966	832	0,267	0,31	1314	2760	1554	2,4
7.	ЗСО	1050	987	0,192	0,21	1322	3730	1596	3,2
8.	ЗСО	1027	970	0,203	0,23	1308	3690	1471	3,1
9.	ЗСО	1106	1043	0,210	0,236	1419	3960	1593	3,3

Обработка полученных данных методом наименьших квадратов (табл.П.3. приложение) показала, что коэффициент корреляции абразивной износостойкости с коэффициентом деформационного упрочнения для стали У8 составил $r = 0.903$. Полученное значение коэффициента корреляции свидетельствует о сильной связи между абразивной износостойкостью ε и коэффициентом деформационного упрочнения D (Рис. 4.3.).

В табл.4.3 приведены экспериментальные данные механических свойств, коэффициента деформационного упрочнения и износостойкости отожженного сплава ВТЗ-1.

Таблица 4.3

Результаты экспериментальных исследований износостойкости
сплава ВТЗ-1

	Термо- обработка	Механические свойства						D	ε
		σ_B	σ_T	ψ_k	e	S_K	нв		
1.	О	1073	907	0,37	0,46	1608	3040	1526	3,1
2.	О	1050	912	0,35	0,43	1546	3150	1474	3,2
3.	О	1024	875	0,38	0,48	1549	2970	1405	3,0

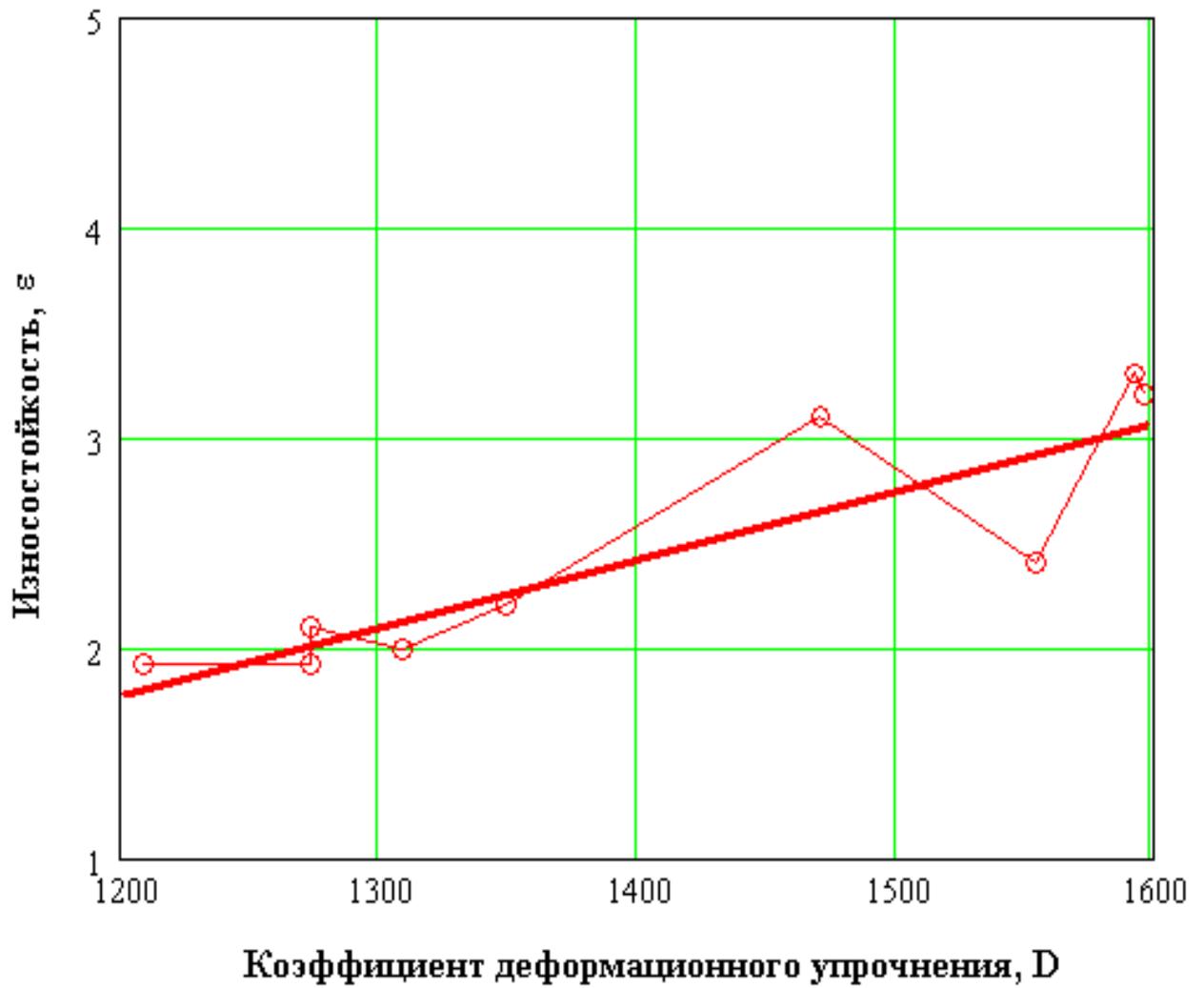


Рис. 4.3. Зависимость абразивной износостойкости ε от коэффициента деформационного упрочнения D (сталь У8)

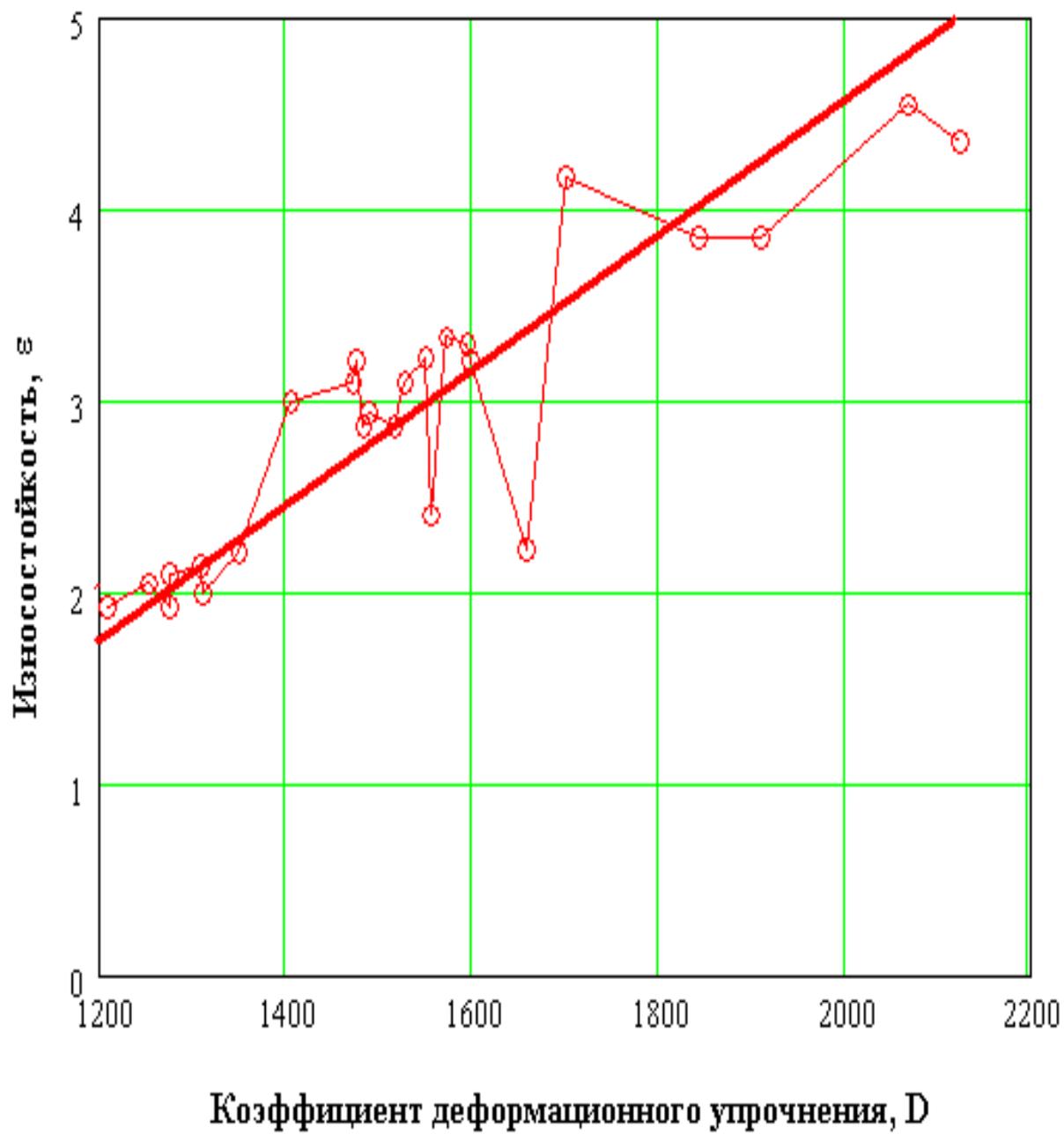


Рис. 4.4 Сводный график зависимости абразивной износостойкости ϵ от коэффициента деформационного упрочнения D (стали 30ХГСНА и У8, титанового сплава ВТ3-1)

На рис. 4.4 представлены сводные данные зависимости износостойкости выше названных сплавов (стали 30ХГСНА, У8 и титанового сплава ВТЗ-1). Коэффициент корреляции составил $r = 0,892$, что говорит о сильной связи износостойкости с коэффициентом деформационного упрочнения.

На рис 4.5 представлен график зависимости абразивной износостойкости ε от твердости по Бринеллю НВ, из которого видно, что для отожженных и закаленных материалов экспериментальные точки укладываются на разные прямые, в отличие от графика на рис. 4.4, где эти зависимости описываются единой прямой.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования и их анализ показал, что между абразивной износостойкостью и коэффициентом деформационного упрочнения существует сильная функциональная связь, близкая к линейной, что хорошо согласуется с предложенной зависимостью (2.15).

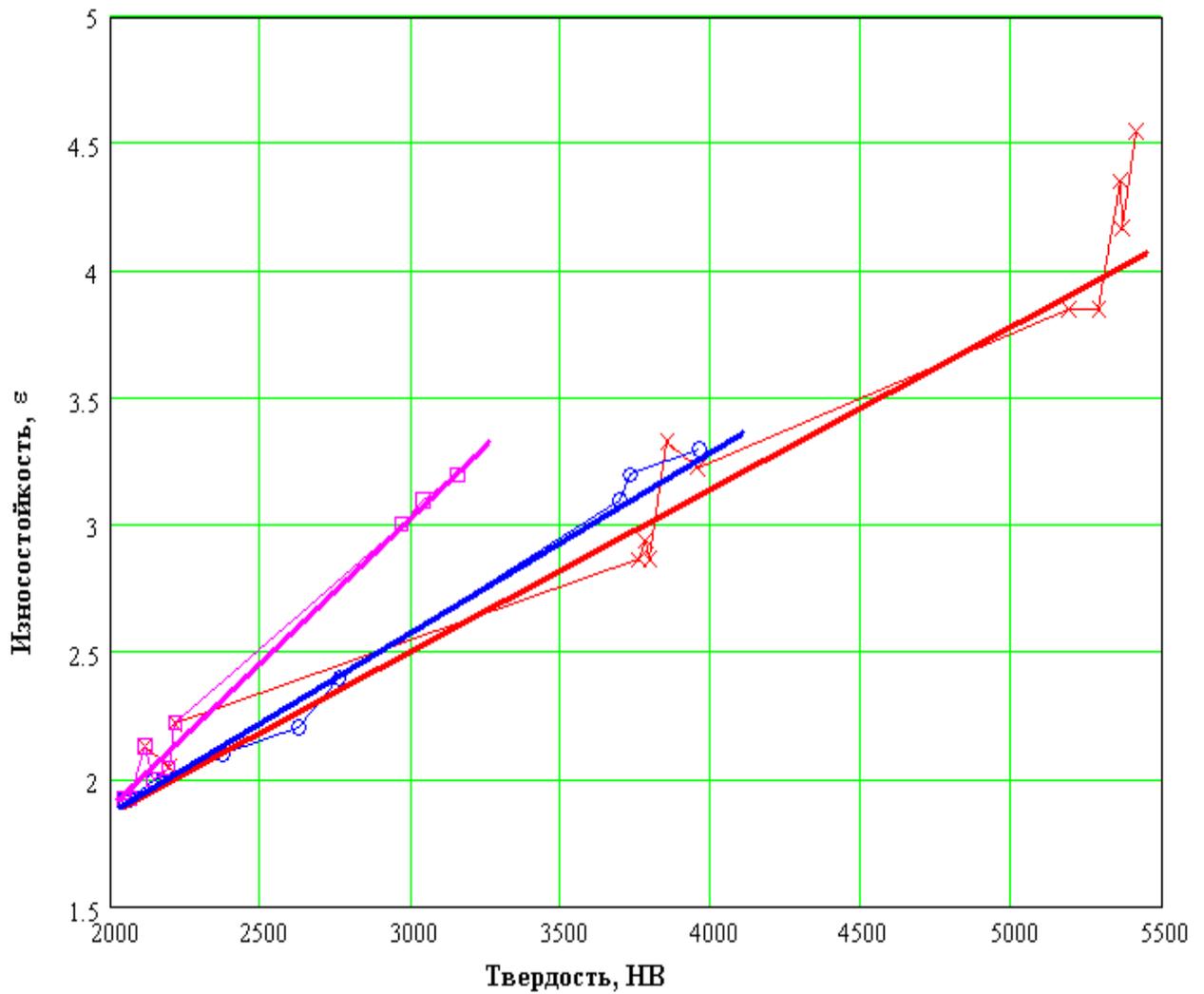


Рис.4.5 Зависимость абразивной износостойкости ϵ от твердости по Бринеллю НВ.

× - сталь 30ХГСНА, закаленная;

0 – сталь У8, закаленная;

□ – отжиг (стали 30ХГСНА и У8, сплав ВТЗ-1)

4.2. Анализ результатов исследований и их сопоставление с экспериментальными данными других исследователей

Идея оценки абразивной износостойкости механическими характеристиками материалов всегда представлялась весьма заманчивой. В главе 1 отмечалось, что к настоящему времени выполнен большой объем исследований, в которых абразивное разрушение поверхностей при трении связывается с различными механическими свойствами: пределом прочности, пределом текучести, модулем упругости, твердостью, относительным удлинением, относительным сужением, ударной вязкостью и др.

То обстоятельство, что коэффициент деформационного упрочнения металлических материалов рассчитывается по стандартным механическим характеристикам (σ_B - пределу прочности, σ_T - пределу текучести, ψ_K - относительному сужению), позволило сопоставить полученные в данном исследовании данные с экспериментальными данными других авторов [8, 72, 79].

Обработка с рассматриваемых позиций экспериментальных данных [8] по относительной износостойкости отожженных чистых металлов и сплавов о закрепленные абразивные частицы показало, что коэффициент корреляции между коэффициентом деформационного упрочнения D и относительной износостойкостью ϵ равен $r = 0,97$. Рис.4.6. (табл.)

На рис.4.7. представлены обработанные экспериментальные данные относительной абразивной износостойкости от коэффициента деформационного упрочнения [72] для 12 марок углеродистых и легированных конструкционных сталей, подвергнутых различным видам термической и термомеханической обработки. Коэффициент корреляции между ϵ и D для 129 различных состояний исследованных материалов составил $r = 0,898$ (табл. П.5. приложение).

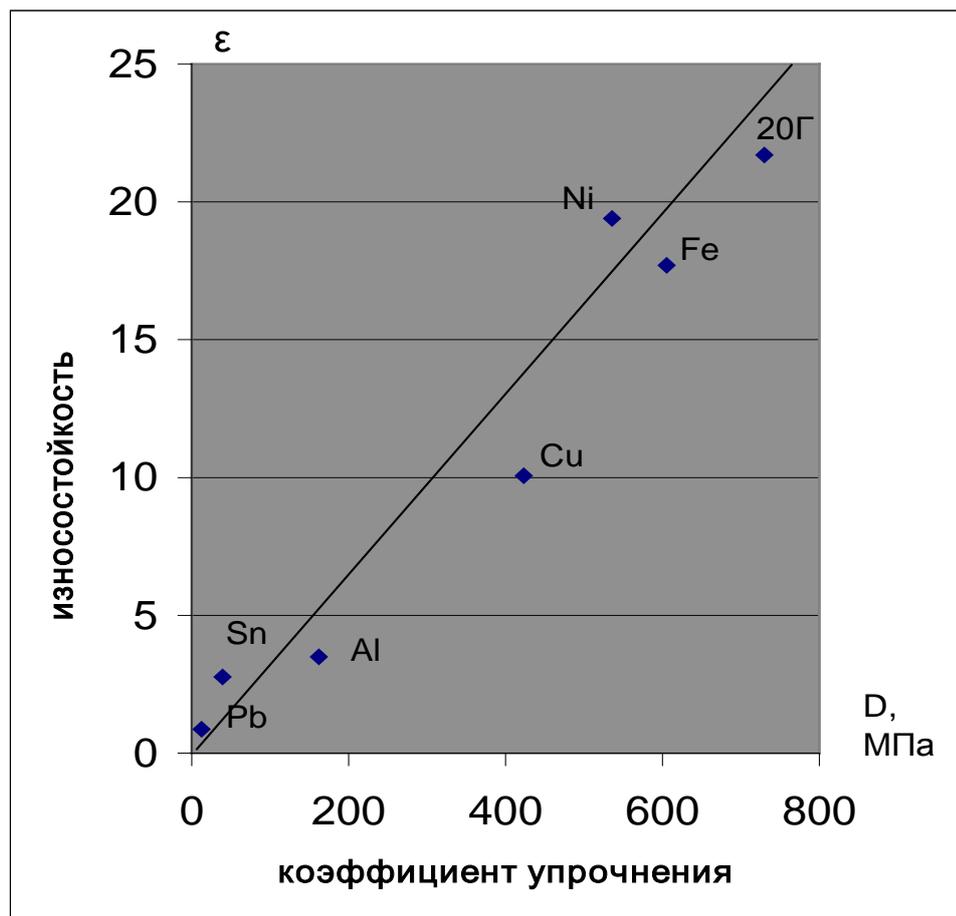


Рис.4.6 Зависимость относительной абразивной износостойкости ϵ отожженных чистых металлов и сплавов от коэффициента деформационного упрочнения D (по данным [8]).

Таблица 4.2

**Величины коэффициента корреляции между D и δ для различных материалов
при различных условиях изнашивания**

№ п/п	Материал	Термообработка	Количество исследованных образцов	Условия изнашивания	Среда	Вид абразивного изнашивания	Коэффициент корреляции
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Чистые металлы	Отжиг	8	$P=3 \text{ Н}$ $n=0,0625\text{с}^{-1}$ $L=3 \text{ м}$	Корундовое полотно (ЧАЗ=170)	Скольжение о закрепленные абразивные частицы	0,9
2	Сталь У8А	Закалка + отпуск	9	Испытание проводилось вручную, время испытания 30 мин.	Черный карбид кремния	Взаимное шлифование	0,97
3	Сталь 45	Закалка + отпуск	4	Энергия удара 0,5 кгм	Черный карбид кремния	Ударно-абразивное изнашивание	0,952
			4	Энергия удара 2 кгм			0,917
4	Сталь 40Х	Двойная закалка	15	Х4-Б	Абразивная шкурка	Изнашивание при скольжении	0,833
1	2	3	4	5	6	7	8
5.	Медь М3, сталь 38Х,	Наклеп	10	$P = 3\text{Н}$	По методике	Изнашивание при	0,947

	Алюминий АД1				ГОСТ 17367-71	скольжении	
6	Стали 45, 40ХМ2МА,7ХФНШ, 40Х13, 03Х11Н10М2Т	Закалка + отпуск	27	Энергия удара 1 Дж.	Кварцевый песок 1КО16А в воде	Ударно – абразивное изнашивание.	0,829
7.	Стали 45,45Г, 45Г2, 45ХГ, 45ХГ2, 45Х,45Х2, 45Х3,45Х4,45Х5, 45ХГС, 45ХНМА.	Объемная закалка, ВТМО, НТМО + отпуск	129	$P=4,6 \text{ Н}$, $n=0,583 \text{ с}^{-1}$	Электрокорундовое полотно	Скольжение о закрепленные абразивные частицы	0,898
8.	Сталь Д7ХФНШ	Закалка + отпуск	8	$P=930 \text{ МН/м}^2$ $V=2,47 \text{ м/с}$, $L=30 \text{ м}$.	Э9А40	Скольжение о закрепленные абразивные частицы	0,932
9.	Сталь 110Г13Л	Объемная закалка, ВТМО, механический наклеп объемно- закаленных образцов и после ВТМО.	4	$P=930 \text{ МН/м}^2$ $V=2,47 \text{ м/с}$, $L=30 \text{ м}$.	Э9А40СТ1	Скольжение о закрепленные абразивные частицы	0,937
			4	1000 ударов	Черный карбид кремния.	Ударно- абразивное изнашивание.	0,976
10.	Стали С=0,03–1,04 %	Отжиг	5	$V=28 \text{ м/с}$	Электрокорунд	В потоке абразивных частиц.	0,87

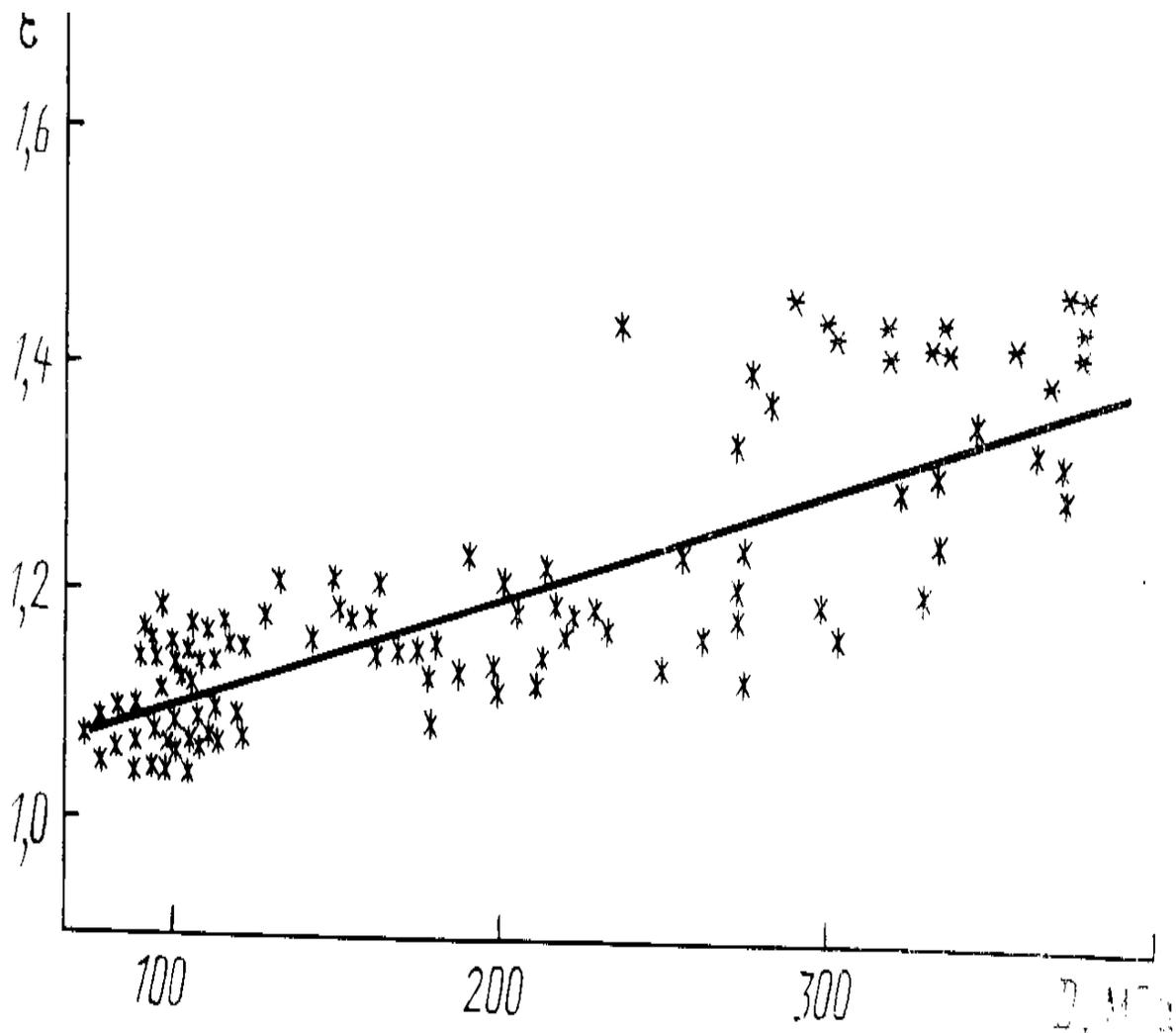


Рис. 4.7. Зависимость относительной абразивной износостойкости от коэффициента деформационного упрочнения для сталей, подвергнутых различным видам термообработки [72].

Расчет коэффициента корреляции между относительной абразивной износостойкостью и коэффициентом деформационного упрочнения D по экспериментальным данным [73] для закаленной и отпущенной при различных температурах стали Д7ХФНШ при скольжении о закрепленные абразивные частицы показали, что он составляет $r = 0,932$ (табл. П.6. приложение).

Обработка с рассматриваемых позиций экспериментальных данных по изнашиванию об абразивную шкурку на машине трения Х4-Б стали 40Х, подвергнутой двойной закалке с отпуском, дала коэффициент корреляции $r = 0,833$ [74,75] (табл.П.7.приложение).

Коэффициент корреляции между ϵ и D для отожженной стали с содержанием углерода 0,03 – 1,04, изнашиваемой в потоке абразивных частиц составил $r = 0,87$ [76] (табл.П.8.приложение).

Изнашивание углеродистой инструментальной стали У8А при взаимном шлифовании вручную выявило достаточно высокий уровень коэффициента корреляции между относительной абразивной износостойкостью и коэффициентом деформационного упрочнения D ($r = 0,97$) [77] (табл.П.9.приложение).

Для закаленных и отпущенных углеродистых и легированных сталей в условиях ударно-абразивного изнашивания коэффициент корреляции между ϵ и D составил $r = 0,829$ [78] (табл.П.10.приложение).

Ударно-абразивное изнашивание закаленной и отпущенной при различных температурах углеродистой стали 45 показало, что при энергии удара 0,5 кГм коэффициент корреляции составил $r = 0,952$, а при энергии удара 2,0 кГм соответственно $r = 0,917$ [79](табл.П.11.приложение)

Таким образом для широкого класса материалов (отожженных и упрочненных различными видами термической и термомеханической

обработки), работающих при различных условиях изнашивания (скольжении по абразиву, ударно-абразивном изнашивании, в потоке абразивных частиц, взаимном шлифовании) уровень коэффициента корреляции между относительной абразивной износостойкостью и коэффициентом деформационного упрочнения D имеет значения близкие к единице ($r \approx 1$) [8, 72-79]. Это свидетельствует о прямой пропорциональной зависимости между этими величинами, что находится в хорошем соответствии с зависимостью (2.15).

Известно, что относительная абразивная износостойкость металлических материалов пропорциональна твердости [8]. Однако, исследования [8,80-83] показали, что абразивная износостойкость металлов и сплавов, получивших различную степень наклепа при пластическом деформировании, остается практически постоянной, хотя твердость при этом повышается. Установленная закономерность имеет большое практическое значение для оценки возможной эффективности повышения износостойкости деталей машин в условиях эксплуатации.

Хрущовым М.М. [8] изучено влияние на сопротивление абразивному изнашиванию механического наклепа, сообщенного технически чистым металлам, сплавам и стали после их предварительного отжига или термической обработки. Исследования показали, что наклеп металлов и сплавов не повышает их сопротивление абразивному изнашиванию, несмотря на то, что твердость при наклепе повышается.

Выявленная закономерность независимости абразивной износостойкости от твердости металлов и сплавов, приобретенной в результате наклепа, позволила сделать вывод о том, что предварительный наклеп является частью полного наклепа, достигаемого в процессе изнашивания, т.е. при трении имеет место наклеп, который больше

предварительного наклепа и является предельно возможным для данного материала.

Поэтому Хрущов М.М. считает, что абразивную износостойкость следует рассматривать как характеристику механических свойств, соответствующую предельной прочности изнашиваемого материала, и в качестве такой характеристики принимает истинное сопротивление разрыву S_k при испытаниях на растяжение. По его мнению эта характеристика может служить количественной оценкой абразивной износостойкости наклепанных материалов, т.к. с увеличением степени наклепа соблюдается постоянство истинного сопротивления разрыву S_k с увеличением предела прочности σ аналогично постоянству относительной абразивной износостойкости ε при повышении твердости НВ.

Аналогичные данные получены Тонном [80] для армко-железа и меди с обжатием разной степени при холодной прокатке. Однако, по его мнению, износостойкость наклепанных образцов при абразивном изнашивании не изменяется потому, что практически не изменяется твердость, определенная методом царапания.

Лаврентьевым А.И. исследовалось влияние наклепа на абразивную износостойкость образцов из меди, алюминия и стали 38ХА, протянутых через фильеры [83]. В отличие от опытов Хрущева М.М.[8] этими экспериментами было установлено, что для наклепанных материалов истинное сопротивление разрыву S_k не является постоянной величиной. В качестве характеристики, объясняющей независимость абразивной износостойкости металлов и сплавов, твердость которых повышается за счет наклепа, предлагается комплекс М:

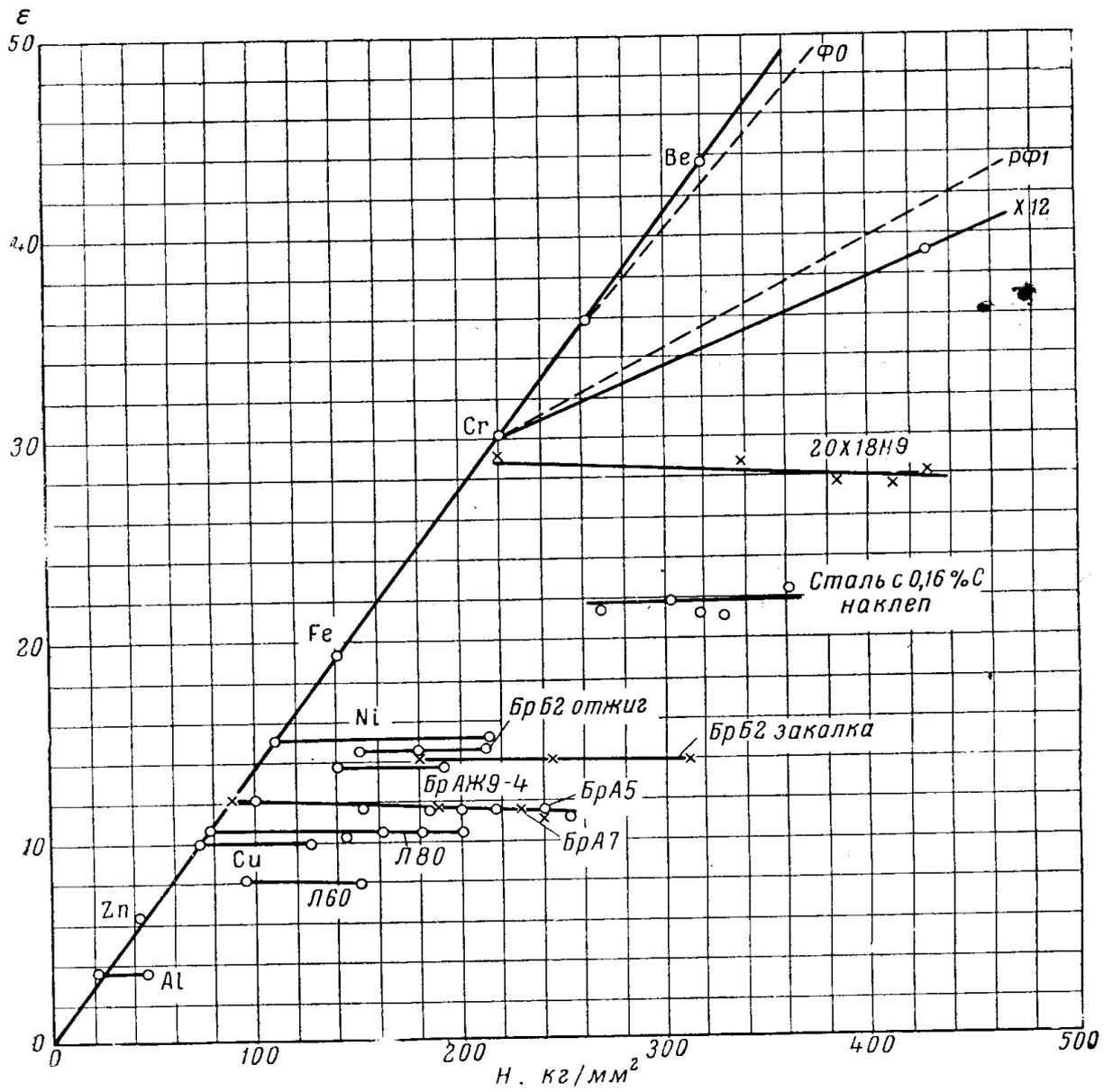


Рис 4.8. Зависимость относительной износостойкости наклепанных металлов от твердости [8].

$$M = HB \frac{S_k}{\sigma_T} \quad (4.1)$$

где HB - твердость по Бринеллю,
 S_k - истинное сопротивление разрыву,
 σ_T - предел текучести.

В исследованиях Савицкого К.В.[81] были получены несколько отличные данные: износ наклепанных образцов алюминия и меди немного понизился.

Влияние наклепа на износостойкость отожженной осевой стали, подвергнутой разной степени деформирования путем холодной прокатки, исследованное Кащеевым В.Н. [82], выявило незначительное повышение износа наклепанных образцов.

Полученное соотношение (2.15), как показали эксперименты, а также обработка данных по абразивной износостойкости, полученных другими исследователями, выполняется для различных металлических материалов: отожженных черных и цветных металлов и сплавов, а также подвергнутых различным видам термической обработки.

Оказалось, что коэффициент деформационного упрочнения можно использовать и для количественной интерпретации закономерностей абразивного разрушения наклепанных металлических материалов.

Исследования [61] показали, что в результате различной степени обжатия при волочении (рис.) коэффициент деформационного упрочнения не изменяется ($\text{tg } \alpha = \text{const} = D$).

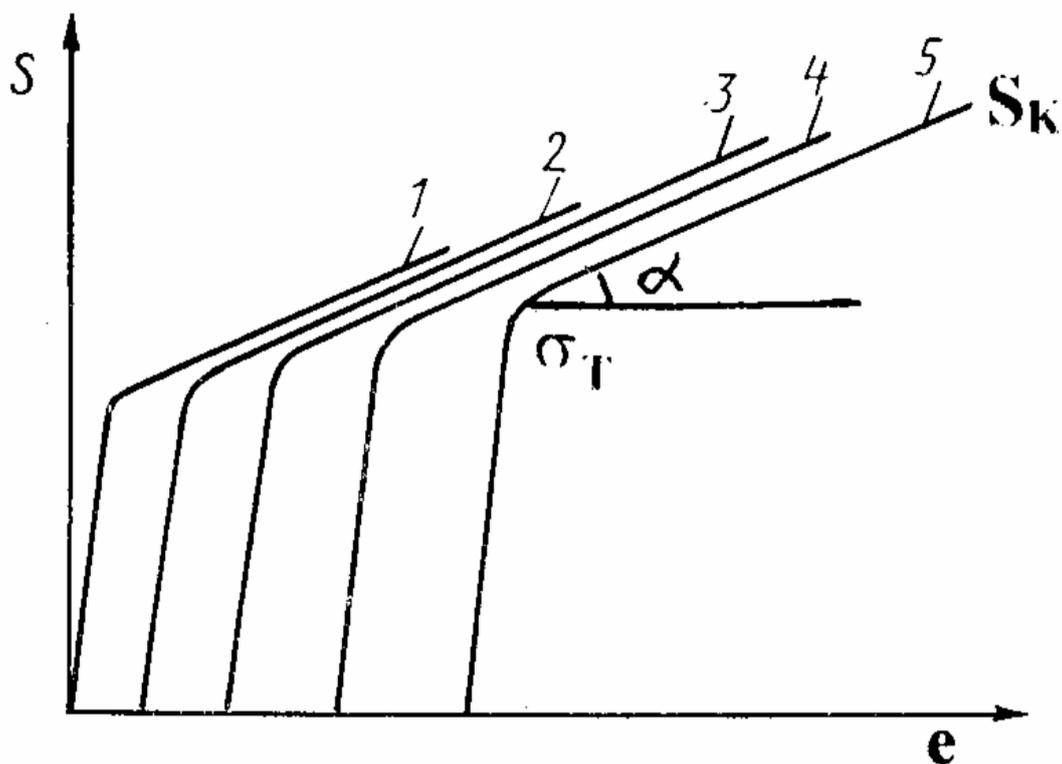


Рис.4.9 Диаграмма растяжения после волочения для различных степеней обжатия: 1 – исходное, 2 – 16 %, 3 – 31 %, 4 – 66 %. [61].

Поскольку относительная абразивная износостойкость ε не зависит от упрочнения при наклепе [8], а коэффициент деформационного упрочнения D остается неизменным при различных степенях деформации [61], то это позволяет сделать предположение о наличии корреляционной связи между этими характеристиками.

Для обоснования сделанного предположения воспользуемся экспериментальными данными [83]. В этой работе исследовалась абразивная износостойкость меди МЗ, алюминия АД1 и стали 38Х, подвергнутых различной степени наклепа и приведены механические свойства исследованных материалов. Это обстоятельство дало возможность проверить справедливость предлагаемого в данной работе критерия для оценки абразивной износостойкости металлических материалов.

Обработка результатов этих исследований методом наименьших квадратов показала, что между абразивной износостойкостью ε и коэффициентом деформационного упрочнения D имеется тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции $r = 0,947$), что является свидетельством наличия прямой пропорциональной зависимости между этими величинами (табл. П.12. приложение).

Обработка экспериментальных данных по стали 110Г13Л, подвергнутой объемной закалке, высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО), механическому наклепу объемно-закаленных образцов и образцов после ВТМО в условиях скольжения о закрепленные абразивные частицы ($r = 0,937$) и при ударно-абразивном изнашивании ($r = 0,976$) также показала высокую степень корреляции между ε и D [84]. (табл. П.13. приложение)

Таким образом, неизменность абразивной износостойкости металлов и сплавов, твердость которых повышена за счет наклепа, можно объяснить постоянством коэффициента деформационного упрочнения при различных степенях пластического деформирования.

Экспериментами Хрущова М. М. выявлено три разные зависимости ε - НВ: для материалов отожженных, для термически обработанных сплавов и для материалов наклепанных.

Следует особо подчеркнуть связь коэффициента деформационного упрочнения D с относительной абразивной износостойкостью ε не только при наклепе, но и при различных видах термообработки, и в отожженном состоянии. Следовательно, для функции $\varepsilon = f(D)$ экспериментальные точки, соответствующие наклепанному и не наклепанному состоянию материала, укладываются на единую прямую в отличие от зависимости ε – НВ, которая укладывается на три разные прямые.

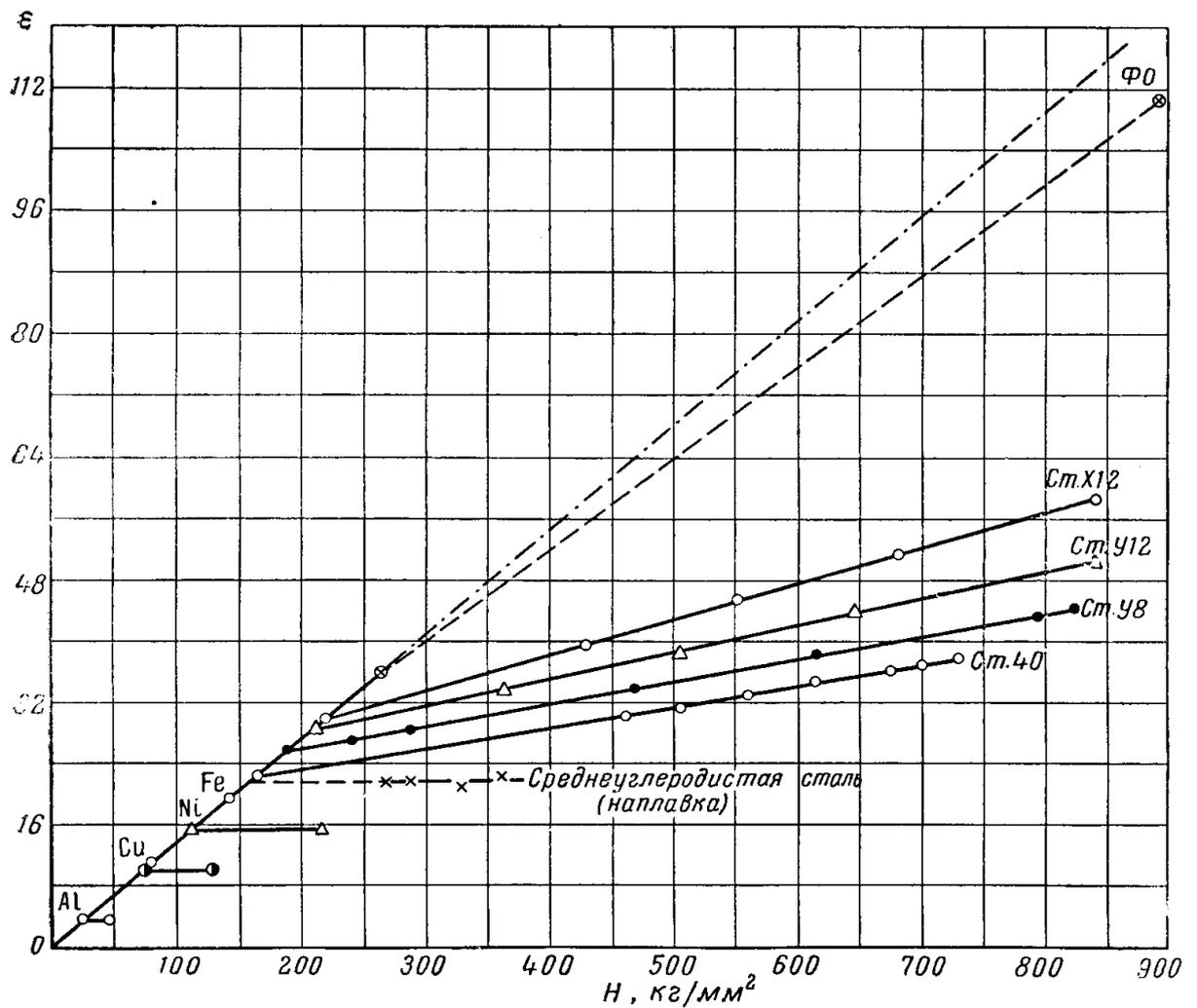


Рис 4.10. Относительная износостойкость ϵ при абразивном изнашивании и твердости H отожженных технически чистых металлов и сталей, термически обработанных сталей и наклепанных материалов.

В заключение следует отметить, что обработка с рассматриваемых позиций экспериментальных данных, полученных другими исследователями, показала, что относительная износостойкость прямо пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения для различных металлических материалов: наклепанных и не наклепанных отожженных черных и цветных металлов и сплавов, а также сплавов, подвергнутых различным видам термообработки.

Следовательно, возможность оценки относительной абразивной износостойкости коэффициентом деформационного упрочнения, обоснованная в настоящей работе теоретическими экспериментальными исследованиями, подтверждается экспериментальными данными других авторов, что является свидетельством справедливости сделанных предположений.

ГЛАВА 5. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ВНЕДРЕНИЕ

Применение научно-обоснованных формул, связывающих относительную абразивную износостойкость со стандартными характеристиками механических свойств. Определяемым по диаграммам статического деформирования, является одним из важных средств рационализации и ускорения определения относительной износостойкости при абразивном изнашивании.

Попытки найти однозначную связь между абразивной износостойкостью и статическими характеристиками, определяемым по условным диаграммам деформирования, существенных результатов не дали. Предложено множество эмпирических характеристик, но каждая из них имеет ограниченное применение и, кроме того, не является следствием какого-либо научно-обоснованного физического или аналитического метода. В результате, многочисленные опытные данные, полученные различными авторами, обычно не соответствуют друг другу. Существующие эмпирические формулы, как правило, представляют собой набор разнородных показателей материала с коэффициентами. Поэтому расхождение расчетов с экспериментальными данными довольно значительны.

Более обоснованной является корреляция между относительной абразивной износостойкостью и параметрами истинных диаграмм разрушения, которые более правильно характеризуют закономерности разрушения металлических материалов.

В данной работе рекомендован метод определения относительной абразивной износостойкости по истинным характеристикам прочности, которые легко определяются по стандартным механическим

характеристикам, определяемым при испытании на растяжение. Предложенные расчетные зависимости получены теоретически, исходя из энергетических представлений о процессе разрушения поверхностных слоев материала при трении, проверены и обоснованы экспериментально. Эти зависимости основаны на использовании истинных, а не условных характеристик статической прочности материала.

Предлагаемая методика может быть использована на стадии проектирования узлов трения машин или в тех практических случаях когда испытания на износостойкость по тем или иным причинам не могут быть проведены.

5.1. Разработка рекомендации и методики оценки относительной износостойкости при абразивном изнашивании коэффициентом деформационного упрочнения

1. Общие положения.

1.1. Рекомендации устанавливают метод прогнозирования относительной абразивной износостойкости металлических материалов по характеристикам их статической прочности.

1.2. Рекомендации следует применять при определении относительной износостойкости в условиях:

- изнашивания о закрепленные абразивные частицы;
- ударно-абразивного изнашивания;
- изнашивания в потоке абразивных частиц;
- изнашивания о незакрепленные (свободные) абразивные частицы

1.3. Рекомендации можно использовать для определения относительной абразивной износостойкости черных и цветных сплавов:

- в отожженном состоянии;
- термически упрочненных;
- наклепанных

1.4. Данный метод позволяет значительно сократить время определения износостойкости металлических материалов, заменить трудоемкие и дорогостоящие испытания на изнашивание расчетом на базе стандартных механических характеристик изнашиваемых материалов, взятых по справочникам, либо на основе статических испытаний на растяжение.

2. Форма, размеры и изготовление образцов

2.1. Форма, размеры и требования к технологическим процессам изготовления образцов по стандарту на статические испытания на растяжение (ГОСТ 1497-61).

2.2. Рекомендуется использовать цилиндрические образцы (с целью получения более точных значений коэффициента относительного сужения ψ_K , входящего в расчетные формулы.

3. Испытательное оборудование

3.1. Для определения характеристик статической прочности рекомендуется использовать испытательные машины, создающие растягивающее усилие (ГОСТ 7855-68)

3.2. Определение разрушающей нагрузки P_K в процессе испытаний на растяжение рекомендуется выполнять с использованием датчиков сопротивления, регистрируя их показания с помощью тензоусилителей (8АНЧ-7М, ТУ-6М и др.)в сочетании с шлейфовым осциллографом.

4. Методика оценки относительной абразивной износостойкости

4.1. Оценка относительной абразивной износостойкости металлических материалов по результатам статических испытаний на растяжение основана на:

- энергетическом подходе к процессам поверхностного разрушения материалов в процессе абразивного изнашивания;
- установленной связи между относительной абразивной износостойкостью и коэффициентом деформационного упрочнения, который определяется по стандартным механическим характеристикам металлов и сплавов на растяжении.

4.2. Выполняется испытание на статическое растяжение до разрушения 3х-4х образцов из партии данного материала. Для каждого из образцов измеряется:

- нагрузка в процессе текучести P_T, H ;
- максимальная нагрузка, которую выдерживает образец P_B, H ;
- нагрузка, соответствующая моменту разрушения образца P_K, H .

4.3. В случае, если испытательная машина не приспособлена для надежного и точного замера разрушающей нагрузки P_K , то эта нагрузка определяется по осциллограмме. Одновременно на осциллограмме регистрируется и максимальная нагрузка P_B и нагрузка в процессе текучести.

4.4. После разрушения образцов определяются диаметры образцов в месте разрыва (d_K) и диаметр (d_B), соответствующий моменту достижения нагрузкой максимума. Диаметр d_B рекомендуется определять после разрушения примерно в середине между местом разрыва и концом расчетной длины образца.

4.5. Расчетом для каждого образца в отдельности определяются следующие характеристики :

- площади поперечных сечений

$$F_K = \frac{\Pi d_K^2}{4}; \quad F_B = \frac{\Pi d_B^2}{4}; \quad F_o = \frac{\Pi d_o^2}{4};$$

d_o - диаметр рабочей длины образца до испытания

- предел прочности

$$\delta_B = \frac{P_B}{F_o};$$

- истинное сопротивление разрыву $S_K = \frac{P_K}{F_R};$

- поперечное сужение к моменту разрушения образца

$$\psi_K = \frac{F_o - F_K}{F_o};$$

- равномерное сужение $\psi_B = \frac{F_o - F_B}{F_o};$

- предел текучести $\delta_T = \frac{P_T}{F_o};$

- истинное удлинение $l = l_n \frac{\psi_K}{1 - \psi_K}$

В случае, если точное определение истинного сопротивления разрыву S_K связано с методическими трудностями или при использовании для расчета справочных данных по стандартным механическим характеристикам (δ_B - предел прочности, δ_T - предел текучести, ψ_K - относительное сужение) истинное сопротивление разрыву S_K рекомендуется определять по зависимостям, предложенным Марковцом М.П.[68]

- для материалов с равномерным поперечным сужением $\psi_B < 0,15$

$$S_K = \delta_B (1 + 1,35\psi_K)$$

- для материалов с $\psi_B > 0,15$

$$S_K = \delta_B (0,8 + 2,06\psi_K)$$

4.7. Расчетом для каждого образца в отдельности, выбранных для оценки относительной износостойкости марок материалов определяется коэффициент деформационного упрочнения D

$$D = \frac{S_k - \delta_T}{e}$$

4.8. Расчетом по коэффициенту деформационного упрочнения оценивается относительная абразивная износостойкость

$$\frac{D}{D_э} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_э}$$

где $D_э$ – коэффициент деформационного упрочнения эталона.

В качестве эталона выбирается материал, имеющий самый низкий показатель коэффициента деформационного упрочнения.

$\varepsilon_э = 1$ – износостойкость материала, принятого за эталон.

5.2. Перспективы использования результатов исследования и их внедрение

Применение научно-обоснованных формул приведенных в предыдущем разделе данной работы, связывающих относительную абразивную износостойкость со стандартными характеристиками механических свойств, определяемым по диаграммам статического деформирования, является одним из важных средств рационализации и ускорения определения относительной износостойкости при абразивном изнашивании.

Предложены расчетные зависимости полученные теоретически, исходя из энергетических представлений о процессе разрушения поверхностных слоев материала при трении, которые проверены и обоснованы экспериментально. Эти зависимости основаны на использовании истинных, а не условных характеристик статической прочности материала.

На основе анализа результатов исследования разработана методика определения относительной абразивной износостойкости по истинным характеристикам прочности, которые легко определяются по стандартным механическим характеристикам, получаемым при испытании на растяжение. Она может быть эффективно использована на стадии проектирования узлов трения машин или в тех практических случаях, когда проведение испытания на износостойкость по тем или иным причинам не представляется возможным и трудным.

Эта методика позволяет оценить относительную абразивную износостойкость в отожженных, термически упрочненных, наклепанных металлических материалов по характеристикам их статической прочности в условиях:

- изнашивания о закрепленные абразивные частицы;
- ударно-абразивного изнашивания;
- изнашивания в потоке абразивных частиц;
- изнашивания о незакрепленные (свободные) абразивные частицы.

Применение данной методики позволяет значительно сократить время определения износостойкости материалов, заменить трудоемкие и дорогостоящие испытания на износостойкость.

Разработанная по результатам исследований в разделе 5.1 данной работы, методика, используется в производственных условиях Андиганского машиностроительного завода в качестве руководящего документа, и в учебном процессе Андиганского Государственного Университета в качестве

методического указания для практических занятий по дисциплине «Материаловедение».

Отдельные теоретические положения данной диссертационной работы включены в рабочую программу «Основы конструкционных материалов» и «Основы износостойкости» в качестве лекционных материалов в Ташкентском институте железнодорожного транспорта имени Акмаля Икрамова и в Ташкентском Государственном Университете имени Абу Райхана Беруний.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [57, 65, 93-98], из которых вытекают основные выводы сделанные по данной работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Рассматривая процесс разрушения конструкционных материалов с энергетических позиций, выведено аналитическое выражение для оценки поверхностной прочности при фрикционном взаимодействии.

2. Предложен критерий для оценки относительной абразивной износостойкости – коэффициент деформационного упрочнения, величина которого определяется по стандартным механическим характеристикам металлических материалов: пределу прочности, пределу текучести, относительному сужению.

3. Разработана методика экспериментальных исследований закономерностей абразивного изнашивания в зависимости от коэффициента деформационного упрочнения, которая позволила провести экспериментальные исследования по определению закономерностей абразивного изнашивания углеродистых и легированных сталей, а также титанового сплава в различных структурных состояниях.

4. Установлена прямая пропорциональная зависимость между относительной износостойкостью исследованных металлических сплавов при абразивном изнашивании и их коэффициентом деформационного упрочнения.

5. Сопоставлением расчетных данных с результатами экспериментальных исследований абразивной износостойкости о закрепленные абразивные частицы, при ударно-абразивном изнашивании, в потоке абразивных частиц и взаимном шлифовании, показано удовлетворительное совпадение.

6. Показано, что с помощью предлагаемого критерия можно объяснить неизменность абразивной износостойкости металлов и сплавов, твердость которых была повышена в результате наклепа.

7. Разработаны методика и рекомендации по прогнозированию относительной абразивной износостойкости металлических материалов, которые нашли практическое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Щедров С.В., Развитие науки о трении. М.: Изд-во АН СССР, 1956, 235 с.
2. Дерягин Б.В. Молекулярная теория трения скольжения Ж.Ф.Х. 1934, т 5, вып. 9.
3. Дерягин Б.В. Что такое трение? М.: Изд-во АН СССР, 1963, 230с.
4. Крагельский И.В. Молекулярно-механическая теория трения // Трение и износ в машинах. М.: Изд-во АН СССР, 1949, т.3., с 178-183
5. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968, 480с.
6. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка . М.:Машгиз, 1960, 151с.
7. Епифанов Г.Н. Трение как сопротивление сдвигу тонких поверхностей слоев твердых тел. // ДАН СССР, 1957, № 4, с 114.
8. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.:Изд-во АН СССР. 1960. 350 с.
9. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев., «Техника». 1970, 394с.
- 10.Ребиндер П.А., Физико-химическая механика – новая область науки. М.:Знание, 1958, 64 с.
- 11.Ребиндер П.А., Епифанов Г.И. Влияние поверхностно- активной среды на граничное трение и износ // Развитие теории трения и изнашивания, М.: Изд-во АН СССР, 1957, с 47-58.
- 12.Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М.: Машиностроение, 1966, 332 с.
- 13.Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Томск .: Полиграфиздат, 1941-1947, т.2-4.

14. Костецкий Б.И. Структурно-энергетические условия поверхностной прочности при трении // Доклады АН УССР, серия А, 1977, №2, с. 136-140.
15. Костецкий Б.И. Энергетический анализ процессов изнашивания деталей машин // Доклады АН УССР, серия А., 1974, №4, с. 108-113.
16. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент, ФАН, 1979, 186с.
17. Махкамов К.Х. Прогнозирование износа узлов трения машин на стадии проектирования. Дисс. д.т.н. Ташкент, 1994, 252с.
18. Хачатурьян С.В. Исследование энергетического баланса процесса изнашивания металлов о закрепленные абразивные частицы при внешнем трении. Дис. канд. техн. наук – М., 1977, 216с.
19. Флайшер Г.К. К вопросу о количественном определении трения и износа // в кн.: Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин. М.: Наука, 1982, с 285-296.
20. Погодаев Л.И., Шевченко П.А. Гидроабразивный износ судового оборудования. Л. : Судостроение, 1984., 264с.
21. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. Саратов. : Изд-во Саратовского университета, 1979, 152с.
22. Попов В.С., Брыков Н.Н., Дмитриченко Н.С., Приступа П.Г. Долговечность оборудования огнеупорного производства. М.: Металлургия, 1978, 232с.
23. Львов П.Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. — М.: Машгиз, 1962, 89с.
24. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987, 288с.
25. Зайцев А.К. Основы учения о трении износе и смазке машин.— М.:Л.: Машгиз, 1947, 256с.

26. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1971, 166с.
27. Савицкий К.В. Природа пластической деформации поверхностей трения // В кн. : «Повышение износостойкости и срока службы машин», м.: Машгиз, 1956, с 49.
28. Савицкий К.В. К вопросу о зависимости абразивного изнашивания металлов от прочностных свойств решетки // Труды III Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. М.: Изд-во АН СССР., т.3, 1960, с. 230-235.
29. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. М.: Наука, 1970, 247с.
30. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Пашков А.Н., Рубарх В.М. Долговечность буровых долот. М.: Недра, 1977, 256 с.
31. Сорокин Г.М., Сафонов Б.П. Влияние механических характеристик сталей на их сопротивление абразивному изнашиванию. // Трение и износ, 1984, т. V, №5, с. 797-805.
32. Лаврентьев А.И. О связи абразивной износостойкости материалов с их физико-механическими свойствами. // Трение и износ. Т. I, № 5, 1980, с.878-884.
33. Костецкий Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. М. : Машгиз 1950, 168 с.
34. Попов В.С., Брыков И.Н., Дмитриченко Н.С. Износостойкость прессформ огнеупорного производства. М.: Металлургия, 1971, 157с.
35. Мухамедов Т.А. Разработка технологии упрочнения и повышение износостойкости тонкостенных дисковых пил хлопковых машин. Автореферат канд. дис. Ташкент, 1989.
36. Любарский И.М., Белов В.А. Обзорные доклады по теме «Роль структуры поверхностных слоев в процессе трения твердых тел». Минск.: Наука и техника, 1969, 68с.

37. Бессонов Н.А. Соотношение между работой шлифования, теплотой и поверхностной энергией при истирании кристаллов каменной соли по различным граням. Дис. канд. техн. наук, Сталинск, 1941.
38. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин. М.-Киев, Машгиз, 1963, 138 с.
39. Костецкий Б.И. Линник Ю.И. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов. //Машиноведение, № 5, 1968, с. 82-95.
40. Костецкий Б.И. Лашко В.А. Караулов А.К. Костецкая Н.Б. Рожковский В.Ф. Энергетический анализ процессов изнашивания деталей машин. //Машиноведение, №4, 1974, с.108-114.
41. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания.-М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
42. Beckmann G. A theory of abrasive wear based on shear effects in metal surfaces. *Wear* 59,(1980), 421-432.
43. Bryggman U., Hogmark S., Vingsbo O. Force and energy measurements during controlled grooving – basic study of abrasive wear. //ASLE Transactions v.24,4,(449-458).
44. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металлов. М.: ОНТИ. 1936, 395 с.
45. Крагельский И.В., Швецова Е.М. Влияние скорости скольжения на износ одноименных металлов. //Трение и износ в машинах. Сборник. X, М.: Изд. АН СССР, 1955, с.5-34.
46. Коттрелл А.К. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958, 267 с.
47. Бевер М.Б. О термодинамике и кинетике возврата. В кн. : «Ползучесть и возврат» М.: Изд. Черной и цветной металлургии. 1961, с. 21-61.
48. Титченер Э.Л., Бевер М.Б. Скрытая энергия при наклепе. -В кн.: «Успехи физики металлов», М.: Изд. АН СССР, 1957, С. 290-395.

49. Большанина М.А., Панин В.Е. Скрытая энергия деформаций .В кн.:« Исследования по физике твердого тела». М.: Изд. АН СССР, 1957, с.193-233.
50. Епифанов Г.И., Ребиндер П.А. Об энергетическом балансе процесса резания металлов. // ДАН АН СССР, новая серия, т.66, № 4, 1949, с. 653-657.
51. Дегтярев М.М. Журнал технической физики . Т.20, вып. 4, 1950, с.440.
52. Студенюк Ю.А. Влияние скорости предварительной деформации на поглощение энергии при сжатии меди. Ж.Т.Ф. Т. 20, вып.4, 1950, с.
53. Панин В.Е. Физика металлов и металловедение. Т.3, вып. 1, 1956, с.172.
54. Клебро Л.М. и др. Изменение внутренней энергии при возврате и рекристаллизации. М.: Металлургия, 1966, 176 с.
55. Bever M. B., Holt D. L., Titchener A. L. The stored energy of cold work // Progress in material science. 1973. vol. 17, p.1-187.
56. Худокормов Д.Н., Гецевич Э.Т. Поглощение энергии известными металлами при абразивном изнашивании.- В кн. : Прогрессивная технология машиностроения. М.: Высшая школа, вып. 5 1974, с.16-19.
57. Негматов С.С., Тураев М., Хачатурьян С.В. Влияние процессов упрочнения и разупрочнения на характер разрушения поверхностных слоев при фрикционном взаимодействии. Материалы международной конференции «Проблемы механики и сейсмодинамики сооружений», Ташкент, 2004, с. 344-347.
58. Крагельский И.В., Любарский И.М., Гусяков А.А. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение. 1973, 216 с.
59. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев.: Техника. 1970, 394 с.
60. Любарский И. М., Белов В.А. Обзорные доклады по теме: «Роль структуры поверхностных слоев в процессе трения твердых тел.»

- 61.Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. - М.:Машиностроение.- 1974. Ч. 1., 2.
- 62.Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.:Машиностроение.- 1975,400 с.
- 63.Nowich A.S.,Machlin E.S. J.Appl. Phys.,18, 1947, p. 79
- 64.Orowan E. J. West. Scot. Iron and steel Inst. 54, 1947,p. 45.
- 65.Хачатурьян С.В., Тураев М.У., Негматов С.С. Связь поверхностной прочности конструкционных материалов с коэффициентом деформационного упрочнения. // Научно- технический журнал ФерПИ. №1, 2005, с. 33-37.
- 66.Willman H. Abrasion and surface structure.//Wear. V.14, N. 5, 1969.
- 67.Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Машиностроение, 1967. 401 с.
- 68.Марковец М.П. Диаграмма истинных напряжений и расчет на прочность. М.: Оборонгиз,1947. 139 с.
- 69.Машины для испытания на трение и износ. Обзор. ЦНИИТЭИ Приборостроения. М. 1974, 56 с.
- 70.ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение
- 71.ГОСТ 7855-74.Машины разрывные и универсальные для испытания металлов.
- 72.Жарков В.Я. Влияние высокотемпературной термомеханической обработки на абразивную износостойкость и другие физико - механические свойства конструкционных сталей. : Дис....канд. техн. наук. М . 1968.
- 73.Доценко В.А. Исследование влияния физико-механических свойств металлов на на их износостойкость при скольжении.: Дис....канд. техн. наук. М.: МИНХ и ГП. 1974.

74. Мухаммедов А.А. Влияние фазовой перекристаллизации при термической обработке на износостойкость стали. // Известия ВУЗов «Черная металлургия». №6, 1978, с.110-113.
75. Мухаммедов А.А., Шамаксудов С.М. Влияние параметров структуры термически обработанной стали на абразивную износостойкость. // Известия ВУЗов. «Черная металлургия» .№6, 1979, с.115-118.
76. Кащеев В.Н. Разрушение стали в потоке абразивных частиц. // Труды СФТИ 1958 . Вып 36. С.43-47.
77. Кащеев В.Н., Солод А.Н. Механические характеристики и абразивное разрушение стали У8А взаимным шлифованием. // Трение и износ, т. VI, №1, 1985, с. 138-144.
78. Гуляев А.Б. Исследование изнашивания стали впри ударе в гидроабразивных средах. : Дис...канд. техн. наук. М МИНХ и ГП. 1978.
79. Сорокин Г.М. Влияние механических свойств стали на износостойкость при ударе. // МИТОМ. № 5, 1975, с.64-66.
80. Tonn W. Verschleib von Eisenlegierungen auf Schmiergelpapier und ihre Harte. Archiv fur Eisenhüttenwesen, 8. Jahrgang, 1934/35, №10, S. 467.
81. Савицкий К.В. Влияние наклепа на износ металлов. // Труды СФТИ, вып. 24, 1947.
82. Кащеев В.Н. Износ стали при трении о личной напильник и твердость по методу царапания в зависимости от наклепа. // Труды СФТИ, вып. 26, 1948.
83. Лаврентьев А.И. К вопросу о независимости абразивного изнашивания от наклепа. // Трение и износ. Т. VII, № 4, с.654-660.
84. Насиров С.М. Влияние структуры и свойств стали 110Г13Л на ее износостойкость при ударе и скольжении по абразиву: Дис...канд. техн. наук. М МИНХ и ГП. 1973.

85. Айвазян С.А. Статистические исследования зависимостей .М.:
Металлургия, 1968, 227 с.
86. Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических
испытаний. М.: Машиностроение, 1972, 232 с.
87. Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г.И.
Погодина- Алексеева. Том 2. Цветные металлы и сплавы. М.: Машгиз.
1952.
88. Смирягин А.П. и др. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.:
Металлургия., 1974.
89. Энциклопедический справочник машиностроения. М.: Машгиз, Т. 3,
1947, 845 с.
90. Справочник по машиностроительным материалам Том 1, Сталь. М.:
Машгиз, 1959.
91. Бобылев А.В. Механические и технологические свойства металлов.
Справочник. М.: Metallurgy, 1980, 296 с.
92. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных
материалов (справочное пособие). Под ред. Туманова А.Т. М. :
Машиностроение, 1974. Т. II.
93. Негматов С.С., Иргашев А., Хачатурьян С.В., Тураев М.У. Повышение
износостойкости зубчатых передач агрегатов машин легированием
смазочных материалов. //Композиционные материалы. Узбекский
научно-технический и производственный журнал. 2004, №1, с.25-27
94. Негматов. С. С. Иргашев. А. Тураев. М. У. Прогнозирование периода
испытания на изнашиваемость материалов зубчатых колес.//
Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и
производственный журнал. 2004, № 2. с.37-39.
95. Набиев Э.С., Тураев М.У., Сеитов У.Б., Негматов С.С., Низамходжаев
Ж.Ф. Структура и свойства многослойного металлокомпозита при
восстановлении изношенной поверхности вагонных колес.//

- Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. 2004, № 2, с. 27-29.
96. Хачатурьян С.В., Негматов С.С., Тураев М.У. Коэффициент деформационного упрочнения — критерий оценки относительной абразивной износостойкости металлов и сплавов. // Композиционные материалы. Узбекский научно-технический и производственный журнал. 2004, № 3, с. 36-38.
97. Негматов. С. С. Иргашев. А. Тураев. М. У. Расчет износостойкости в условиях упруго-пластической деформации материалов. // Научно-технический журнал. ФерПИ. 2004. №2. с.51-54.
98. Хачатурьян С.В., Негматов С.С., Тураев М.У. Оценка абразивной износостойкости наклепанных металлических материалов коэффициентом деформационного упрочнения. // Международная конференция по проблемам развития наземной транспортной системы, Ташкент, 2004, с.407-409.

ПРИЛОЖЕНИЯ