

# К ВОПРОСУ ОБ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТАЛЛУРГИИ

А.П. СЕРГИЕВ<sup>1</sup>, А.В. МАКАРОВ<sup>1</sup>, А.А. ВЛАДИМИРОВ<sup>1</sup>✉, Н.В. БЕЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический институт «МИСиС», Старый Оскол, Белгородская область, Россия

Рассмотрены разновидности износа, взаимодействие трущихся материалов при отсутствии и наличии промежуточных сред. Дан анализ методов оценки износостойкости, приведены рекомендации по выбору износостойких материалов.

**Ключевые слова:** износ; разновидности механизма разрушения; методы испытаний; износостойкие материалы.

## TOWARDS THE QUESTION OF WEAR-RESISTANCE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT IN MACHINE-BUILDING AND METALLURGY

A.P. SERGIEV<sup>1</sup>, A.V. MAKAROV<sup>1</sup>, A.A. VLADIMIROV<sup>1</sup>✉, N.V. BELOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugárov (branch) NUST «MISIS», Stary Oskol, Belgorod region, Russia

Wear varieties, interaction of rubbing materials in the absence and presence of intermediate media are considered. The analysis of methods for assessing wear resistance is given, recommendations for the selection of wear-resistant materials are given.

**Keywords:** wear; varieties of the mechanism of destruction; test methods; wear-resistant materials.

Цитирование: Сергиев А.П. и др. К вопросу об износостойкости технологического оборудования в машиностроении и металлургии. Russian Scientist. 2018. т.2 №1: 13-22

Citing: Sergiev A.P. et al. Towards the question of wear-resistance of technological equipment in machine building and metallurgy. Russian Scientist. 2018.v.2 №1: 13-22

✉ [aleksandr vodila@yandex.ru](mailto:aleksandr vodila@yandex.ru)

Материал прошёл двойное слепое рецензирование.

The manuscript took a double-blind peer review.

Под износом понимают постепенное отделение материала с поверхности твёрдого тела при механическом взаимодействии двух тел в зонах соприкосновения. Износ характеризуют либо объёмом металла, отделившегося от поверхности в процессе износа, либо изменением линейных размеров. Изменение линейных размеров в направлении, перпендикулярном к изнашивающейся поверхности, отнесённое к единице времени, называется скоростью износа. Согласно ГОСТ 27674-88, износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию, оцениваемое величиной обратной скорости изнашивания [1].

Среди видов износа различают износ скольжения и износ качения, каждый при жидком, газообразном или твёрдом промежуточном веществе. При воздействии часто повторяющихся ударов наблюдается износ от перенаклёпа. Разные виды износа часто протекают одновременно.

Из двенадцати разновидностей изнашивания [1] наибольший интерес для металлургии представляют абразивное и гидроабразивное изнашивания, возникающие при эксплуатации технологического оборудования для дробления и размола железосодержащих руд, являющихся основополагающими в технологии производства железорудных окатышей и брикетов.

Между величиной износа и физико-механическими свойствами, технологическими параметрами, скоростью и траекторией перемещения контактирующих поверхностей не существует явно выраженной зависимости.

На износ, в первую очередь, оказывает влияние твёрдость, вязкость, микроструктура, величина зерна, восприимчивость к наклёпу.

Бесспорных, экспериментально подтверждённых данных о факторах, определяющих устойчивость материала при работе в условиях истирания, до настоящего времени не существует. Обычно оценка материала производится на основании некоторых его свойств, связанных с устойчивостью против истирания. Такими свойствами, в первую очередь, являются твёрдость и способность материала к наклёпываемости. С этой точки зрения, изучение износа материалов от трения, при наличии абразивных частиц между трущимися поверхностями, и вопросов обрабатываемости и стойкости инструмента при резании, также способствуют пониманию физической природы изнашивания.

При сухом износе оксидная плёнка может оказывать защитное действие, а с другой стороны, оксидные или металлические продукты износа могут служить шлифующим средством, увеличивающим износ. Износ увеличивается, когда в процессе трения взаимодействуют материалы аналогичного состава и

структуры. Кроме того, отмечается, что «два металла тем лучше противостоят износу при взаимном трении, чем больше они отличаются по своей природе», что основывается на долголетнем опыте, который выражается, например, старой немецкой пословицей: *Hart gegen hart nimmer gut ward* (твёрдое против твёрдого никогда не бывает устойчивым), а также латинским выражением: *Durum et durum non faciunt murgum* (из двух твёрдых материалов не построить стены) [2].

Хенкинс Дж., обобщив работы, выполненные до 1929 г., описывает состояние вопросов об истирании металлов следующим образом: «Результаты произведённых до настоящего времени исследований показывают, что нет такого отдельного особого свойства металлов, которое было бы всегда связано с его высоким сопротивлением износу». В заключение О'Нейл замечает: «Как ценно было бы, например, исчерпывающее знание процессов износа металлов при трении и насколько полезным было бы испытание, определяющее стойкость материала против истирания» [3].

Поведение материала при износе под действием различных изнашивающих факторов невозможно выразить одной объединяющей характеристикой, потому что оно зависит от ряда факторов: состояния поверхности трущихся тел; рода, свойств и поведения образующихся продуктов износа; характеристики относительного движения и скорости взаимного перемещения поверхностей; сочетания их физико-механических свойств; наличия промежуточного слоя; уровня температуры и множества других факторов, зависящих от условий эксплуатации изделий.

Можно считать установленным, что износ материала не зависит от любого отдельного его свойства, в том числе, и от твёрдости, определяемой вдавливанием.

Истирание заключается в структурном изменении поверхностного слоя и его разрушении, причём истирание можно рассматривать как постепенное удаление металла из зоны контакта взаимодействующих поверхностей.

Подавляющее большинство исследований за прошедшее столетие относятся к комплексному изучению проблем трибологии: трения, изнашивания и смазки контактирующих поверхностей, состава смазочных веществ, микротвёрдости поверхности. Делались попытки установить связь с показателями физических свойств материалов, с прочностью межатомных связей в решётках, модулем нормальной упругости, теплосодержанием расплавленного металла, энергией активации самодиффузии, взаимодействия с химическими компонентами смазки, а также условий возникновения абразивного износа за счёт накапливающихся твёрдых микрочастиц – продуктов

износа или частиц, проникающих из внешней среды [4, 5].

В работе [6] сделана попытка дать приближённую оценку идеальной прочности  $\sigma_{ид}$  металлов, полученной методом молекулярной динамики, как отношение энергии связи  $E_{св}$  к атомному объёму  $V_{ат}$  и величине критической деформации при разрушении тела  $\varepsilon_{кр}$

$$\sigma_{ид} = \frac{E_{св}}{8V_{ат}\varepsilon_{кр}}, \quad (1)$$

Согласно этим оценкам, износостойкость  $\varepsilon$  возрастает с ростом периодов Периодической системы, указанных в скобках, например Cr (4) – Mo (5) – W (6). Отсюда делается вывод, что износостойкость тугоплавких соединений можно увеличивать, добиваясь соответствующей кристаллической структуры.

К сожалению, ни одного примера получения износостойкого материала, реализующего предположения проведённых исследований, пока получить не удалось, тем более определение параметров, входящих в предложенную зависимость, требует соответствующего метрологического обеспечения.

Проблеме абразивного изнашивания деталей машин посвящено огромное количество исследований без учёта реальных условий их эксплуатации в различных реальных абразивосодержащих средах.

Существующие методы наплавки или замены рабочих органов строительных и дорожных машин, зубьев ковшей экскаваторов и дробилок являются весьма затратными, но не ставят непреодолимых проблем, хотя и требуют плановых ремонтно-восстановительных работ.

Проблема износостойкости оборудования для дробления и ремонта железосодержащих руд, при производстве железорудных окатышей, становится наиболее актуальной, связанной с демонтажом, установкой и наладкой многотонных элементов чаши и конуса, срок службы которых в среднем не превышает 6-ти месяцев.

Возникшие проблемы стимулировали проведение исследований по изучению процессов изнашивания, установления их зависимостей от новых комплексов физико-механических свойств материалов и поиска наиболее эффективных мер повышения межремонтных сроков эксплуатации, включая конструктивные изменения, изменяющие кинематические и динамические параметры дробления и помола.

Кроме скорости взаимного перемещения контактирующих сред, удельной нагрузки и грануляции частиц породы или руды необходимо учитывать пульсирующий или ударный характер изменения

прилагаемой нагрузки, т.е. учитывать влияние динамических факторов.

Крагельский И.В. [7] различает изнашивание при упругом контакте, при пластическом отеснении и при микрорезании, и считает критерием перехода от пластического отеснения к скалыванию отношение глубины внедрения  $h$  к радиусу контактирующего выступа  $R$ . Значение  $\frac{h}{R} \leq 0,3$  соответствует отеснению, при большем значении происходит скалывание. Львов П.Н. [8] дополняет теорию Крагельского И.В. гипотезой, что при царапании происходит «выламывание» хрупких составляющих из пластической основы.

Кощев В.Н. [9] установил, что у некоторых материалов при взаимодействии с потоком абразивных материалов происходит наклёп, образующий в поверхностном слое износостойкие структуры в результате специфических фазовых превращений.

Экспериментально установлено, что чем меньше различаются твёрдость абразивных частиц и металла, тем ниже интенсивность изнашивания. Однако, механический наклёп металлов и сплавов не повышает сопротивление абразивному изнашиванию. Это объясняется тем, что в самом механизме абразивного изнашивания происходит предварительно возможный наклёп, предшествующий разрушению.

Обобщая теоретические и экспериментальные исследования, Тененбаум М.М. [10] пришёл к выводу, что изнашивание происходит путём среза, отрыва, усталостного разрушения при фрикционных контактах в упругой области при многократном передеформировании.

Сорокин Г.М. [11] считает, что в природе абразивного изнашивания и различных видов разрушения лежит единая прочностная основа, создающая предпосылки для изыскания единых путей повышения износостойкости.

Механическими свойствами металла, имеющими большое значение для его характеристики и оценки, как известно, являются прочность, твёрдость, определяемая при вдавливании, вязкость и пластичность, или тягучесть. Обычно сопротивление металла износу не увеличивается прямо пропорционально с увеличением его временного сопротивления или твёрдости, определённой одним из обычно применяемых способов; тем не менее, твёрдость, определяемая как сопротивление внедрению, и пластичность являются факторами, оказывающими существенное влияние на износ металла при всех разновидностях изнашивания.

Высокая твёрдость, определённая при вдавливании, вызывает уменьшение износа металла и показывает этим высокое сопротивление вмятию, нанесению царапин и деформации металла.

Значительная пластичность или тягучесть металла уменьшает его износ, затрудняя отделение от основной массы металла небольших частиц деформируемого поверхностного слоя. При истирании в условиях высокого удельного давления характеристики деформируемого металла имеют существенное значение, так как практически износ происходит по поверхностному слою материала, который наклёпывается под действием усилия давления. Относительное значение твёрдости, определённой вдавливанием, и пластичности при износе материала от трения изменяется вместе с условиями, при которых происходит трение. Химический состав и термическая обработка металла, конечно, также имеют большое значение, потому что они являются главными факторами, определяющими физические и механические свойства материала. Однако влияние этих факторов на износ обуславливается целым рядом других условий. Макроструктура, микроструктура, размер зерна, степень чистоты и качество обработки поверхности – все это, по-видимому, также оказывает то или иное влияние на сопротивление износу.

При изучении зависимости истирания металлов от различных факторов следует учитывать влияние температуры, так как при истирании почти всегда наблюдается местный нагрев материала.

При движении двух металлов в условиях взаимного трения незначительные неровности на поверхностях соприкосновения вызывают пластическую деформацию наружных слоёв металла. Такая деформация подтверждается результатами исследований микроструктуры поперечного сечения изношенных поверхностей, и она характеризуется увеличением числовых значений твёрдости, которая получается на этих поверхностях. Известно, что начальная твёрдость рельсов из аустенитной марганцовистой стали не превышает 250 по Виккерсу, увеличиваясь после их эксплуатации до значений более 500 HV.

Ткачёв В.Н. [12] отмечает, что при взаимодействии абразивных частиц с металлом на его поверхности развивается пластическая деформация, поэтому можно предположить, что износостойкость металла связана с его сопротивлением пластической деформации. Многие исследователи пытались установить зависимость между износостойкостью и твёрдостью металла. Однако длительное время из-за несовершенства методики испытаний установить чёткую зависимость между износостойкостью и твёрдостью не удавалось. Некоторые исследователи даже пришли к выводу, что подобная зависимость отсутствует.

Экспериментально установлено, что высокое сопротивление истиранию получается у материала, обладающего высокой способностью к наклёпываемости. Эта зависимость была доказана

экспериментально Гадфильдом Р. [13] для аустенитной марганцовистой стали, которая, как хорошо известно, считается наиболее пригодным материалом для рабочих деталей камнедробилок, рельсовых крестовин и аналогичных конструкций.

При оценке стойкости металла против истирания необходимо учитывать его твёрдость, определяемую вдавливанием, и его способность к наклёпываемости по параметрам Майера  $a$  и  $n$ . Без совместного учёта обоих этих свойств металла нельзя объяснить быстрого разрушения при трении некоторых сплавов, кажущихся стойкими против истирания. Разрушение таких сплавов происходит за счёт перенаклёпа поверхности при высоких рабочих усилиях, требующихся для раздробления или разлома некоторых материалов.

Мэртен В.Дж. [14] установил, что в условиях трения при отсутствии высокого удельного давления и ударов цементированная сталь имеет преимущество перед аустенитной марганцовистой сталью.

Доказательства того, что стойкость материала против истирания не однозначно зависит от его твёрдости по Бринеллю, встречаются довольно часто, и в этом нет ничего удивительного, так как сам метод испытания далёк от совершенства.

Относительно износа сталей при трении, как в паре металл + металл, так и в паре металл + абразивный металл, имеются многочисленные доказательства того, что трооститовые и сорбитовые структуры являются наиболее износоустойчивыми. Это утверждение, видимо, справедливо при отсутствии возникновения микрорезания при абразивном износе.

Помимо многочисленных испытаний на истирание в различных условиях, не давших существенных результатов для суждения о стойкости металлов против истирания, необходимо отметить весьма ценную работу Финка М., установившего, что окисление поверхности металла при трении имеет первостепенное значение для его стойкости против истирания. При испытании стали на приборе для определения износа при трении качения с 1 % скольжения в атмосфере воздуха была получена потеря массы 0,18 г на единицу поверхности после 50000 оборотов. При повторных испытаниях в камере, наполненной азотом, т.е. в отсутствие кислорода, потери массы образца вообще не наблюдалось. В последнем случае на шлифованных поверхностях получалась высококачественная полировка, и коэффициент трения падал на одну треть его числового значения при испытании на воздухе [15].

Теория окисления при трении Финка предполагает, что при взаимном трении двух металлов незначительные шероховатости на трущихся поверхностях вызывают пластическую деформацию в наружном слое этих металлов. В результате этого явления образуются плёнки измельчённого материала,

которые имеют очень высокую степень химической активности и легко окисляются в атмосфере кислорода. Окисление может проникать на значительную глубину металла, вызывать дальнейшее измельчение его на поверхности и, в конечном счёте, приводить к отслаиванию наружных слоев.

При абразивном изнашивании с возможностью возникновения микрорезания доминирующими параметрами, вероятнее всего, будут способности материала к упрочняемости и высокие прочностные характеристики.

Испытание на износ целесообразно вести одновременно в эксплуатационных условиях и в лабораторных (на модели). Исследования в эксплуатационных условиях дают надёжные практические результаты. Для проведения лабораторных испытаний существуют машины многих типов, на которых производится сравнение износа материалов в определённых постоянных условиях.

Основным требованием при конструкции машин для испытания на износ обычно является возможность воспроизводства и ускорения практических условий износа, служащих предметом изучения. Даже в том случае, если результаты испытания будут выражены в единицах удельного износа (потеря массы на количество энергии, затраченной на часовое испытание), они всегда должны быть отнесены к точным условиям испытания.

Анализ имеющихся исследований о природе износа и факторов, влияющих на характер разрушения, позволяет сформулировать наиболее важные рекомендации.

При выборе материала для специфических изнашивающих нагрузок можно руководствоваться следующим:

1. При сухом трении скольжения сопряжение двух однотипных материалов часто приводит к заеданию, потому существенную пользу оказывают повышение твёрдости одной из сопряженных частей (цементация, автогенная закалка, наклёп, отбеленное литьё и т.д.); сопряжение чугуна и цементированной и закаленной стали, сталей различного химического состава, плакированных или фосфатированных сталей. Если в зоне помолы возникает давление, достаточное для возникновения наклёпа, то весьма пригодной оказывается марганцовистая износостойкая сталь.
2. При сухом трении качения возникает разрушение в виде выкрашивания. Повышение твёрдости обеих сопрягаемых частей (цементация, цианирование, автогенная, высокочастотная плазменная и лазерная закалка, обычная закалка) повышают прочность при качении.

3. При абразивном износе зернистые промежуточные вещества часто внедряются в более мягкую часть изнашивающейся пары и в результате может усиливаться износ более твёрдой части.

Накопленный опыт эксплуатации оборудования и разработанные рекомендации по выбору материалов трущихся пар не вскрыл всего многообразия и специфики физических явлений, происходящих при абразивном износе и установлении взаимосвязи износостойкости с комплексом механических свойств конструкционных материалов.

Интерес к связи предела выносливости с физико-механическими свойствами материалов до настоящего времени остается актуальным.

Многообразие механизмов изнашивания затрудняет сформулировать единый подход к их анализу и изучению. Ткачев В.Н. [16], рассмотрев 15 условий абразивного изнашивания, отмечает, что проблеме абразивного изнашивания посвящены сотни публикаций, однако основополагающей методики оценки износостойкости и связи с механическими характеристиками материалов выявить не удалось.

Наиболее простая зависимость предела выносливости  $\sigma_{-1} = 0,18\text{HB}$  дана в работе [17].

В результате трения в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия, которые не зависят от величины и знака остаточных напряжений, созданных предшествующей обработкой. Наличие в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия у сталей повышенной твёрдости повышает предел усталости до 50 %. Влияние остаточных напряжений сжатия на предел выносливости особенно велико при большой разнице прочности стали при растяжении и сжатии. Повышение износостойкости поверхностного слоя за счёт создания напряжений сжатия является основой метода поверхностного пластического деформирования (ППД), одним из ограничителей параметров которого является степень исчерпания ресурса пластичности [18].

Некоторые исследователи пытались установить взаимосвязь предела выносливости с твёрдостью и пределом прочности, а когда эта связь не получалась, то смело к размерным величинам добавляли недостающее безразмерное число и дальше уверенно производили необходимые действия. Это стало нормой не только в авторефератах на соискание кандидатской степени, но и в солидных публикациях. В работе о пределе выносливости («Сварка и диагностика», 2011, №1 д.т.н. Ефименко Л.А. (РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина)) приводят формулы (1), (3), (4).

В работе д.т.н., проф. Густов Ю.И., Воронина И.В., Аллаттуф Х.Л. (Вестник МГСУ. 2013. № 4. с. 32 – 37), не проделав ни одного натурального испытания по определению предела выносливости,

авторы оценивают свои научные изыскания о взаимосвязи напряжения среза и предела выносливости металлических материалов по элементарной формуле Тылкина М.А. из [17].

Можно считать установленным, что при взаимодействии абразивных частиц, обладающих твёрдостью, превосходящей твёрдость материала технологического оборудования, происходит процесс микрорезания, интенсивность которого пропорциональна твёрдости и пределу прочности материала оборудования.

Абразивные зёрна, участвующие в процессе микрорезания с радиусом при вершине  $\rho$  могут совершать акт микрорезания только при глубине резания больше  $\rho$ . В остальных случаях происходит смятие поверхности с образованием канавки или лунки, величина которой зависит от коэффициента трения в зоне контакта [19].

Сергиев А.П. [21] установил, что разрушения при царапании или микрорезании происходят от максимального растягивающего напряжения. По своему физическому смыслу максимальное разрушающее растягивающее напряжение обрабатываемого материала представляет собой истинное сопротивление разрушению  $S_k$ , которое может быть определено методом механических испытаний.

При стандартном испытании материалов на растяжение наблюдаются две основные стадии продольной деформации: равномерная деформация до начала образования шейки  $\Delta l_g$ ; деформация, почти полностью сосредоточенная в зоне шейки  $\Delta l_z$ .

Равномерная деформация при растяжении составляет величину, пропорциональную исходной длине  $l_0$  образца и не зависит от длины образца.

$$\Delta l_g = \alpha l_0, \quad (2)$$

Коэффициент  $\alpha$  характеризует относительное удлинение:

$$\alpha = \delta = \frac{\Delta l_g}{l_0}, \quad (3)$$

Баушингер И. установил, что величина сосредоточенного удлинения пропорциональна корню квадратному из площади сечения исходного образца:

$$\Delta l_z = \gamma \sqrt{S_0}, \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности  $\gamma$  зависит от многих параметров, характеризующих физико-механические свойства материала.

Деформация поперечного сечения при растяжении характеризуется относительным сужением:

$$\psi = \frac{\Delta S}{S_0} = \frac{S_0 - S}{S_0}, \quad (5)$$

где  $S_0$  и  $S$  – площадь исходного и текущего сечения образца, соответственно.

В пределах равномерного удлинения справедлив закон сохранения объёма, тогда, с учётом очевидных преобразований, формула (5) примет вид:

$$\psi = \frac{\delta}{1 + \delta}, \quad (6)$$

В упругой зоне деформации необходимо ввести поправку, характеризующую физико-механические свойства конкретного материала, и в окончательном виде значение относительного сужения будет определяться выражением:

$$\psi = \frac{\delta}{1 + \delta} - \frac{1 - 2\mu}{E} \sigma, \quad (7)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma$  – напряжение растяжения.

Стандартное испытание на растяжение не позволяет однозначно вычислить значение истинного сопротивления разрушению  $S_k$ , поэтому целесообразно рассмотреть некоторые исследования по вычислению  $S_k$ . Людвик П.[2] предложил построение истинной диаграммы растяжения  $S_k$  на равномерном участке деформации как функцию относительно сужения  $\psi$ , выраженную через относительное удлинение  $\delta$ .

Из определения временного сопротивления  $\sigma_B$  и истинного сопротивления разрушению  $S_k$ :

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{S_0}, S_k = \frac{P_{max}}{S_{ш}}, \quad (8)$$

где  $S_{ш}$  – сечение шейки образца после разрушения.

Тогда относительное сужение будет:

$$\psi = \frac{S_0 - S_{ш}}{S_0} = 1 - \frac{S_{ш}}{S_0}.$$

Откуда  $\frac{S_{ш}}{S_0} = 1 - \psi$ , следовательно:

$$S_k = \frac{\sigma_B}{1 - \psi}, \quad (9)$$

Таким образом, зная значение  $\psi$  в любой точке диаграммы, можно вычислить истинное сопротивление разрушению.

В некоторых случаях целесообразнее вычислять  $S_k$  по Людвигу П. через  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\delta$ . Формулу (6) можно представить в виде:

$$(1 - \psi)(1 + \delta) = 1, \quad (10)$$

Отсюда находим  $(1 - \psi)$  и, подставив в (9), получим:

$$S_k = \sigma_B(1 + \delta), \quad (11)$$

Вычисление  $S_k$  по формуле Людвика приводит к большому разбросу значений, так как величина  $\delta$  очень чувствительна к случайным факторам (дефекты, риски

и т.п.). Наиболее стабильное значение обеспечивается при вычислении поперечного сужения  $\psi$ . Поэтому целесообразно строить истинную диаграмму растяжения в зависимости от относительного сужения (рисунок 1). Относительное сужение рассчитывают по наиболее узкому сечению образца.

Для построения зависимости  $S_k - \psi$  достаточно измерить две точки: первую на участке равномерного удлинения в начале образования шейки (точка 2), вторую, замерив диаметр шейки после разрыва (точка 4).

Начало образования шейки (точка 2) характеризуется значением нагрузки  $P_{max}$  и соответствующим значением  $\sigma_2$  при относительном удлинении  $\delta = 0,2$  (предел пропорциональности).

Меру упрочнения при дальнейшем нагружении характеризует угол наклона кривой  $\alpha = tg \psi = \frac{d\sigma}{d\psi}$ , справедливой лишь при деформации сужением. Аномальный подъём кривой в точке 4 это результат увеличения скорости деформации и связан с упрочнением, вызванным отклонением формы шейки от цилиндрической и выражается тем ярче, чем резче выражена шейка.

Анализ дифференциального уравнения кривой в точке перегиба 2 позволил установить зависимость угла наклона кривой от параметров напряжения и деформации.

$$tg \alpha = \frac{d\sigma_2}{d\psi_2} = \frac{\sigma_2}{1-\psi_2}, \quad (12)$$

Таким образом, в точке 2 тангенс угла касательной к кривой имеет величину, определяемую уравнением (12).

Совпадение касательной с кривой в точке 2 позволяет считать, что дальнейший ход кривой может быть вычислен по уравнению (12), и рассчитать значение напряжения  $\sigma$  для любой деформации, начиная с деформации  $\psi_2$  до предельной деформации  $\psi = 1$ , т.е. для деформации 100 % сжатия поперечного сечения.

В случае максимально возможной деформации при  $\psi = 1$ , получим:

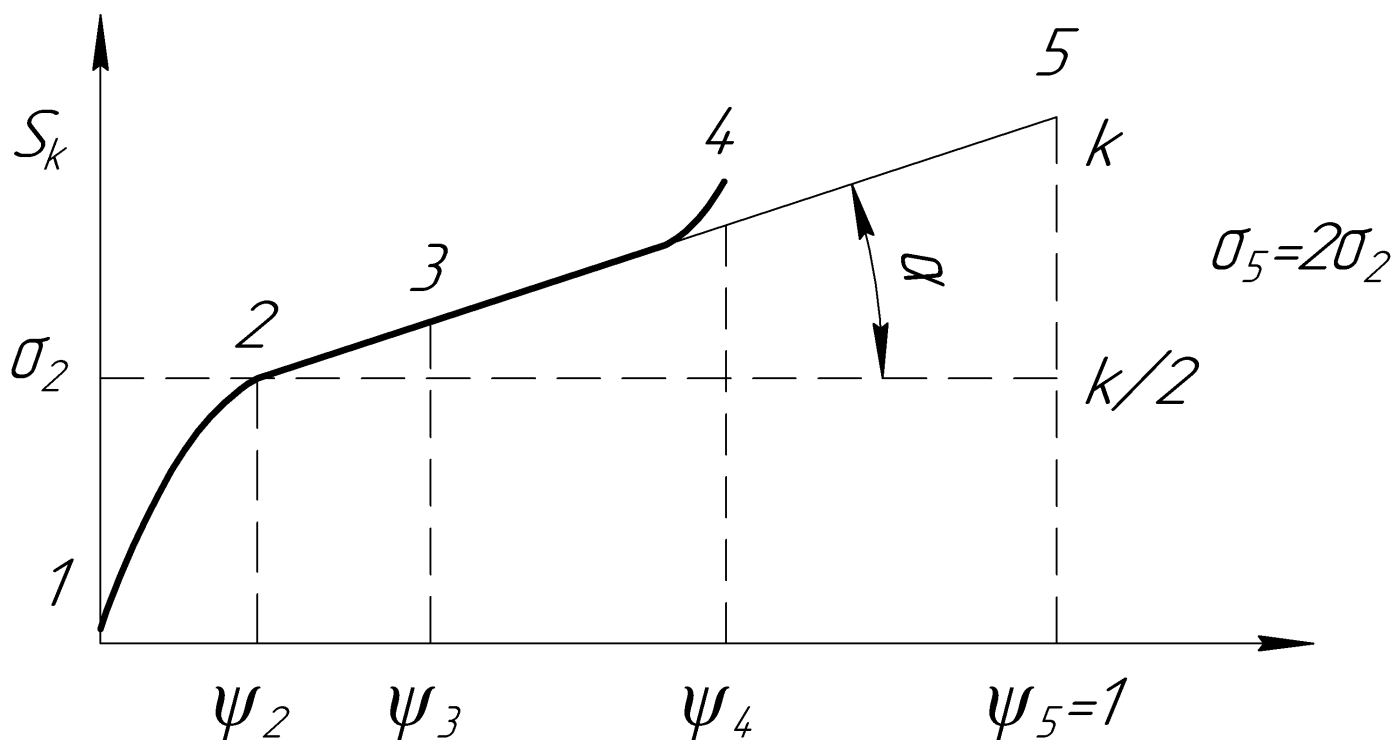
$$\sigma_5 = 2\sigma_2, \quad (13)$$

На рисунке 1 это обозначено точкой  $k$ . Таким образом, напряжение, соответствующее  $\psi = 1$ , равняется удвоенному истинному напряжению, соответствующему началу образования шейки. Это заключение лежит в основе правила Кёрбера – истинное напряжение, соответствующее 100 % сжатию поперечного сечения ( $\psi = 1$ , т.е. разрушению), равно удвоенному истинному напряжению  $\sigma_2$ , соответствующему началу сосредоточенной деформации в точке 2.

Точку 2, независимо от формы начального участка кривой растяжения, находят построением параллельной прямой для отрезка  $k/2$ , как показано на рисунке 1.

Кривую  $S_k - \psi$  с достаточной для практики точностью можно построить по трём точкам,

Рис. 1. Кривая деформации  $S_k - \psi$  // Fig. 1. The strain curve  $S_k - \psi$



соответствующим: 1) пределу текучести; 2) временному сопротивлению; 3) напряжению при разрыве.

Величину истинного разрушения  $S_k$  в точке 4 можно вычислить, измерив диаметр в наиболее узком месте шейки разорванного образца по формуле (8), при соответствующем значении  $\psi_4$ .

Обозначив  $\frac{S_2 - S_4}{S_2}$  через  $\psi_4$  получим окончательно выражение истинного сопротивления разрушению в зависимости от временного сопротивления относительного сужения  $\psi$

$$S_k = \sigma_b(1 + \psi), \quad (14)$$

Аналогичная зависимость была получена на основе анализа большого числа экспериментальных исследований Давиденковым Н.Н. [20].

Анализ механизма микрорезания при взаимодействии единичного абразивного выступа, контактирующего с поверхностью материала, если толщина срезаемого слоя мала по сравнению с длиной царапины, показал, что значение элементарной работы и работы диспергирования описываются выражением (15).

$$C'LP_y\mu_3 = \frac{\sigma}{g} S_{ц} \frac{\Delta M_1}{\rho_m}, \quad (15)$$

Значение удельной поверхности снятого слоя  $S_{ц}$  определяется выражением

$$S_{ц} = \frac{F_{ц}}{Q_{ц}} \approx \frac{l(a)}{L f_{ц}(a)} = \frac{l(a)}{f_{ц}(a)}, \quad (16)$$

где  $F_{ц}$  – площадь вновь образованной поверхности;

$f_{ц}(a)$  – текущая поперечная площадь царапины;

$l(a)$  – текущая длина дуги поперечного сечения царапины.

В формуле (16) при подстановке значения площади диспергированной поверхности  $F_{ц}$  не учтены торцевые поверхности стружки, которыми можно пренебречь, поскольку в процессе съёма металла контактирующий выступ плавно входит и выходит из обрабатываемого материала, а толщина срезаемого слоя мала по сравнению с длиной царапины.

Текущие значения величины  $l(a)$  и  $f_{ц}(a)$  могут быть определены как длина дуги и площадь кругового сегмента радиуса  $\rho$  высотой  $a$  с центральным углом  $\alpha = 90^\circ - \gamma$ , где  $\gamma$  – фактический угол резания (царапания), или хордой, равной ширине царапины  $b$ , тогда

$$\alpha = 2 \arccos \frac{\rho - a}{\rho};$$

$$l(a) = \frac{\pi \rho}{90^\circ} \arccos \frac{\rho - a}{\rho};$$

$$f_{ц} = \frac{\rho^2}{2} \left( \frac{\pi \rho}{90^\circ} \arccos \frac{\rho - a}{\rho} - \sin 2 \arccos \frac{\rho - a}{\rho} \right), \quad (17)$$

$$S_{ц} = \frac{\pi \rho \arccos \frac{\rho - a}{\rho}}{45^\circ \left( \frac{\pi \rho}{90^\circ} \arccos \frac{\rho - a}{\rho} - \sin 2 \arccos \frac{\rho - a}{\rho} \right)}.$$

Приняв для простоты профиль царапины за равнобедренный треугольник с углом при вершине, равным  $2\gamma$ , формулы (17) можно значительно упростить:

$$\alpha = 90^\circ - \gamma;$$

$$l(a) = \frac{2a}{\cos \gamma};$$

$$f_{ц}(a) = a^2 \operatorname{tg} \gamma = a \rho \cos \gamma; \quad (18)$$

$$S_{ц} = \frac{2}{a \sin \gamma} = \frac{4}{b \cos \gamma},$$

где  $b$  – ширина царапины.

Величина  $1/b$ , согласно установленной Давиденковым Н.Н. [20] зависимости, пропорциональна истинному сопротивлению разрыву  $S_k$ , что позволяет представить формулу (18) в окончательном виде:

$$S_{ц} = C'' \frac{S_k}{\cos \gamma}, \quad (19)$$

где  $C''$  – размерный коэффициент.

Подставив в выражение элементарной работы, совершённой единичным выступом при одном соударении (15) значение  $S_{ц}$  из (19) и умножив на количество соударений  $K$  единичных выступов, получим элементарную работу за период:

$$KC'LP_y\mu_3 = C'' \frac{\sigma K \Delta M_1}{g \rho_m \cos \gamma} \frac{S_k}{\cos \gamma} = C'' \frac{\sigma}{g \rho_m \cos \gamma} \frac{S_k}{\cos \gamma} \Delta M, \quad (20)$$

где  $\Delta M = \Delta M_1 K$  – износ за период единичных соударений;

$\sigma$  – удельная поверхностная энергия;

$\rho_m$  – плотность обрабатываемого материала.

Представим выражение (20) в дифференциальной форме и проинтегрируем обе его части по времени.

Правая часть уравнения характеризует величину массы износа, а левая часть после интегрирования примет следующее выражение

$$C_1 \mu_3 m_h \cos \lambda \frac{v^2}{2} = C'' \frac{\sigma}{g \rho_m \cos \gamma} M, \quad (21)$$

Отсюда получим выражение для массы изношенного металла

$$M = \frac{C_1 \mu_3 m_h g \rho_m}{C'' S_k \sigma} \cos \gamma \cos \lambda \frac{v^2}{2}, \quad (22)$$

где  $m_h$  – масса абразивной частицы (гранулы);



$v$  – скорость соударения.

Введя новую переменную

$$C^* = \frac{C_1}{C^m} g, \quad (23),$$

получим окончательно

$$M = C^* \frac{\mu_3 \rho_m}{S_K \sigma} m_h \frac{v^2}{2} \cos \gamma \cos \lambda, \quad (24)$$

Чтобы проанализировать полученную закономерность, определяющую износ, предварительно рассмотрим входящие в неё отдельные величины.

С увеличением грануляции частиц, определяющих  $m_h$ , износ растёт в связи с увеличением кинетической энергии частиц наполнителя и их способности совершать микрорезание. Величина  $\cos \gamma$  и  $\mu_3$  характеризует условия, возникающие в зоне резания и определяют характер съёма металла. Физико-механические свойства обрабатываемого материала определяются значениями  $S_K$  и  $\sigma$ , причём с их ростом, характеризующим повышение прочности и вязкости материала, износ уменьшается.

Соотношение нормальных и касательных напряжений в зоне резания зависят от величины  $\cos \lambda$ , т.е. определяются углом атаки.

Остановимся подробнее на анализе отдельных величин, оказывающих существенное влияние на механизм износа.

Значение  $\cos \lambda$  всецело определяется соотношением нормальной и касательной составляющих силы  $P$  и, в зависимости от характера износа, может меняться от нуля до единицы, что соответствует предельным случаям скольжения абразивных частиц по поверхности разрушения от скалывания, микрорезания или происходит процесс упрочнения (наклепа).

Таким образом, чем острее абразивные зёрна наполнителя, тем легче проходит процесс микрорезания. По мере затупления вершин зёрен, т.е. увеличения радиуса округления вершин единичных зёрен, величина фактического отрицательного угла  $\gamma$  возрастает и условия микрорезания ухудшаются, повышая износостойкость поверхности детали.

Изнашивание (истирание при трении абразивных частиц о поверхность детали) существует при любых соотношениях нормальных и касательных составляющих внешней силы, когда процесс микрорезания осуществляться не может.

Для установления зависимости величины износа от механических свойств обрабатываемых материалов введём некоторую безразмерную постоянную  $C$ , характеризующуюся средними значениями  $\cos \lambda$  и  $\cos \gamma$ , и примем постоянным отношением эффективного коэффициента трения  $\mu_3$  к удельной поверхностной энергии обрабатываемого

материала  $\sigma$  и значению коэффициента  $C^*$ . Тогда формулу (24) можно представить в упрощенном виде:

$$M = C \frac{\rho_m m_h v^2}{S_K 2}, \quad (25)$$

Постоянная  $C$  в формуле (25) является параметром, зависящим от конструкции помольной камеры и принятой технологической схемы обработки (сухая, мокрая); скорость  $v$  является технологическим параметром обработки. Остальные величины могут быть определены по известным физико-механическим характеристикам обрабатываемых материалов.

Таким образом, проведённый анализ величин, определяющих величину износа при размоле, позволил установить, что полученная зависимость достаточно полно объясняет условия существования микрорезания, истирания и скалывания. Интенсивность износа возрастает с увеличением массы гранул размалываемого материала  $m_h$  и величины критерия технологической производительности процесса  $v^2$  и находится в обратной зависимости от истинного сопротивления разрыву, что является достаточным основанием установления зависимости предела выносливости от истинного сопротивления разрыву.

## Список литературы

1. GOST 27674-88 Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredelenija. – М.: Izd-vo standartov, 1988. – 21 s.
2. Spravochnik po staljam i metodam ih ispytanij [Tekst] / Per. s nem. kandidatov tehn. nauk M.S. Aronovicha i O.A. Mihajlova. – Moskva: Metallurgizdat, 1958. - 919 s.
3. O'Nejl', G. Tvjordost' metallov i ee izmerenie / G. O'Nejl'; per. s angl., red. i dop. N.D. Ageeva. – М.; L.: Metallurgizdat, 1940. – 375 s.
4. Hrushhev M.M. Babichev M.A. Abrazivnoe iznashivanie. – М.: Nauka, 1970, 1970, 252 s.
5. Hrushhev M.M. Babichev M.A. Abrazivnaja iznosostojkost' i fizicheskie harakteristiki materialov // Mashinostroenie. 1971. №2. S. 106 – 111.
6. Hrushhev M.M. (ml) Razvitie idej M.M. Hrushheva o svjazi abrazivnoj iznosostojkosti i fizicheskijh svojstv materialov // Vestnik mashinostroenija. 2002. №1. S. 15 – 17.
7. Kragel'skij I.V, Trenie i iznos. М.: Mashinostroenie, 1968. 480 s.
8. L'vov P.N. Iznosostojkost' detalej stroitel'nyh i dorozhnyh mashin. М.: Mashgiz, 1962. 112 s.
9. Kashheev V.N. Zakonomernosti abrazivnogo iznashivanija metallov i splavov // Teorija trenija, iznosa i problem standartizacii. Brjansk, 1978. S. 181 – 192.
10. Tenenbaum M.M. Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniju. М.: Mashinostroenie. 1976. 266 s.
11. Sorokin G.M. Prochnost' kak osnova mehanizma iznosostojkosti stalej pri abrazivnom iznashivanii // Vestnik mashinostroenija. 1986. №5. S. 11 – 15.

12. Tkachev V.N. Iznos i povyshenie dolgovechnosti detalej sel'skohozijskijstvennyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1971. 264 s.
13. Wahl H. Verechleibtechnik. – Technik 3, 1948, S. 193 – 204.
14. Mezten W.J. TASST (1927), 11, 233.
15. Fink M., ZVDI, (1930). 74, 85, Arhiv. Eisenhütt (1932). 161.
16. Tkachjov V.N. Rabotosposobnost' detalej mashin v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya / V.N. Tkachjov. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 335 c.
17. Tylkin M.A. Spravochnik termista remontnoj sluzhby. M.: Metallurgija, 1981, 647 s.
18. Matalin A.A. Tehnologija mashinostroenija. L.: Mashinostroenie, 1985. 496 s.
19. Bogatov A.A., Mizhirickij O.I., Smirnov S.V. Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgija, 1984. – 144 s.
20. Davidenkov N.N. Nekotorye problemy mehaniki materialov. L.: Lenizdat, 1943. 215 s.
21. Sergiev A.P., Antipenko E.I. Otdelochnaja obrabotka v abrazivnyh sredah. – Staryj Oskol.: Nauchnoe izdanie, 1997. – 220 s.