

Er. 6.7
347

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 347

ИЗНОС, УСТАЛОСТЬ И КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

СБОРНИК СТАТЕЙ

VI

ТАЛЛИН 1973

Ep.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 347

1973

УДК 620.178

ИЗНОС, УСТАЛОСТЬ И КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

СБОРНИК СТАТЕЙ

VI

Таллин 1973

С о д е р ж а н и е

	Стр.
1. Уетц Г. Наиболее важные результаты исследований абразивной эрозии, проведенных в Штуттгартском университете	3
2. Клейс И.Р., Паппель Т.А. О эрозионной стойкости некоторых легированных материалов	23
3. Тийдеманн Т.А., Ууемыйс Х.Г., Клейс И.Р. О закономерностях абразивной эрозии при повышенных скоростях струи	29
4. Юксти Л.А., Клейс И.Р. Некоторые результаты исследования эрозии металлов в струе влажного абразива	39
5. Харламов Ю.А., Соколов А.Ф., Паппель Т.А. Повышение стойкости к износу детонационным напылением	49
6. Сяргава П.О., Вальдма Л.Э. Приспособление к центробежному ускорителю ЦУК-3М для испытания материалов на абразивный износ с добавной жидкости	55
7. Вальдма Л.Э., Нанитс М.Х. Топография износа центробежного распылителя	65
8. Мяги А.Р. Исследование износа пробивных игл ..	75
9. Раннат Э.И., Ингерма А.И. Исследование усталости металлов методом внутреннего трения	85



© ТПИ, Таллин, 1973

УДК 620.178.167

Г. Уэтц

НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
АБРАЗИВНОЙ ЭРОЗИИ, ПРОВЕДЕННЫХ В ШТУТТ-
ГАРТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

I. Введение

На практике известно большое количество различных видов повреждений в разных отраслях промышленности, вызванных абразивной эрозией [1, 2, 3, 4]. Эти повреждения показывают также разнообразие влияющих на износ параметров.

При абразивной эрозии вводится энергия в поверхностный слой детали ударами твердых частиц, направляемых и ускоренных потоком газа, или же ускорением другими силами (центробежная сила, сила тяжести). В зависимости от угла атаки имеется нижеуказанная формальная классификация:

касательное попадание, угол атаки около 0° , скольжение	эрозия скользящей струей
перпендикулярное попадание, угол атаки около 90° , удар	эрозия перпендикулярной струей
попадание под углами атаки между 0° и около 90° , скольжение и удар	эрозия наклонной струей

При угле атаки 0° передачи энергии не происходит и износ ввиду этого равен нулю. Это кажущееся противоречие с практикой объясняется тем, что влияние как неровностей по-

Верхности, так и непрямолинейности самого пути частиц, вызываемой соударениями частиц между собой и о стенки трубопровода, приводит к углу атаки $\alpha > 0^\circ$.

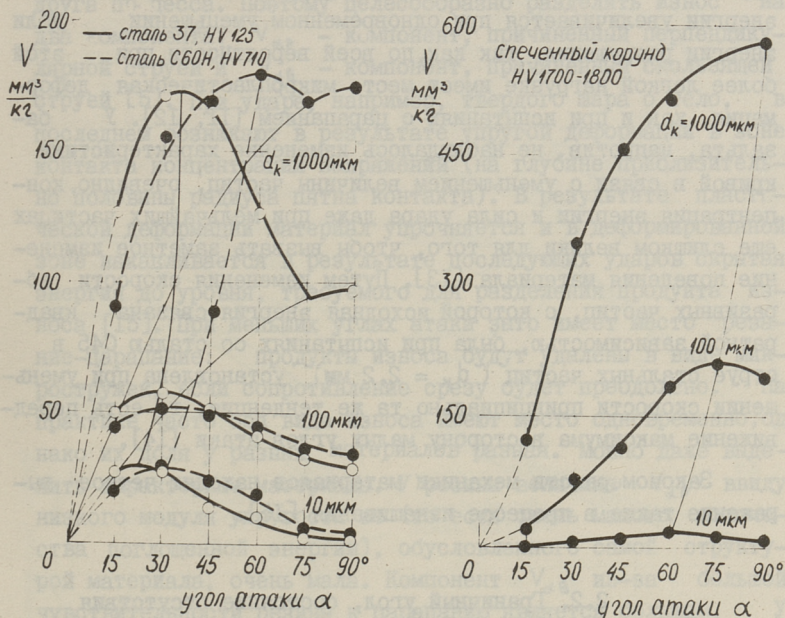
При эрозии наклонной струей доли скольжения и удара при разных углах атаки различное. При углах около 90° для оценки абразивной эрозии могут быть использованы закономерности удара. Важным параметром при абразивной эрозии является преобразованная в этом процессе энергия. Независимо от материала, важнейшую роль играют угол атаки, твердость абразива, скорость частиц, величина частиц, концентрация струи и т.д. Однако при незначительном количестве преобразованной удельной энергии могут приобрести решающее влияние реакции в граничных слоях и покрыть влияние других параметров (особенно при эрозии отделением пленок, возникающих в условиях высоких температур или агрессивных сред). Лишь при упрощенных условиях удалось до сих пор математически охватить параметры изнашивания и расчетным путем установить износ [5, 6, 7, 8]. В общем, получение надежных данных возможно и теперь лишь путем проведения испытаний.

2. Влияние угла атаки

2.1. Сравнение материалов

По данным наших исследований, при $H_M < H_A$ [3, 9, 10] влияют наряду с твердостью, имеющей по опыту существенную важность при износе скользящей струей, на эрозионную стойкость и другие свойства материала (модуль упругости, вязкость и хрупкость), влияющие на восприимчивость энергии. У резины износ с увеличением угла атаки от 15° до 60° постоянно падает и остается потом до 90° почти без изменения. У стали St37 максимальный износ наблюдается в пределах 30° , у более мягких материалов максимум находится у более малых углов (у алюминия около 20°), а с увеличением твердости и хрупкости материалов максимум смещается все больше в сторону больших углов атаки.

При условии $H_M > H_A$ кривые "износ-угол атаки" в принципе такие же, однако в распорядке износостойкостей может произойти инверсия (см. пункт 3).



Фиг. 1. Зависимость интенсивности изнашивания V от угла атаки α при разных крупностях зёрен абразива; скорость частиц - 130 м/сек.

Очевидно, место максимума является признаком вязкого или хрупкого поведения материала. Если изменить энергию удара и этим самым нагрузку, то и положение максимума (учитывая, что вязко-хрупкое поведение материала зависит от нагрузки) должно изменяться. Для проверки этого предположения осуществлялась вариация исходной энергии при величинах корундовых частиц $d_k = 1000, 100$ и $10 \mu\text{m}$. Исходная энергия, как и сила удара, уменьшается пропорционально диаметру частиц в 3 степени. У сталей St 37 и С60Н, а также у совсем хрупкого спеченного корунда, износ в зависимости от размера частиц уменьшается и одновременно макси-

мум износа все больше смещается к малым углам атаки (фиг.1) Процесс преобразования энергии протекает, тем самым, явно по другим закономерностям, т.е. доля упругой или пластической энергии увеличивается при одновременном уменьшении доли энергии разрушения, так как, по всей вероятности, при этой более легкой нагрузке имеет место микропластическая деформация, как и при испытаниях с царапанием [11, 12]. У ба-зальта, напротив, не наблюдалось изменение характеристики кривой в связи с уменьшением величины частиц, очевидно, концентрация энергии и сила удара даже при мельчайших частицах еще слишком велики для того, чтобы вызвать заметное изменение поведения материала [13]. Путем изменения скорости абразивных частиц, с которой исходная энергия связана квадратной зависимостью, была при испытаниях со сталью С45 в струе стальных частиц ($d_k = 2,2$ мм) установлена при уменьшении скорости принципиально та же тенденция, то есть передвижение максимума в сторону малых углов атаки [14].

Закономерности механики материалов находят четкое выражение также в процессе изнашивания [15].

2.2. Граничный угол, состояние отсутствия износа

Испытания со стеклянными образцами в струе частиц стального песка дали максимум износа при 90° . При малой скорости удара (30,5 и 13 м/сек) ниже определенного граничного угла (соответственно 10° и 20°) износа вообще не наблюдалось [6]. Удар в этом случае является почти чисто упругим. Если предел упругости не будет преодолен или же будет преодолен лишь незначительно, то есть преобразования энергии в материале почти нет, то износа или вообще нет, или он незначителен.

2.3. Представления о модели процесса изнашивания

По разным внешним формам можно различить два вида эрозии:

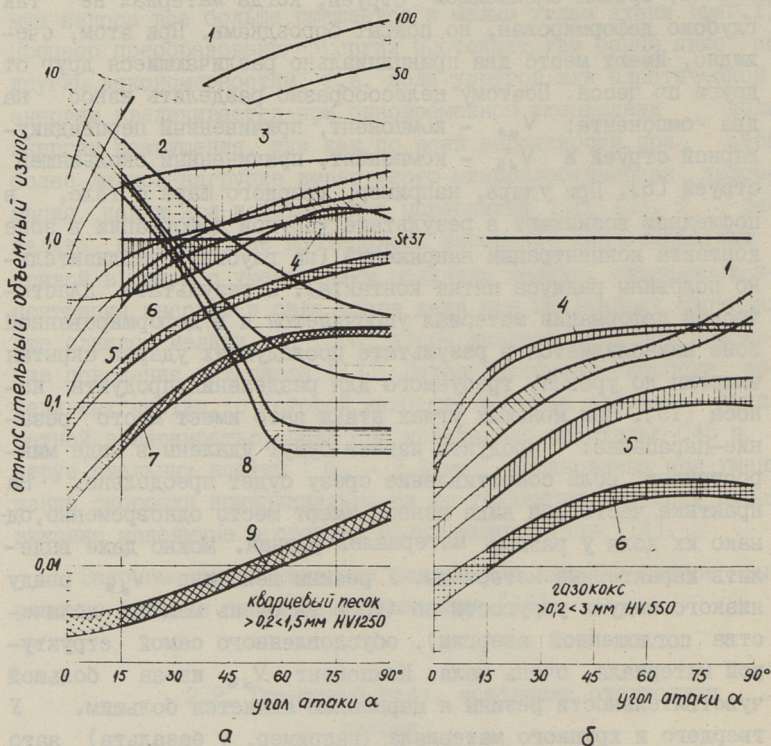
1) эрозия перпендикулярной струей, когда поверхность сильно деформирована, бугристая и частично отслоенная и

2) эрозия скользящей струей, когда материал не так глубоко деформирован, но покрыт бороздками. При этом, очевидно, имеют место два принципиально различающиеся друг от друга процесса. Поэтому целесообразно разделить износ на два компонента: $V_{\alpha p}$ — компонент, причиненный перпендикулярной струей и $V_{\alpha \delta}$ — компонент, причиненный скользящей струей [5]. При ударе, например, твердого шара о тело, в последнем возникают в результате упругой деформации в зоне контакта концентрации напряжений (на глубине приблизительно половины радиуса пятна контакта). В результате пластической деформации материал упрочняется и в деформированной зоне накапливается в результате последующих ударов скрытая энергия до уровня, требуемого для разделения продукта износа [15]. При меньших углах атаки зато имеет место резание-царапание: продукты износа будут удалены в виде микростружек, если сопротивление срезу будет преодолено. На практике часто оба вида износа имеют место одновременно, однако их доля у разных материалов разная. Можно даже выделить характерные материалы. У резины величина $V_{\alpha p}$ ввиду низкого модуля упругости ее (то есть очень малого количества поглощенной энергии), обусловленного самой структурой материала, очень мала. Компонент $V_{\alpha \delta}$ из-за большой чувствительности резины к царапанию является большим. У твердого и хрупкого материала (например, у базальта) зато доминирует компонент $V_{\alpha p}$, так как сам материал очень чувствителен к ударам и стойкий к царапанию. Сталь находится между этими экстремально себя ведущими материалами.

В лаборатории Штуттгартского университета проведены обширные исследования с различными материалами по выявлению влияния угла атаки на их абсолютную и относительную износостойкость [3]. Влияние угла атаки на относительную износостойкость различного типа материалов показано на фиг. 2. Эти данные и изложенные выше теоретические соображения могут облегчить практический выбор эрозионно-стойких материалов.

3. Влияние твердости абразива

Как уже видно из фиг. 2, твердость абразива играет существенную роль, однако на износ влияют и такие свойства



Фиг. 2. Зависимость относительного объемного износа различного типа материалов от угла атаки; скорость абразивных частиц ок. 75 м/сек, эталонный материал - St37 (HV120), а - в струе кварцевых (HV1250, $d = 0,2-1,5$ мм) и б - в струе коксовых (HV550, $d = 0,2-3$ мм) частиц.

Обозначение материалов:

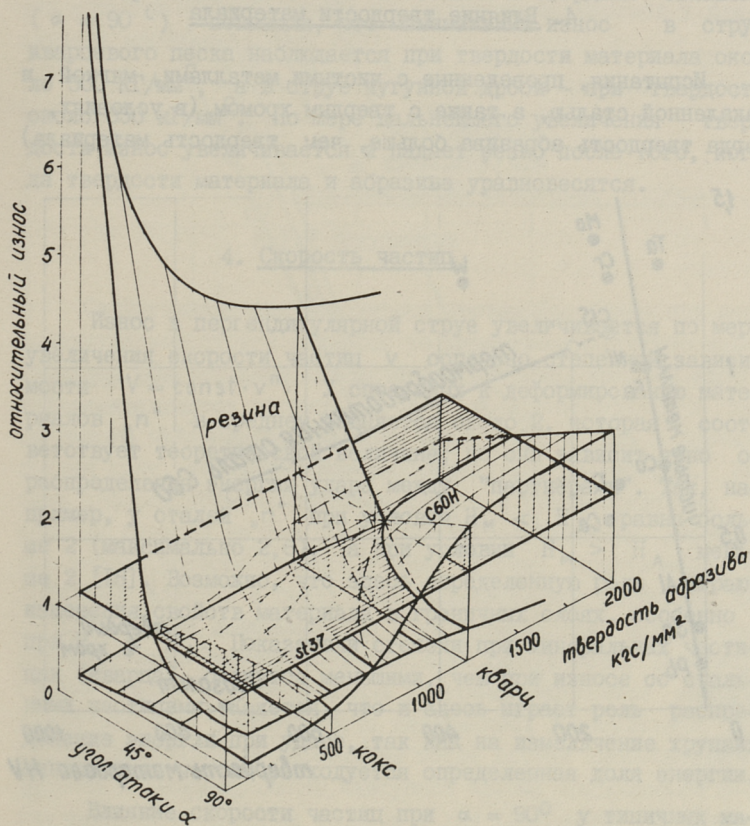
- 1 - базальт, 2 - резина, 3 - белый чугун, (нелегированный),
- 4 - сталь С65Н, 5 - наплавка 3,5С35Ср, 6 - металлокерамический твердый сплав, 7 - твердый сплав 6Э, 8 - вулколлан В, 9 - твердый сплав Н2.

абразива, как форма, плотность и величина частиц, а также взаимодействие с деталью (измельчение, эффект внедрения).

Для металлов действует при эрозии перпендикулярной струей та же закономерность зависимости износа от относительной твердости материала и абразива, что и при износе со скольжением - низкий износ и незначительная восприимчивость энергии материалом, если твердость абразива ниже или равна твердости материала и сильный износ в случае, когда твердость

абразива намного превышает твердость материала. Между этими зонами на соответствующих диаграммах находится так называемая переходная зона. В противоположность износу со скольжением очередность износостойкостей материалов в данном случае меняется в пользу более мягких материалов. У твердых и хрупких материалов наблюдается склонность к хрупкому выкрашиванию, однако это происходит только при повышенных скоростях удара (см. 5).

Износ резины с перпендикулярной струей происходит согласно вышеприведенным разъяснениям в зоне сильного износа, но с низкой интенсивностью ввиду большой упругости ма-



Фиг. 3. Зависимость относительного износа от угла атаки и твердости абразива H_A , эталонный материал - St37 (H V 120).

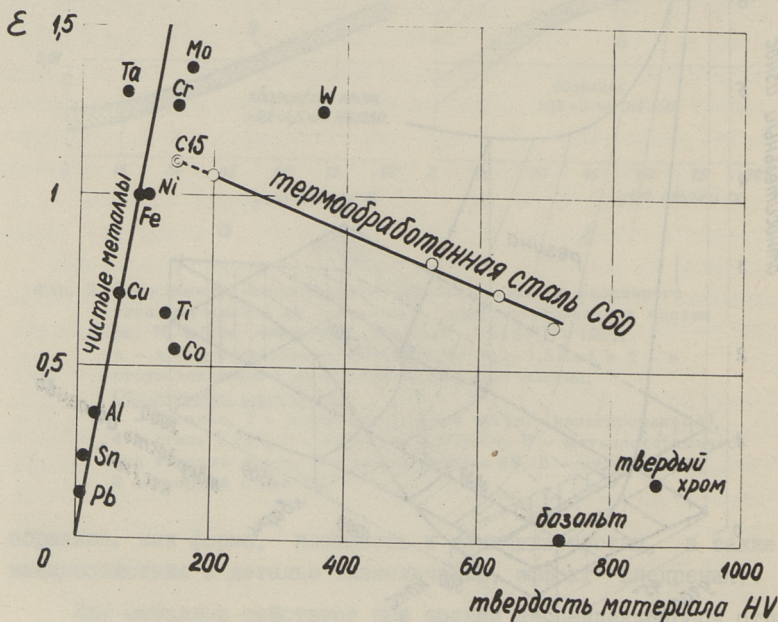
териала, в случае стеклянных и кремневых частиц, износ резины увеличивается из-за большой остроты граней этих частиц.

Базальт имеет в струе мягких частиц (газококс) низкий износ, однако его кривая износа поднимается очень круто по мере увеличения твердости абразива.

Объемное изображение сложной зависимости относительного износа от твердости абразива и угла атаки дается на фиг. 3.

4. Влияние твердости материала

Испытания, проведенные с чистыми металлами, мягкой и закаленной сталью, а также с твердым хромом (в условиях, когда твердость абразива больше, чем твердость материала)



Фиг. 4. Зависимость относительной износостойкости чистых металлов и некоторых других материалов от твердости материала H_M ; кварцевый песок 0,1–0,5 мм, $v = 37$ м/сек, $\alpha \approx 90^\circ$, опыты на центробежном ускорителе.

показали, что относительная износостойкость чистых металлов с увеличением твердости материала нарастает почти линейно, то есть аналогично результатам Хруцова [16] по способу абразивной шкурки (см. фиг. 4). Точка тантала, как и точки гексагональных металлов титана и кобальта, не попадают на прямую. То же самое можно сказать относительно молибдена. Неблагоприятное поведение вольфрама и твердого хрома, по всей вероятности, связано с хрупкостью этих металлов. Износостойкость термически обработанных сталей с увеличением их твердости падает [17].

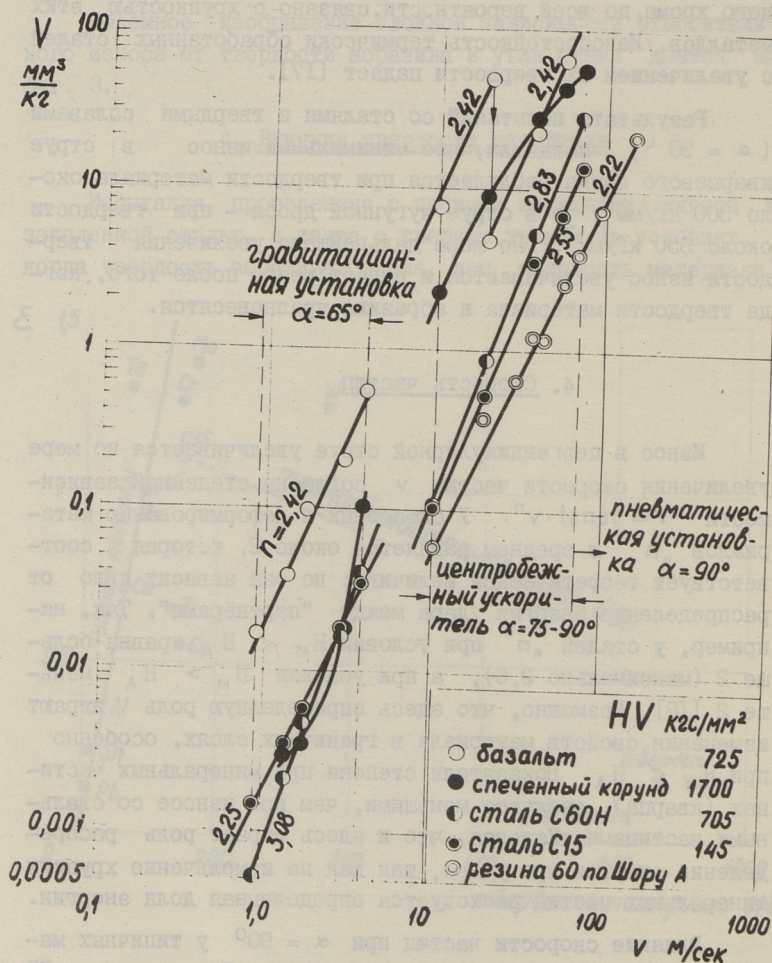
Результаты испытаний со сталями и твердыми сплавами ($\alpha = 90^\circ$) показали, что минимальный износ в струе кварцевого песка наблюдается при твердости материала около 300 кг/мм^2 , а в струе чугунной дробы — при твердости около 350 кг/мм^2 . По мере дальнейшего увеличения твердости износ увеличивается и падает резко после того, когда твердости материала и абразива уравниваются.

4. Скорость частиц

Износ в перпендикулярной струе увеличивается по мере увеличения скорости частиц v согласно степенной зависимости $V = \text{const} \cdot v^n$. У способных к деформированию материалов „ n “ в среднем равняется около 2, которая соответствует теоретической величине; но она зависит явно от распределения энергии удара между „партнерами“. Так, например, у сталей „ n “ при условии $H_M < H_A$ равна больше 2 (максимально 2,6), а при условии $H_M > H_A$ меньше 2 [18]. Возможно, что здесь определенную роль играют изменения свойств материала в граничных слоях, особенно при $H_M < H_A$. Показатели степени при минеральных частицах (кварца) окажутся меньшими, чем при износе со стальными частицами. Кажется, что и здесь играет роль распределение энергии при ударе, так как на измельчение хрупких минеральных частиц расходуется определенная доля энергии.

Влияние скорости частиц при $\alpha = 90^\circ$ у типичных материалов может иметь различный характер. До скорости 70 м/сек (имеется ввиду скорость воздушного потока, а не частиц), износ резины сравнительно мал, так как в этом слу-

чае она ведет себя в основном эластично. Лишь при больших скоростях износ в результате сильного нагрева за счет повторных деформирований резко увеличивается, так как резина в связи с этим свои упругие свойства теряет. Это имеет место и в тех случаях, когда толщина детали меньше критической относительно пробыа.



Фиг. 5. Зависимость интенсивности изнашивания V от скорости абразивных частиц v ; абразив - кварцевый песок 0,1 - 0,5мм.

В струе мелких частиц ($\alpha = 90^\circ$) износ закаленной стали С60Н превосходит износ мягкой стали С15, если скорость удара больше 3–5 м/сек (см. фиг. 5), но меньше ее при очень низких скоростях удара. Абсолютная величина износа стали при $v = 1$ м/сек очень незначительная, однако нельзя утверждать, что износ практически отсутствует, как это наблюдается у резины.

Чувствительным относительно увеличения скорости удара является и литой базальт, у которого, очевидно, при нарастании скорости наблюдается откалывание все больших продуктов износа, так как требуемая для отделения с поверхности единицы объема энергия по сравнению с энергией у пластичных материалов мала [19].

У хрупких материалов были и в других случаях установлены величины показателей „n“ свыше 2 [6].

6. Энергетическая трактовка вопроса

6.1. Вступление

Свойственным для абразивной эрозии (особенно при перпендикулярной струе) является ее динамико-энергетический характер. Из исходной кинетической энергии, которой располагают движущиеся частицы, деталью воспринимается – в зависимости от свойств материала и абразива – лишь определенная доля, которая может распределяться по-разному. Резина деформируется в основном упруго и соответствующая энергия большей частью снова передается частицам. Абразивное зерно, которое намного тверже резины, практически не поглощает энергии и будет лишь незначительно нагружено, ввиду чего оно не деформируется и не разрушается. Мягкая сталь деформируется упруго, но в основном пластически. Если зерно тверже стали, то передаваемая энергия принимается материалом в основном в виде работы деформации. В результате постоянно повторяемой деформации после потери способности материала к деформированию наступает износ. Подводимая энергия используется таким образом и для разделения материала. После того, как наклепанный слой сносится, тот же самый про-

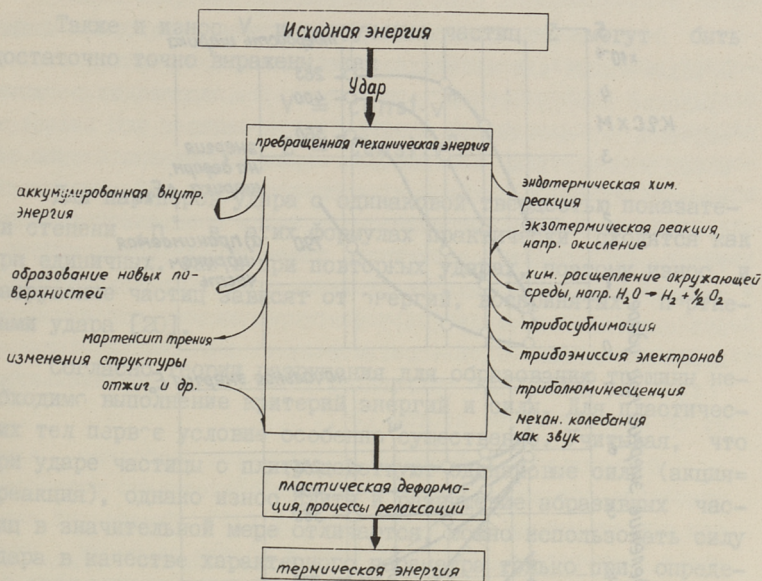
цесс начинается с оставшимся материалом. В случае хрупких материалов (например, базальт) передаваемая материалу энергия расходуется в основном на разделение продуктов износа, причем размеры последних сравнительно большие (предполагается, что $H_M < H_A$). Как только напряжения снижаются до предела упругости, износ сильно уменьшается. Таким образом для износа очень существен вопрос, в какой степени материал в состоянии принять энергию путем деформирования или через какие-либо другие процессы адсорбирования энергии (кроме разрушения), так как оставшаяся часть будет определять износ. Исходя из этого, в принципе продукты износа должны быть возможно мелкими, чтобы на их формирование израсходовалось больше энергии. Износ материала по отдельным молекулам или даже атомам соответствует процессу сублимации. Если материалы с молекулярным строением будут расщепляться, то при этом поглощается энергия в размере энергии химической связи, которая у определенных синтетических материалов, используемых в виде защитного покрытия на космических кораблях, особенно велика.

Абразивные частицы подвержены аналогичным нагрузкам, как и основной материал. Их поведение при ударах (измельчение, заклинивание в поверхность) влияет на процесс изнашивания детали.

Наибольшая доля исходной энергии преобразуется в случае металлов в теплоту (см. фиг. 6). При этом вторичные процессы могут связывать или освобождать определенное количество энергии. Через структурные изменения, химические реакции и т.д. эта энергия может существенно влиять на процесс изнашивания, несмотря на то, что преобразующееся при этом количество энергии по сравнению с деформационной энергией, которая у металлов составляет главную часть, очень мало.

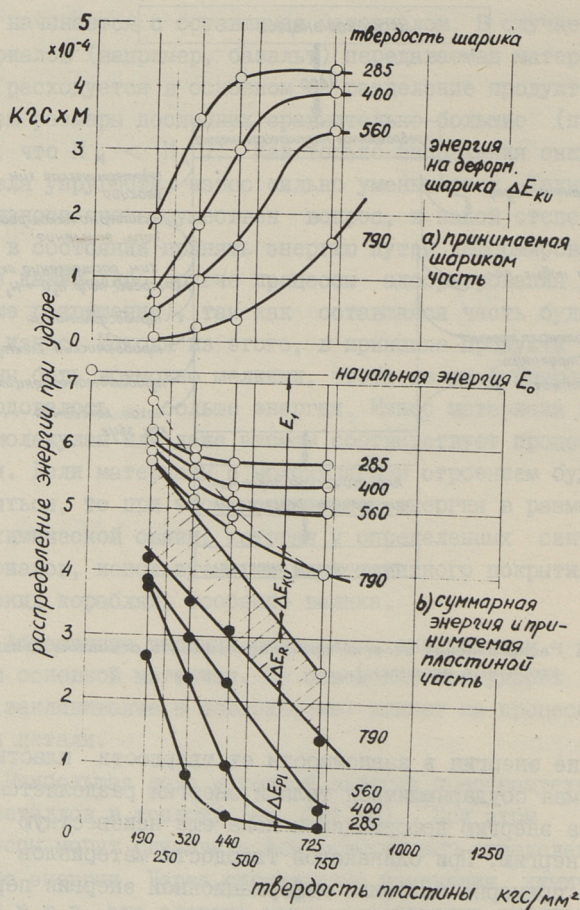
6.2. Распределение энергии

Единичными ударами с помощью стальных шариков $\phi 1$ мм по стальным пластинам различной твердости возможно (исходя из деформации при внедрении и потери кинетической энергии шарика) весьма точно определять распределение исходной энергии между шариком и плитой [20]. На фиг. 7 приведено рас-



Фиг. 6. Распределение энергии при ударе (имея в основном ввиду вторичные процессы).

пределение энергии в зависимости от твердости пластины. Абсорбируемая соударяющимися телами энергия разделяется в основном на энергию деформации и пока еще неизвестную остаточную энергию. При одинаковой твердости материалов плиты и шарика примерно половина деформационной энергии переходит в плиту и другая половина в шарик. При неодинаковой твердости материалов энергия в основном поглощается более мягким материалом. Доля остаточной энергии составляет при первом ударе около 25...30 % всей поглощенной в процессе удара энергии. Ее доля увеличивается при последующих ударах по тому же месту все больше и при 20 ударе охватывает почти всю потерянную в процессе удара энергию [21]. Причиной этому служит происходящее в поверхностном слое медленное течение материала, требующее энергии, которая примерно идентична (не учитывая потерей шабота) ранее неидентифицированной остаточной энергии.



Фиг. 7. Баланс энергии при единичных ударах шарика $\varnothing 1$ мм со скоростью 58 м/сек.

6.3. Энергия и износ

При испытании на многократные удары мы следили за износом плиты и разрушением абразива в зависимости от скорости, твердости и прочих факторов. Сравнение величин энергий, переходящих при ударе в плиту и шар, показало, что эти кривые имеют аналогичный характер. Зависимость долей энергий ΔE , воспринимаемых партнерами удара при различных скоростях удара V выражается формулой

$$\Delta E = \text{const} \cdot v^n.$$

Также и износ V и разрушение частиц Z могут быть достаточно точно выражены, как

$$V = \text{const} \cdot v^n$$

$$Z = \text{const} \cdot v^n.$$

Для партнеров удара с одинаковой твердостью показатели степени „ n “ в этих формулах практически сходятся как при единичных, так и при повторных ударах, поэтому износ и разрушение частиц зависят от энергий, воспринятых партнерами удара [20].

Согласно теории разрушения для образования трещины необходимо выполнение критерий энергий и силы. Для пластических тел первое условие особенно существенно. Учитывая, что при ударе частицы о плиту действуют одинаковые силы (акция = реакция), однако износ плиты и разрушение абразивных частиц в значительной мере отличаются, можно использовать силу удара в качестве характерного параметра только при определенных условиях (например, когда $\Pi_A > H_M$ и вся энергия воспринимается плитой).

Из приведенного выше следует, что существенной при износе в перпендикулярной струе является энергия, затрачиваемая на пластические деформации детали.

6.4. Явления, встречающиеся в процессе абразивной эрозии

При абразивной эрозии приобретает особое значение деформационная работа, передаваемая в оба партнера удара и ее преобразование в другие формы. С нею связаны также вторичные явления на месте удара, как изменение структуры, трибохимические реакции, повышение температуры, возникновение электрических зарядов и др. (см. схему на фиг. 6). В основном деформационная работа преобразуется в теплоту, поэтому в зоне удара наблюдается кратковременное повышение температуры. При скорости частиц 70 м/сек у мягкой стали она составляет около 360 ± 150 °C [22], соответствующие измерения проводились с помощью фольги-термопары. Локальные температурные всплески должны быть еще гораздо выше.

В результате деформации, последующей повторным ударами металлических или неметаллических частиц, происходит возбуждение поверхностной зоны детали. Она переходит в активированное, насыщенное энергией, состояние и это влечет за собой последствия, которые благоприятствуют протеканию как химических так и физических процессов [23, 24]. Взаимодействие насыщенного энергией состояния и повышенной температуры может вызвать структурные изменения в поверхностном слое детали. У мягких сталей наблюдается образование местных окисных включений [25], у которых было установлено содержание железа 72 % (соответствует стехиометрически Fe_3O_4). Потемнение травленной поверхности свидетельствует об обогащении ее азотом [26].

В результате деформации наблюдаются свободные электрические заряды, которые можно непосредственно установить при помощи метода измерения фольгой [22]. Измеренный заряд, как и температура, увеличивается с ростом скорости удара частиц. Однако энергия, требуемая для образования этих электрических зарядов, лишь незначительная часть той энергии, которая поглощается деталью.

7. Выводы

Абразивная эрозия является процессом изнашивания, при котором энергия в изнашиваемое тело передается ударами движущихся в газовом потоке частиц. В зависимости от величины угла атаки различают износ скользящей струей, наклонной струей и перпендикулярной струей. Важной приметой абразивной эрозии является ее динамико-энергетический характер. Из всей кинетической энергии частиц деталью принимается (в зависимости от свойств изнашиваемого тела и абразива) только определенная часть, которая может различно распределяться. Принимаемая деталью энергия, которая затрачивается на пластическую деформацию, является решающей при эрозии перпендикулярной струей и при износе повторными ударами (при ударном износе), можно полагать, что эта закономерность действительно и в отношении других углов атаки, а частично и для других видов изнашивания.

Часть энергии, переходящая в виде деформационной энергии в оба соударяющиеся тела, создает на месте удара изменения: повышение температуры, структурные изменения, трибохимические реакции, трибоэмиссию, трибоабсорбцию и другие явления. При распределении энергии на указанные изменения решающими являются условия нагружения, причем закономерности изнашивания могут изменяться. Важными параметрами при этом являются угол атаки, твердость абразива и скорость удара. При специфически малом количестве превращенной энергии решающее значение могут иметь реакции в граничных слоях, и процессы изнашивания могут происходить в пределах тонкой пленки реакций, причем упомянутые выше основные процессы теряют свое значение.

Л и т е р а т у р а

1. K. W e l l i n g e r, H. C. B r o c k s t e d t. Verschleiß von Spülversatzrohren und Versuche zur Ermittlung des Verschleißwiderstandes verschiedener Werkstoffe für Spülversatzrohre. Glückauf 81, S. 45-51, 1945.
2. H. W a h l, F. H a r t s t e i n. Strahlverschleiß. Frank'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1946.
3. K. W e l l i n g e r, H. U e t z. Gleitverschleiß, Spülverschleiß, Strahlverschleiß unter der Wirkung von körnigen Stoffen. VDI - Forschungsheft 449, Beilage zur Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Ausgabe B, Band 21, S. 1-40, 1955.
4. A. B r a u e r, E. K r i e g e l. Untersuchungen über den Verschleiß von Kunststoffen und Metallen. Chemie-Ingenieur-Technik 35, S. 697-707, 1963.
5. K. W e l l i n g e r. Sandstrahlverschleiß an Metallen. Z. Metallkunde 40, S. 361-364, 1949.
6. J. F i n n i e. Erosion of surface by solid particles. Wear 3, pp. 87-103, 1960.
7. J. G. A. B i t t e r. A study of erosion phenomena. Wear 6, Nr. 1, bzw. 3, S. 5-21, und 169-190, 1963.
8. I. K l e i s. Probleme der Bestimmung des Strahlverschleißes bei Metallen. Wear 13, S. 199-215, 1969.

9. K. W e l l i n g e r, H. U e t z. Verschleiß durch körnige mineralische Stoffe. Aufbereitungstechnik 4, nr. 8, S. 321-335, 1963.

10. K. W e l l i n g e r, H. U e t z. Verschleiß durch körnige mineralische Stoffe unter Berücksichtigung des Mahlverschleißes in Kugelmühlen. Zement, Kalk, Gips 18, Nr. 2, S. 52-63, 1965.

11. P.S. D o b s o n, H. W i l m a n. The friction and wear and their interrelationship in abrasion of a single crystal of brittle nature. Brit. Journ. Appl. Phys. 14, S. 132-136, 1963.

12. K. W e l l i n g e r, H. U e t z, J.M. G ü r - l e y i k. Gleitverschleißuntersuchungen an Metallen und nichtmetallischen Hartstoffen unter Wirkung körniger Stoffe. Wear 12, S. 173-199, 1968.

13. H. U e t z, J. F ö h l. Einfluß der Korngröße auf das Strahlverschleißverhalten von Metallen und nichtmetallischen Hartstoffen. Wear 20, S. 299-308, 1972.

14. C. B o d e, H. S c h a e t z. Eine neue einfache Versuchsanordnung zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeit bei Strahlverschleißuntersuchungen. Chem. Techn. 18, Nr. 2, S. 93-98, 1966.

15. H. R u m p f. Problemstellung und neuere Ergebnisse der Bruchtheorie. Materialprüfung 3, Nr. 7, S. 253-265, 1961.

16. M.M. K h r u s h c h o v. The correlation between wear resistance in abrasive wear and the strength properties of metals. Ind. Lab. (USSR) 28, S. 372-376, 1962.

17. H. U e t z, J. F ö h l. Strahlverschleißverhalten von reinen Metallen und Stählen in Abhängigkeit von der Werkstoffhärte (В ПЕЧАТИ).

18. G. G o m m e l. Energie, Verschleiß und Zerkleinerung bei Prallvorgängen. Staub-Reinhaltung der Luft, 27, Nr. 1, S. 42-47, 1967.

19. H. U e t z, J. F ö h l. Energiebetrachtung bei Strahlverschleiß (В ПЕЧАТИ).

20. G. G o m m e l. Stoßuntersuchungen Stahlkugel-Stahlplatte in Zusammenhang mit Strahlmittelzertrümmerung und Strahlverschleiß. Diss. Universität Stuttgart 1968.

21. H. B r e c k e l. Kenngrößen und Verschleiß beim Stoß metallischer Werkstoffe. Diss. Universität Stuttgart 1968.

22. H. U e t z, G. G o m m e l. Temperaturerhöhung und elektrische Aufladung beim Stoß einer Stahlkugel gegen eine Stahlplatte. Wear 9, S. 282-296, 1966.

23. G. H e i n i c k e. Physikalisch-Chemische Untersuchungen Tribochemischer Vorgänge. In P.A. Thiessen, K.Meyer und G.Heinicke, Grundlagen der Tribochemie. Akademie-Verlag, Berlin, S. 101-194, 1967.

24. K. M e y e r. Energetisch angeregte Zustände in tribo-mechanischen Prozessen. In P.A.Thiessen, K.Meyer und G.Heinicke, Grundlagen der Tribochemie. Akademie-Verlag, S.24-100, Berlin, 1967.

25. G. G o m m e l. Erscheinungen bei stoßender Beanspruchung und ihr Zusammenhang mit Verschleißvorgängen. Materialprüfung 9, 5, S. 175-178, 1967.

26. R. M a i l ä n d e r, K. D i e s. Beitrag zur Erforschung der Vorgänge beim Verschleiß. Archiv Eisenhüttenwes. 16, S. 385-398, 1943.

Die wichtigsten Ergebnisse von Strahlverschleißuntersuchungen in der MPA Stuttgart

Zusammenfassung

Strahlverschleiß ist ein Abnutzungsprozeß, bei dem Energie in die Festkörperoberfläche durch Auftreffen von Blasgut eingebracht wird, das in einem Gasstrom geführt wird. Abhängig vom Anstrahlwinkel unterscheidet man Gleitstrahlverschleiß, Schrägstrahlverschleiß, Prallstrahlverschleiß. Das wesentliche Kennzeichen des Strahlverschleißes ist der dynamisch-energetische Charakter. Von der kinetischen Energie wird, abhängig von den Eigenschaften des Grundkörpers und Blasgutes, nur ein bestimmter Anteil aufgenommen und in diesen verschieden aufgeteilt. Die in einen Körper eingebrachte bleibende Verformungsenergie ist maßgebend für den Prallstrahl- bzw. Stoßverschleiß, es ist anzunehmen, daß diese Gesetzmäßigkeit auf den ganzen Winkelbereich und teilweise auch auf andere Verschleißarten ausgedehnt werden kann. Die als Verformungsarbeit in beide Partner fließende Stoßenergie bedingt an der Stoßstelle Veränderungen wie Temperatursteigerung, Gefügeumwandlung, tribochemische Reaktionen, Triboelektronenemission, Triboabsorption und weitere Erscheinungen. Ihre energiemäßigen Anteile werden durch die Beanspruchungsbedingungen entscheidend beeinflusst, wodurch der Verschleißvorgang nach anderer Gesetzmäßigkeit abläuft. Wesentliche Einflußgrößen sind Anstrahlwinkel, Blasguthärte, Anstrahlgeschwindigkeit. Bei spezifisch geringer umgewandelter Energie können Grenzflächenreaktionen entscheidenden Einfluß gewinnen und die Verschleißvorgänge in einer Reaktionsschicht ablaufen, wodurch die obengenannten Haupteinflüsse sogar überdeckt werden.

УДК 620.178.169

И.Р. Клейс, Т.А. Паппель

О ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕКОТОРЫХ
 ЛЕГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

У некоторых машин (скоростные смесители, дезинтеграторы, дезембраторы и др.), применяемых в химической промышленности, имеет место сильная абразивная эрозия.

В рамках данной работы исследовались некоторые распространенные высоколегированные коррозионностойкие стали на эрозионную стойкость. Для сравнения испытаны и некоторые другие износостойкие сплавы. Данные об испытанных материалах даны в таблице I.

Т а б л и ц а I

Испытанные материалы в порядке увеличения твердости

№	Материал	Твердость по Виккерсу кг/мм ²	$\frac{H_a}{H_M}$	Примечания
I	2	3	4	5
1.	Сталь 45	177	5,4	Эталон
2.	OXI5M75H	186	5,1	ЭИ - 844
3.	XI8H10T	195	4,9	
4.	XI4ГI4M3T	224	4,2	ЭИ - 7II
5.	ШХI5	224	4,2	
6.	OXI7T	227	4,2	
7.	X25T	242	3,9	
8.	IX2IH5T	275	3,4	ЭИ - 8II
9.	XI7H5M3	346	2,7	
10.	ШХI5	464	2,0	
11.	Белый чугун	526	1,8	Обычный до-эвтектический

I	2	3	4	5
I2.	ШХ15	605	1,6	
I3.	Легированный белый чугун I5-3	614	1,5	3,5 % С, 15 % Cr 3 % Mo
I4.	ШХ15	769	1,2	
I5.	Сталь У8	864	1,1	

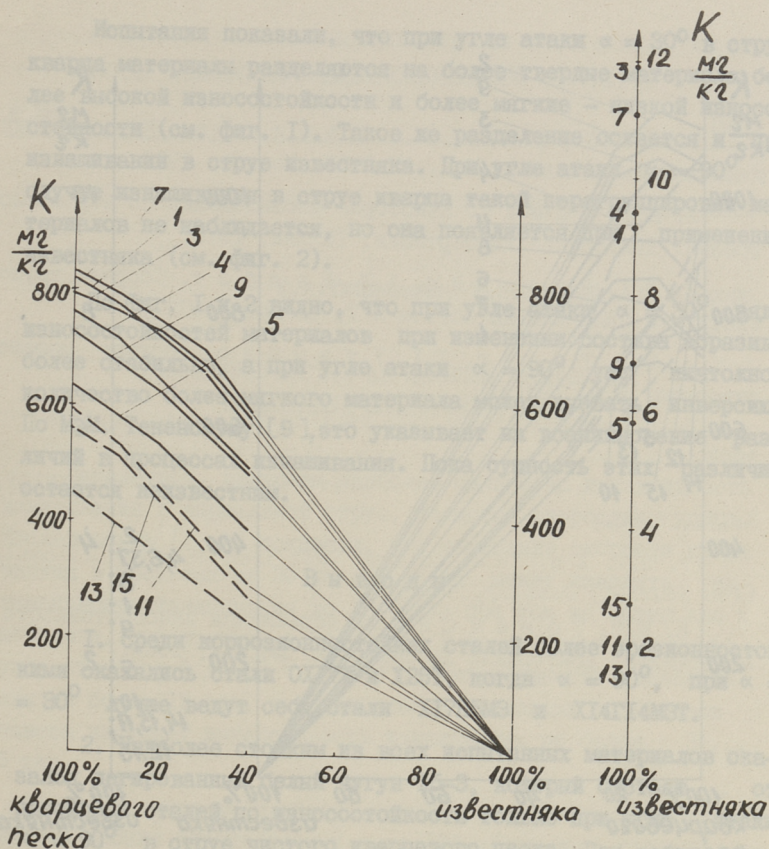
Как известно [1, 2 и др.], при абразивном изнашивании важную роль играет соотношение твердостей материала H_M и абразива H_a . Из таблицы I видно, что два материала (I4, I5) имеют твердость $H_M > H_a/1,6$. У двух материалов (I2, I3) $H_M \approx H_a/1,6$, если абразивом является кварцевый песок (H_a - средняя твердость кварца). Относительно известняка у всех материалов выполнено требование $H_M > H_a/1,6$.

В качестве абразива применен сухой кварцевый песок (твердость 800-1100 кг/мм², фракция 0,6-0,8 мм) и известняковый порошок (твердость 105-109 кг/мм², фракция 0,6 - 1,2 мм).

Скорость струи абразива $v = 100$ м/сек. По данным работы [3] материалы в струе смеси, содержащей частицы разной твердости, ведут себя иначе, чем при изнашивании на аналогичной шкурке. Если при изнашивании на шкурке из частиц разной абразивной способности изнашивающее действие обоих абразивов будет независимым [1], то при эрозии маленькие добавки неабразивного (мягкого) компонента могут резко увеличить износ. Поэтому в данной работе при испытаниях использовали и смеси песка с известняком (10, 20 и 30 % известняка от общего веса смеси).

Для проведения опытов был использован центробежный ускоритель ЦУК-3. Конструкция и методика проведения опытов на этой установке подробно описаны в труде [4]. С каждым материалом проводилось три серии опытов, что достаточно для получения достоверных данных [2].

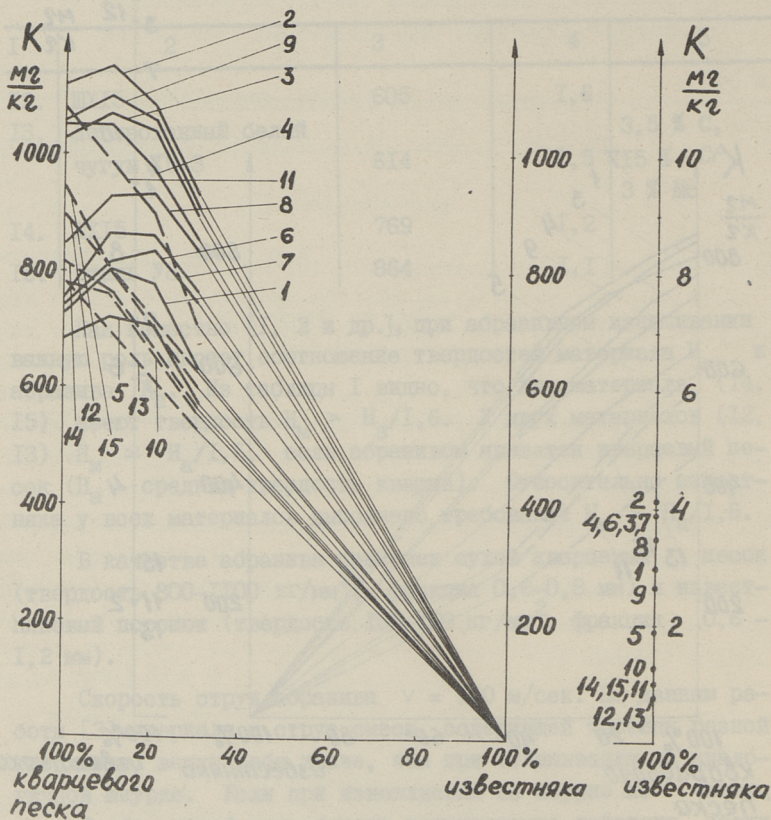
Среди испытанных материалов наивысшую износостойкость в большинстве случаев (см. фиг. I) имеет легированный белый чугун I5-3. Этот результат подтверждается и другими



Фиг. 1. Зависимость интенсивности изнашивания k от состава абразива при разных материалах (материалы указаны в таблице 1) при угле атаки $\alpha = 30^\circ$.

работами, которые рекомендуют мартенситовый белый чугуны как наиболее подходящий материал для изготовления тел размола в измельчителях ударного типа [5, 6, 7]. Но интересно отметить, что белый чугун теряет свое преимущество перед сталями ШХ15, 45 и ОХ17Т при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ в струе песка с содержанием известняка менее 10 %.

Среди коррозионностойких материалов при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ имеют повышенную износостойкость стали ОХ17Т и Х25Т, при $\alpha = 30^\circ$ Х17Н5М3 и Х14Г14Н3Т (см. фиг. 1, 2 и таблицу I)



Фиг. 2. Зависимость интенсивности изнашивания K от состава абразива при разных материалах при угле атаки $\alpha = 90^\circ$.

Если прибавить к кварцевому песку некоторое количество известняка, то по фиг. 1 и 2 видно, что при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ износ мягких материалов (показано на фигуре сплошной линией) при 10, 20 % известняка повышается. У твердых же материалов (показано на фигуре штриховой линией) износ сразу падает и материалы перегруппировываются по такому же порядку, как при изнашивании в струе известняка. При угле атаки $\alpha = 30^\circ$ такого повышения износа у мягких материалов не наблюдается.

Испытания показали, что при угле атаки $\alpha = 30^\circ$ в струе кварца материалы разделяются на более твердые материалы более высокой износостойкости и более мягкие - низкой износостойкости (см. фиг. 1). Такое же разделение остается и при изнашивании в струе известняка. При угле атаки $\alpha = 90^\circ$ в случае изнашивания в струе кварца такой перегруппировки материалов не наблюдается, но она появляется при применении известняка (см. фиг. 2).

По фиг. 1 и 2 видно, что при угле атаки $\alpha = 30^\circ$ ряды износостойкостей материалов при изменении состава абразива более стабильны, а при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ уже ничтожное количество более мягкого материала может вызвать инверсию. По М.М. Тененбауму [9], это указывает на возникновение различий в процессах изнашивания. Пока сущность этих различий остается неизвестным.

В ы в о д ы

1. Среди коррозионностойких сталей более эрозионностойкими оказались стали ОХ17Т и Х25Т, когда $\alpha = 90^\circ$, при $\alpha = 30^\circ$ лучше ведут себя стали Х17Н5МЗ и Х14Г14МЗТ.

2. Наиболее стойким из всех испытанных материалов оказался легированный белый чугун 15-3, который отстает от некоторых сталей по износостойкости только при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ в струе чистого кварцевого песка. При добавлении в песок некоторого количества мягкого известняка, относительная износостойкость его увеличивается.

3. Если добавить в кварцевый песок до 20 % известняка, то при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ изнашивание мягких сталей повышается. При $\alpha = 30^\circ$ такого явления не наблюдается.

4. При угле атаки $\alpha = 90^\circ$ прибавление известняка к песку вызывает инверсию в ряде износостойкостей материалов.

5. Абразивность известняка (твердость 105-190 кг/мм²) при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ в 30 до 1000 раз и при угле атаки $\alpha = 30^\circ$ в 60 до 300 раз меньше абразивности кварцевого песка (твердость 800-1100 кг/мм²).

Л и т е р а т у р а

1. М.М. Х р у щ о в, М.А. Б а б и ч е в. Исследования изнашивания металлов. Изд. АН СССР. Москва, 1960.
2. И.Р. К л е й с. Некоторые исследования по абразивной эрозии. Докторская диссертация, Таллин, 1970.
3. Х.Х. У у э м н й с, А.Т. Б а л б а т. Сборник трудов института НИПИ силикатобетон № 7, Таллин, 1972.
4. И.Р. К л е й с, Х.Х. У у э м н й с. Вестник машиностроения, № 9, 1971.
5. Т.Е. Н о р м а н, Г.Л. О т т. Sleserei, Nr.16/17, 1962.
6. К. В е р г е р. Revue Universelle des Mines, XVIII, Nr.12, 1962.
7. H.T. A n g r u s. British Cast Iron Research Association Journal, January, 1962.
8. М.М. Т е н е н б а у м. Абразивная износостойкость материалов. Докторская диссертация. Москва, 1969.

I.Kleis, T.Pappel

About the Erosive Wear Resistance of Some Alloyed Steels

Summary

This paper deals with the results obtained at testing some alloyed steels for erosive wear in a stream of quartz sand (hardness 800 to 1100 kG/mm²), limestone powder (hardness 105 to 109 kG/mm²) and in a mixture of quartz sand and limestone powder. The velocity of the stream was 100 m/sec. The impact angles were 30° and 90°.

The addition of limestone powder to quartz sand results in an increase of wear rate of annealed steels at great impact angles.

УДК 666.965.2.022.3

Т.А.Тийдеманн, Х.Г.Ууемыйс, И.Р.Клейс

О ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ АБРАЗИВНОЙ ЭРОЗИИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ СКОРОСТЯХ СТРУИ

Параметром, влияющим наиболее сильно на интенсивность изнашивания в абразивной струе, является скорость удара. Исследования [1, 2] показали, что изменение скорости удара частиц в пределах от 20 до 200 м/сек может изменить интенсивность изнашивания до 1000 раз при том же материале и абразиве, участвующих в процессе. В то же время изменения угла атаки от 5 до 90° влияет на интенсивность изнашивания не более 15 раз, а варьирование остальных параметров износа изменяет интенсивность изнашивания не более 3 ... 5 раз.

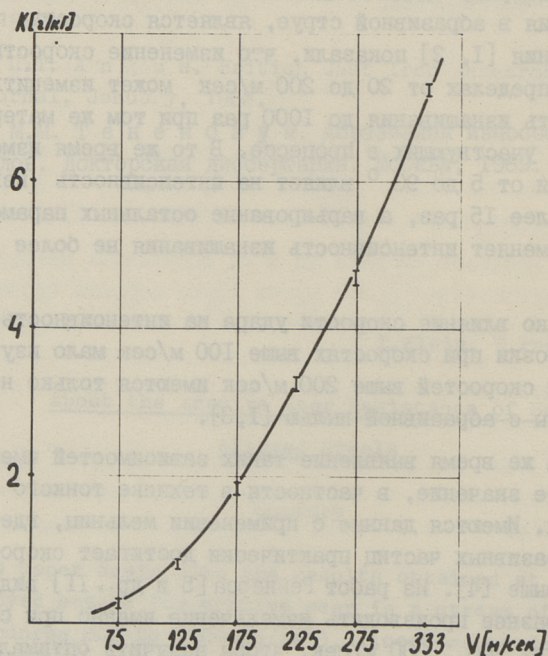
Однако влияние скорости удара на интенсивность абразивной эрозии при скоростях выше 100 м/сек мало изучено, а в области скоростей выше 200 м/сек имеются только некоторые работы с абразивной пылью [1, 3].

В то же время выявление таких зависимостей имеет немаловажное значение, в частности в технике тонкого измельчения. Имеются данные о применении мельниц, где скорость абразивных частиц практически достигает скорости звука и выше [4]. Из работ Рейнерса [5 и др., 11] видно, что целесообразнее производить измельчение именно при скоростях порядка 200...300 м/сек, чтобы получить оптимальную повышенную степень измельчения. Дальнейшее повышение скорости уже меньше влияет на интенсивность измельчения.

Для уточнения вышеприведенных вопросов в институте НИИИсиликатобетон была разработана установка ВК-2. Этот

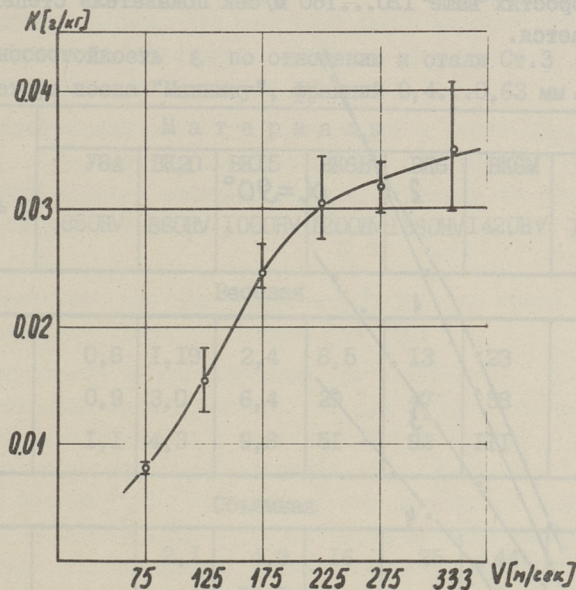
механический ускоритель с вакуумной рабочей камерой позволяет изучать абразивную эрозию при скоростях удара до 350 м/сек [5, 6].

Для изучения влияния скорости частиц на интенсивность абразивной эрозии на указанной установке в диапазоне скоростей от 75 м/сек до 330 м/сек был проведен ряд опытов с образцами из сталей Ст.3, У8А (HV 840) и с металлокерамическими твердыми сплавами ВК 20, ВК 15, ВК60М, ВК6В, ВК6, ВК3М, изготовленными в ВНИИТС. Образцы были размерами 25 x 20 x 4 мм. Одновременно испытывалось до 36 образцов. В качестве абразива были использованы фракционированный кварцевый песок "Мяннику", стальная дробь, стеклопорошок и



Фиг. 1. Зависимость интенсивности изнашивания стали Ст.3 от скорости удара в струе фракции 0,4...0,63 кварцевого песка "Мяннику"; $\alpha = 90^\circ$.

корунд. Все образцы подвергались предварительной обработке, а испытания проводились после достижения установившегося режима изнашивания. Для определения потерь веса образцы до и после изнашивания подвергались взвешиванию на аналитических весах с точностью $\pm 0,2$ мг. Параллельно проводились четыре испытания. Во всех испытаниях эталонным материалом была Ст.3.

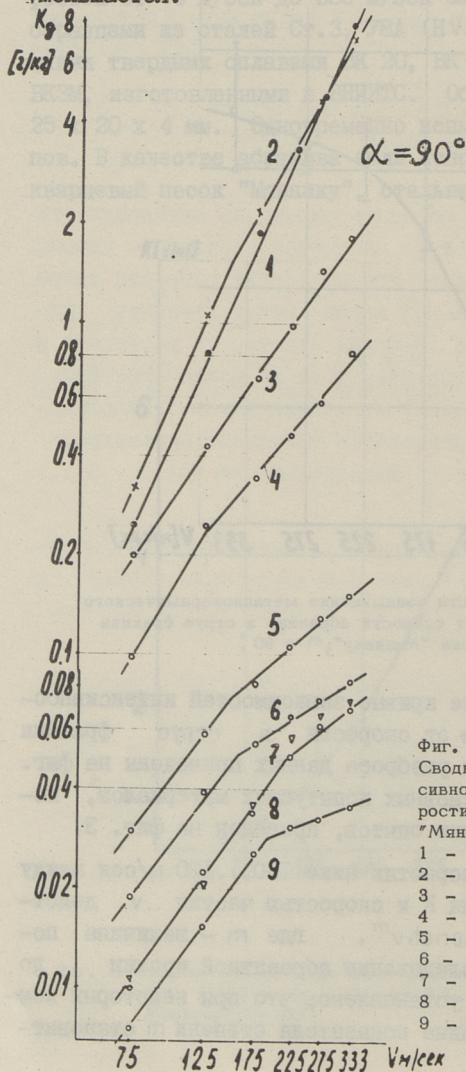


Фиг. 2. Зависимость интенсивности изнашивания металлокерамического твердого сплава ВКЗМ от скорости абразива в струе фракции 0,4...0,63 кварцевого песка "Маннику"; $\alpha = 90^\circ$.

Некоторые характерные кривые зависимостей интенсивности изнашивания материалов от скорости в струе фракции 0,4...0,63 мм с указанием разброса данных приведены на фиг. 1 и 2. Сводный график основных испытываемых материалов, построенный по средним данным опытов, приведен на фиг. 3.

Как известно, при скоростях ниже 100...120 м/сек между интенсивностью изнашивания K и скоростью частиц v действует зависимость $K = \text{const} \cdot v^m$, где m — величина постоянная. Затем при исследовании абразивной эрозии до скоростей 225 м/сек было установлено, что при некоторых комбинациях материалов величина показателя степени m становит-

ся переменной, критическая скорость при этом — 120 ... 170 м/сек [1]. Из данных настоящих опытов на фиг. 3 видно, что до 330 м/сек постоянная зависимость действует в случае мягкой стали Ст.3 в струе кварцевого песка. При остальных материалах в случае применения кварцевого песка при скоростях выше 120...160 м/сек показатель степени n уменьшается.



Фиг. 3.
Сводный график зависимостей интенсивности изнашивания сплавов от скорости удара частиц кварцевого песка "Мяньнику" фракции 0,4...0,63

- 1 - Ст. 3
 - 2 - У8 А зак(850 HV)
 - 3 - ВК 20
 - 4 - ВК 15
 - 5 - ВК 6В
 - 6 - ВК 6
 - 7 - ВК 6М
 - 8 - ВК 60М
 - 9 - ВК 3М
- } практически совпадают

Как видно из графика фиг. 3, наиболее резкий перелом кривых происходит у мелкозернистых твердых сплавов с низким процентом содержания связки [7]. С повышением скорости удара относительная износостойкость упомянутых твердых сплавов по отношению к стали Ст.3 заметно возрастает (см. табл. I).

Т а б л и ц а I

Износостойкость ε по отношению к стали Ст.3
в струе песка "Мяннику", фракций 0,4...0,63 мм $\alpha = 90^\circ$

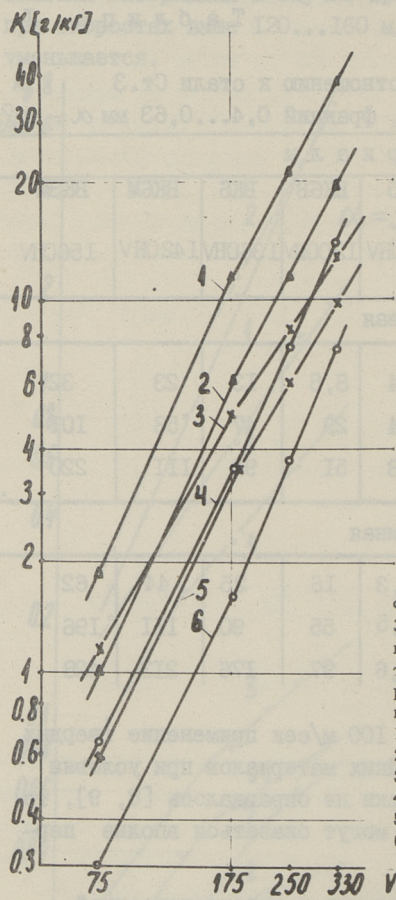
Скорость удара, м/сек	М а т е р и а л ы						
	У8А	ВК20	ВК15	ВК6В	ВК6	ВК6М	ВК3М
	850HV	880HV	1000HV	1200HV	1360HV	1420HV	1560HV
Весовая							
75	0,8	1,19	2,4	8,5	13	23	32
225	0,9	3,0	6,4	29	47	58	101
330	1,1	4,3	9,8	51	92	111	220
Объемная							
75		2,1	4,3	16	25	44	62
225		5,2	11,5	55	90	111	196
330		7,5	17,6	97	176	213	428

Если при скоростях ниже 100 м/сек применение твердых сплавов в качестве износостойких материалов при условии эрозийного износа экономически не оправдалось [8, 9], то при повышенных скоростях они могут оказаться вполне перспективными материалами.

Результаты испытаний образцов в высокоскоростной струе корундовых частиц фракций 0,4...0,63 мм приведены на фиг. 4. Металлокерамические твердые сплавы при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ по весу изнашиваются даже интенсивнее, чем Ст. 3. В логарифмических координатах также заметен перелом прямых при скоростях около 175 м/сек, причем при твердых сплавах перелом происходит в сторону уменьшения интенсивности из-

нашивания, а у стали Ст.3 - в сторону увеличения.

Следует отметить, что увеличение показателя степени m с увеличением скорости выше критического наблюдалось еще при испытаниях стали Ст.3 в струе стальной и чугунной дроби.



Фиг. 4.
Зависимость интенсивности изнашивания стали Ст.3 и металлокерамических твердых сплавов ВКЗМ и ВК15 от скорости удара в струе корунда фракции 0,4...0,63

1 - ВК15,	$\alpha = 90^\circ$
2 - ВК15,	$\alpha = 30^\circ$
3 - ВКЗМ,	$\alpha = 90^\circ$
4 - Ст.3,	$\alpha = 30^\circ$
5 - ВКЗМ,	$\alpha = 30^\circ$
6 - Ст.3,	$\alpha = 90^\circ$

Картина разрушения поверхности при скоростях порядка 300 м/сек принципиально мало отличается от той же при скоростях 200 м/сек, которое описано в [10].

Малая эрозионная стойкость металлокерамических твердых сплавов в струе корунда объяснима тем, что твердость абразива H_A выше твердости материала H_M , и абразив способен

врезаться в материал. Здесь наглядно действует закономерность о влиянии на абразивное изнашивание отношений твердостей $H_M : H_A$ [13].

При стали Ст.3 причиной разрушения поверхности являются микрорезание частицами при малых углах атаки и полудеформационные процессы при врезании частиц в металл при углах, близких к прямым. При стальной дробь картина разрушения поверхности свидетельствует о наличии значительных пластических течений металла в зоне попаданий.

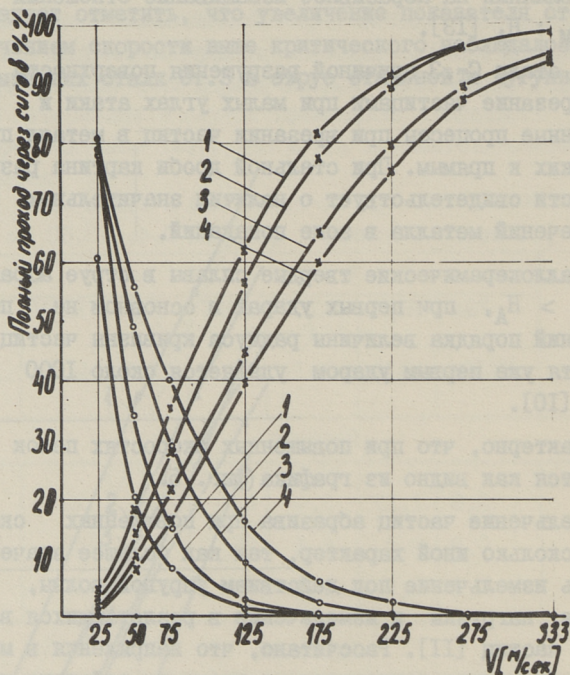
Металлокерамические твердые сплавы в струе абразива, когда $H_M > H_A$, при первых ударах в основном не получают повреждений порядка величины радиуса кривизны частиц абразива, хотя уже первым ударом удаляется около 1000 зерен карбида [10].

Характерно, что при повышенных скоростях песок сильно разрушается как видно из графика (фиг. 5).

Измельчение частиц абразива при повышенных скоростях имеет несколько иной характер, так как большее значение будет иметь измельчение под действием упругой волны, а не сжимающие нагрузки и измельчение в разлетающихся в облако осколков частиц [11]. Рассчитано, что напряжения в месте контакта несколько понижаются, а время их действия увеличивается [11]. Разлетающиеся тонкие осколки встречаются с поверхностью под более острым углом. Так как при маленьких углах атаки изнашивание значительно уменьшается, особенно при твердых материалах [12], то такое измельчение частиц при твердых сплавах может способствовать относительному снижению интенсивности изнашивания с повышением скорости, т.е. это явление может являться одной из причин перелома кривых изнашивания в сторону уменьшения. Измельченные частицы под действием возникающих высоких температур и локальных давлений прилипают к поверхности материала, что также может защищать поверхность образцов при повышенных скоростях.

При материалах и абразивах, при которых $H_M < H_A$, частица при повышенных скоростях глубоко врезается в поверхность материала и такой эффект в таком размере может не существовать.

В случаях, когда абразив не разрушается (стальная дробь при ударе о Ст.3) могут возникнуть высокие локальные тем-



Фиг. 5. Зависимость измельчения песка "Мянику" от скорости удара. Увеличение количества частиц крупностью ниже 0,1 мм и уменьшение частиц крупностью свыше 0,4 мм.

1. Ударная плита из ВК 6,	$\alpha = 90^\circ$
2. " " "	$\alpha = 30^\circ$
3. Ударная плита из Ст. 3,	$\alpha = 90^\circ$
4. " " "	$\alpha = 30^\circ$

пературы, могущие достигнуть величины точки плавления. Это может способствовать облегчению пластического течения металла и увеличению интенсивности изнашивания. Необходима дальнейшая работа, чтобы выявить физическую сущность таких явлений.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что при повышенных скоростях относительная износостойкость некоторых металлокерамических твердых сплавов по сравнению со сталью Ст.3 существенно повышается и они могут оказаться перспективными материалами в качестве отбойных плит центробежных измельчителей, применяемых для измельчения минералов с твердостью 7 по Моосу.

Л и т е р а т у р а

1. Х.Х. У у е м н ы й с, И.Р. К л е й с. Исследования некоторых закономерностей абразивной эрозии. Сборник трудов НИИСиликатобетона, № 2, Таллин, 1967.
2. И.Р. К л е й с. Некоторые исследования по абразивной эрозии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Таллин, 1970.
3. I. E. G o o d w i n, Miss W. S a g e, G. P. T i l l y. Study of erosion by solid particles. The institution of Mechanical Engineers. Proceedings 1969-1970, vol. 184, part 1 member 15.
4. Р. П л а н и о л ь. Центробежная мельница, работающая под вакуумом. Труды Европейского совещания по измельчению. Изд-во литературы по строительству. Москва, 1966.
5. E. R e i n e r s. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1059, 1962.
6. И.Р. К л е й с, Х.Х. У у е м н ы й с, Т.А.Т и й д е м а н н. Разработка высокоскоростных установок для комплексного исследования процесса измельчения и изнашивания. Сборник трудов НИИСиликатобетона № 6, 1971.
7. И.Р. К л е й с, Х.Х. У у е м н ы й с, В. Т у м а н о в, Т.А.Т и й д е м а н н. Исследования абразивной эрозии металлокерамических вольфрамовых твердых сплавов. Порошковая металлургия (в печати).
8. H. L e r i k s o n, I. K l e i s. Metallide erosiooni ja liiva eripinna juurdekasvu uurimine suurtel pörrekiirustel. Uurimistöõ aruanne, 1962.
9. И.Р. К л е й с. Исследование ударного износа металлокерамических твердых сплавов разной твердости. Труды ТПИ, серия А, № 219, 1965.
10. Х.Х. У у е м н ы й с, И.Р. К л е й с. Исследования единичных следов удара и продукта износа при абразивной эрозии. Труды ТПИ, серия А, № 294, 1970.

II. Г. Ш л а у г. Некоторые проблемы при измельчении в воздушных струях. Труды Европейского совещания по измельчению. Изд-во литературы по строительству, Москва, 1966.

12. И. Л а н г е б е р г, И. К л е й с, О выборе материалов для деталей оборудования, подвергающихся абразивной эрозии при малых углах атаки. Сборник трудов НИИ силикатобетона № 2, 1967.

13. Н. W a h l. Verschleißprobleme im Braunkohlenbergbau. Braunkohle, Wärme u. Energie. Bd. 3, Heft 5/6, 1951.

T. Tiidemann, H. Uuemõis, I. Kleis

A Study of Erosion at Higher Impact

Velocities

Summary

The paper deals with the study of abrasive erosion at velocities up to 330 m/sec. Tests with cermets of the type BK have shown that the value of the exponent m in the equation $k = a v^m$ starts decreasing at velocities above the so-called critical values - 120...170 m/sec. At the velocity of 330 m/sec the relative volumetric wear resistance of cermet BKЗМ is 428 with respect to soft steel grade St.3. The wear mechanism at higher velocities has also been explained.

УДК 620.178.167

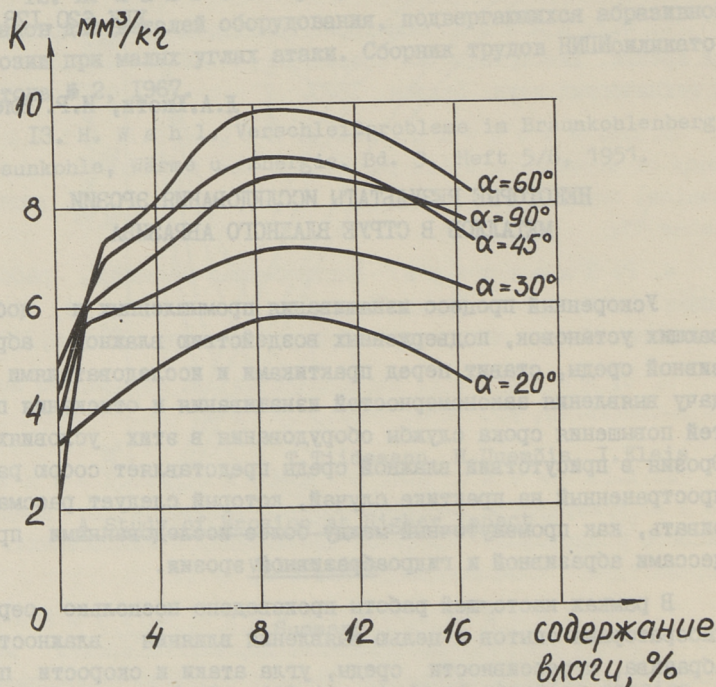
Л.А. Юсти, И.Р. Клейс

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИИ
МЕТАЛЛОВ В СТРУЕ ВЛАЖНОГО АБРАЗИВА

Ускоренный процесс изнашивания промышленных и добывающих установок, подверженных воздействию влажной абразивной среды, ставит перед практиками и исследователями задачу выявления закономерностей изнашивания и отыскания путей повышения срока службы оборудования в этих условиях. Эрозия в присутствии влажной среды представляет собою распространенный на практике случай, который следует рассматривать, как промежуточный между более исследованными процессами абразивной и гидроабразивной эрозии.

В рамках настоящей работы произведено несколько серий лабораторных опытов с целью выявления влияния влажности абразива, агрессивности среды, угла атаки и скорости потока на интенсивность изнашивания торфоперерабатывающего оборудования при комнатной температуре. Опыты проводились на центробежном ускорителе ЦУК-1 [1] с реконструированным питателем. В качестве абразива применялся нормальный песок ГОСТ 6139-70, увлажненный водой, торфяными вытяжками или слабыми растворами органических кислот. Влажность песка в весовых процентах варьировалась в пределах 0...16 %, скорость удара абразивных частиц о поверхность образцов - в пределах 29...82 м/сек. Наряду со сталью Ст.3, принятой за эталон, испытывались в основном стали 0Х17Т (ЭИ645), Х18Н9Т, а также стали 2Х13, 4Х14Н14В2М (ЭИ69) и наплавленное износостойкое покрытие СНГН. Сплав СНГН, разработанный ВНИИТС [2], выпускается по ЦМТУ-08Т-44-68 на никелевой основе с содержанием 14...18 % Cr, 3,2...4,2 % В, 3,5

...4,5 % Si, 0,5...1,0 % C, 1,3...3,0 % Fe, 0,5...0,7 % Mn.
 По данным авторов, этот сплав обладает высокой стойкостью в условиях эрозионного и сильного абразивного воздействия и высоких температур.

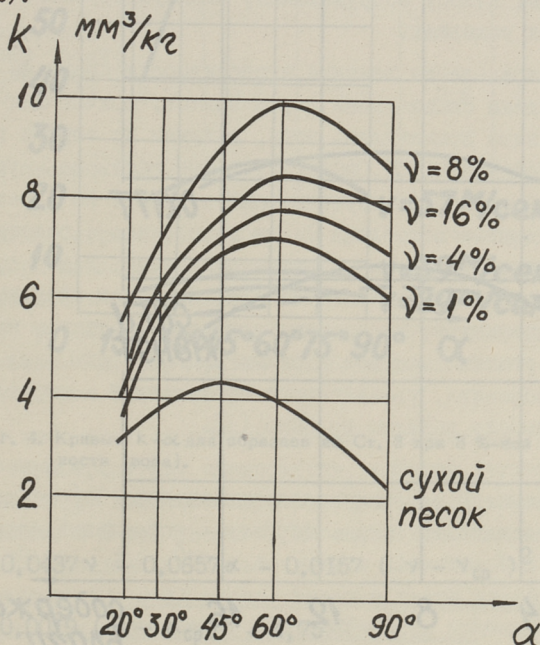


Фиг. 1. Влияние содержания влаги в абразиве на интенсивность изнашивания образцов из Ст. 3. Скорость потока $V = 29$ м/сек.

Под воздействием влажной среды (например, торфяной массы) на поверхности стенок оборудования образуются с высокой скоростью первичные продукты коррозии, которые в основном состоят из гидратов окислов железа. Это приводит к понижению сопротивления металла эрозионному износу, что в свою очередь усугубляется сопутствующими процессами, такими как возможный эффект адсорбционного понижения прочности или межкристаллитной коррозии.

Уже при 1 %-ном содержании влаги (водопроводная вода) в абразиве интенсивность изнашивания Ст.3 превышает соответст-

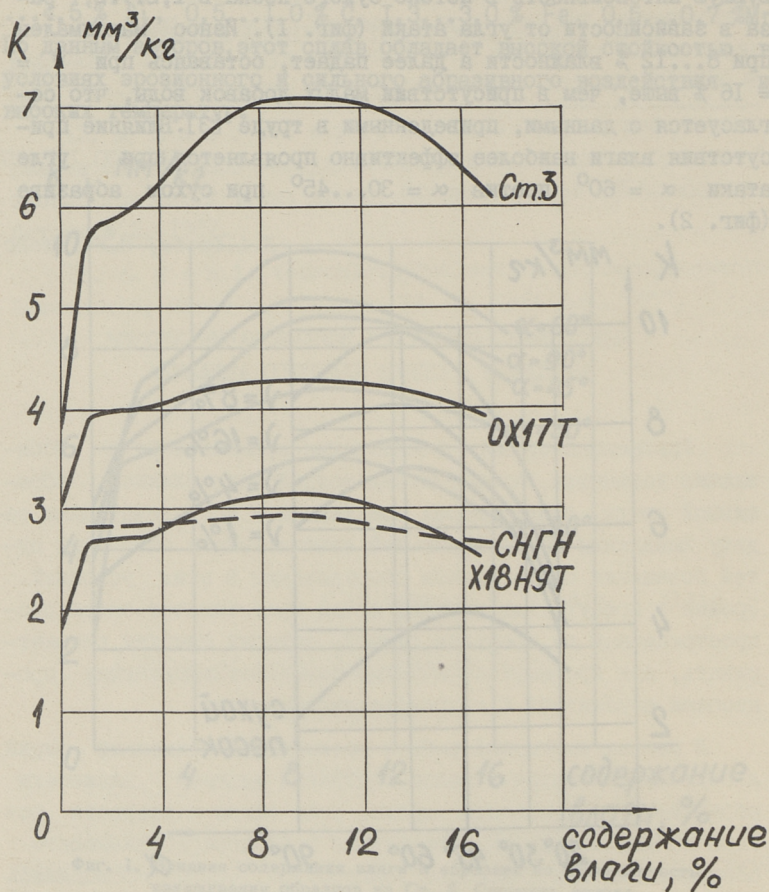
вующую интенсивность в потоке сухого песка в 1,2...2,7 раза в зависимости от угла атаки (фиг. 1). Износ максимален при 8...12 % влажности а далее падает, оставаясь при $\nu = 16\%$ выше, чем в присутствии малых добавок воды, что согласуется с данными, приведенными в труде [3]. Влияние присутствия влаги наиболее эффективно проявляется при угле атаки $\alpha = 60^\circ$ против $\alpha = 30...45^\circ$ при сухом абразиве (фиг. 2).



Фиг. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от угла атаки. Материал образцов - Ст.3, $V = 29$ м/сек.

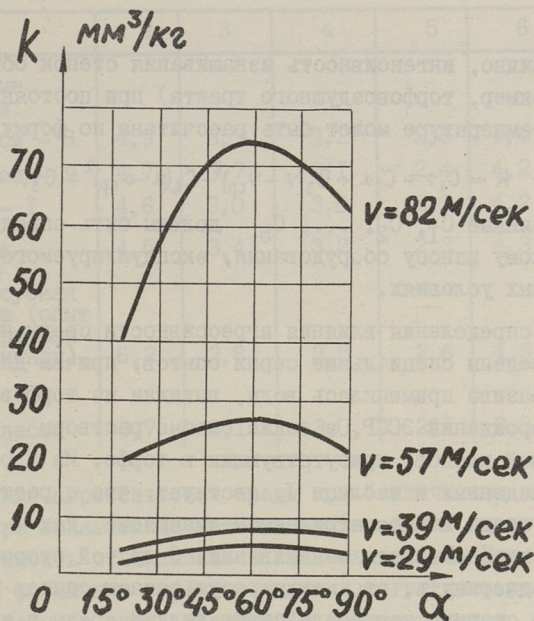
Скачкообразное увеличение интенсивности изнашивания при малых добавках воды наблюдается и у нержавеющей стали (фиг. 3). Износ сплава СМГН мало зависит от влажности.

При повышенных скоростях потока ($\nu = 82$ м/сек) влияние угла атаки проявляется сильнее (фиг. 4).



Фиг. 3. Кривые износа различных материалов в потоке влажного абразива при $V = 29$ м/сек, $\alpha = 30^\circ$.

Результаты, полученные при изнашивании Ст.3 в потоке абразива, увлажненного водой, были обработаны на ЭЦВМ "Минск-22" с целью установления зависимости между влажностью абразива γ , углом атаки α и интенсивностью изнашивания k при постоянной скорости потока $v = 29$ м/сек. В интервале влажностей от 1 до 16 % можно кривые, приведенные на фиг.1, считать достаточно близкими к квадратичной параболе, в соответствии с чем была подготовлена программа. Формула приобретает следующий вид:



Фиг. 4. Кривые $k-\alpha$ для образцов из Ст. 3 при 8 %-ной влажности (вода).

$$k = 0,0437 \gamma + 0,0657 \alpha - 0,0157 (\gamma - \gamma_{\text{cp}})^2 - 0,0019 (\alpha - \alpha_{\text{cp}})^2 + 4,75$$

В этой формуле:

γ_{cp} — средняя влажность абразива в весовых процентах в пределах серии опытов. Для нашей серии

$$\gamma_{\text{cp}} = \frac{1 + 4 + 8 + 10 + 12 + 16}{6} = 8,5 \%$$

α_{cp} — средний угол атаки в градусах. Для нашей серии

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{20 + 30 + 45 + 60 + 90}{5} = 52^\circ$$

k — объемная интенсивность изнашивания образца в mm^3 на килограмм абразива, ударившегося о поверхность образца.

Очевидно, интенсивность изнашивания стенок оборудования (например, торфозовдушного тракта) при постоянной скорости и температуре может быть рассчитана по формуле

$$k = C_1 v + C_2 \alpha + C_3 (v - v_{cp})^2 - C_4 (\alpha - \alpha_{cp})^2 + C_5,$$

где постоянные C_1, C_2, \dots, C_5 должны быть определены по фактическому износу оборудования, эксплуатируемого при аналогичных условиях.

Для определения влияния агрессивности среды на износ были проведены специальные серии опытов, причем для увлажнения абразива применялась вода, вытяжки из торфов различных месторождений ЭССР, а также слабые растворы уксусной и щавелевой кислот, присутствующих в торфе. Из результатов, приведенных в таблице I, явствует, что с ростом кислотности среды в рассматриваемом диапазоне, как правило, растет и интенсивность изнашивания. С другой стороны необходимо подчеркнуть, что между результатами опытов на коррозию при статическом воздействии жидкой среды и на износ в потоке абразива, увлажненного этой средой, корреляционной зависимости найдено не было [4].

Т а б л и ц а I

Зависимость интенсивности изнашивания k [мм³/кг] от увлажняющей среды. Абразив - нормальный песок, $v = 8 \%$, $v = 20$ м/сек, $\alpha = 30^\circ$, $t = 20^\circ \text{C}$

С р е д а	М а т е р и а л о б р а з ц о в					
	Ст.3	OXI7T	2X13	XI8H9T	BTI-0	Наплавка CHГH
I	2	3	4	5	6	7
1. Вода	4,6	3,4	2,9	2,1	4,0	2,6
2. Уксусная кислота:						
1 %	4,9	3,6	3,3	2,3	4,1	3,1
2 %	5,0	3,6	3,5	2,5	4,4	3,5
3 %	5,3	3,7	3,6	2,7	4,5	3,1
3. Щавелевая кислота:						
0,17-н	4,9	3,8	4,1	2,5	4,3	2,6
0,34-н	5,0	3,9	4,3	2,9	4,6	2,2

I	2	3	4	5	6	7
4. Торфяные вытяжки:						
Тостси - 8	4,9	3,3	3,2	2,5	4,4	2,4
Тоотси - 9	4,7	3,7	3,1	2,4	4,2	2,5
Ору - I	4,6	3,0	3,0	2,3	4,2	2,0
Улила	4,5	3,4	3,2	2,3	4,3	2,5
5. 2 % уксусная кислота (опыт с перерывами по 15 минут)	6,2	3,8	3,5	2,6	4,3	3,2
6. Сухой песок	3,7	3,1	3,0	2,1	3,8	2,5

Влияние агрессивности среды при статическом корродировании и при изнашивании металла нельзя также ставить в прямую зависимость от показателя кислотности pH. При одном и том же pH различные торфяные вытяжки могут дать расходящиеся результаты в силу различий в составе кислот, обуславливающих данное значение pH.

При небольших скоростях потока, характерных для оборудования торфобрикетных предприятий, влияние кислотности среды относительно велико. Например, при $v = 29$ м/сек увлажнение абразива 2 %-ной уксусной кислотой взамен воды дает двукратное увеличение интенсивности изнашивания. При высоких скоростях ($v = 82$ м/сек) влияние такой кислотности мало заметно или отсутствует. Интенсивность изнашивания аустенитной стали, титана и сплава СНГН, коррозионно стойких в упомянутых средах, стабильно по отношению к среде в широком диапазоне скоростей.

Для моделирования периодической работы оборудования был произведен дополнительный опыт, в ходе которого 10 кг абразива, увлажненного 2 %-ной уксусной кислотой, было пропущено через испытательную установку порциями по 2 кг с 15-минутными перерывами между ними. В результатах опыта (таблица I) отчетливо проявляется роль коррозии при изнашивании: по сравнению с непрерывным опытом износ Ст.3 увеличился на 24 % и стали ОХ17Т на 2...3 %, в то время как износ стали Х18Н9Т, сплава СНГН и технического титана ВТ1-0 остался на прежнем уровне.

Опыты, проведенные в промышленных условиях, показали перспективность применения износостойких покрытий. После 8,5-месячной работы в наиболее изнашиваемых местах торфозащитного тракта износ образцов с наплавкой СНГН оказался в 5,1...9,5 раз, стали ОХ17Т - 3,1...3,4 раза, а стали Х18Н9Т - 3,4...4 раза меньше износа Ст.3. В соответствии с этим были разработаны предложения по применению упомянутых материалов в оборудовании торфобрикетных предприятий.

Л и т е р а т у р а

1. И.Р. Клейс. Машина для исследования изнашивания свободным абразивом. Труды ТПИ, серия А, № 152, Таллин, 1958.

2. Ю.А. Отрадинский, Т.И. Подойница, Е.И. Январев. Напыление с оплавлением Ni - Cr - В - Si твердых сплавов на детали, работающие в условиях эрозийного износа. Тезисы докл. на респ. научн. конф. по абразивной эрозии. Таллин, 1970.

3. И.Р. Клейс. Некоторые исследования по абразивной эрозии. Автореферат докт. дисс. Таллин, 1971.

4. В.А. Калласт, Л.А. Юксти. О коррозионно-механическом износе оборудования торфобрикетных предприятий ЭССР. Тезисы докл. на межвузовской конф. по коррозии. Таллин, 1971.

5. Н.Д. Томашов. Теория коррозии и защиты металлов. Изд-во АН СССР. М., 1960.

An Experimental Investigation into Erosion
of Metals by Moistened Abrasive Stream

Summary

This paper deals with erosion test data of a number of steels and a hard surfacing alloy by a stream of abrasive moistened with water of weakly acid organic medium. The tests were carried out on a centrifugal-type rig. Results are given for wear rate versus particle velocity, angle of attack and moisture content. Concerning industrial applications in peat briquetting plants, the comparative wear resistance of materials is discussed.

УДК 620.178.16

Ю.А.Харламов, А.Ф.Соколов, Т.А.Паппель

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ИЗНОСУ ДЕТОНАЦИОННЫМ
НАПЫЛЕНИЕМ

Большое значение для износостойкости материалов имеет взаимное отношение твердостей материала и абразивных частиц H_M/H_a . Установлено [1, 2, 3], что использованием износостойких материалов и наплавов при абразивной эрозии можно достичь значительного эффекта, если удастся обеспечить соотношение $H_M > H_a$.

Единственными материалами, обеспечивающими высокую износостойкость деталей в струе минеральных частиц твердостью 7-8 по Моосу пока являются металлокерамические твердые сплавы.

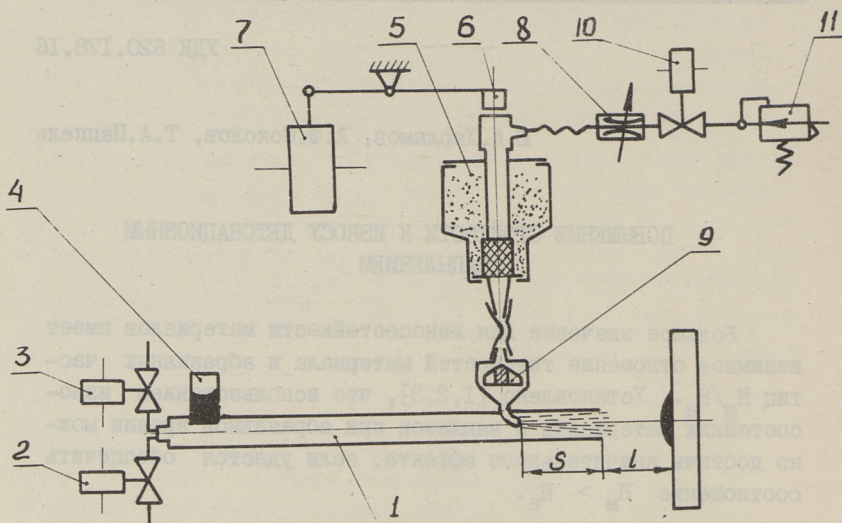
Наиболее универсальными в технологическом отношении способами нанесения защитных покрытий являются методы напыления, позволяющие использовать большую гамму как наносимых, так и покрываемых материалов.

В зарубежной литературе имеются сообщения о том, что наивысшую плотность, прочность, сопротивление изнашиванию, в том числе и абразивному к ударным нагрузкам, обеспечивает метод детонационного напыления [4, 5, 6].

В настоящее время нет работ, посвященных изучению износостойкости детонационных покрытий, тем более в условиях абразивной эрозии.

Кафедрой технологии машиностроения Ворошиловградского машиностроительного института, Северодонецким филиалом НИИХИММАШ и кафедрой деталей машин Таллинского политехни-

ческого института проведены некоторые экспериментальные исследования процесса детонационного напыления и стойкости к износу получаемых покрытий. Схема экспериментальной установки для детонационного напыления изображена на фиг. I.



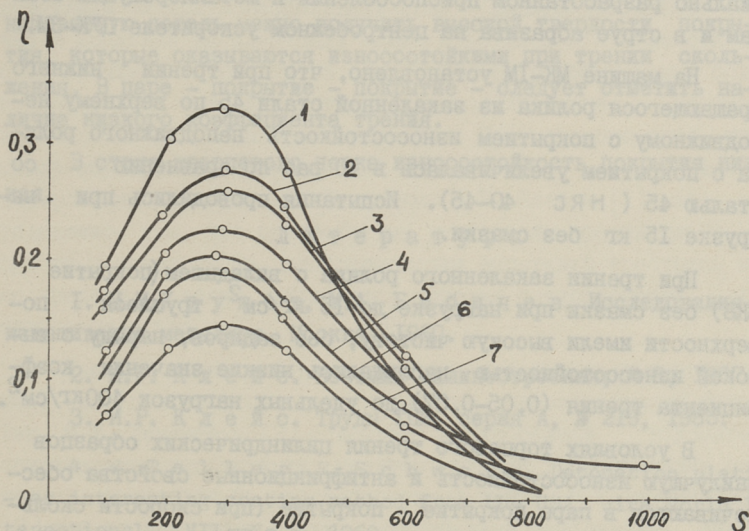
Фиг. 1. Схема экспериментальной установки для детонационного напыления: 1 - ствол, 2,3 - электромагнитные клапаны, соединенные с баллонами ацетилена, кислорода и азота, 4 - свеча зажигания, 5 - бункер с дозирующим устройством, 6 - молоток, 7 - электромагнит, 8 - электромагнитный клапан, 9 - штуцер для ввода порошка в ствол, 10 - дроссель, 11 - регулятор давления, соединенный с баллоном инертного газа (азот или аргон).

Процесс детонационного напыления циклический. Через электромагнитный клапан 2 ствол установки заполняется гремучей смесью (ацетилена и кислорода в соотношении 1:1,25). Доза порошка напыляемого материала струей инертного газа распыляется вдоль оси ствола. При поджигании гремучей смеси электрической искрой процесс детонации в стволе приводит к нагреву и ускорению частиц до скорости 700-800 м/сек и выбрасыванию их на поверхность детали, установленной перед стволом на определенном расстоянии (дистанция напыления).

На поверхности напыляемой детали образуется единичное пятно напыления толщиной 6–10 мкм. После взрыва гремучей смеси ствол продувается азотом для удаления продуктов сгорания через электромагнитный клапан 3 и цикл повторяется сначала.

Основные исследования проводились со стандартным порошком сплава ВК8 с размером частиц 1–2 мкм.

В качестве стволов установки использовались трубы из нержавеющей стали диаметром от 12 до 28 мм и длиной от 1,5 до 2 м. На фиг. 2 приведены графики зависимости коэффициента использования материала η от дистанции напыления l и длины рабочего участка ствола S (см. фиг. I), полученные при использовании ствола диаметром 20 мм и длиной 1800 мм. Доза порошка 100–150 мг вводилась в ствол порцией азота ~ 40 мл при давлении 0,6 атм.



Фиг. 2. Зависимость коэффициента использования материала η от длины рабочего участка ствола S . 1 - дистанция напыления $l = 60$ мм, 2 - 100 мм, 3 - 140 мм, 4 - 180 мм, 5 - 220 мм, 6 - 260 мм, 7 - 300 мм.

Наилучшее использование порошка достигается при вводе его на расстоянии 300 мм от среза ствола. С ростом дистанции напыления коэффициент η пропорционально уменьшается. Максимальная микротвердость покрытий данного состава 1600 кг/мм² при нагрузке 100 г получена при $S = 300$ мм и дистанции напыления 60 мм. Характер изменения микротвердости покрытий с изменением длины рабочего участка ствола в основном повторяет закономерности изменения коэффициента η . Твердость же по Виккерсу для данных покрытий превышала 1100 кг/мм² (при нагрузке 5 кг).

Установлено, что каждому диаметру ствола соответствует оптимальная доза вводимого порошка, при превышении которой не все частицы ускоряются до требуемой скорости.

Оценка износостойкости и антифрикционных свойств детонационных покрытий на основе сплава ВК8 осуществлялась на машине трения МИ-1М, в условиях торцевого трения на специально разработанном приспособлении к металлорежущим станкам и в струе абразива на центробежном ускорителе ЦУК-3М.

На машине МК-1М установлено, что при трении нижнего вращающегося ролика из закаленной стали 45 по верхнему неподвижному с покрытием износостойкость неподвижного ролика с покрытием увеличивалась в 10 раз по сравнению со сталью 45 (НРС 40-45). Испытания проводились при нагрузке 15 кг без смазки.

При трении закаленного ролика с вкладышем (покрытие ВК8) без смазки при нагрузке до 15 кг/см² трущиеся поверхности имели высокую чистоту, без задиrow, наряду с высокой износостойкостью наблюдались низкие значения коэффициента трения (0,05-0,07) до удельных нагрузок 400 кг/см².

В условиях торцевого трения цилиндрических образцов наилучшую износостойкость и антифрикционные свойства обеспечивают в паре покрытие - покрытие (при скорости скольжения 3,14 м/сек коэффициент трения 0,17, интенсивность износа в среднем 0,012 мг/кг км). Сочетание пары трения покрытие-сталь наиболее применимо при высоких скоростях скольжения (свыше 1,6 м/сек).

В струе свободного абразива износостойкость детонационных покрытий низкая при средних и больших углах ата-

ки α (30° и 90°), несмотря на их высокую твердость. При угле атаки $\alpha = 30^\circ$ износостойкость покрытия сравнима с износостойкостью незакаленных сталей, при $\alpha = 90^\circ$ она же значительно отстает от износостойкости последних (скорость струи абразива 50 м/сек, величина зерна кварцевого песка 0,6 до 0,8 мм). Низкая износостойкость испытанных покрытий в условиях абразивной эрозии объясняется прежде всего недостаточной прочностью сцепления между единичными слоями покрытия, что требует дальнейшего совершенствования технологии процесса напыления, а также проведения работ по оценке износостойкости покрытий, полученных при использовании порошков твердых сплавов более крупной зернистости.

З а к л ю ч е н и е

При помощи детонационного напыления порошка ВК8 на изнашиваемую деталь можно получить высокой твердости покрытия, которые оказываются износостойкими при трении скольжения. В паре — покрытие — покрытие — следует отметить наличие низкого коэффициента трения.

В струе кварцевого песка износостойкость покрытия низкая.

Л и т е р а т у р а

1. М.М.Хрущов, М.А. Бабичев. Исследования изнашивания металлов. Москва, 1960.
2. И.Р. Клейс. Вестник машиностроения, № 8, 1967.
3. И.Р. Клейс. Труды ТПИ, серия А, № 219, 1965.
4. W. T e l l e r, E. S c h w a r z. Detonation plating — an interesting coating method from the USA. Wire World International, VII, No 5, 1969.
5. Shooting on metal coatings with a detonation gun. Mach. Shop and Metalwork. Econ., 30, No 11, 1969.
6. H. D. W h i t m i r e. Gun shoots coatings at supersonic speeds. Tool and Manufact. Eng., 62, No 5, 1969.

The Increase of Wear Resistance Due
to Detonation Plating

Summary

Detonation plating of BK 8 carbide powder onto wearing parts allows to obtain high hardness and surface wear resistance to sliding friction.

Between the plated surfaces the coefficient of friction is low.

In a stream of solid particles the plated surfaces show insufficient wear resistance.

УДК 620.178.169

П.О. Сяргва, Л.Э. Вальдма

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ К ЦЕНТРОБЕЖНОМУ УСКОРИТЕЛЮ
ЦУК-ЗМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА АБРАЗИВНЫЙ
ИЗНОС С ДОБАВКОЙ ЖИДКОСТИ

Поверхностное разрушение деталей и узлов машин под воздействием жидкостно-абразивных сред - распространенный случай в практике эксплуатации машин и установок и является частой причиной выхода их из строя. Для разработки новых более износостойких материалов требуется моделирование процесса изнашивания в лабораторных условиях. При моделировании процесса абразивного изнашивания¹ сравнительно часто применяют центробежный ускоритель. По данным И.Р. Клейса [1], это обусловлено, тем, что центробежные ускорители сравнительно просты в конструкции, для проведения испытаний требуется мало времени, а также наблюдается хорошая повторяемость результатов опыта.

Известны также работы о применении ускорителя центробежного типа при испытании материалов на гидроабразивный износ. Так М.М. Тененбаум [2] описывает центробежный ускоритель оригинальной конструкции, предусмотренный для испытания различных материалов на гидроабразивный износ. М.Г. Тимербулатов [3] применял в своих опытах центробежный ускоритель специальной конструкции для моделирования гидроабразивного износа.

¹ Термины по ГОСТ 16429-70.

В работе [4] для создания гидроабразивного потока применялся центробежный ускоритель ЦУК-2, при этом для создания равномерного состава смесей применялся специальный смеситель и сравнительно мелкий абразив. Поскольку у всех вышеуказанных установок питание центрифуги осуществляется заранее приготовленной смесью абразив-вода, то трудно обеспечить равномерное распределение абразива в жидкости, имеется опасность расслаивания, особенно при применении крупного абразива.

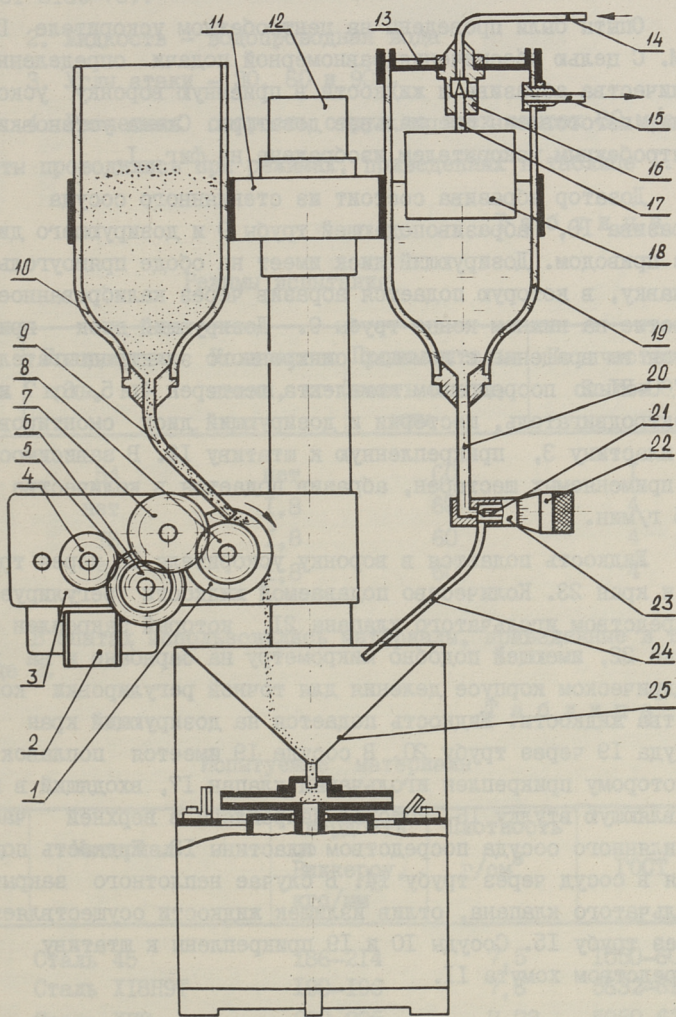
В данной работе проводили опыты по применению центробежного ускорителя ЦУК-3М для изучения влияния присутствия воды на абразивный износ. Значительное влияние влажности абразивного материала на абразивный износ доказал И.Р.Клейс [5].

В предлагаемой работе проводились эксперименты для выяснения изнашивающего воздействия струи воды (без абразива), ускоренной через ротор центробежного ускорителя до теоретической скорости 80 м/сек. При этом заметного износа не наблюдалось, хотя количество пропускаемой воды в 30 раз превышало количество сухого абразива, обычно вызывающего сильный износ.

На основе расчетов и практических наблюдений можно предполагать, что при высоких скоростях водяной поток в канале ротора вытягивается в тонкую пленку, которая при выходе из канала, испытывая сопротивление воздуха, распыляется на мелкие капельки, скорость которых при встрече с образцом намного меньше скорости абразивных частиц.

Такое объяснение подтверждается также специальными измерениями, проведенными для определения силы удара водяной струи. Измерения показали, что с увеличением скорости вращения ротора центробежного ускорителя, сила удара водяной струи остается приблизительно постоянной.

Таким образом, процесс изнашивания, проводимый на маломощной центрифуге, когда количество воды многократно превышает количество абразива и, когда абразивные частицы не увлекаются водой, нельзя рассматривать как гидроабразивный. Вероятнее всего такой процесс является промежуточным между абразивным и гидроабразивным.



Фиг. 1. Схема установки дозирования жидкости и абразива в центробежный ускоритель.

Установка для испытаний

Опыты были проведены на центробежном ускорителе ЦУК-3М. С целью обеспечения равномерной подачи определенного количества абразива и жидкости в приемную воронку ускорителя, изготовлены специальные дозаторы. Схема установки с центробежным ускорителем изображена на фиг. 1.

Дозатор абразива состоит из стеклянного сосуда для абразива 10, абразивоподающей трубы 9 и дозирующего диска I с приводом. Дозирующий диск имеет на ободке прямоугольную канавку, в которую подается абразив через калиброванное отверстие на нижнем конце трубы 9. Дозирующий диск приводится во вращение с помощью синхронного электродвигателя ДС¹ЭС-III 2 посредством комплекта шестерен 4, 5, 6, 7 и 8. Электродвигатель, шестерни и дозирующий диск смонтированы на пластину 3, прикрепленную к штативу I2. В зависимости от применяемых шестерен, абразив подается в количестве 10-75 г/мин.

Жидкость подается в воронку ускорителя 25 через трубу 24 и кран 23. Количество подаваемой жидкости регулируется посредством игольчатого клапана 21, который закреплен в ручке 22, имеющей подобно микрометру на барабане и на цилиндрическом корпусе деления для точной регулировки количества жидкости. Жидкость подается на дозирующий кран из сосуда I9 через трубу 20. В сосуде I9 имеется поплавок I8, к которому прикреплен игольчатый клапан I7, входящий в направляющую втулку I6, которая закреплена в верхней части стеклянного сосуда посредством пластины I3. Жидкость подается в сосуд через трубу I4. В случае неплотного закрытия игольчатого клапана, отлив излишек жидкости осуществляется через трубу I5. Сосуды I0 и I9 прикреплены к штативу I2 посредством хомута II.

Проведение опытов

Изучение влияния присутствия воды на интенсивность абразивного изнашивания проводилось на образцах, изготовленных из материалов, имеющих различные твердости и различную коррозионную стойкость. Условия для испытания выбраны следующие:

1. Абразив - кварцевый песок, зернистостью 0,4-0,63 мм (ГОСТ 6139-70).

2. Жидкость - водопроводная вода

3. Углы атаки - 30, 60 и 90°.

4. Расчетная скорость струи во всех опытах 80 м/сек.

Опыты проводились при режимах, приведенных в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Режимы испытания

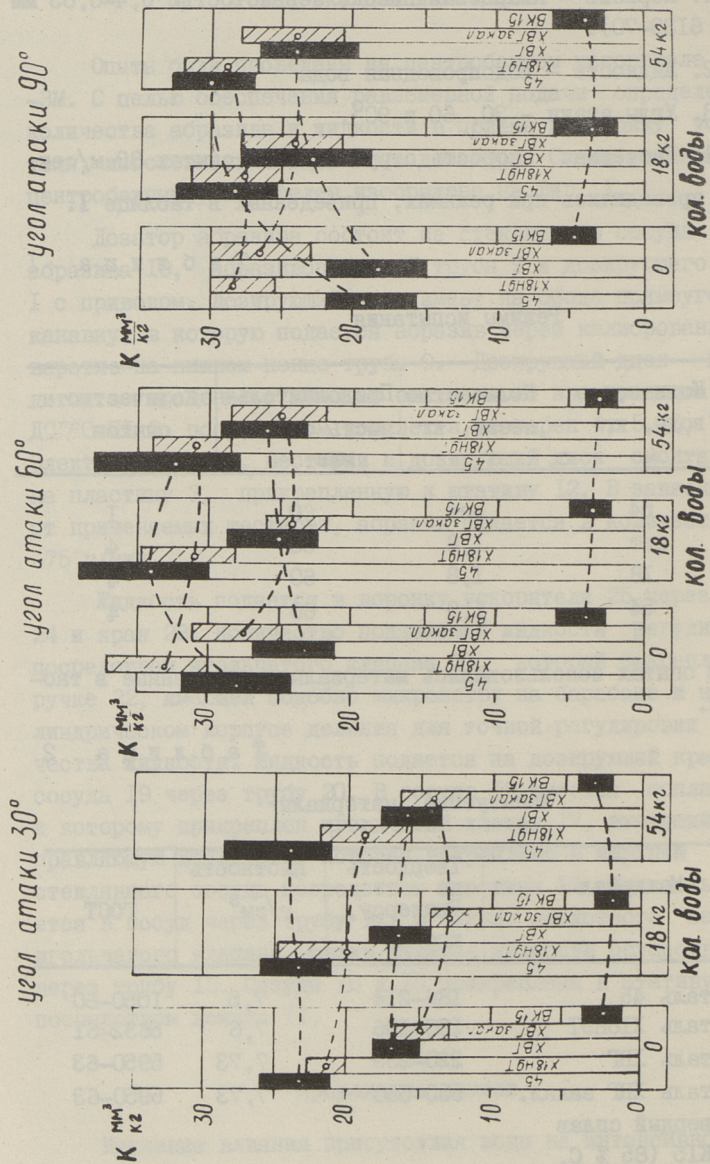
№ п.п.	Количество воды, кг	Количество песка, кг	Продолжительность опыта, мин	Количество опытов
1.	54	нет	60	1
2.	нет	1,8	60	4
3.	18	1,8	60	4
4.	54	1,8	60	4

В опытах использовались материалы, приведенные в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Испытуемые материалы

№ п.п.	Материал	Твердость по Виккерсу, кгс/мм ²	Плотность г/см ³	ГОСТ
1.	Сталь 45	186-214	7,5	1050-60
2.	Сталь Х18Н9Т	190-196	7,6	5632-61
3.	Сталь ХВГ	220-235	7,73	5950-63
4.	Сталь ХВГ закал.	550-590	7,73	5950-63
5.	Твердый сплав ВК15 (85 % С, 15 % Со)	1052	13,7	



Фиг. 2. Зависимость интенсивности абразивного изнашивания различных материалов от количества подаваемой воды при постоянном количестве подаваемого абразива (1,8 кг.) в струе.

На каждом режиме испытывались одновременно по 3 образца из каждого материала, установленных под углом атаки соответственно 30, 60 и 90°.

Поверхность образцов соответствовала 8-9 классу чистоты по ГОСТ 2789-59. Износ определяли взвешиванием на аналитических весах с точностью до 0,2 мг.

Результаты опытов

Образцы, подвергаемые воздействию струи воды без абразива, показали потерю веса от 0-0,3 мг, т.е. потеря веса от износа лежит в пределах погрешности при взвешивании.

Результаты опытов в струе песка и песка с водой приведены на фиг. 2.

На диаграммах столбики изображают интенсивность объемного абразивного изнашивания в зависимости от количества воды в смеси при постоянном количестве песка (1,8 кг). Диаграммные группы изображены отдельно при углах атаки 30, 60 и 90°. В верхних частях каждого столбика изображено поле разброса результатов четырех опытов (доверительные интервалы). Средние арифметические отмечены кружками. Три столбика, изображающие интенсивности изнашивания одного и того же материала, соединены штриховой линией, показывающей интенсивности изнашивания в зависимости от количества воды в смеси при постоянном количестве песка.

Сравнивая интенсивности изнашивания, полученные при различных условиях испытания и учитывая разброс результатов, можно заключить, что при угле атаки 30° добавка воды в некоторой мере изменяет интенсивность изнашивания сталей по сравнению с износом в безводной струе, но изменение количества воды в струе в пределах режимов опытов практически никакого влияния не имеет.

По результатам опытов заслуживает внимания тот факт, что интенсивность изнашивания водой стали 45 и ХВГ при углах атаки 60 и 90° увеличивается, а сталей Х18Н9Т и ХВГ закаленной, наоборот, уменьшается. При этом изменение интенсивностей имеет одинаковую величину по отношению к полю разброса одиночных опытов. Это обстоятельство требует дополнительного исследования.

Максимальная интенсивность изнашивания твердого сплава ВК15, при опытах как с водой, так и без воды одинакова при углах атаки 60 и 90°. То обстоятельство, что в струе сухого абразива интенсивности изнашивания твердого сплава ВК15 при углах атаки 60 и 90° приблизительно равны подтверждается данными, приведенными в работе [6].

В ы в о д ы

1. При скорости струи абразивных частиц 80 м/сек и углах атаки около 30° добавка воды практически не изменяет интенсивности изнашивания испытываемых материалов. Такая закономерность действительна также для твердого сплава ВК15 при углах атаки 60 и 90°.

2. Сравнение интенсивностей изнашивания сталей в абразивной струе со скоростью 80 м/сек и углах атаки 60 и 90° не позволяет сделать однозначного вывода о равенстве износов с применением воды и без нее. Этот вопрос требует дополнительного исследования.

Л и т е р а т у р а

1. И.Р. Клейс. Центробежный ускоритель ЦУК-3М для определения относительной износостойкости материалов при абразивной эрозии. Труды ТПИ, серия А, № 294, 1970. Износ, усталость и коррозия металлов IV, стр. 23-33.

2. М.М. Тененбаум. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин, М., 1966, стр. 252-268.

3. М.Г. Тимеербулатов. Исследование сопротивляемости материалов гидроабразивному износу на лабораторных стендах. Труды ЦНИИТМаш, № 46-47, 1964, стр. 126-141.

4. У.Х. Муштейс, И.Р. Клейс, Х.Х. Уемныйс. О возможностях моделирования гидроабразивного изнашивания. Труды ТПИ, серия А, № 322, 1972. Износ, усталость и коррозия металлов, У, стр. 71-77.

5. И.Р. Клейс. Некоторые исследования по абразивной эрозии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Ротапринт ТПИ, Таллин, 16-17

6. Л.Э. В а л ь д м а, Ю.Ю. П и р с о. Закономерности абразивного износа некоторых материалов мазутных форсунок. Труды ТПИ, серия А, № 322, 1972. Износ, усталость и коррозия металлов, У, стр. 31-43.

P.Särgava, L.Valdma

Anlage zum Zentrifugalbeschleuniger ZUK-3M
für Sanderosionsprüfungen an Werkstoffen mit

Wasser

Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel werden die Verwendungsmöglichkeiten einer dosierenden Anlage zur Zentrifugalverschleißmaschine ZUK-3M beschrieben. Die Anlage ist für Versuche mit einem Strahl aus Gemisch von Abrasiv und Flüssigkeit bestimmt.

Zugleich werden die Ergebnisse einiger Versuche an Stählen 45, X18H9T, XBT und gehärtetem XBT und Sinterhartmetall BK15 vorgeführt.

УДК 621.181.7:621.43.037.3:620.193.15

Л.Э. Вальдма, М.Х. Нанитс

ТОПОГРАФИЯ ИЗНОСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ

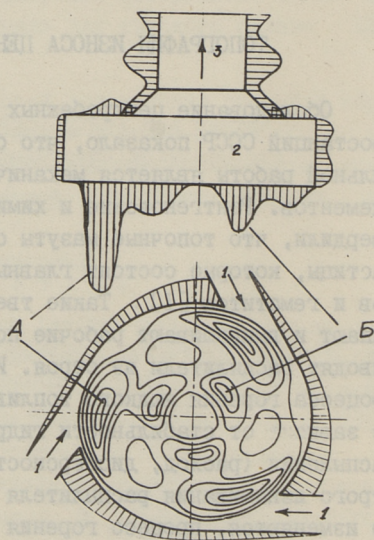
Обследование центробежных форсунок ряда тепловых электростанций СССР показало, что основной причиной их нестабильной работы является механический износ распыливающих элементов. Рентгеновские и химические анализы мазутов подтвердили, что топочные мазуты содержат твердые минеральные частицы, которые состоят главным образом из твердых кварцитов и гематитов [1]. Такие твердые абразивные частицы царапают и выкрашивают рабочие поверхности металла и быстро выводят распылители из строя. Известно, что эффективность процесса горения жидкого топлива в топке в значительной мере зависит от стабильности гидравлических характеристик распыления (расход, дисперсность распыла). В результате быстрого изнашивания распылителя эти характеристики непрерывно изменяются, процесс горения ухудшается и к.п.д. котлов снижается. В связи с этим детали распылителя приходится часто менять. До настоящего времени еще мало обращали внимания на повышение стабильности работы распыливающих устройств и поэтому в литературе работ по износу распылителей, кроме проведенных в ТПИ [1, 2, 3] не удалось найти.

Тем не менее, как показали опыты, повышение износостойкости распылителей имеет существенное экономическое значение. Например, предварительные оценки на Литовской и Конаковской ГРЭС показали, что применение твердосплавных распылителей повышает к.п.д. котла на 0,1...0,3%. Это дало бы годовую экономию в СССР 150...500 тыс. тонн мазута или 2,8...8,5 миллионов рублей.

С другой стороны, повышение износостойкости распылителей вызывает ряд технологических и конструктивных трудностей. Поэтому для разработки конструктивных и технологических основ, а также выбора оптимальных материалов для изготовления распыливающих элементов с повышенной износостойкостью необходимо изучить общую топографию износа их рабочих поверхностей и выяснить причины образования областей с различной глубиной.

I. Распределение износа на элементах распылителя

Схема нормализованного по ОСТу 24.836.01 центробежного распылителя [4] с эпюрами износа показана на фиг. 1. Распылитель состоит из входных каналов I, камеры закрутки 2 и сопла 3. Внешний осмотр элементов распылителей, побывавших в эксплуатации, показывает, что наиболее интенсивно изнашиваются камера закрутки потоков (дно и боковые стенки), а также сопловое отверстие (см. фиг. 2). На входных каналах износ практически незаметен.

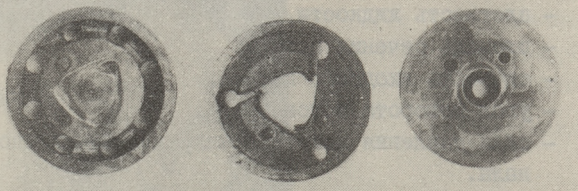


Фиг. 1.
Схема нормализованного центробежного распылителя с эпюрами износа.

I. Камера закрутки

На поверхности дна камеры закрутки (см. фиг.

I) видны два характерных участка, где образуются глубокие следы износа — в области встречи двух соседних потоков при входе в камеру (область А) и в центре камеры — вокруг воздушного вихря (область Б).



Фиг. 2.

Изношенные элементы центробежного распылителя:

- а) дно камеры закрутки,
- б) боковые стенки камеры и входные каналы,
- в) сопло.

Основным положением теории центробежного распылителя для идеальной жидкости является сохранение момента количества движения частиц [5] т.е. $u \cdot r = \text{idem}$, или для реальной жидкости $u \cdot r^n = \text{idem}$ (u — тангенциальная скорость, r — текущий радиус камеры, n — постоянная, зависящая от свойств жидкости). Эрозионный износ K в потоке абразива обычно выражается формулой $K = C \cdot v^m$, где C — постоянная, v — скорость потока, m — постоянная, обычно $m > 2$. Отсюда, главным энергетическим фактором износа является скорость частиц, что вполне естественно. Таким образом, по теории каждому значению радиуса дна камеры соответствует некоторая постоянная тангенциальная скорость жидкости и следовательно, неизменная величина износа. Фактические картины износа на фиг. 1 и 2 этого не подтверждают. Теория не учитывает число входных каналов и взаимодействия отдельных потоков, которые сильно влияют на картину износа. Сильный износ вокруг центра камеры обусловлен, по-видимому, тангенциальной скоростью потока, которая имеет в этой области максимальную величину, согласно закону сохранения момента количества движения частиц.

Глубина износа боковой поверхности камеры возрастает с увеличением угла поворота потока частиц (см. фиг. 1). Это вызвано силой давления частиц на боковую поверхность, которая возрастает с увеличением угла поворота согласно правилу импульса

$$P_x = \rho f v_x^2 (1 - \cos \alpha),$$

где ρ — плотность жидкости,
 f — площадь сечения потока,
 v_x — скорость входного потока,
 α — угол поворота потока,
 P_x — сила давления потока в направлении входного канала.

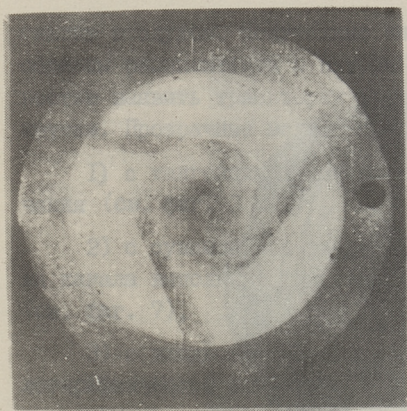
Возрастающая сила давления вызывает возрастающий износ с увеличением угла поворота, а также деформирует соседний поток при встрече с ним. Одновременно следующий поток защищает стенку камеры от действия атакующего потока.

2. Сопло

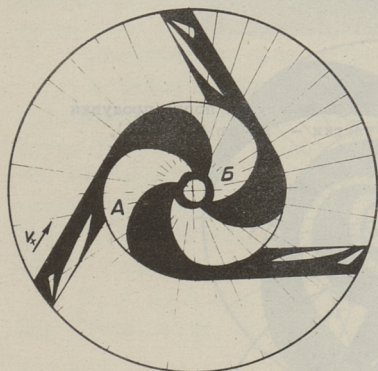
Износ соплового отверстия характеризуется приобретением бочкообразной формы с фаской на выходе, в которой появляются винтовые канавки. Угол фаски при выходе близок к углу раскрытия факела (см. фиг. I). Образование бочкообразности при изнашивании можно описать следующим образом. При переходе из камеры закрутки в сопло жидкость преодолевает местное сопротивление, в области "бочки" поток сужается и у боковой поверхности соплового отверстия образуется так называемая "мертвая зона", которая типична для сопел и заполнена вихрями. Скорость течения суженного потока увеличена, в этом сечении сопла обычно образуется вакуум и в этом случае возможно образование кавитационных явлений, которые совместно с твердыми частицами вызывают усиленный износ и образование бочкообразности.

II. Выявление траектории входящих потоков жидкости в камере закрутки

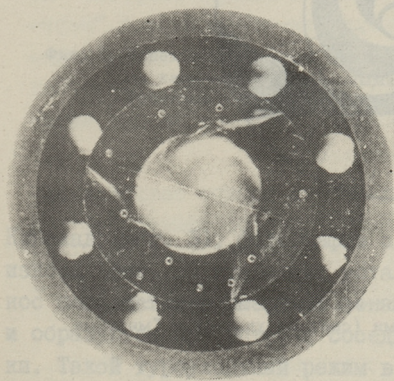
Для получения более полного представления о явлениях, имеющих место в различных областях износа в камере закрутки, были проведены скоростные кино съемки с прозрачными моделями. Для съемки использовались кинокамеры Pentazet — 35 скорость съемки 2000 кадров в секунду. Для лучшей видимости в качестве рабочей жидкости использовалась вода, смешанная со



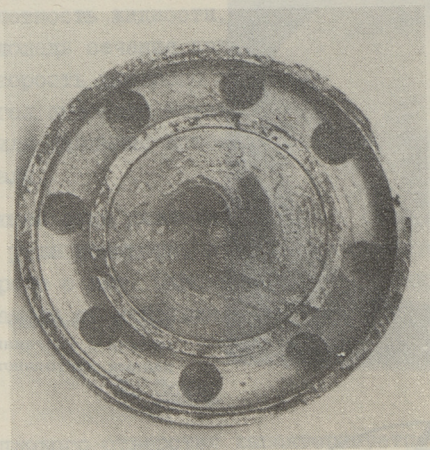
Фиг. 3. Кинокадр с прозрачной модели с тангенциальными каналами постоянного сечения.



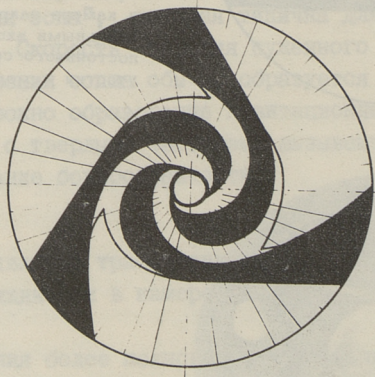
Фиг. 4. Траектория потоков жидкости в камере закрутки с тангенциальными входными каналами постоянного сечения (светлые участки - мертвые зоны).



Фиг. 5. Слабоизношенная полированная поверхность для камеры закрутки после на турных испытаний (светлые участки - "мертвые зоны").



Фиг. 6. Окрашенное мазутом дно камеры закрутки после продувки водой на стенде (темные участки - "мертвые зоны").



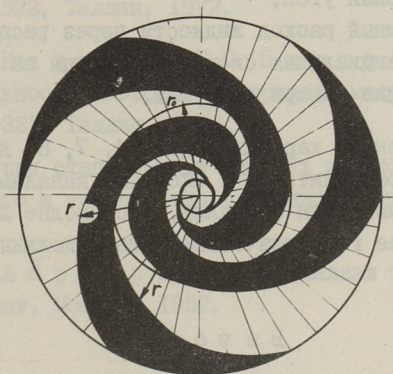
Фиг. 7. Траектория потоков жидкости в камере закрутки с сужающимися входными каналами (светлые участки - "мертвые зоны").

сжатым воздухом. Полученные кинокадры с моделей, а также образцы распылителей в натуре позволили с достаточной точностью выявить траектории отдельных потоков в камере закрутки. Прозрачные модели были изготовлены трех типов:

1) с тангенциальными входными каналами постоянного сечения (см. фиг. 3 и 4),

2) с сужающимися входными каналами, причем левая стенка канала выполнена тангенциальной, правая – криволинейной (см. фиг. 7),

3) с входными каналами, стенки которых выполнены по логарифмической спирали (см. фиг. 8).



Фиг. 8. Траектория потоков жидкости в камере закрутки с входными каналами, выполненными по логарифмической спирали (светлые участки – "мертвые зоны").

Кинокадр (фиг. 3), фотографии с натуры (фиг. 5 и 6) и рельеф износа (фиг. 1) позволяют установить, что максимальный износ появляется в "мертвых зонах", которые заполнены вихрями и образуются при встрече соседних потоков в камере закрутки. Такой турбулентный режим в "мертвых зонах" обычно приводит к кавитационным явлениям, которые резко повышают аб-

разивный износ в этих зонах. Если сравнить разные варианты прозрачных моделей, то можно установить, что "мертвые зоны" являются минимальными у моделей, где каналы исполнены по логарифмической спирали (см. фиг. 8).

Теоретически можно доказать, что частицы имеют в камере закрутки траектории по логарифмической спирали согласно формуле

$$r = r_0 e^{-k\varphi},$$

где

$$k = \frac{Q}{2\pi r_0 u_0 h_0},$$

где r — расстояние точки стенки канала от центра камеры,

r_0 — радиус камеры,

φ — полярный угол,

Q — объемный расход жидкости через распылитель,

u_0 — тангенциальная скорость частицы на радиусе r_0 ,

h_0 — глубина камеры закрутки.

Вышеприведенные картины (фиг. 4, 7, 8) доказывают целесообразность распылителей с входными каналами, выполненными по логарифмическим спиральям, что вполне логично, так как в этом случае гидравлические потери должны быть минимальными.

В ы в о д ы

1. Области максимального износа в камере закрутки потока и сопла центробежного распылителя образуются в "мертвых зонах" (при встрече соседних потоков, при входе в камеру и при сужении потока в сопловом отверстии) и в зонах максимальной скорости вокруг воздушного вихря на дне камеры закрутки.

2. Для уменьшения "мертвых зон" в камере закрутки необходимо изготавливать входные каналы по логарифмической спирали или увеличивать по возможности число каналов. Переход в сопло выполнять плавным с минимальным гидравлическим сопротивлением.

3. В "мертвых зонах", где наблюдается сильный износ, имеется вероятность появления кавитации.

4. Для выяснения значения кавитационных явлений при изнашивании распылителя, необходимо проводить дополнительные измерения с определением количественных гидравлических параметров в характерных областях износа. Микрофотографии, снятые в различных зонах износа качественно трудно различить.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Э. В а л ь д м а, Л.Р. П а к к а с, Э.Х. А р у м э э л ь, В.А. К о з ь я к о в. А б р а з и в н о с т ь т о п о ч н о г о м а з у т а. Труды ТПИ, № 322, Таллин, 1972.

2. Л.Э. В а л ь д м а, Ю.Ю. П и р с о. О возможности моделирования изнашивания материалов мазутных форсунок. Труды ТПИ, № 322, Таллин, 1972.

3. Л.Э. В а л ь д м а, Ю.Ю. П и р с о. Закономерности абразивного износа некоторых материалов мазутных форсунок. Труды ТПИ, № 322, Таллин, 1972.

4. Форсулки стационарных паровых котлов. Мин. тяж. энергетического и транспортного машиностроения. Москва, 1970.

5. Г.Н. А б р а м о в и ч. Прикладная газовая динамика. Гостехиздат, Москва, 1957.

L.Valdma, M.Nanits

Die Verschleißtopographie des Drallzerstäubers

Zusammenfassung

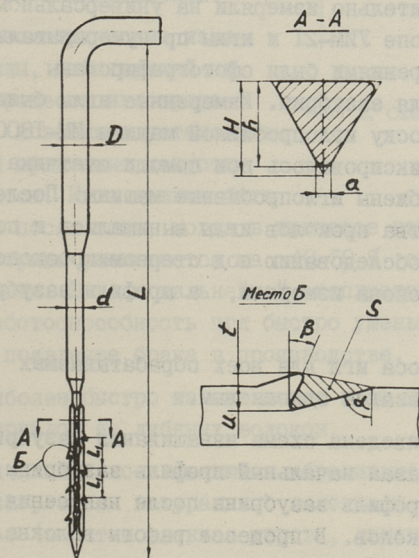
Im vorliegenden Beitrag wird die vollständige Verschleißverteilung der Elemente des Drallzerstäubers dargelegt. Mit der Schnellkinokamera werden die Bewegungslinien der eintretenden Flüssigkeitsstrahlen erforscht. Es wurden auch die in der Drallkammer entstehenden "Todeszonen" als Hauptquellen des starken Verschleißes betrachtet.

УДК 677.066.05

А.Р. Мяги

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ПРОБИВНЫХ ИГЛ

Иглопробивной способ производства нетканых текстильных материалов – новая прогрессивная технология, позволяющая значительно повышать производительность труда. При этом способе волокнистый холст закрепляется, уплотняется и превращается в готовый материал без применения дополнительных ниток или связующих веществ на иглопробивных машинах. Рабочим органом иглопробивной машины является пробивная игла.



Фиг. 1. Пробивная игла.

На фиг. 1 изображен общий вид иглы, ее поперечное сечение

и характерные размеры зазубрин. В процессе работы размеры зазубрин, вследствие износа, меняются и количество волокон, которые игла способна захватить, уменьшается. Это непосредственно отражается на свойствах обрабатываемого материала. При выработке материалов, к качеству и внешнему виду которых предъявляются повышенные требования, как например, покрытия для полов, синтетический войлок для бумагоделательных машин и т.п., износостойкость игл приобретает первостепенное значение.

Исследование износа игл в производственных условиях позволило выявить общий характер износа и показало, что срок службы игл колеблется в пределах от $0,6 \cdot 10^6$ до $15 \cdot 10^6$ проколов.

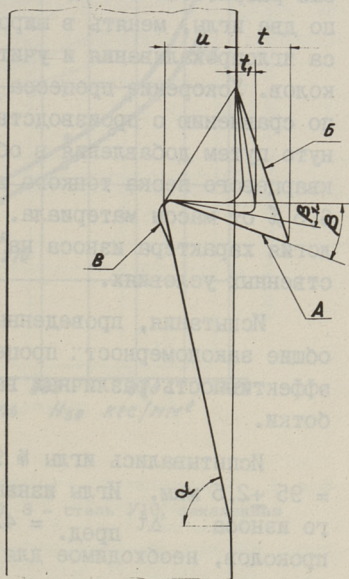
Исследование было проведено на экспериментальной базе Конструкторского бюро Министерства легкой промышленности Эстонской ССР и на Казанском льнокомбинате им В.И. Ленина.

Для каждого опыта была взята партия стандартных пробивных игл [I] в количестве не менее 30 штук из числа тех, которые применялись на данном агрегате. Размеры каждой зазубрины предварительно измеряли на универсальном измерительном микроскопе УИМ-2I и иглы пронумеровывались. Одновременно с измерениями были сфотографированы теневые изображения профиля зазубрин. Измеренные иглы были вставлены в игольную доску иглопробивной машины ИМ-1800. Количество проколов фиксировалось при помощи счетчика проколов, которыми снабжены иглопробивные машины. После определенного количества проколов иглы вынимались и подвергались визуальному обследованию под стереомикроскопом МБС-I. Размеры зазубрин снова измеряли, а профили зазубрин фотографировали.

Характер износа игл для всех обрабатываемых нетканых материалов оказался одинаковым.

На фиг. 2 приведена схема изнашивания зазубрин. Толстыми линиями показан начальный профиль зазубрины, а тонкими линиями — профиль зазубрины после нанесения определенного числа проколов. В процессе работы волокна трутся по поверхностям А и Б, вследствие чего уменьшаются высота

зазубрины "t" и угол наклона зазубрины "β", которые через "n" проколов приобретают значения "t₁" и "β₁". Глубина зазубрины "u" и угол дна подрезки "α" практически не меняются и лишь при полностью изношенных зазубринах в месте, обозначенном на фиг. 2 буквой В, появляется углубление. После достаточно большого числа проколов зазубрина полностью изнашивается и вместо зазубрины появляется выемка, выступающая часть зазубрины отсутствует, t = 0 мкм и β = -60 ÷ -85°. Очевидно, такая зазубрина вообще не способна захватить с собой волокна и иглы должны быть заменены до того, когда износ достигает такой величины.



Фиг. 2. Схема изнашивания зазубрин.

Тензометрические измерения силы, действующей на иглу в процессе иглопрокалывания, позволили установить критерий предельно допустимого износа. Иглы должны быть заменены после того, когда в процессе износа высота их первой зазубрины уменьшается на 40-50 % от ее первоначального значения. В ходе дальнейшей эксплуатации, вследствие износа, работоспособность игл быстро уменьшается, что может вызвать появление брака в производстве.

Наиболее быстро изнашиваются иглы при обработке тяжелых материалов из лубяных волокон.

Причиной износа являются абразивные частицы SiO₂, которыми загрязнены натуральные волокна и особенно низкосортное сырье (восстановленная шерсть, льняные отходы) и TiO₂, которую вводят в качестве матирующего вещества в химические волокна. Наибольшее содержание частиц SiO₂ - до 0,25 % - наблюдается в нетканых материалах из лубяных воло-

кон, при выработке которых процесс изнашивания игл протекает наиболее интенсивно.

Для проведения ускоренных лабораторных исследований был разработан стенд, позволяющий одновременно испытывать по две иглы, менять в широком диапазоне параметры процесса иглопрокалывания и учитывать количество сделанных проколов. Ускорение процесса изнашивания в 100 раз и более, по сравнению с производственными условиями, было достигнуто путем добавления в обрабатываемый нетканый материал кварцевого песка тонкого помола в количестве не менее 6,5 % от массы материала. При этом сохранялась полная аналогия характера износа на стенде с наблюдаемым в производственных условиях.

Испытания, проведенные на стенде, позволили выявить общие закономерности процесса изнашивания игл и оценить эффективность различных вариантов упрочнения и термообработки.

Испытывались иглы № 90 с высотой первой зазубрины $t = 95 \pm 2,5$ мкм. Иглы изнашивались до предельно допустимого износа $\Delta t_{\text{пред.}} = 42$ мкм и определяли количество проколов, необходимое для достижения такого износа.

Относительная износостойкость ε определялась из соотношения

$$\varepsilon = \frac{n_2}{n_1},$$

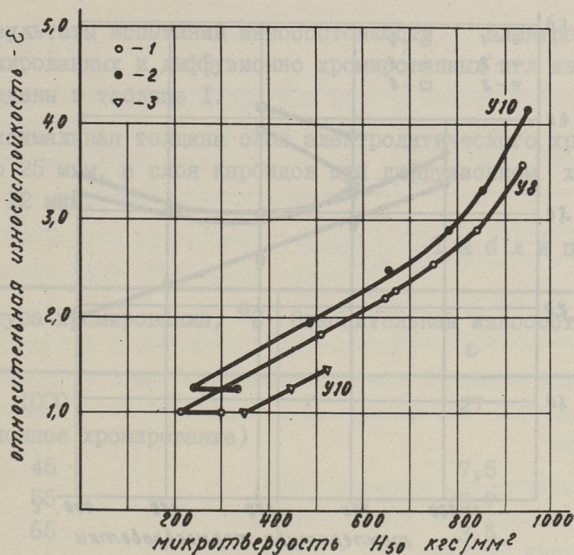
где n_1 — число проколов, необходимое для достижения предельного износа эталонной иглы из отожженной стали У8,

n_2 — то же, для испытываемой иглы.

На фиг. 3 приведены результаты испытаний износостойкости игл из стали У8 и У10, закаленных в защитной атмосфере (эндотгаз) и в окисляющей атмосфере после термообработки в течение 60 минут при различных температурах.

Полученные результаты хорошо согласуются с основными законами абразивного изнашивания [2]:

I. С повышением микротвердости материала его износостойкость повышается, причем при отношении $H_{\text{мат.}} : H_{\text{абр.}} < 0,6$



Фиг. 3. Износостойкость стальных игл
 1 - сталь У8, 2 - сталь У10, 3 - сталь У10, закаленная
 в защитной атмосфере.

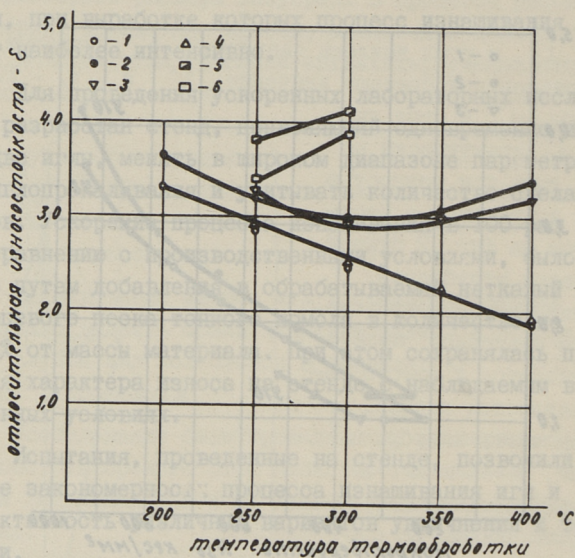
зависимость $\epsilon - H$ имеет линейный характер, а при отношении $H_{\text{мат.}} : H_{\text{обр}} \geq 0,6$ начинается отклонение износостойкости от линейной связи с твердостью. Такие же результаты получены при исследовании изнашивания сталей на песчаной шкурке [3].

2. С повышением содержания углерода износостойкость повышается - кривая стали У10 лежит выше кривой стали У8. Закалка игл в окисляющей атмосфере приводит к выгоранию углерода и к значительному снижению износостойкости (нижняя кривая на фиг. 3).

3. Износостойкость отожженных и наклепанных игл одинакова (горизонтальные линии на фиг. 3).

На фиг. 4 приведены результаты испытаний износостойкости никелированных игл.

Поскольку износостойкость игл с гальваническими и химическими покрытиями зависит не только от микротвердости покрытия, но и от твердости основного металла игл, которая



Фиг. 4. Износостойкость никелированных игл
 1 — сталь У10 без покрытия, 2 — химическое никелевое покрытие 15 мкм, 3 — электролит. никелевое покрытие 20 мкм, 4 — электролит. никелевое покрытие 10 мкм, 5 — электролит. никелевое покрытие 20 мкм; термообработка 400°С + закалка и отпуск, 6 — электролит. никелевое покрытие 20 мкм; термообработка — закалка и отпуск.

уменьшается с повышением температуры отпуска, а сама твердость покрытия неодинаковы по толщине, то в этих случаях вместо диаграммы $\varepsilon - H$ результаты опытов правильнее представить в координатах: относительная износостойкость — температура отпуска. На фиг. 4 нижняя кривая характеризует износостойкость игл из стали У10 без покрытия. Как видно, при толщине покрытия до 10 мкм износостойкость игл не повышается. При более толстых покрытиях, начиная с температуры 300°С, в связи со значительным повышением микротвердости покрытия, износостойкость никелированных игл повышается. Иглы, которые закалены после нанесения покрытия, имеют большую износостойкость, особенно после предварительной термообработки при 400°С. Другие варианты никелевых покрытий дают в интервале температур 250 — 300°С, что обеспечивает оптимальные механические свойства пробивных игл, незначительное повышение износостойкости.

Результаты испытаний износостойкости электролитически хромированных и диффузионно хромированных игл из стали У8 приведены в таблице I.

Максимальная толщина слоя электролитического хрома была около 25 мкм, а слоя карбидов при диффузионном хромировании - 12 мкм.

Т а б л и ц а I

Температура хромирования, °С	Относительная износостойкость, ε
1000 (диффузионное хромирование)	27
45	7,5
55	5,7
65	3,5
У8 (нехромированные после закалки и отпуска при 300 °С	2,3

Как видно из таблицы I, повышение микротвердости осадков электролитического хрома с понижением температуры хромирования, приводит к увеличению износостойкости игл. Диффузионное хромирование, вследствие высокой микротвердости слоя карбидов 1600-1800 кгс/мм², что значительно превышает твердость абразивных частиц SiO₂ - 1200 кгс/мм², приводит к резкому повышению износостойкости игл.

Испытания хромированных, никелированных и диффузионно-хромированных игл показали, что все эти способы упрочнения игл позволяют повышать износостойкость игл. При увеличении толщины покрытия или толщины слоя карбидов при диффузионном хромировании и его микротвердости, износостойкость поверхностного слоя игл повышается.

Общая износостойкость упрочненных игл зависит как от свойств упрочненного поверхностного слоя, так и от концентрации углерода в основном металле и связанной с этим микротвердостью сердцевины иглы.

Т а б л и ц а 2

Материал, термообработка, способ упрочнения	Относительная износостойкость ε_1
Сталь У8, отпуск при 300 °С	1,0
Сталь У8, отпуск при 250 °С	1,1
Сталь У10, отпуск при 300 °С	1,1
Сталь У10, отпуск при 250 °С	1,3
Химическое никелирование, термообработка при 300 °С, толщина слоя никеля 15 мкм	1,3
Электролитическое никелирование, термообработка при 300 °С, толщина слоя никеля 20 мкм	1,3
Электролитическое никелирование с последующей закалкой и термообработкой при 300 °С, толщина слоя никеля 20 мкм	1,8
Электролитическое хромирование при 45 °С, толщина слоя хрома 25 мкм	2,5
Диффузионное хромирование, толщина слоя карбидов 12 мкм	12

В таблице 2 приведена относительная износостойкость ε_1 пробивных игл при различных вариантах термообработки и упрочнения, по сравнению с иглами из стали У8, отпущенными при 300 °С в течение 60 минут. В таблицу включены только наиболее целесообразные варианты упрочнения игл, которые позволяют получить достаточную механическую прочность игл.

Как видно из таблицы 2, наиболее перспективным видом упрочнения пробивных игл является диффузионное хромирование, которое обеспечивает повышение износостойкости игл до 12 раз по сравнению с иглами из стали У8.

В ы в о д ы

1. Изучен характер и причины износа пробивных игл в лабораторных и производственных условиях. Показано, что иглы изнашиваются абразивными частицами SiO_2 и TiO_2 , содержащимися в обрабатываемых волокнах.

2. Результаты стендовых испытаний хорошо согласуются с основными законами абразивного изнашивания.

3. Наиболее перспективным способом упрочнения пробивных игл является диффузионное хромирование, которое обеспечивает повышение износостойкости игл до 12 раз по сравнению с закаленными и отпущенными при 300°C иглами из стали У8.

Л и т е р а т у р а

1. А.Р. М я г и. Параметры игл для иглопробивных машин. "Текстильная промышленность", № 10, 1972.

2. М.М. Х р у щ о в, М.А. Б а б и ч е в. Исследование изнашивания металлов. М., Изд. АН СССР, 1960.

3. М.М. Т е н е н б а у м. Лабораторная оценка износостойкости сталей при трении о песчаную шкурку. "Вестник машиностроения", № 8, 1956.

A Study of Felting Needle Wear

Summary

The results of the study of felting needles wear in laboratory and in industrial conditions are described in this paper.

Wear resistance of chrome plated, nickel plated and diffusion chromium hardened needles was studied in laboratory. The results of investigations are found to be in accordance with the main laws of abrasion wear.

Wear resistance of diffusion chromium hardened needles was 12 times higher than that of steel needles.

УДК 620.174.21:175.21 669:539.67

Э.И. Раннат, А.И. Ингерма

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ
ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

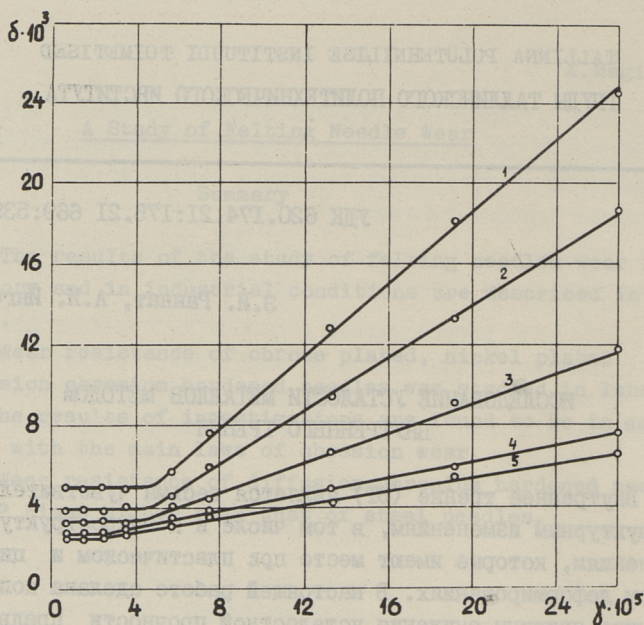
Внутреннее трение (ВТ) является весьма чувствительным к структурным изменениям, в том числе и к микроструктурным изменениям, которые имеют место при пластическом и циклическом деформированиях. В настоящей работе сделана попытка пояснить причины снижения усталостной прочности предварительно растянутых образцов методом ВТ.

С увеличением степени предварительной деформации ВТ изменяется как в амплитуднонезависимой, так и в амплитуднозависимой областях по кривой с максимумом [1, 2, 3, 4]. Появление максимума следует также из теории Гранато-Люкке [3].

Первоначальное возрастание ВТ связывают с появлением в структуре легкоподвижных дислокаций. Дальнейшее деформирование, приводящее к уменьшению ячеистой структуры дислокации, вызывает уменьшение ВТ [2]. Такое есть классическое объяснение подобного изменения ВТ после пластического деформирования.

Образцы для испытания были изготовлены из железа Армко. Химический состав, механические свойства, режим термообработки, форма и размеры образцов приведены в работе [5].

Измерения ВТ проводились на установке типа крутильного маятника, разработанного авторами работы [6]. Частота крутильных колебаний ~ 8 Гц. В качестве меры ВТ использовался логарифмический декремент затухания δ . Амплитуды деформаций изменялись от $2,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,7 \cdot 10^{-4}$. Измерение проводилось при комнатной температуре.



Фиг. 1. Влияние пластической деформации на внутреннее трение железа Армко:
 1 - $\epsilon = 0$; 2 - $\epsilon = 0,55$; 3 - $\epsilon = 1,0$; 4 - $\epsilon = 2,0$;
 5 - $\epsilon = 4,5$ %.

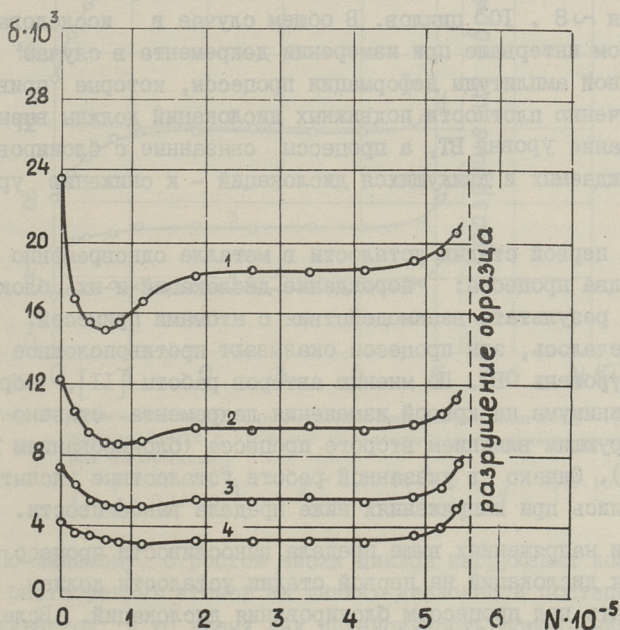
На фиг. 1 приведены результаты измерения ВТ образцов, деформированных до различных степеней пластической деформации. Измерения производились параллельно на трех образцах (с одной и той же предысторией) через 30 минут после деформирования. Полученные при этом результаты удовлетворительно совпадали.

Как видно из кривых на фиг. 1, ВТ сильно уменьшается в результате пластического деформирования.

Объяснить такое изменение можно тем, что в ферромагнетиках, как известно, наряду с дислокационным рассеянием энергии имеет место и магнитоупругое рассеяние энергии, обусловленное движением стенок доменов [7]. Уменьшение ВТ при пластическом деформировании связывают с подавлением магнитоупругого рассеяния энергии, так как при деформировании значительно повышается количество дислокации, поля

напряжения которых являются препятствиями движению стенок доменов [8]. ВТ, связанное с движением дислокаций, как в амплитуднонезависимой, так и амплитуднозависимой областях при пластическом деформировании увеличивается [8, 4]. Об увеличении плотности легкоподвижных дислокаций свидетельствует тот факт, что критическая амплитуда отрыва дислокации уменьшается от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-5}$ (см. фиг. 1).

Действие циклического нагружения приводит к необратимому изменению микроструктуры металла, о чем свидетельствует закономерное изменение его физико-механических свойств [9]. Циклическому нагружению подвергались образцы без



Фиг. 2. Изменение внутреннего трения недеформированного железа Армко в процессе усталости при различных амплитудах деформации:

- 1 - $\gamma = 2,7 \cdot 10^{-4}$; 2 - $\gamma = 1,32 \cdot 10^{-4}$; 3 - $\gamma = 9,75 \cdot 10^{-4}$;
 4 - $\gamma = 0,18 \cdot 10^{-4}$.

предварительной пластической деформации и деформированные растяжением на 1,5 %.

Усталостные испытания проводились на механическом пульсаторе [10] по симметричному циклу нагружения растяжения - сжатия при напряжениях, превышающих предел выносливости на 1,5 %.

Изменение декремента затухания недеформированных образцов в процессе усталости при различных амплитудах приведено на фиг. 2.

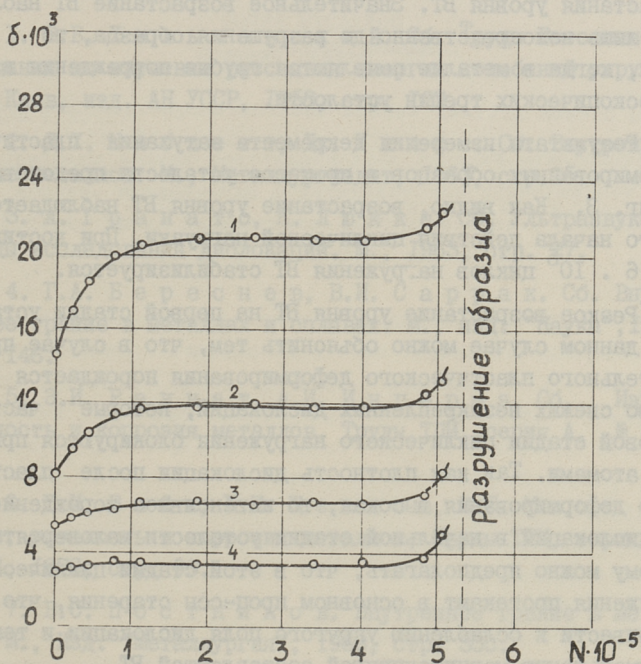
Несколько неожиданным, на первый взгляд, может показаться характер изменения декремента затухания в процессе усталости. Полученные данные свидетельствуют о том, что с самого начала действия циклической нагрузки наблюдается снижение декремента, который достигает минимума после совершения $\sim 8 \cdot 10^4$ циклов. В общем случае в исследованном частотном интервале при измерении декремента в случае фиксированной амплитуды деформации процессы, которые приводят к увеличению плотности подвижных дислокаций должны вызывать возрастание уровня ВТ, а процессы связанные с блокированием порождаемых и движущихся дислокаций - к снижению уровня ВТ.

На первой стадии усталости в металле одновременно протекают два процесса: порождение дислокаций и их блокирование в результате взаимодействия с атомами примесей. Как уже отмечалось, эти процессы оказывают противоположное влияние на уровень ВТ. По мнению авторов работы [11], образование минимума на кривой изменения декремента связано с превалирующим влиянием второго процесса (блокированием дислокаций). Однако в указанной работе усталостные испытания проводились при напряжениях ниже предела выносливости.

При напряжениях выше предела выносливости процесс порождения дислокаций на первой стадии усталости должен превалировать над процессом блокирования дислокаций. Вследствие этого во многих исследованиях отмечается рост уровня ВТ на первой стадии усталости.

Снижение уровня ВТ в наших опытах на первой стадии усталости, по-видимому, следует связать с повышением количества дислокации, поля напряжений которых подавляют маг-

нитоупругое рассеяние энергии. Известно, что циклические нагрузки, особенно при напряжениях выше предела выносливости, способствуют развитию процессов интенсивного блокирования дислокации, т.е. процессов старения. Эти процессы должны уменьшать поля напряжений дислокаций.



Фиг. 3. Изменение внутреннего трения деформированного ($\bar{\epsilon} = 1,5\%$) железа Армко в процессе усталости при различных амплитудах деформации:
 1 - $\delta = 2,7 \cdot 10^{-4}$; 2 - $\delta = 1,32 \cdot 10^{-4}$; 3 - $\delta = 0,75 \cdot 10^{-4}$;
 4 - $\delta = 0,18 \cdot 10^{-4}$.

По-видимому, с ростом числа циклов нагружения концентрация растворенных атомов на линиях дислокации постепенно увеличивается: в то время как интенсивность порождения новых дислокаций уменьшается. Поэтому на этой стадии усталости наблюдается рост общего уровня ВТ (см. фиг. 2), так как степень подавления магнитоупругого рассеяния энергии уменьшается.

Стабилизация уровня ВТ при дальнейшем возрастании числа циклов нагружения соответствует фазе усталостного разрушения, в которой процессы порождения и блокирования дислокаций уравниваются. В данной стадии усталости происходит и образование субмикроскопических трещин. Начало образования субмикроскопических трещин не вызывает заметного возрастания уровня ВТ. Значительное возрастание ВТ наблюдается лишь непосредственно до разрушения образца, то есть тогда, когда в металле появляются грубые повреждения в виде микроскопических трещин усталости.

Результаты измерения декремента затухания пластически деформированных образцов в процессе усталости представлены на фиг. 3. Как видно, возрастание уровня ВТ наблюдается с самого начала действия циклической нагрузки. При достижении $\sim 1,6 \cdot 10^5$ циклов нагружения ВТ стабилизируется.

Резкое возрастание уровня ВТ на первой стадии усталости в данном случае можно объяснить тем, что в случае предварительного пластического деформирования порождается множество свежих незакрепленных дислокаций, которые частично в первой стадии циклического нагружения блокируются примесными атомами. Так как плотность дислокации после пластического деформирования высокая, то интенсивное порождение новых дислокаций в начальной стадии усталости маловероятно. Поэтому можно предполагать, что в этой стадии циклического нагружения протекает в основном процесс старения, что должно привести к ослаблению упругого поля дислокации и тем самым уменьшению магнитоупругой составляющей ВТ.

Дальнейшее изменение уровня ВТ с ростом числа циклов нагружения имеет такой же характер, какой наблюдался при испытании недеформированных образцов.

В общем случае процесс усталости разделяют на три стадии: инкубационный период, период разрыхления (образование субмикроскопических трещин) и период развития трещин до критического размера.

При исследовании процесса усталости методом ВТ по результатам, полученным нами, можно предполагать, что основные различия протекания процессов усталости недеформированного и деформированного металлов имеют место в инкубацион-

ном периоде усталости. Это различие можно приписать увеличению плотности дислокации вследствие предварительного пластического деформирования металла.

Л и т е р а т у р а

1. В.В. Хильчевский. Сб. Труды Всесоюзного совещания по изучению рассеяния энергии колебаний упругих тел. Киев, изд. АН УССР, 1958, стр. 127.

2. Д.Х. Ниблетт, Дж. Уилкс. Сб. Внутреннее трение металлов. М., Metallurgizdat, 1963, стр. 25.

3. А. Гранато, К. Люкке. Сб. Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М., 1963, стр. 27.

4. Г.А. Береснев, В.И. Саррак. Сб. Внутреннее трение в металлах и сплавах. М., изд. "Наука", 1966, стр. 146.

5. Э.И. Раннат, А.И. Ингерма. Сб. Износ, усталость и коррозия металлов. Труды ТПИ, серия А, № 322, 1972.

6. У.И. Вийк, Н.Н. Щеглов, В.Г. Масс. Сб. Износ, усталость и коррозия металлов, Труды ТПИ, серия А, № 294, 1970, стр. 99.

7. В.С. Постников. Внутреннее трение в металлах. М., Изд. "Металлургия", 1969, стр. 300.

8. Г.А. Береснев, В.И. Саррак. ФММ, т. 20, 1965, стр. 317.

9. В.С. Иванова. Усталостное разрушение металлов М., Metallurgizdat, 1963, стр. 103.

10. Э.И. Раннат, А.И. Ингерма. Сб. Износ, усталость и коррозия металлов, Труды ТПИ, серия А, № 294, 1970, стр. 95.

11. И.А. Одинг, Л.К. Гордиенко, Т.С. Марьяновская. Сб. Внутреннее трение в металлах и сплавах. Изд. "Наука", 1966, стр. 109.

E.Rannat, A.Ingerma

Wechselfestigkeitsuntersuchungen

mit Innenfriktionsmethode

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden Untersuchungsergebnisse plastisch-zugverformter Metalle auf die Wechselfestigkeit dargestellt. Bei den Untersuchungen ist eine Innenfriktionsmeßmethode auf ein Windungspendelgerät angewandt.

ИЗНОС, УСТАЛОСТЬ И КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ. Сборник статей У1. Таллинский политехнический институт. Редактор Ю. Тадоидер. Техн. редактор Е. Ракеева. Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 25/У 1973. Подписано к печати 12/ХП 1973. Бумага 60x90/16. Печ. л. 5,75 + 0,5 приложение. Уч.-изд. л. 4,35. Тираж 350. МВ-10512. Зак. №655. Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Цена 44 коп.

ИЗНОС, УСТАЛОСТЬ И КОР-
РОЗИЯ МЕТАЛЛОВ
Сборник статей VI

УДК 620.178.167

Наиболее важные результаты исследований абразивной эрозии, проведенных в Штуттгартском университете.

Г. Уэтц. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр. 3-22

Абразивная эрозия является процессом изнашивания, при котором энергия в изнашиваемое тело передается ударами движущихся в газовом потоке частиц. В зависимости от величины угла атаки различают износ скользящей струей, наклонной струей и перпендикулярной струей. Важной приметой абразивной эрозии является ее динамико-энергетический характер. Из всей кинетической энергии частиц деталь принимает (в зависимости от свойств изнашиваемого тела и абразива) только определенная часть, которая может различно распределяться. Принимаемая деталью энергия, которая затрачивается на пластическую деформацию, является решающей при эрозии перпендикулярной струей и при износе повторными ударами (при ударном износе); можно полагать, что эта закономерность действительна и в отношении других углов атаки, а частично и для других видов изнашивания.

Часть энергии, переходящая в виде деформационной энергии в оба соударяющихся тела, создает на месте удара изменения: повышения температуры, структурные изменения, трибохимические реакции, трибоэмиссию, трибоабсорбцию и др. явления. При распределении энергии на указанные изменения решающими являются условия нагружения, причем закономерности изнашивания могут изменяться. Важными параметрами при этом являются угол атаки, твердость абразива и скорость

удара. При специфически малом количестве превращенной энергии решающее значение могут иметь реакции в граничных слоях, и процессы изнашивания могут происходить в пределах тонкой пленки реакций, причем упомянутые выше основные процессы теряют свое значение.

Фигур 7, библиографий 26.

УДК 620.178.169

Об эрозионной стойкости некоторых легированных материалов. И.Р. Клейс, Т.А. Паппель. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр. 23-28.

В статье приведены данные по эрозионной стойкости некоторых высоколегированных материалов в струе кварцевого песка твердость 800-1100 кг/мм², известнякового порошка твердость 105-190 кг/мм и в смеси от них при скорости струи абразива 100 м/сек и углах атаки $\alpha = 30^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$.

Выявлено, что прибавление известняка к кварцевому песку вызывает увеличение интенсивности изнашивания мягких сталей и при больших углах атаки инверсию в рядах износостойкостей.

Фигур 2, таблиц 1, библиографий 8.

О закономерностях абразивной эрозии при повышенных скоростях струи. Т.А. Тийдеманн, Х.Г. Уумейс, И.Р. Клейс. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр. 29-38.

В статье приведены результаты исследования закономерностей абразивной эрозии до скоростей 330 м/сек. При исследовании различных металлокерамических твердых сплавов типа ВК установлено, что выше т.п. критической скорости - 120... 170 м/сек, степень показателя m в зависимости $k = aV^m$ станет уменьшаться. При скорости $V = 330$ м/сек относительная объемная износостойкость сплава ВКЗМ составляет 428 в отношении эталонного материала стали Ст.3. Даны некоторые соображения относительно механизма изнашивания при повышенных скоростях.

Фигур 5, таблиц I, библиографий I3.

Некоторые результаты исследования эрозии металлов в струе влажного абразива. Л.А. Ёксти, И.Р. Клейс. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр. 39-48.

В статье рассматриваются результаты испытаний некоторых сталей и твердосплавного покрытия на износ в потоке абразива, увлажненного водой или слабокислотными органическими средами. Опыты произведены на центробежной испытательной установке. Приводятся зависимости интенсивности изнашивания от скорости потока, угла атаки и влажности абразива. Дается сравнительная оценка износостойкости материалов в условиях оборудования торфобрикетных заводов.

Фигур 4, таблиц I, библиографий 5.

УДК 620.178.16.

Повышение стойкости к износу детонационным напылением.
Д.А. Харламов, А.Ф. Соколов, Т.А. Паппель. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр.

49-54.

Д.А. Харламов, А.Ф. Соколов, Т.А. Паппель - Повышение стойкости к износу детонационным напылением. При помощи детонационного напыления порошка ВК8 на изнашиваемую деталь можно получить покрытия высокой твердости, которые оказываются износостойкими при трении скольжения. В паре - покрытие - покрытие - следует отметить наличие низкого коэффициента трения. В струе свободного абразива износостойкость покрытия низкая.

Фигур 2, библиографий 6.

УДК 620.178.169.

Приспособление к центробежному ускорителю ЦУК-3М для испытания материалов на абразивный износ с добавкой жидкости. П.О. Саргава, Л.Э. Вальдма. Труды Таллинского политехнического института, 1973, № 347, стр. 55-64.

В статье описываются результаты проведенных опытов, поставленных с целью моделирования процесса абразивного износа с водой на центробежном ускорителе ЦУК-3М. Приводится описание приспособления для дозирования абразива и жидкости, а также данные о результатах испытаний при расчетной скорости струи 80 м/сек и при углах атаки 30, 60 и 90° сталей 45, Х18Н9Т, ХВГ и ХВГзакал., а также твердого сплава ВК15.

Фигур 2, таблиц 2, библиографий 6.

УДК 621.181.7:621.43.037.3:620 193.15

Типография износа центробежного распылителя
Л.Э. Вальдма, М.Х. Нанитс. Труды Таллинско-
го политехнического института, 1973, № 347,
стр. 65-74.

Приводится информация о "мертвых зонах" в камере за-
крутки потока, где износ максимальный. Описываются траекто-
рии входных потоков жидкости с помощью скоростных киносье-
мок.

Фигур 8, библиографий 5.

УДК 677.066.05

Исследование износа пробивных игл. А.Р. Мяги. Труды
Таллинского политехнического института, 1973, № 347,
стр. 75-84.

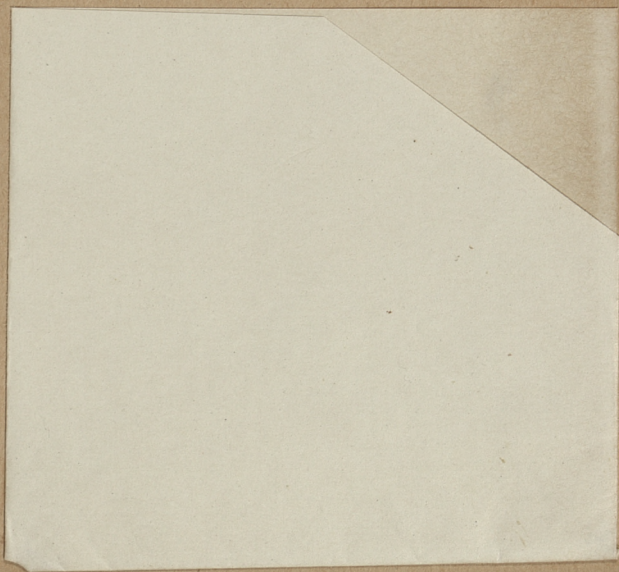
В статье рассматриваются результаты исследования изно-
са пробивных игл (для изготовления нетканых материалов) в
производственных и лабораторных условиях.

Проведены исследования износостойкости хромированных,
никелированных и диффузионно хромированных игл в лаборатор-
ных условиях.

Результаты исследований хорошо согласуются с основными
законами абразивного изнашивания.

Износостойкость диффузионно хромированных игл повыша-
ется до 12 раз по сравнению со стальными иглами.

Фигур 4, таблиц 2, библиографий 3.



Цена 44 коп.

19