

УДК 669.141:539.374

Д-р техн. наук М. Н. Брыков

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ НИЗКИХ СКОРОСТЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО АБРАЗИВУ

*Проведены испытания нелегированных сталей в различном структурном состоянии в диапазоне скоростей скольжения по абразиву 0,1–86 мм/с. Установлено, что снижение скорости скольжения с десятков до единиц миллиметров в секунду по-разному влияет на износ образцов с различным типом структуры. Наиболее существенно увеличивается износ образцов со структурой феррита. При уменьшении скорости скольжения с 86 до 5 мм/с потеря массы ферритных образцов возрастает на 10%. Влияние снижения скорости на износ образцов со структурой мартенсита и аустенита не столь значительно.*

**Ключевые слова:** абразивное изнашивание, металлические материалы, скорость скольжения, износ.

### Актуальность и цель работы

В классической работе Б. И. Костецкого [1] представлена теория изнашивания деталей машин. Показано, что скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей является одним из важнейших параметров трибосистемы. Определенному диапазону скоростей скольжения соответствует определенная вид и интенсивность изнашивания, изменяющиеся скачкообразно при переходе скорости скольжения через некоторые критические пороги. Отмечено также, что наиболее интенсивным видом изнашивания является абразивное, которое, в отличие от других видов изнашивания, может возникать в гораздо более широких диапазонах скоростей скольжения абразива по изнашиваемой поверхности – от 0 мм/с до десятков метров в секунду.

Влияние скорости скольжения абразива относительно поверхности трения на износ металлических материалов исследовано в работах [2–11]. Установлено, что существует три характерных диапазона скорости скольжения. При скорости скольжения порядка 10–100 мм/с износ металлов и сталей не зависит от скорости. При уменьшении скорости до значений 0,5–1,0 мм/с происходит увеличение износа на 10–50% (медь и сталь AISI 1020). Увеличение скорости до 500–1000 мм/с и более также приводит к увеличению износа. При этом износ непрерывно увеличивается с увеличением скорости.

Повышенный износ в диапазоне малых скоростей, вероятно, связан со снижением предела текучести по мере уменьшения скорости деформирования [12]. Увеличение износа с повышением скорости в диапазоне высоких скоростей связано с фрикционным нагревом [2–5], который, опять же, приводит к снижению предела текучести [12].

Поскольку эксперименты различных исследователей проведены в разных условиях изнашивания (разные испытательные установки), а также в связи с отсутствием данных об интенсивности изнашивания мате-

риалов при низких скоростях скольжения, задачей работы явилось определение закономерностей изнашивания сплавов системы железо-углерод при скоростях скольжения по абразиву от 0,1 мм/с и выше.

Условия испытаний приняты в соответствии с ГОСТ 17367-71. Переменной является лишь скорость скольжения образцов по абразивной поверхности. Испытательная машина смонтирована на базе токарного станка 1К62 с дополнительными понижающими редукторами. Испытания проведены в диапазоне скоростей скольжения от 0,1 до 86 мм/с.

### Методика испытаний

За единичный эталонный износ принимается износ эталонного материала (феррит) при скорости скольжения 3,5 мм/с или 5,0 мм/с. Результат единичного испытания представляют в виде относительного износа  $i$ , который выражают в виде отношения массового износа образца к эталонному износу эталонного материала. При этом эталон и образец проходят одинаковый путь трения, соответствующий 100 оборотам барабана. Для определения величины относительного износа образца на данной скорости скольжения проводят два идентичных опыта, определяют два единичных значения относительного износа и вычисляют среднее. При этом последовательность испытания эталона и образца чередуют.

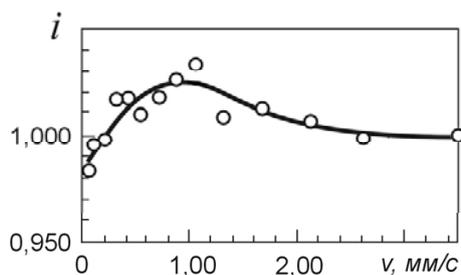
Испытаны образцы сталей системы железо-углерод в различном структурном состоянии: феррит, мартенсит, аустенит. Образцы феррита получены из отожженной стали 08кп. Структура мартенсита получена закалкой на максимальную твердость без отпуска образцов стали У8. Образцы с аустенитной структурой получены закалкой в воду от температуры 1130 °С стали с содержанием углерода 2,10%.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

В результате испытаний установлено, что для каждого структурного состояния образцов существует зави-

симось относительного износа от скорости скольжения по абразиву. При этом интенсивность влияния скорости скольжения на относительный износ различна для образцов с различным типом металлической основы.

На рис. 1 представлена зависимость относительного износа ферритных образцов от скорости скольжения по абразиву в диапазоне (0,1–3,5) мм/с. Установлено, что минимальный износ образцов наблюдается при скорости скольжения 0,1 мм/с. Повышение скорости скольжения приводит к увеличению износа, который достигает максимума при скорости 1,0 мм/с. При дальнейшем повышении скорости до 3,5 мм/с износ образцов снижается.



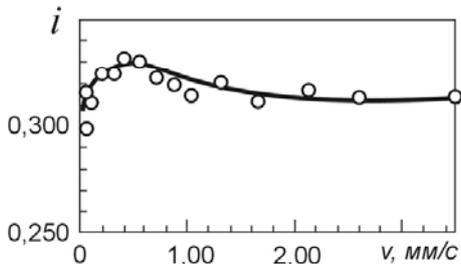
**Рис. 1.** Зависимость относительного износа ( $i$ ) образцов со структурой феррита от скорости скольжения по абразиву ( $v$ ) в диапазоне скорости 0,1–3,5 мм/с

Для определения влияния скорости скольжения по абразиву на относительный износ сплавов с мартенситной основой испытывали образцы из закаленной стали У8.

Для образцов с мартенситной основой минимальный износ также наблюдается при минимальной скорости скольжения (рис. 2). Экстремум износа мартенситных образцов возникает при скорости скольжения 0,5 мм/с.

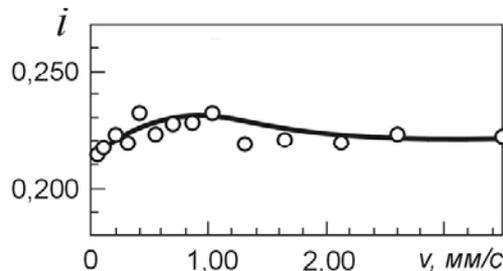
Для определения влияния скорости скольжения по абразиву на относительный износ сплавов с аустенитной основой испытывали образцы из сплава с содержанием углерода 2,10 % после закалки от 1130 °С.

Испытания образцов со структурой аустенита позволили установить, что при увеличении скорости скольжения в диапазоне 0,1–1,0 мм/с происходит увеличение износа, который достигает максимума при скорости 1,0 мм/с (рис. 3). Дальнейшее увеличение скорости скольжения вплоть до 3,5 мм/с приводит к уменьшению износа образцов.



**Рис. 2.** Зависимость относительного износа ( $i$ ) образцов со структурой мартенсита от скорости скольжения по абразиву ( $v$ ) в диапазоне скорости 0,1–3,5 мм/с

Результаты испытаний на изнашивание образцов с различной структурой в диапазоне 0,1–3,5 мм/с коррелируют с данными по зависимости силы трения скольжения сплавов в разном структурном состоянии от скорости скольжения по абразиву, которые получены на предшествующих этапах работы.

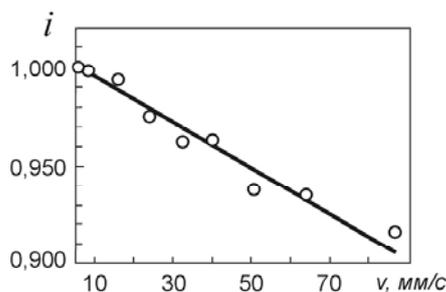


**Рис. 3.** Зависимость относительного износа ( $i$ ) образцов со структурой аустенита от скорости скольжения по абразиву ( $v$ ) в диапазоне скорости 0,1–3,5 мм/с

Испытания образцов со структурой аустенита завершают цикл экспериментов с использованием дополнительного привода установки в виде двухступенчатого червячного мотор-редуктора.

Для проведения испытаний образцов при более высоких скоростях скольжения по абразиву привод испытательной машины заменен на дополнительный электродвигатель с одноступенчатым червячным редуктором. Это позволило испытывать образцы в диапазоне скоростей скольжения 5–86 мм/с.

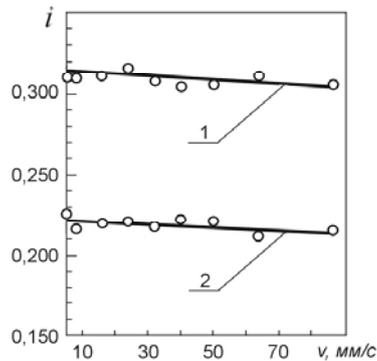
В результате испытаний образцов со структурой феррита установлено, что при увеличении скорости скольжения в диапазоне 5–86 мм/с относительный износ монотонно снижается (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость относительного износа ( $i$ ) образцов со структурой феррита от скорости скольжения по абразиву ( $v$ ) в диапазоне скорости 5–86 мм/с

При испытаниях образцов со структурой мартенсита и аустенита установлено, что ни для мартенситных, ни и для аустенитных образцов не наблюдается экстремумов значений относительного износа. При увеличении скорости скольжения образцов по абразиву с 5 мм/с до 86 мм/с относительный износ мартенситных и аустенитных образцов изменяется незначи-

тельно. В результаті испытаний установлено, що при збільшенні швидкості в досліджуваному діапазоні відносний знос мартенситних і аустенитних образців знижується на 2–3 % (рис. 5).



**Рис. 5.** Зависимость относительного износа ( $i$ ) образцов со структурой мартенсита (1) и аустенита (2) от скорости скольжения по абразиву ( $v$ ) в диапазоне скорости 5–86 мм/с

Оценка погрешности определения величин относительного износа образцов в различном структурном состоянии позволяет говорить о достоверности полученных экспериментальных данных. Потеря массы эталона и образцов измеряется с погрешностью  $\pm 0,2$  мг. Величины абсолютных износов для образцов феррита (эталон), мартенсита и аустенита на пути трения одной и той же длины (32 м) находится на уровне  $(26,0 \pm 0,2)$  мг,  $(8,0 \pm 0,2)$  мг и  $(5,0 \pm 0,2)$  мг соответственно, поэтому относительные погрешности определения потери массы составляют 0,8 %; 2,5 % и 4,0 %. Поскольку величина относительного износа представляет собой отношение абсолютного износа образца к абсолютному износу эталона, то при испытании образцов в различном структурном состоянии относительные погрешности определения относительного износа не превышают следующих значений:

$0,8\% + 0,8\% = 1,6\%$  при испытании образцов со структурой феррита;

$0,8\% + 2,5\% = 3,3\%$  при испытании образцов со структурой мартенсита;

$0,8\% + 4,0\% = 4,8\%$  при испытании образцов со структурой аустенита.

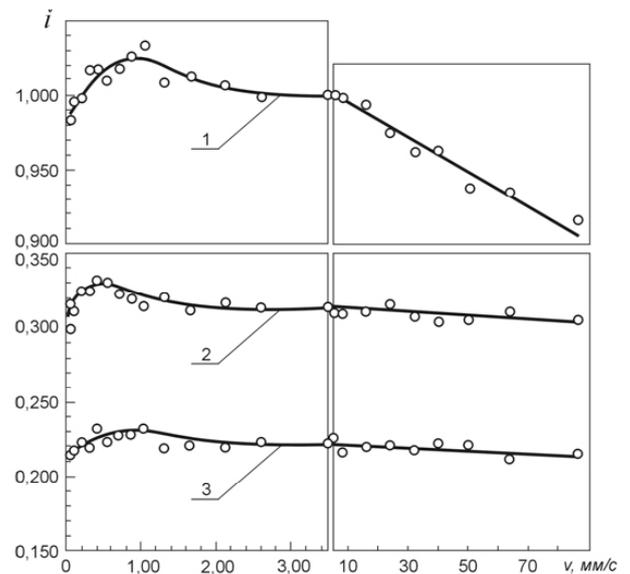
Совместное рассмотрение полученных зависимостей позволяет построить обобщенную диаграмму «Относительный износ ( $i$ ) – Скорость ( $v$ )» для различного типа металлической основы сплавов системы Fe-C (рис. 6).

Зависимость  $i = f(v)$  иллюстрирует влияние скорости скольжения по абразиву на износ феррита (см. рис. 6, кривая 1). В диапазоне скоростей 0,1–3,5 мм/с наблюдается максимум величины износа ферритных образцов при скорости 1,0 мм/с.

Увеличение скорости от 3,5 до 86 мм/с приводит к существенному уменьшению износа. Если в диапазоне скоростей 0,1–3,5 мм/с износ образцов феррита в области экстремума всего лишь на 2–3 % выше средне-

го уровня их износа в данном диапазоне скоростей, то при увеличении скорости до 86 мм/с износ снижается на 10 %. Поэтому для ферритной структуры весь диапазон скоростей на уровне единиц миллиметров в секунду можно считать экстремальным, поскольку именно при таких скоростях износ феррита достигает максимума.

Зависимость  $i = f(v)$  для мартенсита (сталь У8, закалка на максимальную твердость) представлена кривой 2 (см. рис. 6). Эта зависимость показывает, что максимальный износ для мартенситной структуры достигается при скорости 0,5 мм/с. В то же время, увеличение скорости скольжения в очень широком диапазоне 1,0–86 мм/с практически не приводит к существенным изменениям износа мартенситных образцов.



**Рис. 6.** Диаграмма «Относительный износ ( $i$ ) – Скорость ( $v$ )» для различного типа металлической основы сплавов системы Fe-C: 1 – феррит; 2 – мартенсит; 3 – аустенит

Аналогичные выводы могут быть сделаны при рассмотрении зависимости  $i = f(v)$  для аустенита (сплав 2,10 %C, закалка из однофазной области, см. рис. 6, кривая 3). Отличие лишь в том, что максимальный износ аустенитной структуры наблюдается при скорости 1,0 мм/с. При изменении скорости в диапазоне 1,0–86 мм/с износ аустенитных образцов незначительно уменьшается.

Таким образом, в результате проведенной работы определены закономерности изнашивания железуглеродистых сплавов при низких скоростях скольжения по абразиву, которые представлены в виде диаграммы «Относительный износ ( $i$ ) – Скорость ( $v$ )». Из диаграммы следует, что наиболее существенно при уменьшении скорости скольжения увеличивается износ феррита. Износ мартенсита и аустенита при уменьшении скорости увеличивается незначительно.

Другой практически важный вывод, который может быть сделан по результатам исследований, заклю-

чается в том, что при уменьшении скорости относительного перемещения абразива и изнашиваемой поверхности не происходит инверсии ряда износостойкости различных типов металлической основы железоуглеродистых сплавов. Ранее было установлено [1], что в диапазоне скоростей скольжения (86–3500) мм/с структура аустенита обладает максимально достижимой износостойкостью (или минимальным износом). Новые данные показывают, что аустенит остается наиболее износостойкой металлической основой и при малых скоростях скольжения, включая те, при которых наблюдается повышенный износ образцов.

Таким образом, в результате последовательного цикла исследований определен ряд износостойкости для основных структурных составляющих металлической основы железоуглеродистых сплавов. Показано, что в условиях абразивного изнашивания ряд износостойкости «феррит-мартенсит-аустенит» сохраняется в широком диапазоне скорости скольжения образцов по абразиву.

### Выводы

Определен износ сталей при различной скорости скольжения по абразиву и построена диаграмма «Относительный износ ( $i$ ) – скорость ( $v$ )». Установлено, что снижение скорости скольжения с десятков до единиц миллиметров в секунду по-разному влияет на износ образцов с различным типом структуры. Наиболее существенно увеличивается износ образцов со структурой феррита. При уменьшении скорости скольжения с 86 до 5 мм/с потеря массы ферритных образцов возрастает на 10 %. Влияние снижения скорости на износ образцов со структурой мартенсита и аустенита не столь значительно.

Практически важный вывод проведенной работы заключается в том, что при уменьшении скорости от-

носительного перемещения абразива и изнашиваемой поверхности не происходит инверсии ряда износостойкости различных типов металлической основы железоуглеродистых сплавов, т. е. ряд «феррит-мартенсит-аустенит» остается без изменения.

### Список литературы

1. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин / Б. И. Костецкий. – М. : Машгиз, 1959. – 479 с.
2. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 420 с.
3. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – К. : Техника, 1970. – 396 с.
4. Хрущов М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М. : Наука, 1970. – 252 с.
5. Хрущов М. М. Развитие учения об износостойкости машин в советский период / М. М. Хрущов // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 1. – С. 124–135.
6. Nathan G. K. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions / G. K. Nathan, W. J. D. Jones. // Wear. – 1966. – Vol. 9, № 4. – P. 300–309.
7. Misra A. Some observations on two-body abrasive wear / A. Misra, I. Finnie // Wear. – 1981. – Vol. 68, № 1. – P. 41–56.
8. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела / Кузнецов В. Д. – Томск : Полиграфиздат, 1947. – 542 с.
9. Шулепникова А. Г. Сопротивление наплавленного металла абразивному изнашиванию / А. Г. Шулепникова, И. К. Юдин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1961. – № 8. – С. 120–124.
10. Mutton P. J. High stress abrasion testing of wear resistant materials / P. J. Mutton // BHP Tech. Bull. – 1980. – Vol. 24, № 1. – P. 38–44.
11. Clark H. M. Particle velocity and size effects in laboratory slurry erosion measurements OR... do you know what your particles are doing? / H. M. Clark // Tribology International. – 2002. – Vol. 35, № 10. – P. 617–624.
12. Bhushan B. Introduction to tribology / Bhushan B. – New York : John Wiley & Sons, 2002. – 732 p.

Одержано 10.03.2015

### Бриков М.М. Дослідження зношування сталей при низькій швидкості ковзання по абразиву

*Проведено випробовання нелегованих сталей у різному структурному стані в діапазоні швидкостей ковзання по абразиву 0,1–86 мм/с. Встановлено, що зниження швидкості ковзання з десятків до одиниць міліметрів на секунду по-різному впливає на зношування зразків з різним типом структури. Найбільш суттєво збільшується знос зразків зі структурою фериту. При зменшенні швидкості ковзання з 86 до 5 мм/с втрата маси феритних зразків зростає на 10 %. Вплив зниження швидкості на знос зразків зі структурою мартенситу й аустеніту не настільки значний.*

**Ключові слова:** абразивне зношування, металеві матеріали, швидкість ковзання, знос.

### Brykov M. Investigation on wear of steels at low sliding velocities against abrasive surface

*The abrasive wear tests with sliding speed in the range of 0,1–86,0 mm/s is fulfilled for carbon steels with different structure. It is found that the reduction of sliding speed from tens mm/sec to a few millimeters per second has different influence upon wear of the samples with different type of structure. The most significant increase of wear is attributed to the samples with ferritic structure. When the sliding speed decreases from 86,0 to 5 mm/sec, the mass loss of ferritic samples increases by 10 %. The effect of reducing sliding speed upon the wear of the samples with the structure of martensite and austenite is found to be not so significant.*

**Key words:** abrasive wear, metallic materials, sliding velocity, wear-out.