

Изнашивание ферритной и аустенитной сталей при воздействии незакрепленных частиц кокса

Н. П. Бродниковский, А. Г. Гогоци, П. В. Мазур, Ю. И. Зозуля,
Б. Н. Малиновский, А. В. Самелюк, М. В. Губинский,
С. С. Федоров

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: dep53@ipms.kiev.ua

Показано, что при трении по незакрепленным частицам кокса с малым давлением износ Ст. 3 меньше, чем стали AISI 304. При давлениях больше 30 кПа быстрее изнашивается Ст. 3. Проявление большей стойкости к износу коррелирует с увеличением деформационного упрочнения сталей. Геометрия борозд на поверхности трения, полученных в одних и тех же условиях, у сталей различная и определяется самоорганизацией разрушения от взаимодействий отдельных частиц абразива с образцом.

Ключевые слова: износостойкость, разрушение, деформация.

Введение

При выполнении проекта по разработке комплекса оборудования для графитизации кокса для компании "American Energy Technologies CO" возникла проблема выбора материала и толщины стенок проходной обжиговой печи, находящихся под воздействием потока частиц кокса. Частицы двигаются с разной скоростью и оказывают разное давление в результате переменного сечения печи. Путь трения частиц кокса определяется высотой проходной обжиговой печи, которая составляет 12 м. Взвешенные в продуваемом встречно потоке азота частицы проходят путь за время около 20 мин.

Воздействие потока твердых частиц кокса, полученных дроблением продуктов переработки угля, приводит к изнашиванию стенок печи. Контактное взаимодействие в трибологии принято классифицировать по типу элементарных процессов разрушения в точках механических контактов трущихся поверхностей. В работе [1] механическое взаимодействие неровностей поверхности подразделяется на упругое оттеснение, пластическое оттеснение, микрорезание и разрушение. Взаимодействия всех видов, в конечном счете, приводят к контактному разрушению. Резание и хрупкое разрушение происходят при одном или нескольких воздействиях. Разрушение в результате развития контактных деформаций наблюдается после большего числа циклов взаимодействия. Отделение частичек материала при разрушении в местах контактов трущихся поверхностей называют износом. Средняя скорость изнашивания k представляет собой отношение конечного приращения величины

© Н. П. Бродниковский, А. Г. Гогоци, П. В. Мазур, Ю. И. Зозуля,
Б. Н. Малиновский, А. В. Самелюк, М. В. Губинский, С. С. Федоров,
2014

износа (уменьшение линейного размера Δh , массы Δm или объема Δv) к интервалу времени Δt , за который изменение произошло:

$$k_h = \Delta h / \Delta t, \quad k_m = \Delta m / \Delta t, \quad k_v = \Delta v / \Delta t. \quad (1)$$

Интенсивность изнашивания I определяется как отношение величины износа к пути трения Δl , на котором наблюдается этот износ:

$$I_h = \Delta h / \Delta l, \quad I_m = \Delta m / \Delta l, \quad I_v = \Delta v / \Delta l. \quad (2)$$

Ввиду сложной зависимости процесса формирования разрушения от свойств материала (в объеме и на поверхности), от шероховатости трущихся поверхностей и от условий трения (скорости и нагрузки) чаще всего только модельные эксперименты могут определить пригодность материалов для использования их при контактном взаимодействии.

Цель настоящей работы — выяснить закономерности износа ферритной и аустенитной сталей под воздействием потока частиц кокса, смоделировав процесс трением по незакрепленным частицам кокса. Результаты позволяют выбрать материал и толщину стенок обжиговой печи.

Методика эксперимента

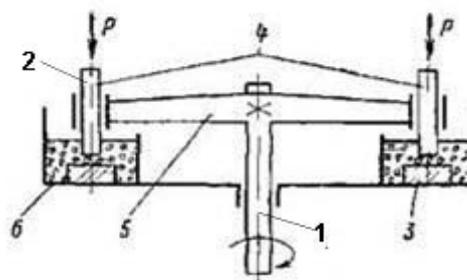
Износ стальных деталей частицами кокса хорошо моделируется испытаниями на абразивный износ на установке типа НК (неподвижное кольцо) конструкции ГосНИИ машиноведения [2]. Выбранный метод испытания на абразивное изнашивание основан на трении вращающегося образца и кольца, которое расположено в желобе, засыпанном испытываемым порошковым материалом (рис. 1). Ось, на которую передается вращение от привода, проходит через центр кольца и имеет два рычага для испытания одновременно двух образцов. Использовали три усилия прижатия образцов к кольцу: 1 — масса держателя 0,65 кг; 2 — масса держателя и груза 0,5 кг, всего 1,15 кг; 3 — масса держателя и груза 2,3 кг, всего 2,95 кг.

При испытании для каждой нагрузки желоб с кольцом засыпался новым коксом, который прошел отжиг при 900 °С, дробление и рассев с выделением фракции, прошедшей через сито с размером ячейки 1 мм и оставшейся на сите с ячейкой 0,2 мм. Расстояние образца от оси вращения — 0,15 м, скорость вращения — 40 об/мин. Скорость скольжения образца по кольцу составляла при этом $0,3 \cdot 3,14 \cdot 40 / 60 = 0,628$ м/с. Одновременно испытывали два образца: Ст. 3 и AISI 304 (нержавеющая сталь).

Испытания с регистрацией времени и массы износа начинались после притирки образцов. Требовалось 2—3 мин, чтобы след трения определялся



a



б

Рис. 1. Общий вид (*a*) и схема (*б*) установки для испытаний на абразивный износ марки НК (неподвижное кольцо) [2]: 1 — ось вращения; 2 — порошок кокса; 3 — образец; 4 — нагрузка на образец; 5 — коромысло; 6 — желоб.

шириной кольца (26 мм) и толщиной образца (8,7 мм). Таким образом, достигался полный контакт образца с кольцом. Площадь контакта $F = 226 \text{ мм}^2$.

Линейный износ Δh устанавливали по потере массы ΔP , поскольку более точно характеризовать изменения образца после трения можно с помощью измерения массы, а не размеров. Потерю объема определяли как $\Delta V = P/\gamma$, учитывая, что плотность стали AISI 304 составляет $\gamma = 7,81 \text{ г/мм}^3$, а Ст. 3 — $7,86 \text{ г/см}^3$. Линейный износ несложно определить, зная потерю объема ΔV и площадь контакта F , по формуле $\Delta h = \Delta V/F$.

После испытания на трение с максимальной нагрузкой проводили фрактографический анализ поверхности образцов сталей на растровом электронном микроскопе Superprobe-733.

Изменение твердости около поверхности трения определяли на поперечном шлифе с помощью микротвердомера ПМТ-3. Использовали приемы для обеспечения необходимого расстояния между отпечатками и сохранения малого шага при приближении к поверхности трения. Уколы наносили по прямой, расположенной под острым углом к поверхности трения, или по двум прямым, перпендикулярным к поверхности трения в шахматном порядке. Испытания на сжатие осуществляли на универсальной машине марки 1231У-10 производства НИКИМП.

Результаты и их обсуждение

Графики зависимостей линейного износа Ст. 3 и AISI 304 от времени и нагрузки при трении по коксу представлены на рис. 2. В случае Ст. 3 уменьшение линейного размера образца возрастает пропорционально времени в течение 20 мин при всех нагрузках (рис. 2, а). Это означает, что износ происходит с постоянной скоростью. Для стали AISI 304 пропорциональная зависимость износа от времени наблюдается только при минимальной нагрузке (рис. 2, б). При больших нагрузках скорость износа со временем уменьшается.

На протяжении работы трибосопряжения проходит через несколько стадий, отличающихся скоростью износа [3]. В общем случае их три: приработка, установившийся износ и катастрофический износ. Приработка является нестационарным режимом изнашивания, в течение которого происходит формирование поверхности взаимодействия элементов трибосопряжения. В нашем случае этот период проходил во время приработки поверхности контакта образца и круга с порошком кокса (см. методику эксперимента). Установившийся износ — стационар-

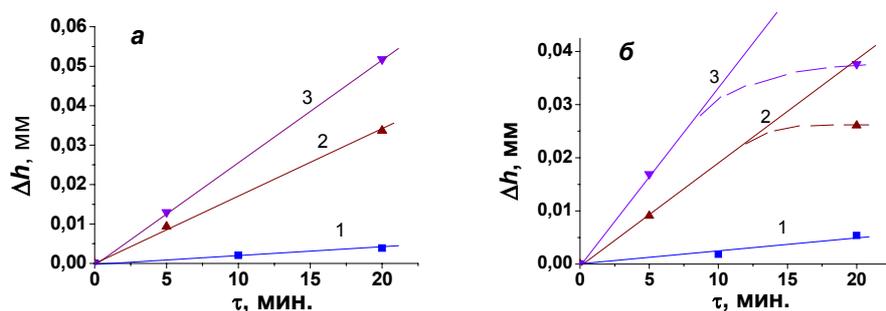


Рис. 2. Зависимости линейного износа Ст. 3 (а) и AISI 304 (б) от времени трения и нагрузки (кПа): 1 — 30; 2 — 50; 3 — 130.

ный период работы трибосопряжения, во время которого скорость изнашивания постоянна. Исследование износа Ст. 3 осуществляли именно в стационарных условиях. Катастрофический износ — заключительный период жизненного цикла трибосопряжения, характеризующийся обычно нарастанием скорости изнашивания (разрушения) вследствие накопленных изменений свойств трущихся поверхностей и условий их взаимодействия.

В проведенных экспериментах свойства трущихся поверхностей могут изменяться в результате измельчения частиц кокса или затупления их острых углов, что приводит к уменьшению износа. Однако образцы трутся одновременно по одному и тому же порошку. Поэтому уменьшение износа только у стали AISI 304, скорее, вызвано деформационным упрочнением ее приповерхностного слоя.

Результаты изучения деформационного упрочнения при сжатии приведены на рис. 3. У стали AISI 304 деформационное упрочнение происходит значительно сильнее, чем у Ст. 3, и во всем интервале значений деформации. У Ст. 3 резкое упрочнение наблюдается только в начале (~2,5%) деформации (рис. 3, а). Полученные данные по износу (рис. 2) показали, что основной рост деформационного упрочнения фиксируется на стадии притирки образца. В стали AISI 304 упрочнение возрастает с увеличением нагрузки и времени трения при ней. Это объясняет рост стойкости к износу стали AISI 304 с увеличением времени при больших нагрузках (рис. 2, б).

На рис. 4 представлены зависимости скорости износа от приложенной нагрузки для изучавшихся сталей. При этом для стали AISI 304 взята максимальная скорость износа, которая имеет место на начальной стадии трения и определяется наклоном прямых линий на рис. 2, б. Скорость износа Ст. 3 больше, чем у стали AISI 304, при минимальной нагрузке и меньше при больших нагрузках. Изменение характера износа стали AISI 304 с ростом нагрузки видно на рис. 2, б. При малой нагрузке не проявляется упрочнение нержавеющей стали, о чем свидетельствует прямо пропорциональная зависимость износа от времени при нагрузке 30 кПа. И при этой нагрузке стойкость к износу Ст. 3, которая резко упрочняется на начальном этапе, оказывается выше (рис. 4).

Хотя предел текучести при сжатии у стали AISI 304 значительно выше, чем у Ст. 3 (рис. 3, а), значения микротвердости вдали от поверх-

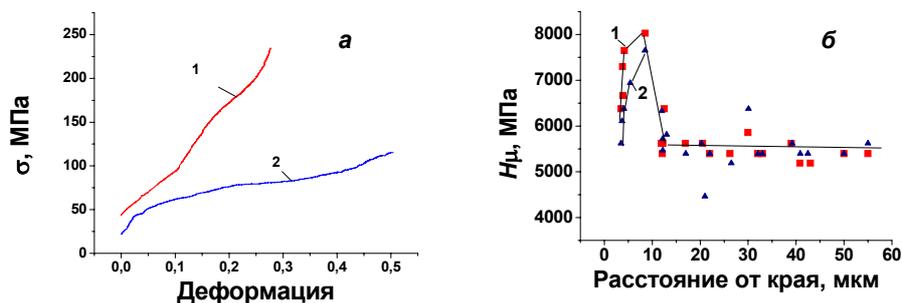


Рис. 3. Механические свойства стали AISI 304 (1) и Ст. 3 (2): а — кривые пластической деформации при сжатии; б — микротвердость в зависимости от расстояния от поверхности трения.

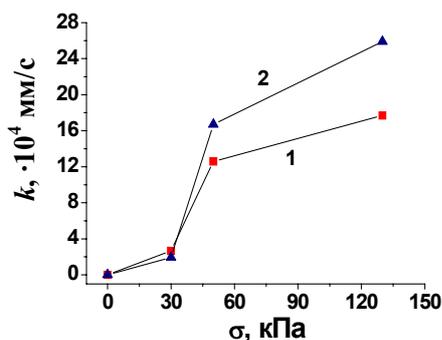


Рис. 4. Зависимость скорости линейного износа сталей AISI 304 (1) и Ст. 3 (2) по коксу в зависимости от приложенной нагрузки.



Рис. 5. Отпечатки индентора у поверхности трения стали AISI 304.

ности для обеих сталей близки (рис. 3, б). В соответствии с [4] микротвердость, определяемая с помощью индентора Виккерса, пропорциональна напряжению течения при деформации $\sim 4\%$. А при этой деформации напряжения течения исследуемых сталей сближаются (рис. 3, а). У поверхности трения наблюдается рост микротвердости в обеих сталях (рис. 3, б). Это свидетельствует о значительном деформационном упрочнении материала вблизи поверхности трения.

Однако у самой поверхности трения происходит снижение микротвердости. Причем в Ст. 3 снижение микротвердости фиксируется в более толстом приповерхностном слое (рис. 3, б). Изменение микротвердости у края шлифа вызвано не "завалом" поверхности при шлифовании и не близостью свободной поверхности, поскольку уколы достаточно далеки от нее (рис. 5). Микрофотографии поверхности трения позволяют сделать вывод, что уменьшение микротвердости обусловлено накоплением разрушения в приповерхностном слое (рис. 6). В Ст. 3 разрушения на поверхности глубже и их значительно больше, чем в стали AISI 304. Это и приводит к появлению вблизи поверхности трения более широкого слоя с низкой микротвердостью (рис. 3, б и 5).

На рис. 6 видно, что при трении одновременно по одному и тому же порошку с одинаковой нагрузкой на образцах разных сталей образуются полосы разной ширины. Трение происходит об углы отдельных порошинок. Рельеф на рис. 6, а, б — это результат самоорганизации процесса разрушения от единичных воздействий (царапин) частиц: формируются борозды многократного воздействия на разных уровнях и образуется иерархическая структура. Поверхность, описывающая крупные борозды, покрыта более мелкими бороздами, поверхность которых, в свою очередь, покрыта еще более мелкими бороздами. Многократное воздействие частиц в одном месте затрудняется разрушением. При максимальной нагрузке разрушение в Ст. 3 развивается сильнее, чем в стали AISI 304, и износ (рис. 4) больший. В результате скалывания в Ст. 3 при увеличении 600 (рис. 6, в) самоорганизованная полосчатая структура почти пропадает, тогда как в стали AISI 304 она видна при увеличении и 600 и 4000 (рис. 6, з, д). На Ст. 3 при увеличении 4000 (рис. 6, д) видны только полосы от единичных царапин поверхности образца частицами кокса.

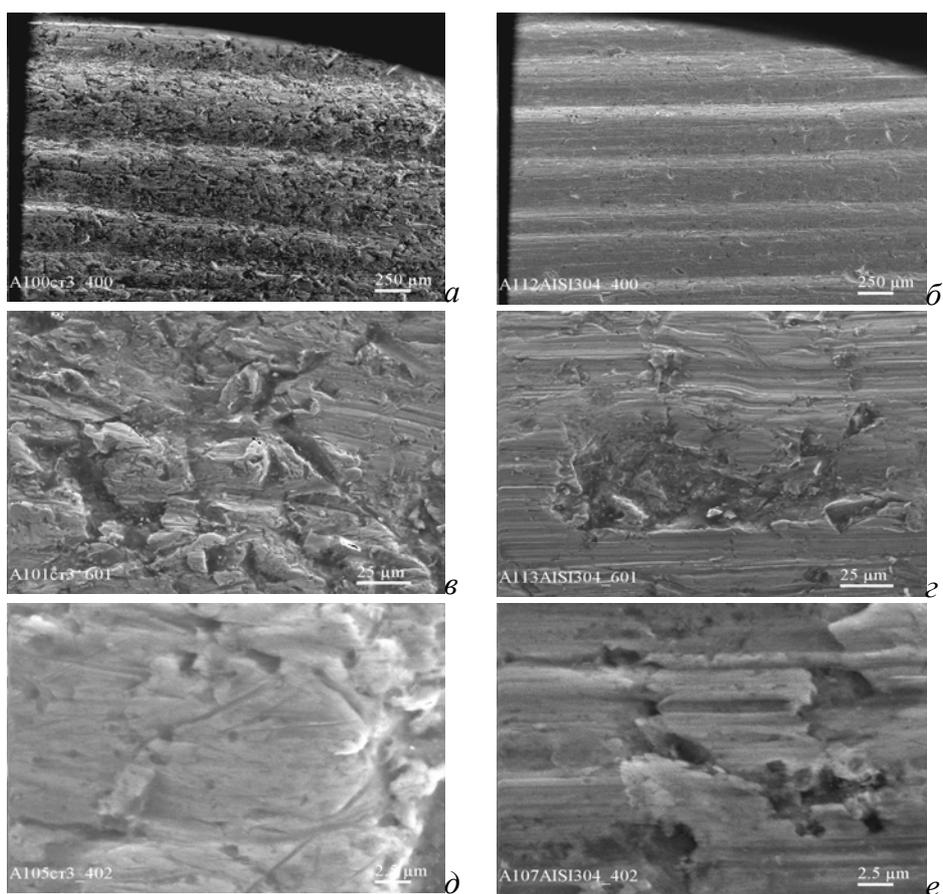


Рис. 6. Микроструктура поверхности трения сталей Ст. 3 (а, в, д) и AISI 304 (б, з, е) при нагрузке 130 кПа: а, б — х40; в, з — х600; д, е — х4000.

Полученные данные использованы для выбора материала и расчета толщины стенок обжиговой печи. В результате изменения поперечного сечения печи на различных ее участках изменяются скорость движения потока и давление в нем. Давление изменяется в пределах 5—10 кПа. При таком давлении скорость износа нержавеющей стали в 1,38 раза больше, чем Ст. 3. Поэтому для изготовления печи использовали Ст. 3.

Для расчета толщины стенок с целью обеспечения непрерывной работы печи не менее трех месяцев по графику на рис. 4 для нужного давления в печи оценивали скорость износа для скорости потока, которая соответствует скорости трения в эксперименте. Учет изменения скорости трения в реальных условиях проводили на основании того, что в довольно широком интервале скорости трения износ зависит только от пройденного пути. Уравнения (1) и (2) позволяют учесть влияние скорости трения на износ. Из них следует, что скорость линейного износа в реальных условиях меньше полученной оценки во столько раз, во сколько скорость потока частиц кокса в печи меньше скорости трения образца в эксперименте.

Выводы

Установлено, что при малых давлениях Ст. 3 более стойкая к износу при трении о порошок кокса, чем нержавеющая сталь AISI 304. При давлениях более 30 кПа стойкость к износу стали AISI 304 становится выше.

Изменения в относительной стойкости к износу сталей Ст. 3 и AISI 304 объясняются различием в характере упрочнения при деформации.

Наблюдалась самоорганизация разрушений от единичных воздействий частиц порошка в полосы. При трении в одних и тех же условиях на материале с меньшей стойкостью к износу формировались более грубые полосы.

Полученные данные позволили обосновать замену более дорогой нержавеющей стали AISI 304 на более дешевую Ст. 3 и рассчитать необходимую толщину стенок обжиговой печи, в которой стенки подвергаются воздействию потока частиц кокса.

1. Крагельский И. В. Трение и износ. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.
2. Хрущев М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. — М. : Наука, 1970. — 252 с.
3. Сафонов Б. П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений/ Б. П. Сафонов, А. В. Бегова. — М. : Новомосковский институт, 2004. — 65 с.
4. Tabor D. The hardness of solids // Rev. of Phys. in Technology. — 1970. — **145**, No. 1. — P. 145—172.

Зношування ферритної і аустенітної сталей при впливі незакріплених частинок коксу

М. П. Бродніковський, А. Г. Гогоці, П. В. Мазур, Ю. І. Зозуля,
Б. М. Малиновський, А. В. Самелюк, М. В. Губинський, С. С. Федоров

З'ясовано закономірності зносу сталей Ст. 3 і AISI 304 при терті по коксу. Проводили випробування на абразивний знос методом обертання з варіюванням сили притиску зразків сталей по порошку коксу. Досліджували абразивний знос, зміцнення при стисканні, мікротвердість поблизу поверхні тертя, характер руйнування поверхні тертя. Показано, що особливості деформаційного зміцнення матеріалу визначають зносостійкість при абразивному зносі. Відмінності в характері деформаційного зміцнення сталей Ст. 3 і AISI 304 приводять до того, що при малих тисках тертя Ст. 3 має більшу зносостійкість, ніж нержавіюча сталь AISI 304. При тиску більше 30 кПа більшу зносостійкість проявляє сталь AISI 304.

Ключові слова: зносостійкість, руйнування, деформація.

Wear ferritic and austenitic steels under the influence of loose particles of coke

М. P. Brodnikovskiy, A. G. Gogotsi, P. V. Mazur, Y. I. Zozulya,
B. N. Malinowskiy, A. V. Samelyuk, M. V. Gubinskiy, S. S. Fedorov

The aim of this work is to elucidate the characteristics of wear of AISI 304 and Cm. 3 steels at the friction on the coke. Tests were carried out on abrasive wear by rotation of steel samples on the powder coke with a variable pressing force on the samples. Abrasive wear, hardening under compression, microhardness near the friction surface, the fracture at friction surface were investigated. It has been shown that the characteristics of strain hardening of the material determine the wear resistance at abrasive wear. Differences in the nature of strain hardening of AISI 304 and Cm. 3 steels lead to the fact that at low pressures, wear resistance of cm. 3 is greater than of AISI 304 stainless steel. At pressures higher them 30 kPa, wear resistance of AISI 304 steel becomes greater them of Cm. 3.

Keywords: wear resistance, fracture, deformation.