

УДК 681.2;620.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36638

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА МАТЕРИАЛОВ ШАРОВЫХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Е. М. Прохоренко

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник*

E-mail: fort-58@mail.ru

В. Ф. Клепиков

Доктор физико-математических наук, профессор, член-корресподент НАН Украины, директор*

В. В. Литвиненко

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора*

П. А. Хаймович

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник**

Н. А. Шульгин

Инженер-исследователь**

А. И. Морозов

Кандидат технических наук, доцент
Национальный университет гражданской защиты Украины
ул. Чернышевского, 56, г. Харьков, Украина

*Институт электрофизики и

радиационных технологий НАН Украины

ул. Гуданова, 13, г. Харьков, Украина, 61002

**Национальный Научный Центр Харьковский

Физико-Технический Институт НАН Украины

ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

Вивчалися процеси спрацювання матеріалів куль, які використовуються в кульових барабанних млинах, як робоче тіло. Досліджувалася динаміка появи і розвитку областей із зниженою твердістю. Визначені межі міцності різних ділянок кулі. Показано, що кількість областей із зниженою твердістю зростає в процесі експлуатації

Ключові слова: твердість матеріалу, структура куль барабанних млинів, система пылеприготовлення

Изучались процессы износа материалов шаров, которые используются в шаровых барабанных мельницах, как рабочее тело. Исследовалась динамика появления и развития областей с пониженной твердостью. Определены пределы прочности различных участков шара. Показано, что количество областей с пониженной твердостью возрастает в процессе эксплуатации

Ключевые слова: твердость материала, структура шаров барабанных мельниц, система пылеприготовления

1. Введение

Решение вопросов повышения эффективности работы энергетики является важной задачей. Для выполнения этой цели необходимо провести модернизацию электрогенерирующего комплекса, что включает в себя: увеличение эффективности работы электрогенерирующих объектов, понижение потребления энергоносителей, продление ресурса работоспособности [1]. Так как проектирование, изготовление оборудования и строительство электрогенерирующих объектов осуществлялось более 40 лет назад, то и идеология, заложенная в принципы их работы, соответствовала концепции тех времен. Поэтому достичь нынешних требований по экономичности, эргономике, экологии очень затруднительно. Существенно ухудшают эти показатели такие факторы как износ оборудования [2], изменения в структуре топлива.

Одним из вопросов повышения эффективности эксплуатации объектов энергетики есть проблема

улучшения топливной смеси. При этом существенное влияние оказывают системы приготовления пылеугольной смеси. В них, в качестве рабочего тела, применяются специальные стальные шары. Данные шары являются расходным материалом. Поэтому, увеличение времени их жизни повышает эффективность работы всей системы. Изучение всего комплекса этих вопросов позволяет дать рекомендации по изменению работы электрогенерирующего комплекса.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Одним из условий увеличения эффективности работы ТЭС есть улучшение работы системы приготовления и подачи пыли [3]. Важным параметром является размер пыли. Получение пыли осуществляется путем размола угля в шаровых барабанных мельницах (ШБМ) [4]. Для примера на Змиевской

ТЭС эксплуатируются 6 блоков по 200 МВт и 4 блока по 300 МВт. Приготовление топливной смеси для каждого 200 МВт блока осуществляется двумя ШБМ типа Ш-50, для 300 МВт блока тремя ШБМ типа Ш-50А. Основной принцип работы шаровой барабанной мельницы основан на измельчении материала твердотельными шарами во вращающейся емкости. Размер пыли зависит от режима работы, размеров и твердости шаров. Время “срабатывания” шаров прямо пропорционально экономическому показателю. Чем больше время выработки, тем выгоднее эксплуатация ШБМ. Поэтому вопросы поведения шаров во время эксплуатации, остаются насущными.

Одной из основных характеристик шаров, которая позволяет оценить износ шара, есть его твердость.

Значение твердости является важным при определении потребностей предприятия в шарах. Потребление определяется по формуле [5]:

$$G_{ш} = D_{\text{деств}} \cdot K_{з.т} \cdot \sum V_i, \quad (1)$$

где $G_{ш}$ – суммарное потребление; $D_{\text{деств}}$ – действительное значение удельного износа шаров; $H_{\text{деств}} = H_{\text{норм}} \cdot K_{з.т}$ – коэффициент зольности; $\sum V_i$ – расход топлива. Исходя, из значения $G_{ш}$, есть возможность определить необходимость в шарах для нормальной работы ШБМ. Коэффициент зольности дает возможность найти эффективность теплопроизводства. Он определяется по довольно сложной формуле, которая в настоящей работе не детализируется. Значение величины $\sum V_i$ является табличным. Из всех этих параметров нас интересует параметр $D_{\text{деств}}$, который зависит от коэффициента твердости следующим образом:

$$D_{\text{деств}} = D_{\text{норм}} \cdot [1 + \delta(HV_{\text{норм}} - HV_{\text{действ}})], \quad (2)$$

где $D_{\text{норм}}$ – нормативный износ шаров; δ – коэффициент пересчета (табличный); $HV_{\text{норм}}$ – нормативное значение твердости шаров; $HV_{\text{действ}}$ – действительное значение твердости шаров.

Значение нормативного износа шаров понижается с повышением твердости. И, соответственно, уменьшается расход шаров, что дает более высокую эффективность приготовления пылеугольной смеси.

Контроль изменения структуры шаров возможно осуществить посредством воздействия на образцы пучка ускоренных частиц [6]. В работе [7] рассматривается появление на поверхности стали микрократеров, в зависимости от структуры материала. Временная эволюция данных микрократеров позволяет произвести изучение изменения структуры, облучаемой стали [8]. Анализ полученных результатов дает возможность контролировать прохождение процессов разрушения материалов [9]. Однако, при рассмотрении вопроса изменения структуры материалов не рассматривался вопрос изменения такого макроскопического параметра как твердость. Его изучение дает возможность контролировать появление и развитие образования зон с аномальным значением твердости, где могут образоваться зоны разрушения.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы есть изучение изменения структуры материала шаров, которые применяются как рабочее тело в шаровых барабанных мельницах, для увеличения их эксплуатационных возможностей и времени работы.

Для достижения поставленной цели решались такие задачи:

- измерялось изменение твердости шаров в процессе эксплуатации;
- находилось предельное значение прочности;
- проводилась диагностика структуры и состояния поверхности шара.

4. Определение областей с изменением твердости. Изучение структуры материалов шаров шаровых барабанных мельниц

Шары шаровых барабанных мельниц (рабочее тело), предназначенные для помола угля, изготавливались из специальной углеродистой низколегированной и легированной инструментальной стали (8ХФ, 9ХФ, 8Х6НФТ, 9Х5ВФ), в соответствии с требованиями ГОСТ 72324-89 и ДСТУ 3499-97 [10]. При этом, для шаров диаметром 15–60 мм, массовая доля углерода в углеродистой стали должна быть не менее 0,40 %; углеродный эквивалент низколегированной и легированной конструкционной стали должен быть не менее 0,50 %. При размоле угля применяют различных групп твердости. Твердость измерялась по шкале Бриннеля. При выполнении работ по определению величины твердости необходимо использовать твердомер ПМТ-3. В заводских условиях, в соответствии с требованиями ГОСТа и технических условий контроль твердости проводился в два этапа. На первом этапе, проводились измерения твердости на поверхности шара в точках расположенных в вершинах равнобедренного треугольника. Второй этап заключался в измерении твердости на глубине равной половине радиуса. Уменьшение толщины осуществляется обдиркой на шлифовальном круге. В случае несоответствия заданным показателям твердости происходит выбраковка. Поставка потребителям осуществляется, когда измеренные значения соответствуют табличным.

Нами исследовалась твердость шаров, которые применяются в ШБМ. Для контроля, предварительно было произведено измерение твердости по всей поверхности новых шаров, которые не использовались. Рассматривались шары четвертой группы твердости.

После проведения замеров твердость на поверхности новых шаров была равна значению 9800 МПа (980 кг/мм²). Твердость на глубине половины радиуса имела значение 9780 МПа (978 кг/мм²). Эти значения были немного выше, чем требования ГОСТа (65/653 HRC/HV, 8200 МПа).

Также проверили значение величины твердости по всей глубине шара. С этой целью провели стачивание к центру. Удаление материала и измерения проводили с шагом 5 мм. Твердость составила величину близкую к 9700 МПа.

Для проверки воздействия методов обработки на характеристики твердости, удаление части материала

проводилось и другими методами: фрезеровкой, стачивание на токарном станке. Снятие проводилось в медленном режиме без перекаливания. Как и в случае стачивания на наждачном круге, шаг измерений был 5 мм. Твердость изменялась от величины 9680 МПа до значения 9720 МПа. Следовательно, при плавном удалении материала не образуются поверхностные пленки напряжений. Т. е для проверки твердости по глубине, удаление части металла можно проводить любыми из вышеперечисленных способов. Проверка твердости в приповерхностном слое (глубина под поверхностью от 0.1 мм до 1 мм) показала, что она равна твердости на поверхности. Так как твердость на поверхности, твердость под поверхностью и твердость в теле шара равны, то первоначальные образцы не имели закаленной или зацементированной поверхности.

На следующем этапе исследовались свойства материалов, из которых состоят бывшие в эксплуатации шары, т. е те, которые использовались в ШБМ при размолу угля. Они имели размеры 12 мм, 20 мм, 35 мм.

Для увеличения точности определения особых зон на каждом шаре проверено 14 точек. Замеры были проделаны на пересечении границ и на средней точке поверхности телесного угла $\pi/2$. Данный выбор распределения определялся из условия равномерности нахождения на поверхности.

Вторым исследовался шар, который эксплуатация ровался в ШБМ. Его форма имела отличия от сферы. Первоначальный диаметр шара составлял величину 40 мм. Выработка составила от 2 мм до 5 мм, т. е. диаметр изменялся от 35 мм до 38 мм. Сразу была измерена твердость на поверхности по схеме. В большинстве точек её значения равнялись 8000–8100 МПа. Сравнивая, эту величину со значением твердости на поверхности нового шара, наблюдаем разницу в твердости около 15 %, что в абсолютном выражении составляет значение 1500 МПа. Это связано с уменьшением твердости на поверхности в результате эксплуатации. Также, обнаружили несколько точек на поверхности, в которых значение твердости отличалось в сторону понижения. Точки с пониженной твердостью были сгруппированы по соседству и образовали две выделенных области. С целью определения границ этих зон провели сканирование значения твердости по поверхности. Первоначальное измерение твердости производили с шагом 5 мм. При сканировании, для определения границ зоны с пониженной твердостью, с шагом 1 мм. Одна из выделенных зон имела круговую область с диаметром 15 мм. Схематически эти области показаны на рис. 1.

В центральной части особой зоны находится пятно с диаметром 2мм, которое имеет минимальное значение твердости, отличающееся от значения твердости нового шара на 30 % и от значения твердости работающего шара на 15 %. Абсолютное значение составляло величину 6630 МПа. Что существенно ниже, чем в остальном шаре. С удалением от центрального пятна твердость возрастает. Вторая область также имела круговую форму и находилась в стороне от первой неоднородности. Она имела диаметр 9 мм. Минимальное значение твердости на её поверхности было 6800 МПа.

В табл. 1 приведены значения твердости, в зависимости от радиуса, на поверхности шара для двух областей, где наблюдали аномальное её снижение.

Данные приведенные в строке НВ1 – соответствуют измерениям для первой аномальной зоны, НВ2 – для второй аномальной зоны.

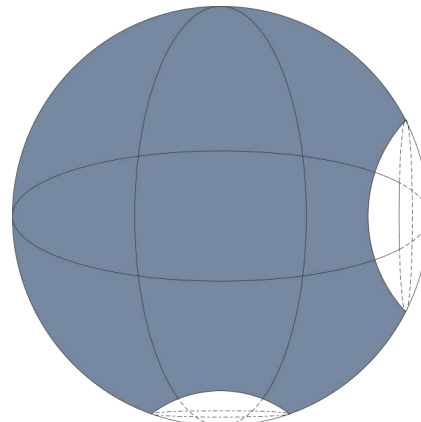


Рис. 1. Схематическое изображение нахождения зон с отличиями твердости на шаре

Таблица 1

Твердость по поверхности шара в зависимости от радиуса

R(мм)	0	1	2	3	4	5	6	7
НВ1(МПа)	6630	6630	6900	7200	7500	7700	7900	8100
НВ2(МПа)	6800	6900	7300	7700	7900	8100	8100	8100

Дополнительное обследование других шаров показало, что изменение твердости в аномальных зонах однотипно.

Для определения глубины нарушенной зоны были сделаны секущие разрезы по всему объему шарика, в том числе и через дефектную зону. Получили 4 шайбы толщиной 1.5 мм (рис. 2.)



Рис. 2. Внешний вид целого шарика и полученных шайб

Так как измерения твердости проводились по поверхности разреза, т. е перпендикулярно плоскости шайбы, то провели сравнение твердости на поверхности шарика с твердостью в приповерхностном слое, но измеренной в перпендикулярном направлении со стороны разреза. Значение этих величин совпали.

Считаем, что значения твердости, измеренной по плоскостям разреза, совпадает со значениями твердости, в этой точке, сделанной перпендикулярно к поверхности шара.

Твердость по боковой поверхности порезанных шайб измерялась по диаметральному линиям, которые расположены друг к другу под углом 60° (рис. 3).



Рис. 3. Шайбы с отмеченными линиями, по которым измеряли твердость и сегментами, где твердость понижена

Шаг между отдельными точками был, как и в предыдущем случае, 5 мм, при уточнении границ зоны ослабления 1 мм. В нарушенной зоне, твердость, измеренная по боковой поверхности, изменялась от значения 6630 МПа, до значения 8100 МПа на границе нарушенной зоны. Минимальное значение было обнаружено на поверхности шара по центру дефектной зоны. Значение твердости увеличивалось при удалении от центральной точки вглубь шара. Максимальная глубина обнаружения дефекта составляла 4 мм для первой особой зоны и 3 мм для второй зоны. Области с ослабленной твердостью отмечены маркером (рис. 3).

Значения твердости в зависимости от глубины приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение твердости (МПа) в зависимости от глубины (мм)

h(мм)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
НВ1(МПа)	6630	6650	7300	7900	8500	9200	9700	9700	9700
НВ2(МПа)	6800	6900	7500	8100	8600	9200	9700	9700	9700

Значения твердости приведены для первой аномальной зоны (НВ1) и для второй (НВ2).

Динамику изменения твердости можем наблюдать на графиках, которые предоставлены на рис. 4.

На графике рис. 4, а приведены кривые для изменения твердости по поверхности аномальных зон, на рис. 4, б по глубине. Синяя линия (маркер-ромб) соответствует изменению твердости для первой аномальной зоны шара. Красная линия (маркер-квадрат) – отображает изменение твердости для второй аномальной зоны. Видно, что в результате воздействия, образуется область с радиусом 1 мм, в которой минимальное зна-

чение твердости. Для первой области это 6630 МПа, для второй 6800 МПа. С увеличением расстояния от центральной части твердость возрастает и становится равной твердости всего шара. Отметим, что в глубину изменение слабее, чем в приповерхностном слое. Это видно из того, что красные линии выходят на насыщение (сравниваются с общим значением) раньше, чем синие.

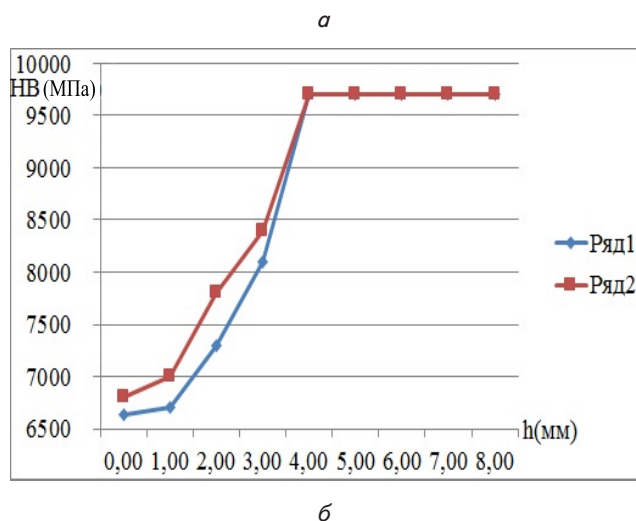
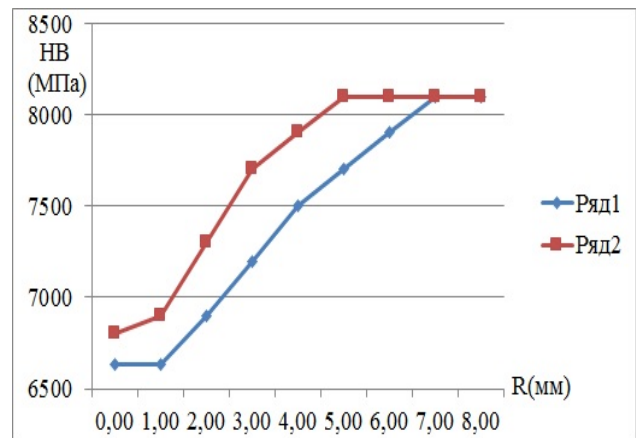


Рис. 4. График изменения твердости в зависимости от размера: а – по поверхности; б – вглубь

Для проверки размеров нарушенной области, аналогичные измерения твердости провели и для шайб которые находились рядом с испытуемой. Твердость проверили с двух сторон шайб. На шайбе, которая находилась слева: размеры дефектной зоны имели ширину 9 мм и глубину 3 мм с одной стороны, и ширину 7 мм и глубину 2 мм с другой. Для шайбы, которая находилась справа: ширина 6 мм, и глубина 2 мм, ширина 5 мм, и глубина 2 мм соответственно для разных сторон. Также выделенные области выделены и показаны на рис. 3, б. И на этих шайбах ослабления твердости располагались в сферическом сегменте.

Изучив изменение твердости по всему объему, можем сделать предположение о дефектах, которые имели вид эллипсоидов. Эллипсоиды располагались на теле шара таким образом, что большая полуось была перпендикулярна радиусу, а малая параллельна.

Так как исследовать выработку шаров в процессе эксплуатации затруднительно, то были исследованы шары после выгрузки. В соответствии с эксплуатационными правилами выгрузка производится при достижении размера шаров меньше 15 мм. Нами были получены образцы шаров с размерами 12–15 мм.

Исследование проходило по процедуре, приведенной выше. Измерение твердости показало, что в процессе эксплуатации происходит её общее снижение. Значение твердости на поверхности изменялось от 6600 МПа до 7100 МПа. Т. е. общее уменьшение составляло величину до 30 % от первоначального значения. На поверхности наблюдаются области выработки. В отличие от начального этапа, когда было обнаружено только две области с пониженным значением твердости, для данного случая найдено восемь особых зон. Эта закономерность распространялась на все шарики. Лишь несколько шариков имело по пять зон с понижением твердости, остальные по восемь. Структура этих областей имела вид сферического сегмента.

Дальнейшее изучение дефекта включало в себя исследование пластичности материала. Данные работы проводили на разрывной машине. Из обследованных шайб были вырезаны тимплеты. Они имели следующие размеры: длина 20 мм, ширина захвата 3.2 мм, ширина разрывной части 0.9 мм, толщина 0.4 мм. Тимплеты вырезались с разных участков шайбы. Так как толщина шайбы 2 мм, то для каждого участка изготовлено по три идентичные тимплеты. На разрывной машине было исследовано по два образца с каждой области. Внешний вид тимплет после испытаний, представлен на рис. 5.

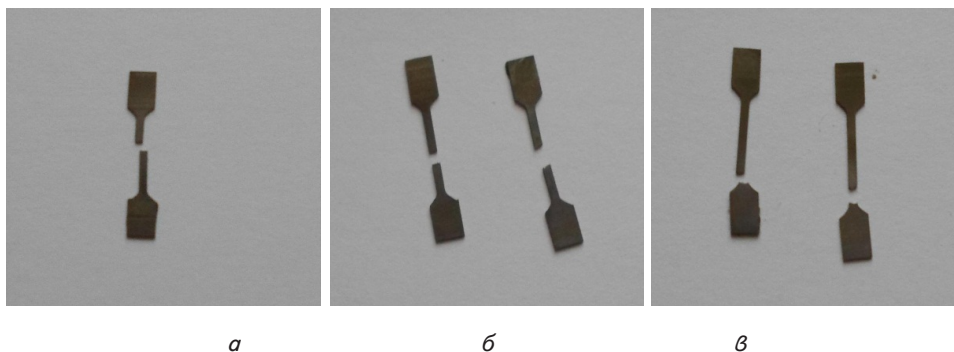


Рис. 5. Тимплеты после исследований на разрывной машине: а – первая группа; б – вторая группа; в – третья группа

После проведения эксперимента все образцы можно разделить на три группы. Тимплеты каждой из групп были представлены на рис. 5, а–в. Они различаются между собой по разрывному усилию. Как видно из рисунка также отличается и форма излома.

Рассмотрим образец из первой группы. Его изображение дано на рис. 5, а. Для изготовления образцов первой группы, использовали шайбы, после порезки нового шара, который не был в эксплуатации. Все тимплеты из первой группы были вырезаны из различных секторов шара. Поверхность разрыва имеет ровную поверхность, без глубоких каверн. Она расположена под углом девятнадцати градусов к линии прилегания на грузки. Разрыв находится посередине тимплеты. Сила разрыва имела величину 140.6 кГ/мм². Данное зна-

чение разрывной силы было максимальным для всех образцов первой группы.

На рис. 5, в, представлены фотографии тимплет, вырезанных из шаров, которые уже были в эксплуатации. Левая тимплет из шара, который только начал эксплуатироваться (износ составил 7 мм от начального радиуса), правая из шара, после выгрузки из шаровой мельницы. Они были взяты из областей, где не наблюдалось ослабления твердости. Значение силы разрыва изменялось в интервале 119 кг/мм²–122 кг/мм². Разрыв находится в средней части тимплеты, что свидетельствует об одинаковой твердости по всему объему. По результатам измерений можем сделать вывод, что снижение твердости происходит не только в точках удара, но и происходит постепенное её уменьшение по всей поверхности шара.

Тимплеты, фотографий, которых приведены на рис. 5, б, также были вырезаны из шаров, бывших в эксплуатации. Однако зоны, из которых они брались, подбирались таким образом, что включали в себя области с аномальным понижением твердости. Левая тимплет была вырезана из шара, который только начал эксплуатироваться, правая из шара после выгрузки из шаровой барабанной мельницы. Сила разрыва составляла значение 104–108 кг/мм². Разрыв находился возле крепления. Это свидетельствует об уменьшении твердости в этой области. Причина данного эффекта есть ударное повреждение и разрушение шара в процессе эксплуатации.

Отметим, что для этих тимплет сила разрыва близка. Таким образом, твердость шаров, из-за ударного воздействия, уменьшается до определенного порогового значения, после которого происходит разрушение части шара.

Изучение структуры поверхности разрыва тимплет, позволяет определить, какой из механизмов разрушения преобладает. При механическом разрыве, поверхность имеет однородную равномерно нарушенную структуру. Разрыв с пластической деформацией сопровождается вытягиванием отдельных элементов металла, нарушением равномерности поверхности.

Так как шарики изготавливаются из специальных инструментальных низколегированных сталей, то разрыв должен быть хрупким. Если разрыв происходит с пластической деформацией, то это свидетельствует об изменении структуры материала, т. е. фазовом превращении металла.

На рис. 6. дана фотография тимплеты после проведения испытаний на разрывной машине. На фотографии видно, что область разрыва имеет толщину равную толщине тимплеты.

В области разрыва отсутствует пластическое растяжение. Поверхность разрыва имеет резко выраженную структуру. Для точного определения структуры разрыва были сделаны снимки с более высоким разрешением (рис. 7).

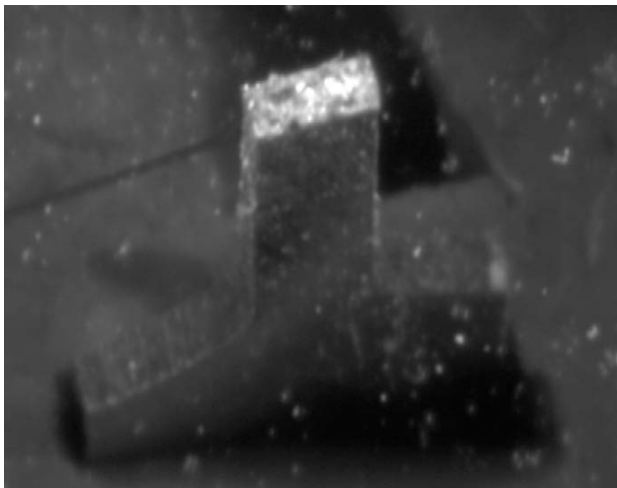
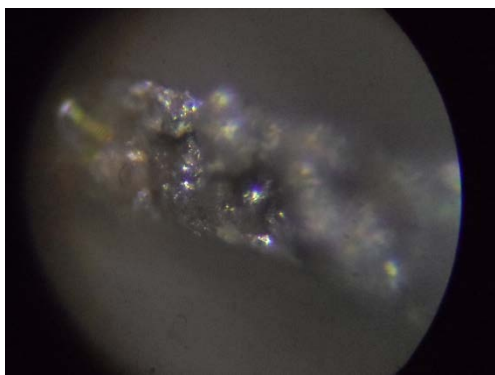
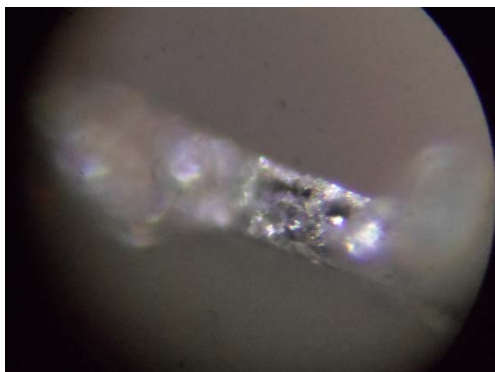


Рис. 6. Увеличенное изображение тимплеты



а



б

Рис. 7. Снимки поверхности разрыва тимплет: а — шар новый; б — шар в процессе эксплуатации

На снимке рис. 7, а представлена поверхность разрыва тимплеты, которая была изготовлена из шара, не

бывшего в эксплуатации. Наблюдаем крупнозернистую структуру поверхности. Удлинений и вытянутых элементов нет. На рис. 7, б представлена фотография поверхности разрыва тимплеты изготовленной из шара, который уже эксплуатировался. Эта тимплета вырезана из той части шайбы, где обнаружили область с пониженной твердостью. Поверхность разрыва имеет крупнозернистую структуру, удлинений нет. Аналогичную структуру имеет и поверхность разрыва тимплеты изготовленной из бывшего в эксплуатации шара, но из того места шайбы где не было области с пониженной плотностью. Таким образом, можно сделать вывод, что в процессе эксплуатации шары вырабатываются посредством выкряшивания в областях пониженного давления, при этом фазовых изменений материала шара нет.

При рассмотрении вопроса износа шаров стоял вопрос о температурном воздействии в результате эксплуатации. Для этого посчитаем максимальную тепловую энергию, которая может выделиться. Диаметр мельниц ШБМ-50 и ШБМ-50А составляет значение 3 м, частота вращения до 60 с^{-1} . Т. е. шар может не более 60 раз упасть с высоты 3 м. При весе шара диаметром 40 мм равном 0,294 кг, за один удар выделяется 8,65 Дж энергии, за минуту 520 Дж. Это все посчитано для максимальных значений. На практике выделяется значительно меньше. Данного количества тепловой энергии недостаточно для существенного нагрева. Поэтому присутствует только механическое разрушение.

Следует отметить, что при использовании шариков с упрочненным поверхностным слоем эффект упрочнения будет сказываться только на начальном этапе работы. При износе поверхностного слоя скорость разрушения сравнивается со скоростью разрушения шариков без упрочнения поверхности.

5. Выводы

Получены характеристики изменения твердости шаров шаровых барабанных мельниц. Показано, что в процессе эксплуатации шаров в их приповерхностной зоне образуются области с пониженной твердостью.

Обнаружено, что эти аномальные зоны имеют форму эллиптических сегментов, большая полуось которых перпендикулярна диаметру. Выяснено, что при достижении определенного минимального значения твердости шаров происходит их разрушение по эллиптическим сегментам.

Разрушение поверхностного слоя происходит путем механического разрушения, без фазового изменения материала шара.

Литература

1. Воинов, О. П. Котло будування й розвиток енергетики України [Текст] / О. П. Воинов, В. С. Полонік. // Енергетика та електрифікація : наук.-вироб. журн. – 2012. – № 5. – С. 3–5.
2. Прохоренко, Е. М. ИК-радиометрия, как инструмент контроля оборудования энергогенерирующих объектов [Текст] / Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Н. И. Базалеев, О. Е. Брюховецкая, А. И. Морозов, А. А. Захарченко, И. Я. Сафонов, В. В. Колесникова // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2012. – № 1 (30). – С. 353–360.

3. Клепиков, В. Ф. Перспективы использования радиационных методов очистки дымовых газов и диагностики оборудования для топливоподготовки [Текст] / В. Ф. Клепиков, Д. А. Аннопольский, С. И. Бабушкина, В. В. Литвиненко, Е. А. Мелякова, Е. М. Прохоренко, М. А. Сагайдачный. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 2 (36). – С. 34–38.
4. Кесова, Л. А. Влияние системы пылеприготовления на топочный режим котла при высококонцентрированной пылеподаче на горелки [Текст] / Л. А. Кесова // Энергетика та електрифікація: наук.-вироб. журн. – 2009. – № 5. – С. 41–45.
5. Левит, В. Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях [Текст] / В. Т. Левит. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 384 с.
6. Proskurovsky, D. I. Physical foundations for surface treatment of materials with low energy, high current electron beams [Text] / D. I. Proskurovsky, V. P. Rotshtein, G. E. Ozur, Y. F. Ivanov, A. B. Markov // Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125, Issue 1-3. – P. 49–56. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00604-0
7. Zou, J. X. Selective surface purification via crater eruption under pulsed electron beam irradiation [Text] / J. X. Zou, K. M. Zhang, C. Dong, Y. Qin, S. Z. Hao, T. Grosdidier // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89, Issue 4. – P. 1904–1913. doi: 10.1063/1.2234306
8. Hao, S. Z. Microstructure evolution occurring in the modified surface of 316L stainless steel under high current pulsed electron beam treatment [Text] / S. Z. Hao, P. S. Wu, J. X. Zou, T. Grosdidier, C. Dong // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253, Issue 12. – P. 5349–5354. doi: 10.1016/j.apsusc.2006.12.011
9. Zou, J. X. Cross-sectional analysis of the graded microstructure in an AISI D2-steel treated with low energy high-current pulsed electron beam [Text] / J. X. Zou, T. Grosdidier, K. M. Zhang, C. Dong // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255, Issue 9. – P. 4758–4764. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.123
10. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц. [Текст] / Введ. 01.02.1989-01-02. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 26 с.

В роботі підтверджено можливість формування на основі часток магнетиту, отриманих із сполук заліза методами хімічної конденсації, високоефективних сорбентів із відмінними фільтраційними властивостями, що дозволяє проводити процес сорбції в динамічному режимі та уникнути суттєвих недоліків, пов'язаних із високою дисперсністю часток магнетиту. Встановлено, що в процесі циклів сорбції-регенерації властивості твердої фази практично не змінюються

Ключові слова: стічні води, нафтопродукти, сорбція, динамічний режим, магнетит, прокалювання

В работе подтверждена возможность формирования на основе частиц магнетита, полученных из соединений железа методами химической конденсации, высокоэффективных сорбентов с отличными фильтрационными свойствами, которые позволяют проводить процесс сорбции в динамическом режиме и избежать существенных недостатков, связанных с высокой дисперсностью частиц магнетита. Определено, что в процессе циклов сорбции-регенерации свойства твердой фазы практически не изменяются

Ключевые слова: сточные воды, нефтепродукты, сорбция, динамический режим, магнетит, прокалывание

УДК 628.16

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36251

ВИДАЛЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ З ВОДИ СОРБЕНТАМИ НА ОСНОВІ МАГНЕТИТУ

В. М. Радовенчик

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: dokeco@ukr.net

М. І. Романенко

Аспірант*

E-mail: marushka_r@ukr.net

С. В. Гринчук

Кафедра екології

Національний університет

«Києво-Могилянська Академія»

вул. Г. Сковороди, 2, м. Київ, Україна, 04655

E-mail: SonichkaScorpio@gmail.com

А. С. Глущенко*

E-mail: m.gomelya@kpi.ua

*Кафедра екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Сучасний рівень використання органічного палива в якості енергоносіїв викликає інтенсивне забруднен-

ня всіх компонентів довкілля. Особливо потерпає від забруднення нафтою та нафтопродуктами гідросфера, яка є не лише наймасштабнішим транспортним середовищем, а й накопичує всі органічні речовини,