

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
МЕХАНИЗМОВ ИЗНОСА И РАЗРУШЕНИЯ
МАТЕРИАЛОВ ШАРОВ БАРАБАНЫХ МЕЛЬНИЦ**

**В. Ф. Клепиков¹, Е. М. Прохоренко¹, В. В. Литвиненко¹, В. В. Брюховецкий¹,
В. В. Шатов¹, Н. А. Шульгин², А. И. Морозов³**

¹*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, (Харьков),
Украина,*

²*Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт
НАН Украины, (Харьков),
Украина,*

³*Национальный университет гражданской защиты Украины, (Харьков)*

Поступила в редакцию 17.05.2015

Изучалось изменение твердости поверхностного слоя шаров, которые используются в шаровых барабанных мельницах, как рабочее тело. Исследовалась динамика появления и развития микродефектов, областей разрушения. Определялись основные механизмы изменения структуры материала шаров. Рассматривалась зависимость износа шара от накопления структурных изменений.

Ключевые слова: твердость шаров, механизмы износа и разрушения материала шаров барабанных мельниц, изменение структуры, система пылеприготовления.

**СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ
МЕХАНІЗМІВ ЗНОСУ ТА РУЙНУВАННЯ**

МАТЕРІАЛІВ КУЛЬОК БАРАБАНИХ МЛИНІВ

**В. Ф. Клепиков, Е. М. Прохоренко, В. В. Литвиненко, В. В. Брюховецкий,
В. В. Шатов, М. А. Шульгин, А. І. Морозов**

Вивчалася зміна твердості поверхневого шару куль, які використовуються в кульових барабаних млинах, як робоче тіло. Досліджувалася динаміка появи і розвитку мікродефектів, областей руйнування. Визначалися основні механізми зміни структури матеріалу куль. Розглядалася залежність зносу кулі від накопичення структурних змін.

Ключові слова: твердість куль, механізми зносу і руйнування матеріалу куль барабаних млинів, зміна структури, система пилеприготування.

**STRUCTURAL FEATURES
OF MECHANISMS OF WEAR AND DESTRUCTION
OF MATERIALS OF BALLS OF DRUM MILLS**

**V. F. Klepikov, E. M. Prokhorenko, V. V. Lytvynenko, V. V. Bryuhovetsky,
V. V. Shatov, N. A. Shul'gin, A. I. Morozov**

A change was studied to hardness of superficial layer of balls which are used in ball drum mills, as a working body. The dynamics of appearance and development of microflaws was investigated, areas of destruction. The basic mechanisms of change of structure of material of balls were determined. Dependence of wear of ball was examined on the accumulation of structural changes.

Keywords: hardness of balls, mechanisms of wear and destruction of material of balls of drum mills, change of structure, pulverizing system.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросам повышения эффективности функционирования ТЭС уделяется значительное внимание. Это связано с несколькими основными причинами. Старение основных фондов — основная

масса оборудования была изготовлена более 40 лет назад, соответственно необходима его замена ввиду физического износа. Существенно изменились принципы работы в соответствии с современными требованиями экономических показателей, экологии.

Значительно ухудшились структурные показатели топлива. Первоначально, большинство ТЭС рассчитывалось под использование газа, мазута, высокоэнергетических углей. В настоящее время, ввиду повышающегося роста цен энергоносителей, преобладающим топливом есть низко реакционные угли.

Важным в этом вопросе есть повышение теплоотдачи топлива. Одним из направлений улучшения сгорания является качество приготавливаемой топливной смеси [1]. Для этого необходимо провести доработку и усовершенствование систем пылеприготовления [2, 3]. Система приготовления топливной смеси состоит из нескольких блоков. Среди них важное место занимают шаровые барабанные мельницы (ШБМ). Шаровые барабанные мельницы бывают различные по размерам и модификации. Для примера, на Змиевской ТЭС, применяют одну ШБМ (типа Ш-50 или Ш-50А) на 100 МВт мощности. В ШБМ измельчают уголь до нужного размера. Измельчение производится при помощи металлических шаров. Качество топливной смеси напрямую связано с повышением теплоотдачи, КПД котлов, количеством потребляемого угля, «подсветочного» мазута, газа. Все это, в комплексе, дает рост производства электрической и тепловой энергии, повышает экономические, экологические показатели работы энергогенерирующего комплекса. В процессе приготовления пылеугольной смеси происходит износ шаров. Уменьшение скорости износа шаров повышает эффективность размола угля, качество пылеугольной смеси. Улучшение эксплуатационных характеристик шаров осуществляется за счет изменения структуры материала, упрочнения поверхности. Для этого необходимо изучить все процессы, которые происходят в процессе эксплуатации.

Целью данной работы есть исследование процессов разрушения материала шаров, изменения твердости шаров, которые применяются как рабочее тело в шаровых барабанных мельницах, в процессе эксплуатации. Изучение механизма износа. Определение изменения структуры материала в зависимости от накопления усталостных нарушений.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При изготовлении шаров шаровых барабанных мельниц, которые применяются для размола угля различных спецификаций, используются специальные углеродистые низколегированные стали 8ХФ, 9ХФМ, 8Х6НФТ, ХГС и т. д. [4].

При измерении микротвердости использовался твердомер ПМТ-3. Твердость измерялась по шкале Бриннеля.

Работы проводились в следующей последовательности. Перед началом загрузки из массы шаров, случайным образом, извлекался шар. Также, в процессе работы, проводились выемки шаров через определенные промежутки времени. Последний шар брался для анализа после выгрузки ШБМ. Процедура измерения твердости для всех шаров была одинакова. Первоначально проводилось измерение твердости на поверхности в 14 точках. Из них 6 были точками на границе телесного угла $\pi/2$, а 8 являлись серединой телесного угла $\pi/2$. Расположение точек показано на рис. 1, а. Данное количество точек измерения и их количество позволяет с высокой точностью просмотреть твердость на поверхности. На следующем этапе шары разрезались поперек. Толщина шайб была равной 1,2 мм. После этого, проводились измерения твердости по диаметральным линиям шайб с шагом 5 мм. Линии, по которым проводили обследования, расположены друг относительно друга, под углом 60 градусов. Фотография одной из шайб приведена на рис. 1, б.

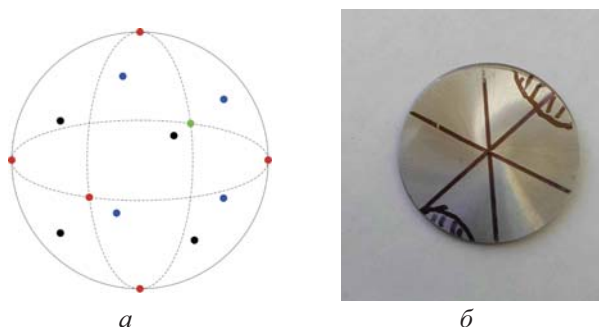


Рис. 1. Вид типовой шайбы, полученной из шара шаровой барабанной мельницы-б

Исследовали шары с начальным диаметром 40 мм. Твердость на поверхности нового шара находилась в интервале 9700–9720 МПа (970–972 кг/мм²). Это равно твердости

четвертого класса. В соответствии с требованиями ГОСТа, была проверена твердость на глубине равной половине радиуса. Значение ее было равно значению на поверхности.

На следующих этапах исследовались шары, которые эксплуатировались. В результате стирания их диаметры стали 35 мм, 25 мм, 14 мм.

При изучении шара диаметром 35 мм были обнаружены отклонения от сферичности. Найдено четыре выемки с углублениями 3–5 мм. Твердость на поверхности этого шара составляла значение 8100–8200 МПа (810–820 кг/мм²). Она отличалась от нового шара на величину 1500 МПа или 15 % от первоначального значения. В области выработки значения твердости соответствовали твердости на остальной поверхности. При изучении остальной поверхности были обнаружены две точки с пониженной твердостью: 6600 МПа и 6630 МПа. Поверхность в окрестности этих особых точек была просканирована с шагом 1 мм. Найдено, что вокруг каждой из них находятся круговые области с пониженной твердостью. Для точки с твердостью 6600 МПа область имела диаметр 15 мм, для точки с твердостью 6630 МПа область имела диаметр 9 мм. В этих зонах, твердость увеличивается от центра к периферии. Графически это изменение представлено на рис. 2а, кривая 1, 2. Кривая 1 соответствует верхней особой зоне, кривая 2 — нижней особой зоне.

Дальнейшее исследование провели по технологии описанной выше. Шар был разрезан на шайбы и проведены измерения. На фотографии рис. 1б показаны линии, по которым проводили измерения твердости. Также отмечены и две области на поверхности, твердость которых была понижена. При проведении измерений внутрь, твердость увеличивается, и на глубине 5 мм равняется твердости нового шара. Зависимость изменения твердости в области аномалий по глубине представлена на графике на рис. 2б кривыми 1, 2. Кривая 1 соответствует верхней особой зоне, кривая 2 — нижней особой зоне.

Выделенные на шайбе зоны имели вид эллиптического сегмента. В центральной части которого, находится ядро с минимальными значениями твердости.

Твердость увеличивается от центра к краям. Следует отметить, что вглубь твердость увеличивается скорее, чем по поверхности. Данная закономерность связана с тем, что твердость поверхностного слоя меньше чем на глубине. Это видно из сравнения графиков представленных на рис. 2а и рис. 2б. Максимальный размер центрального ядра эллиптического сегмента, с минимальным значением твердости в особой зоне, для шара диаметром 35 мм, составлял значение 2 мм.

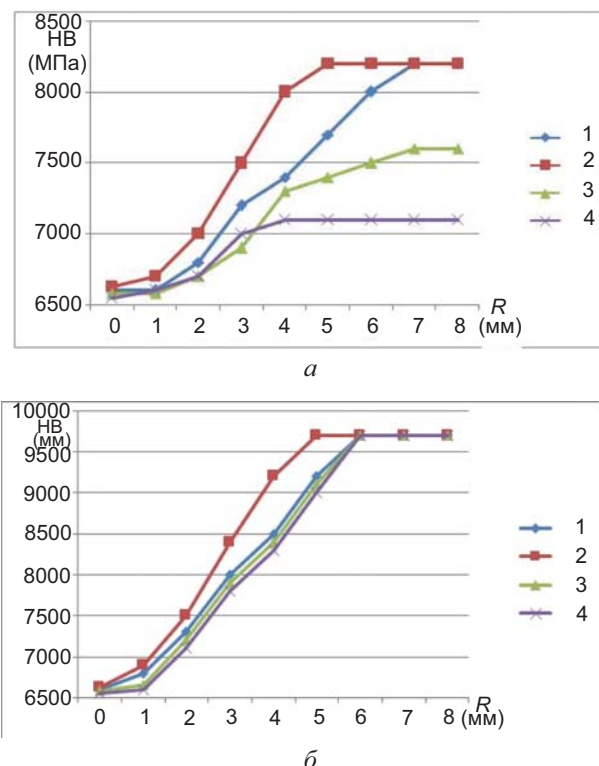


Рис. 2. Графики изменения твердости шаров различных размеров: а — по поверхности шара, б — вглубь шара

При изучении шара с диаметром 25 мм обнаружили, что твердость на поверхности имела значение 7500–7600 МПа. Областей, в которых были значительные выемки, было уже пять. При обследовании твердости по поверхности обнаружено четыре зоны с пониженной твердостью, значение которой изменялось от 6580 МПа до 6650 МПа. При сканировании по поверхности получили, что все области были кругами с диаметром пятна от 6 мм до 14 мм. Во всех этих кругах твердость была минимальной в центре и увеличивалась по радиусу к краям. График ее изменения по поверхности представлен на рис. 2а, кривая 3. Для исследования

характеристик изменения твердости по глубине, шар разрезали на шайбы и провели измерения в плоскости разреза. Как и в предыдущем случае, твердость увеличивалась вглубь шара и на глубине 7 мм была равна 9700 МПа, т. е. равна твердости нового шара. График изменения твердости в области особых точек по глубине представлен на рис. 2б, кривая 3.

Проверка характеристик твердости, для шара диаметром 14 мм, после выгрузки из ШБМ, показала, что все вышеизложенные закономерности наблюдаются и в нем. Твердость на поверхности имела значение 7000–7100 МПа. Точек с ее пониженным значением, от 6550 МПа до 6650 МПа, было восемь. Области вокруг этих точек имели вид кругов с диаметром 6–13 мм. График изменения твердости по поверхности шара, от центральной точки до края круга, представлен на рис. 2а, кривая 4. Измерения твердости вглубь были сделаны после порезки шара на шайбы. График ее изменения дан на рис. 2б, кривая 4.

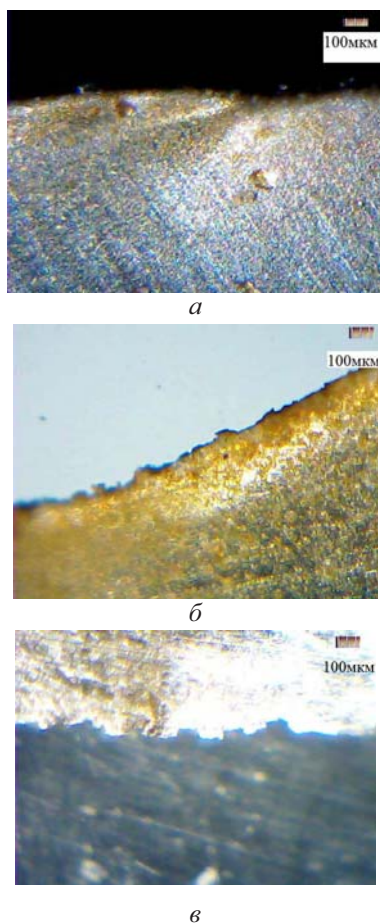


Рис. 3. Поверхности шаров ШБМ: а — исходного (Ø40 мм), б — средняя степень износа (Ø35 мм), в — высокая степень износа (Ø25 мм)

При исследовании шаров было рассмотрено состояние поверхности. На рис. 3а приведен вид поверхности нового шара. В зависимости от скорости вращения мельницы различают два близких режима работы ШБМ: перетиравание и разбивание. При низкой скорости шарики вместе с размалываемым материалом перекатываются, и происходит перетиравание. В процессе трения с измельчаемым материалом и другими шарами происходит истирание поверхностного слоя. Поверхность в этих областях имеет гладкий вид, без значительных шероховатостей (рис. 3б). При высокой скорости вращения ШБМ шары вместе с размалываемым материалом, за счет центробежной силы и рельефности внутренней поверхности ШБМ, поднимаются вверх и оттуда падают. В процессе эксплуатации происходит разрушение отдельных участков шара. На теле шарика образуется выемка (рис. 3в). Поверхность имеет значительные шероховатости.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для дальнейшего изучения микроструктурных характеристик материалов проводились фрактографические исследования. Из шаров с диаметрами 40, 35, 25 мм были изготовлены образцы, которые исследовались на разрывной машине. Они имели следующие размеры: длина 20 мм, ширина захвата 3,2 мм, ширина разрывной части 0,9 мм, толщина 0,4 мм.

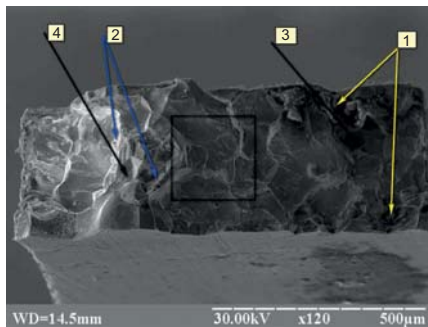


Рис. 4. Общий вид образцов после испытания на разрывной машине

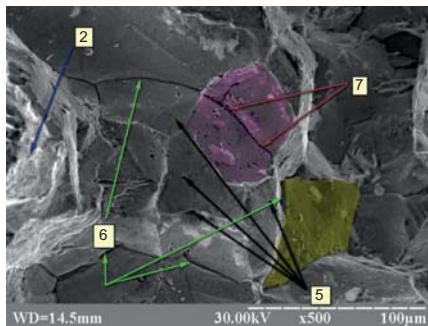
При изучении поверхности разрыва применяли электронный микроскоп РЭМ-100.

На первом этапе исследовались образцы, изготовленные из исходного шара (первый тип). Образец этих тимплет представлен на рис. 4 (слева). Разрыв образцов происходил при напряжении $140,6 \text{ кГ/мм}^2$. Разрыв находился посередине шейки образцов и расположен перпендикулярно оси.

На рис. 5 представлено изображение поверхности разрыва образцов первого типа. Рис. 5а увеличение $\times 120$. Из рис. 5а видно, что толщина перешейка в точке разрыва равна толщине перешейка по всей длине. Это свидетельствует, что при разрыве, в основном, отсутствовала пластическая деформация. В этой области имел место хрупкий разрыв. Однако на рисунке можно выделить несколько различных механизма разрыва. В областях обозначенных стрелками (1) обнаружены



а



б

Рис. 5. Поверхность разрыва образцов первого типа: а — общий вид, с указателями особенностей, б — общий вид выделенной области с увеличением и отмеченными особенностями

разрывы, где протекала пластическая деформация. Видно вытягивание материала шара. Так как шар новый и не был в эксплуатации, то такие области могут возникать при нарушении технологии изготовления. Стрелками (2), обозначены области, в которых произошел разрыв сколом. В нашем случае он произошел на последней стадии разрыва. Вся остальная поверхность разрыва сходна

по своей структуре. Из фрактограммы можем определить, что произошел межзеренный излом. Плоскость разрыва плоская. Таким образом, при испытаниях на разрыв образцов вырезанных из исходного шара, было обнаружено наличие таких основных механизма разрыва: межзеренный излом, вязкое разрушение. Обнаруженные разрывы возникали на различных этапах воздействия разрывного напряжения и занимали разную площадь.

Разрыв сколом — не более 5 % от всей площади. Вязкое разрушение — около 10 %. Межзеренный разрыв — 85 % площади темплета. Макро уступ в правой части рис. 5а (3) и макро возвышение в левой части (4) образовались в результате ступенчатого разрыва. Для более полного изучения поверхности разрыва, выполнили снимки области, выделенной прямоугольником области, с увеличением $\times 500$ (рис. 5б). На рис. 5б приведены обозначения различных характерных особенностей. Стрелками с индексом (2) обозначены области скола. Свидетельством этого является ручьева структура узора поверхности разрыва. Так как разрыв сколом происходит при неравномерном приложении разрывного напряжения (сил пластической деформации), то площадь этой области незначительна. Остальная область на рисунке относится к межзеренному разрушению. Разрыв проходил по зернам, размер которых $40\text{--}60 \times 60\text{--}80 \text{ мкм}$. Максимальный размер $80\text{--}100 \times 100\text{--}120 \text{ мкм}$. Фасетки межзеренного разрушения имеют ровную поверхность. Микрорельеф поверхности разрыва фасеточный с уступами. Разрыв имел форму провалов и горбов. Впадины или выпуклости зерен соответствуют репликам на противоположной стороне разрывной поверхности. В процессе разрыва произошло разориентирование зерен. Подтверждением этого служит отсутствие выбранного направления фасеток. На поверхности некоторых фасеток наблюдаем точки (5). Дополнительные исследования показали, что это заварившиеся полости. На рис. 5б стрелками (6) обозначены вторичные трещины вдоль границ зерен. Глубина трещин — 10 мкм. В процессе испытаний кроме межзеренного разрыва также реализовывался и разрыв по зернам. Вторичные трещины по зернам обозначены

стрелками с указателями (7). Их глубина не превышала 5 мкм.

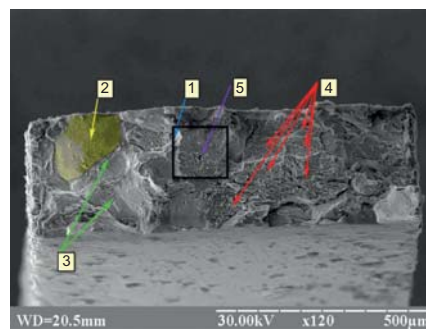
На втором этапе исследовались образцы, изготовленные из шара, средней степени износа, который находился в эксплуатации. Образцы не содержали в себе мест, где были зоны с пониженной твердостью. На рис. 4 образец данного вида расположен справа. Сила пластической деформации имела значение 119–122 кГ/мм². Разрыв находился в средней части тела образца. Плоскость разрыва направлена под углом 60 градусов к оси образца.

Как и в предыдущем случае вытягивания шейки образца нет. Присутствуют хрупкий и вязкий разрывы. Обнаружена только одна область, в которой разрыв происходил сколом (стрелка 1). Определить, что это скол позволили бороздки типа «ручей», которые хорошо различаются на рис. 6б.

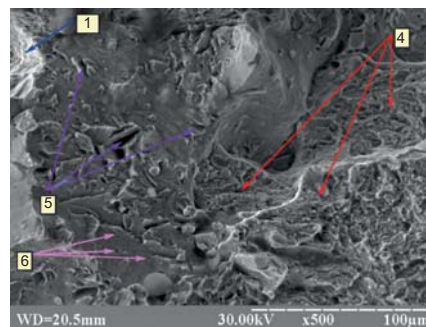
При разрушении образца второго типа изменилось соотношение между хрупким и вязким разрывами. Площадь поверхности вязкого разрыва увеличилась и сравнялась с площадью поверхности, на которой произошел хрупкий разрыв.

Изучая поверхности, где произошло хрупкое разрушение, наблюдаем наличие межзеренного разрыва. При этом зерна увеличились до значений 100–110 × 110–130 мкм. Отсутствуют значительные впадины и выпуклости. Проявились изменения в характеристиках разрывов. По сравнению с образцом первого типа, в пять раз стало меньше трещин между отдельными зернами (стрелка 3). Глубина межзеренных трещин не превышает 5 мкм. Отсутствует внутризеренный разрыв. Соответственно нет и внутризеренных трещин. Фасетки имеют плоскую и гладкую поверхность. На поверхности фасеток обнаружены микрополости. По сравнению с предыдущим случаем, их количество незначительно. На рис. 6б стрелками (6) показано несколько заварившихся микрополостей.

Структура пластического, вязкого разрыва, сходна по всей области. Наблюдаем вытянутые границы ямок микрополостей. В правой центральной части рис. 6б наблюдаем структуру характерную для вязкого разрыва, который осуществляется вытягиванием. Основой данного вязкого



а



б

Рис. 6. Поверхность разрыва образца второго типа: а — общий вид, с отмеченными особенностями, б — общий вид выделенного участка, с отмеченными особенностями

разрыва служат дислокации. Они образуются в результате ударного воздействия, так как работа шаров состоит в измельчении материала посредством перетираания или ударов. Любой удар сопровождается образованием отдельных дислокаций. Множественные ударные воздействия способствуют образованию множественных дислокаций. Их увеличение сопровождается слиянием отдельных микродефектов. При разрыве образуются тянущиеся ямки. На всей поверхности вязкого разрыва образовались ямки, типичные для этого типа разрыва. Интересным является то, что общая поверхность вязкого разрыва состоит из нескольких поверхностей, отличающихся по высоте расположения (стрелки 4). Разница в высоте между отдельными площадками 5–10 мкм. Для объяснения данного эффекта рассмотрим структуру поверхности выделенной области. Все ямки образованы вытягиванием и имеют тянутые границы. Что характерно для вязкого разрыва. Границы ямок имеют скругленные края. В их отклонении от вертикали нет преобладающего направления. Разброс ямок по поверхности, также не является организованным. Это свидетельствует об однородности распределения

материала шара по его объему. Так как, соседние ямки сходны, значит, сходны и условия их образования. Следовательно, при вязком разрыве, каждая область уступа образовывалась при одинаковых условиях. В целом все уступы имеют мало отличий. Параметр, который фиксирован, есть напряжение пластической деформации. Поэтому каждый уступ является сосредоточением одинаковых дефектов с одинаковой концентрацией нарушений.

Таким образом, процесс слияния дефектов происходит при достижении определенных концентраций. Их расположение имеет структурированный характер.

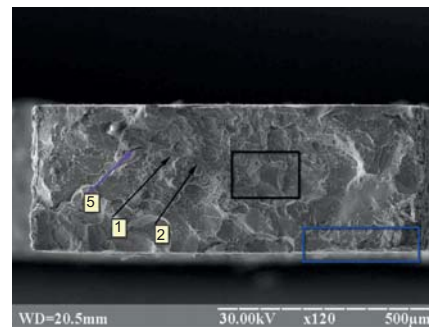
На рис. 5б обнаружили особенность с характерной структурой (стрелка 5). Из [6] известно, что для низколегированных инструментальных сталей, из которых изготовлены шары, данная структура (Lips), образуется при разрыве упрочненных участков, образовавшихся в процессе изготовления. При изучении этого участка на фрактограммах с большим увеличением (рис. 6б), видим наличие в структуре материала шара нескольких аналогичных областей. Таким образом, следы вкраплений таких участков остаются в шаре в процессе эксплуатации.

На третьем этапе, изучались образцы, изготовленные из шара с высокой степенью износа. Образцы данного типа вырезались из шайбы, на которой была обнаружена область с пониженной твердостью (рис. 1б). Данный образец расположен посередине (рис. 4). Фрактограмма разрыва представлена на рис. 7.

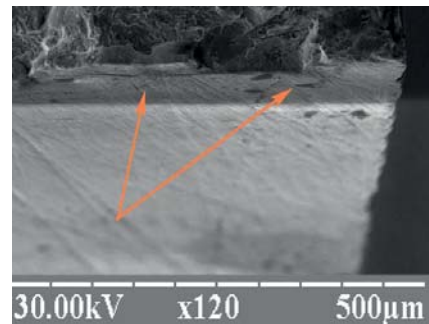
Разрыв произошел возле точки крепления, в области пониженной твердости. Сила разрыва составляла значение 104–108 кГ/мм. Направление разрыва под углом 80 градусов к оси образца. Поверхность разрыва, изображенная на рис. 7а, состоит из хрупкого и вязкого разрывов. Основным механизмом был вязкий разрыв, посредством которого было разрушено свыше 60 % поверхности.

В отличие от предыдущих случаев, геометрические размеры шейки в области разрыва образца отличаются от размеров тела образца. Сужение составляло 10–20 мкм. Увеличенное изображение сужения шейки приведено на

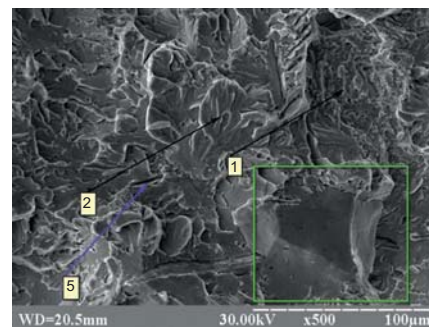
рис. 7б. Это свидетельствует о наличии пластической деформации на участке одной из



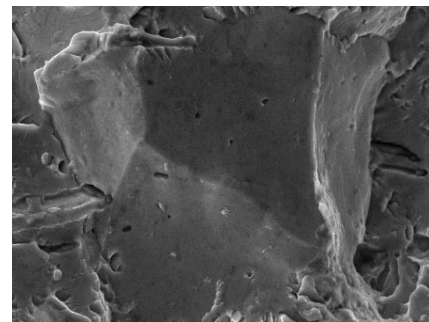
а



б



в



z

Рис. 7. Разрыв на участках образцов третьего типа: а — общий вид с отмеченными особенностями, б — увеличение изображения участка с сужением шейки (длинная прямоугольная рамка на рис. 7а), в — увеличение изображения участка образца (прямоугольная рамка на рис. 7а, черная), z — область с полостями (прямоугольная рамка на рис. 7в)

границ области разрыва. На всех остальных участках наблюдали хрупкое разрушение.

При хрупком разрушении осуществлялся межзеренный разрыв. В его области образовывались зерна $100\text{--}120 \times 120\text{--}140$ мкм. Отсутствует преимущественное направление межзеренного разрыва. Все фасетки имеют различную ориентацию. Было обнаружено несколько небольших фрагментов межзеренных вторичных трещин. Их глубина не превышала 3 мкм. Не наблюдали внутризеренных разрывов. Также не наблюдали и трещин по телу зерен. Области хрупкого разрушения расположены по всей поверхности разрыва шейки образца.

Основное разрушение образца произошло за счет вязкого разрыва. В зависимости от места расположения структура поверхности разрыва имеет незначительные отличия. Область, обозначенная 1 (на рис. 7*в*), тождественна представленной на рис. 6*в* (стрелка 4, второй тип темплета). Следовательно, эта часть разрыва есть вязкое разрушение вытягиванием, и вся идеология соотносится с рассуждениями приведенными выше. В этой области расположены три площадки, находящиеся на разной высоте. Ямки имели форму кратеров. Стенки вытянутые. Толщина стенок не превышала половины диаметра ямок.

Основная площадь плоского разрыва (стрелка 2) отличается от области вытягивания (стрелка 1). Поверхность разрыва также расположена на нескольких плато. Т. е. накопление усталостных дефектов происходит в отдельных плоскостях. Предполагаем, что на каждой из этих плоскостей степень насыщения дислокаций одинакова. Пластическая структура разрыва отлична от всех предыдущих случаев. Сами ямки имеют большой размер и плоское дно. Стенки между ямками широкие с плоскими вершинами. Поверхность этого разрыва имеет вид больших плоских уступов. Данная структура образовалась при разрыве области со значительными усталостными напряжениями. Произошел вязкий усталостный отрыв, который возник под воздействием длительного циклического воздействия. Об этом свидетельствуют вытянутые плоские поверхности фасеток квазискола. Данное утверждение полностью согласуется с условиями эксплуатации шаров — постоянное ударное воздействие

с силой различной интенсивности, нанесенное с различных углов.

На рис. 7*в* было обнаружено несколько областей с характерной формой разрыва (стрелка 5). По своему виду они близки к разрывам, приведенным на рис. 6*в* (стрелки 5). По аналогии можем предполагать [6], наличие в этой области упрочненных участков,

При детальном изучении поверхности фасеток (рис. 7*в*) были обнаружены полости. Они имели существенное отличие от полостей, найденных на разрыве образца исходного шара (рис. 5*з*). Известно, что наличие различных неоднородностей, может стимулировать зарождение центров разрушения. Поэтому вопрос образования полостей и их влияния на скорость разрушения стоит остро. На фрактограмме, сделанной с большим увеличением (рис. 7*в*) видим присутствие включений в середине некоторых пор. Исследования показали [6], что включения состоят из Cr_2O_3 . Эти включения образовались при изготовлении материала шаров. В данном случае полости открывались вокруг включений. Открытия произошли под действием разрушающего напряжения и во время разрыва. Изучение места расположения этих пор, отдельных деталей рельефа фасеток, их формы и структуры, дает возможность исключить определяющее влияние данного вида пор на зарождение разрушения.

На основании проведенных исследований можем сделать предположения о развитии нарушений в шаре. На первом этапе разрушение осуществляется за счет хрупкого разрыва. Затем, в результате нормальных ударов, появляются точечные области с нарушениями структуры материала. Их количество накапливается. Кроме нормальных ударов, происходит значительное количество соударений со всех направлений телесного угла π . В процессе эксплуатации происходит слияние дислокаций и накопление микродефектов. Затем при определенной концентрации дефектов происходит интенсивное разрушение внешней части шара.

ВЫВОДЫ

1. Получены значения распределения микротвердости шаров на их поверхности и внутри. Дана динамика изменения

микротвердости в процессе эксплуатации. Найдены напряжения пластической деформации для образцов, изготовленных из разных частей.

2. Показано, что в процессе эксплуатации появляются дислокации, которые объединяются и являются центрами разрушения.

3. На основании анализа поверхности разрыва изучены механизмы износа материала. Выяснено, что микродефекты со сходными характеристиками располагаются по плоскостям.

4. Обнаружены неоднородности структуры материала, которые возникли при изготовлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоренко Е. М., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Хаймович П. А., Шульгин Н. А., Морозов А. И. Диагностика процесса износа материалов шаровых барабанных мельниц // Восточно европейский журнал передовых технологий. — 2014. — №2(36). — С. 34–38.
2. Кесова Л. А. Влияние системы пылеприготовления на топочный режим котла при высококонцентрированной пылеподаче на горелки // Энергетика та електрифікація: наук.-вироб. журн. — 2009. — № 5. — С. 41–45.
3. Клепиков В. Ф., Аннопольский Д. А., Бабушкина С. И., Литвиненко В. В., Мелькова Е. А., Прохоренко Е. М., Сагайдачный М. А. Перспективы использования радиационных методов очистки дымовых газов и диагностики оборудования для топливоподготовки // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2014. — № 2(36). — С. 34–38.
4. ГОСТ 7524-89. Шары стальные мелющие для шаровых мельниц // Введ. 1989-01-02. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 26 с.
5. Левит В. Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 384 с.
6. Феллоуз Дж. Фрактография и атлас фрактограмм — М.: Metallurgiya, 1982. — 489 с.

LITERATURA

1. Prohorenko E. M., Klepikov V. F., Litvinenko V. V., Hajmovich P. A., Shul'gin N. A., Morozov A. I. Diagnostika processa iznosa materialov sharovyh barabannyh mel'nic // Vostochno evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. — 2014. — No. 2(36). — P. 34–38.
2. Kesova L. A. Vliyanie sistemy pyleprigotovleniya na topochnyj rezhim kotla pri vysokokoncentririvannoj pylepodache na gorelki // Energetika ta elektrifikaciya: nauk.-virob. zhurn. — 2009. — No. 5. — P. 41–45.
3. Klepikov V. F., Annopol'skij D. A., Babushkina S. I., Litvinenko V. V., Melyakova E. A., Prohorenko E. M., Sagajdachnyj M. A. Perspektivy ispol'zovaniya radiacionnyh metodov ochistki dymovyh gazov i diagnostiki oborudovaniya dlya toplivopodgotovki // Kompessornoe i energeticheskoe mashinostroenie. — 2014. — No. 2(36). — P. 34–38.
4. GOST 7524-89. Shary stal'nye melyuschie dlya sharovyh mel'nic // Vved. 1989-01-02. — M.: Izd-vo standartov, 1989. — 26 p.
5. Levit V. T. Pyleprigotovlenie na teplovyh elektrostanciyah — M.: Energoatomizdat, 1991. — 384 p.
6. Fellouz Dzh. Fraktografiya i atlas fraktoqramm — M.: Metallurgiya, 1982. — 489 p.