



УДК 539.43.669

Л.А. Горбачев, А.И. Недобитков  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРУ СЕРОГО ЧУГУНА  
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В многочисленных работах установлено, что от 80 до 90 % автомобилей, тракторов, установок и агрегатов выходит из строя в результате износа. Увеличение долговечности, например двигателей внутреннего сгорания, в два раза выгоднее, чем удвоение выпуска этих двигателей, так как при этом экономится металл, электроэнергия, труд, оборудование [1]. На современном этапе развития науки известно, что существуют скрытые ускорители износа, способные в отдельных случаях в десятки раз увеличивать износ и даже приводить к разрушению поверхностного слоя [1].

Но продукцию машиностроения невозможно представить без участия металлургии. Причем, учитывая специфику производства черных металлов, особое место в решении проблемы повышения качества продукции металлургии занимает вопрос нейтрализации вредного влияния технологических примесей: газов, серы, фосфора и др. В ряду этих элементов особое место занимает водород, что связано с его аномально высокой подвижностью в металле при низких температурах [2]. Как показано в работе [2] при 20 °С коэффициент диффузии водорода в  $10^{12}$  превосходит соответствующую величину для углерода или азота. Сочетание с ничтожной растворимостью при невысоких давлениях и сильнейшим влиянием на свойства металлов делает его уникальным элементом, с большим трудом поддающимся экспериментальным исследованиям [2].

Необходимо отметить, что любой эксперимент представляет собой ту или иную модель объективно существующего физического явления и имеет, по определению, ряд каких-либо допущений или условий, которые естественным образом сказываются на его результатах и их трактовку. Например, как показано в работе [2], В.П. Чернобровкин вначале обнаружил увеличение размеров включений графита при обогащении расплава водородом в результате продувки жидкого чугуна водородом. Форма графита при этом оставалась пластинчатой и практически не изменялась. Примерно к таким же результатам пришли В.П. Мигай, Охира и Икава, Девсон, Бак и Смит [2]. Но впоследствии, В.П. Чернобровкин, несмотря на практически одинаковую методику и материалы по сравнению с предыдущими исследованиями, приходит к выводу, что после продувки жидкого чугуна водородом и увеличения его содержания в 1,5 раза графит резко измельчается и появляется междендритный графит, а форма его не изменяется [2]. Аналогичные результаты были получены в работах и других исследователей (Н.Г. Гиршовича, Л.И. Феломешкиной, Хосена и др.). В.И. Шаповалов в работе [2] прямо указывает, что причиной вышеприведенного противоречивого экспериментального материала являются методические погрешности, которые не позволили из влияния множества факторов выделить один – фактор влияния водорода на форму и размеры графита в сером чугуне.

Даная работа основана на результатах исследования причины разрушения гильзы 130-1002021-А2 двигателя ЗиЛ (рис. 1).



Рисунок 1 - Разрушение буртика исследуемой гильзы: а – совмещение разрушенных фрагментов по месту излома, б – кольцевой фрагмент буртика гильзы

Разрушение гильзы произошло в условиях эксплуатации, то есть специально эксперимент не проводился, исследуется естественное протекание физического процесса. Согласно техническим условиям завода-изготовителя гильза выполняется из серого чугуна и отливается методом центробежного литья.

Определим условия нагружения буртика гильзы. В общем случае, для предотвращения прорыва газов и охлаждающей жидкости между головкой и блоком цилиндров их стыковочная зона уплотняется прокладками (рис. 2).

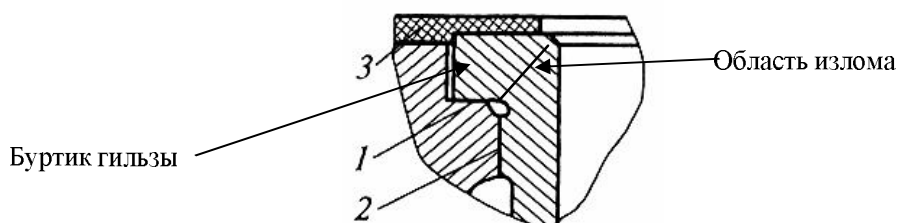


Рисунок 2 - Уплотнение газового стыка: 1 - опорная плоскость, 2 - центрирующий пояс, 3 - прокладка

Работоспособность газового стыка двигателя оценивают по его герметичности при реализации рабочего процесса и по уровню напряженно-деформированного состояния его элементов – шпильки или болта, прокладки и блока [3].

Основными расчетными нагрузками на газовый стык являются (рис. 3):

- сила предварительной затяжки;
- нагрузка от газовой силы;
- термическая сила, образующаяся при прогреве двигателя вследствие различных коэффициентов линейного расширения элементов стыка.

Тогда, как показано в работе [3], минимальная сила, действующая на буртик гильзы, определится как:

$$P_{\sigma \min} = P_{p \min} \cdot i. \quad (1)$$

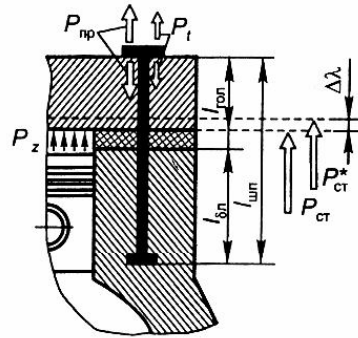


Рисунок 3 - Расчетная схема оценки надежности элементов газового стыка

В работе [3] максимальная сила, действующая на буртик гильзы, определяется по формуле:

$$P_{\sigma_{max}} = P_{p_{max}} \cdot i. \quad (2)$$

Таким образом, сила, действующая на буртик гильзы, изменяется от значения  $P_{\sigma_{min}}$  до значения  $P_{\sigma_{max}}$ .

Перейдем от силы  $P$ , действующей на буртик, к  $q$  – внешнему давлению на верхнюю поверхность буртика гильзы, которое определяется в зависимости от затяжки болтов головки блока цилиндров из условия герметичности газового стыка. Расчетная схема приведена на рис. 4.

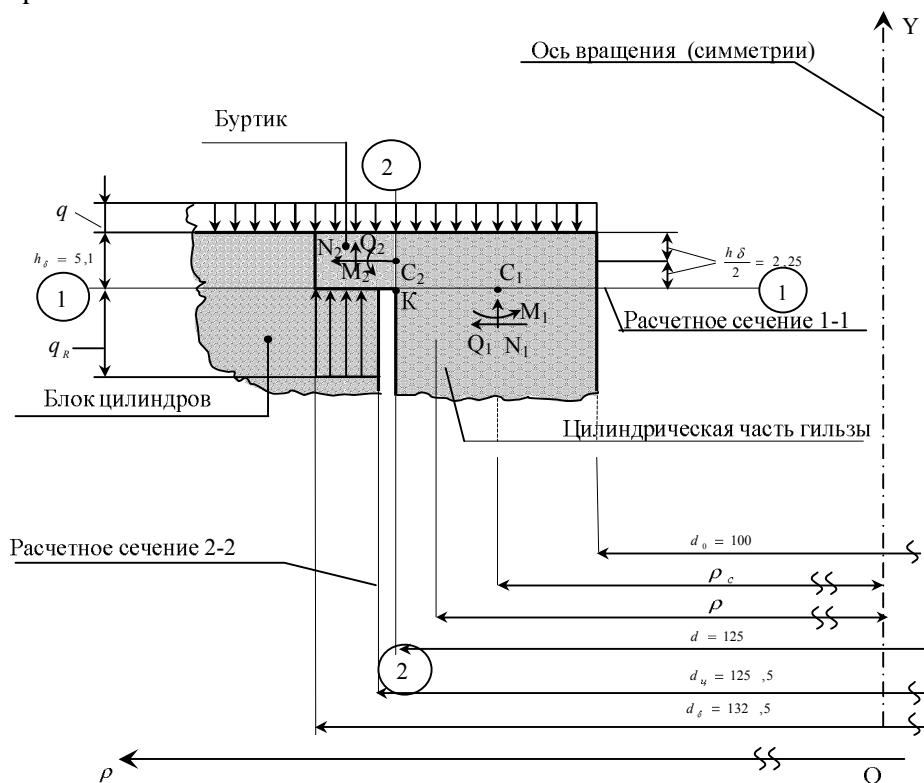


Рисунок 4

Размеры  $d_0$ ,  $d_{ц}$ ,  $d_δ$  – соответствуют размерам гильзы 130-1002021-A2 двигателя

Зил-

130;

$\rho$  - радиальная координата произвольной точки гильзы в цилиндрической системе координат  $\rho OY$ ;

$q$  – внешнее давление на верхнюю поверхность буртика гильзы, которое определяется в зависимости от затяжки болтов головки блока цилиндров из условия  $q > P_z$  (где  $P_z$  – максимальное давление в цилиндрах);

$\rho_0$  - радиус срединной поверхности цилиндрической части гильзы,

$$\rho_0 = \frac{d_0 + d}{2} = 112,5 \text{ мм}; \quad (3)$$

$M_1, M_2, N_1, N_2, Q_1, Q_2$  – распределенные по окружностям радиусами  $\rho_0$  и  $d/2$ , соответственно, изгибающие моменты ( $M_1, M_2$ ), продольные ( $N_1, N_2$ ) и поперечные ( $Q_1, Q_2$ ) силы в сечениях 1-1, 2-2, проходящих через точку «К» с типичным концентратором напряжений в виде резкого (ступенчатого) изменения формы гильзы, обусловленного наличием буртика;

$\sigma_{H1}, \sigma_{H2}$  – экстремальные номинальные напряжения на главных площадках 1-1 и 2-2 в окрестностях точки «К»;

$a_\sigma$  – коэффициент концентрации нормальных напряжений  $\sigma_{H1}, \sigma_{H2}$ ;

$\tau_H, \tau_{\max}$  – номинальное и наибольшее касательные напряжения;

$\sigma_{\text{экв}(H)}, \sigma_{\text{экв}(M)}$  – номинальное и максимальное эквивалентные напряжения в опасной точке «К».

Вполне очевидно, что значение  $q$  меняется во времени так же, как и значение  $P_z$ , обусловленное рабочим циклом двигателя внутреннего сгорания.

Как показано в работе [4], при работе двигателя внутреннего сгорания его гильзы подвергаются периодическим ударным нагрузкам со стороны поршневой группы. В результате этого возникают вынужденные упругие колебания гильз. Кроме того, в работе [4] выведено выражение для определения прогиба оболочки-гильзы, окруженной слоем жидкости, при ударных импульсных воздействиях на ее внутреннюю поверхность со стороны поршня, возникающих при прохождении им верхней мертвой точки

$$B = \frac{R^2 \omega^2}{c^2 \psi} \cdot \frac{\rho R_2}{\rho_0 h_0 R_e} \left[ \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{256}{105} - \frac{256}{315} - \frac{1}{\sigma^4} \cdot \frac{128}{5} + \frac{384Q}{\sigma^6} \right], Q = 1 - \frac{3}{\sigma} \text{cth} \sigma + \frac{3}{\sigma^2}. \quad (4)$$

В работе [4] также показано, что амплитуда колебаний будет максимальной, если ударные нагрузки приложены в центре гильзы, а при их приближении к торцам, амплитуда колебаний падает вплоть до нуля на торцах.

Таким образом, можно указать на следующие факторы, характеризующие напряженно-деформированное состояние буртика гильзы:

- динамико-циклический характер давления  $q(t)$  (рис. 5);
- воздействие нестационарного положительного температурного поля;
- колебания гильзы двигателя, окруженной слоем охлаждающей жидкости, при воздействии на ее внутреннюю поверхность периодических ударных нагрузок.

При исследовании поверхности излома с помощью микроскопа МБС-2 было установлено наличие разнородных по своему микрорельефу участков:

- 1) зона, имеющая небольшую высоту микронеровностей и характерную «заглаженность» поверхности, – зона развития усталостной трещины;
- 2) зона, имеющая значительно более грубый микрорельеф и крупнокристаллическое строение, – зона окончательного разрушения (зона долома).

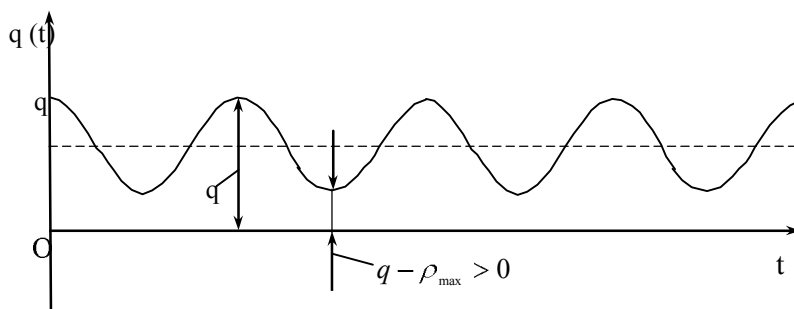
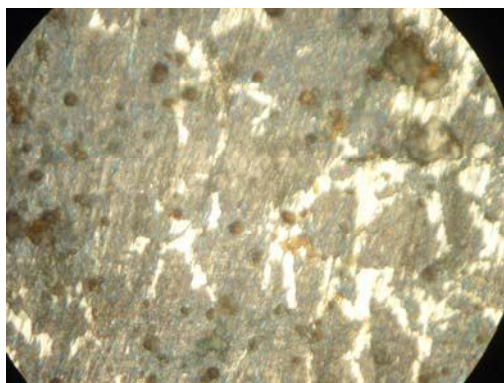


Рисунок 5

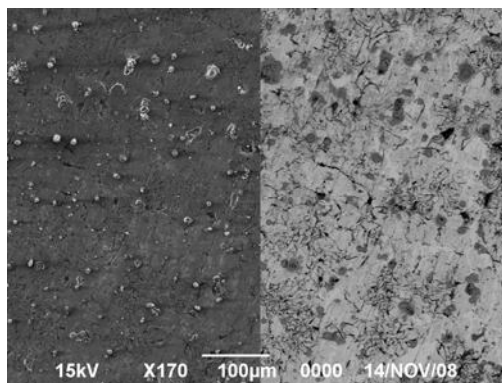
Наличие двух зон свидетельствует о медленном развитии трещины за достаточно большое число циклов нагружения. Её раскрывающиеся края успевают претерпеть во взаимном контакте значительную пластическую деформацию смятия, нивелирующую неровности.

В работе [5] дается следующее определение усталости – процесс постепенного накопления повреждений металла под действием переменных напряжений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин и разрушению. Таким образом, имеет место усталостное разрушение исследуемой гильзы.

При проведении металлографического исследования образца гильзы с поверхности излома было установлено, что твердость составляет  $HV=302$ . Шлифы готовились по общепринятой методике. Исследование микроструктуры проводилось на микроскопе МИМ-7 и на растровом электронном микроскопе JSM-6290LV (рис 6). До травления в микроструктуре чугуна отмечается графит шаровидной формы (рис. 6).



а



б

Рисунок 6 - Микроструктура образца: а - снимок, полученный на микроскопе МИМ-7, б - снимки в разных режимах съемки, полученные на растровом электронном микроскопе JSM-6290LV

После травления шлиф имеет следующую микроструктуру: перлит, графит, феррит в виде сетки, плюс фосфидная эвтектика. Согласно ГОСТ 1412-85 при толщине стенки отливки 8 мм твердость по Бринеллю должна быть от 224 до 240 единиц.

Необходимо отметить, что для серого чугуна характерна пластинчатая (лепестковая) форма графита. Именно такая форма графита имеет место на образцах, изъятых в нижней, не подвергавшейся циклической нагрузке части гильзы. При этом наличие фосфидной эвтектики отмечается и на этих образцах (рис. 7).

| Элемент | Весовой % | Атомный% |
|---------|-----------|----------|
| C K     | 1,50      | 5,85     |
| Si K    | 0,83      | 1,38     |
| P K     | 0,44      | 0,66     |
| S K     | 16,45     | 23,99    |
| Mn K    | 33,76     | 28,74    |
| Fe K    | 47,03     | 39,39    |
| Итого   | 100,00    |          |



Рисунок 7 - Включения серы и фосфора

В работе [2] отмечается, что в чистых сплавах Fe-C-H и Fe-C-Si-H, начиная с концентраций 27-30 см<sup>3</sup>/100 г, водород способствует усилению разветвлений графита, уменьшая число включений и делая их более компактными, а в пределе - шаровидными. Таким образом, эффект изменения формы графита в области излома гильзы объясняется воздействием водорода.

Как показано в работе [6] водород может проникать в металлы при литье слитков, обработке металлов, а также в процессе эксплуатации готовых изделий. Необходимо отметить, что конструктивно гильза получается литьем, в процессе эксплуатации омывается охлаждающей жидкостью, в составе которой имеется водород, а также контактирует с отработавшими газами и смазкой, в составе которых также присутствует водород, но его концентрация при этом значительно меньше отмеченных в работе [2] концентраций 27-30 см<sup>3</sup>/100 г и даже 50-60 см<sup>3</sup>/100 г.

В работе [6] отмечается, что водород, абсорбированный металлом, может находиться в нем в различных состояниях:

- а) растворяться в металле;
- б) сегрегировать на несовершенствах кристаллического строения;
- в) адсорбироваться на поверхности микрополостей и частицах вторых фаз;
- г) скапливаться в микрополостях в молекулярной форме;
- д) образовывать гидриды с основным металлом;
- е) вступать во взаимодействие со вторыми фазами.

При исследовании на растровом электронном микроскопе JSM-6290LV образцов, взятых с поверхности излома, было установлено наличие структур (рис. 8) с различной степенью увеличения. При проведении исследования с помощью приставки энергодисперсионного анализа INCAEnergy установлен точечный количественный состав обнаруженной структуры (рис. 9).

Результаты исследования позволяют сделать вывод о наличии в области излома Fe-C-Si-H и его отсутствии в областях, не подверженных циклической нагрузке.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [7], авторы которой использовали механоактивацию для получения гидридов алюминидов титана при комнатной температуре в атмосфере водорода. Более того, сопоставляя микроструктуры (рис. 8-10), можно прийти к выводу о близкой форме и размере гидридов, что свидетельствует о едином механизме образования, связанном с циклическим нагружением исследуемых образцов и практически независимом от концентрации и давления водорода (в рассматриваемых случаях они очень далеки друг от друга).

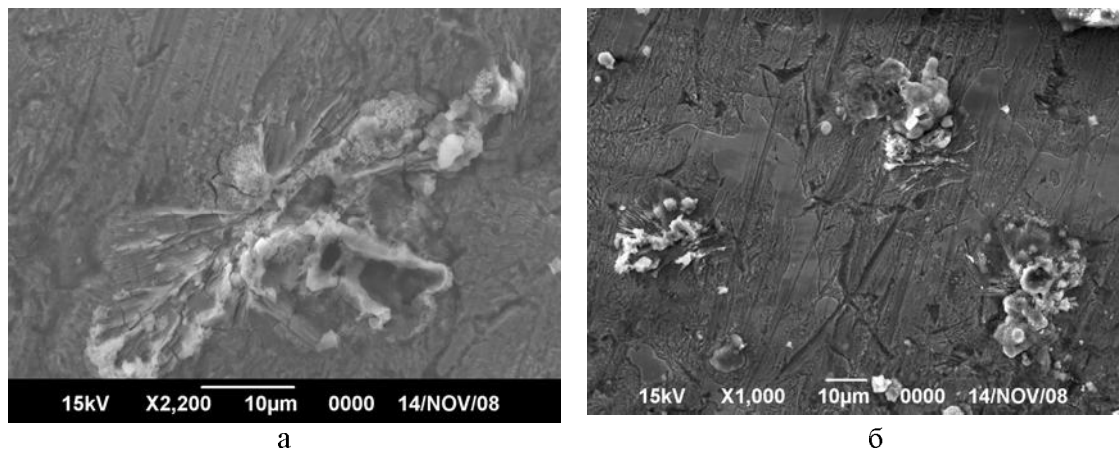


Рисунок 8 - Микроструктура гидридов: а - увеличение 2200, б – увеличение 1000

| Элемент | Весовой, % | Атомный, % |
|---------|------------|------------|
| С К     | 41,24      | 33,54      |
| О К     | 78,78      | 48,10      |
| Si К    | 2,00       | 0,70       |
| Mn К    | 1,10       | 0,20       |
| Fe К    | 99,87      | 17,47      |
| Итого   | 222,99     |            |

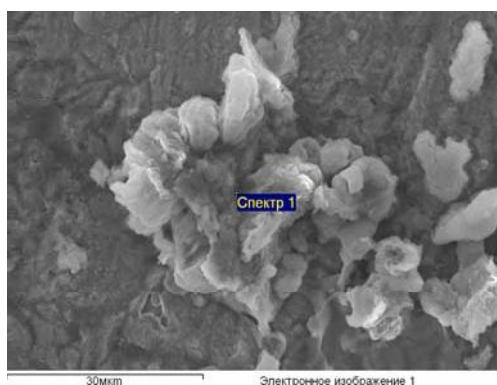


Рисунок 9

В работе [8] показано, что в процессе циклического нагружения вследствие сложных физико-химических процессов могут возникать новые фазы. В данной работе приведен пример образования соединений  $C_2FeO_4$ ,  $Fe_2C$ ,  $Fe_3C_2$  в условиях циклического нагружения (2800 цикл/мин) при комнатной температуре, хотя общеизвестно, что для получения вышеуказанных соединений требуются высокие температуры.

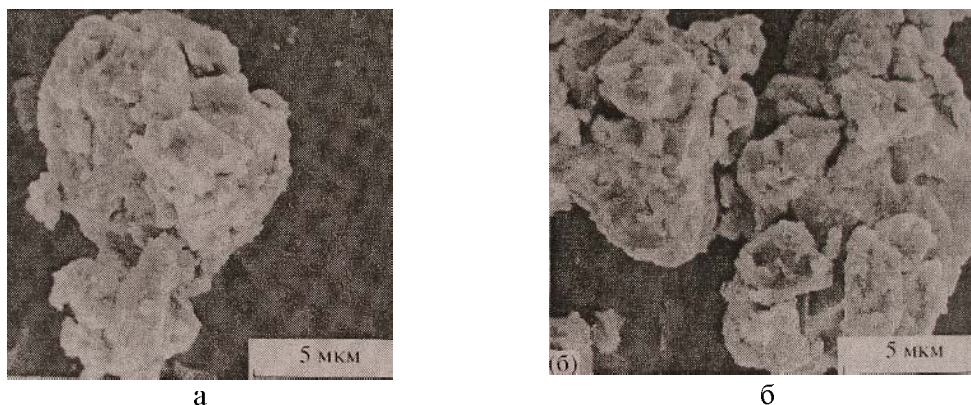


Рисунок 10 - Микроструктура гидридов, полученных при механоактивации в атмосфере водорода [7]

Выводы работы [8] прямо подтверждаются настоящим исследованием и косвенно - данными работы [2], в которой В.И. Шаповалов указывает на две гипотезы, объясняющие сфероидизирующее воздействие водорода в сером чугуна. Причем обе схемы базируются на адсорбционном взаимодействии водорода с поверхностью графита, но одна из них объясняет переход от пластинчатых форм роста к шаровидным увеличениям степени разветвленности графита, а другая, наоборот, связывает его с дислокационным выклиниванием без предварительного разветвления. Но обоснование гипотез работы [2] построено на экспериментах, связанных с продувкой водорода через чугун и в итоге с концентрацией водорода более 27-30 см<sup>3</sup>/100 г. Но выше показано, что данный эффект имеет место безводородной продувки и внешнего стационарного водородного давления, но в условиях циклической нагрузки. Следовательно, наличие водорода является необходимым условием, но не доминирующим.

Общеизвестно, что первая фаза графитизации происходит при выдержке отливок при температуре около 1000 °С и заканчивается формированием структуры, состоящей из графита, перлита и феррита, обычно окружающего выделение хлопьевидного графита. Данная структура очень близка к полученной микроструктуре в зоне излома исследуемой гильзы, но гильза автомобильного двигателя в процессе эксплуатации конструктивно не может быть нагрета до температуры около 1000 °С.

Кроме того, известно явление предварительной низкотемпературной обработки, заключающееся в том, что чугун, выдержанный перед графитизирующим отжигом определенное время при температурах ниже 400 °С, дает при отжиге в пять-десять раз больше включений графита, чем обычный.

Представляется, что наиболее логичным объяснением перехода от пластинчатых форм графита к шаровидным при циклическом нагружении образца серого чугуна при отсутствии внешней водородной атмосферы является следующее. После кристаллизации чугуна обычно оказывается пересыщенным водородом. Известно, что растворенные по типу внедрения атомы взаимодействуют с несовершенствами кристаллической решетки, образуя «облака» Коттрелла, в которых наблюдается повышенная концентрация растворенного вещества. Активным «образователем» облаков является водород, обладающий высокой скоростью диффузии при низких и высоких температурах [2]. В процессе сложного и специфического характера циклического нагружения происходит активная диффузия водорода в зону наиболее высоких напряжений. Концентрация водорода в данной области возрастает. Энергия циклической деформации (усталости) является причиной: во-первых, изменения формы графита с пластинчатой на шаровую в присутствии водорода; во-вторых, образования гидридов в зоне высоких напряжений. В работе [6] показывается, что при увеличении содержания выше предела растворимости водород расходуется не на растворение, а на образование гидридной фазы.

Изложенное выше объяснение является универсальным и для других металлов, о чем свидетельствуют результаты работы [7]. Кроме того, возможно использование эффекта циклического нагружения для контролируемого изменения свойств металлов.

#### Список литературы

1. Защита от водородного износа в узлах трения/ Под ред. А.А. Полякова. - М.: Машиностроение, 1980. - 135 с.
2. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов. - М.: Металлургия, 1982. - 232 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания/ Под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. - М.: Высш. школа, 2005. - 400 с.
4. Могилевич Л.И. Колебания гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания с водяным охлаждением под действием ударных нагрузок со стороны поршневой группы / Л.И. Мо-



- гилевич, В.С. Попов, А.А. Попова // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2008. - № 3. - С.100-108.
5. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. - М.: «Металлургия», 1978. - 304 с.
  6. Колачев Б.А. Водородная хрупкость цветных металлов. - М.: «Металлургия», 1966. - 239 с.
  7. Казанцева Н.В. Использование механоактивации для получения гидридов алюминидов титана / Н.В. Казанцева, Н.В. Мушников, А.Г. Попов, В.А. Сазонова, П.Б. Терентьев // Физика металлов и металловедение. - 2008. - № 5. - С. 492-502.
  8. Горбачев Л.А. Об образовании новых фаз в стали 08кп при циклическом нагружении // Вестник ВКГТУ. - 2006. - № 2. - с. 74-81.

Получено 6.04.10

УДК 622.14.03

**А.А. Жанбатыров**

Центр инжиниринга и трансферта технологий, г. Астана

**КОНСЕРВАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖАЙРЕМ  
(ДАЛЬНЕЗАПАДНЫЙ И ЗАПАДНЫЙ УЧАСТКИ)**

Основанием для консервации месторождения Жайрем является отсутствие собственной полиметаллической обогатительной фабрики и экономической нецелесообразности дальнейшей добычи руды без глубокой переработки с получением высококачественных концентратов. Консервация осуществлена в соответствии с нормативными документами Республики Казахстан [1-3].

*Существующее состояние горных работ на Дальнезападном участке.* Отработка запасов Дальнезападного участка осуществляется двумя карьерами. Вскрытие запасов производится спиральными съездами с выходом капитальных съездов из карьеров № 1 и № 2 на южном борту карьера № 2.

Размеры карьеров в плане поверхности: карьер № 1 – 840×980 м и карьер № 2 – 1300×1380 м; глубина карьера № 1 – 203 м, карьера № 2 – 300 м. Верхняя часть карьера, сложенная песками, глинами и сильно выветрелыми породами, отрабатывается без буровзрывных работ уступами высотой 10 м, в скальных породах – от 12 до 18 м; руда отрабатывается подступами высотой от 12 м, в наиболее сложных участках - до 6 м. Генеральный угол наклона бортов карьера – 30°; угол откосов – 60°.

Проектом обоснованы: разубоживание – 10 % и потери при добыче – 3,0 %.

По состоянию на 1.01.2010 г. фактическая глубина карьера № 1 составляет 157 м, карьера № 2 - 175 м. При общем объеме горной массы 70,87 млн м<sup>3</sup> к настоящему времени по данным маркшейдерского замера осталось вскрыши 59,03 млн м<sup>3</sup>, в том числе: по карьеру № 1 – 9,5 млн м<sup>3</sup>, карьеру № 2 – 49,53 млн м<sup>3</sup>. Большой объем ГКР обуславливается отставанием вскрышных работ. Разбивка вскрышных пород по карьерам и горизонтам приводится в табл. 1.

*Консервация Западного участка месторождения Жайрем.* Западный участок месторождения Жайрем состоит из карьера и отвала вскрышных пород. Горные работы на карьере Западного участка были остановлены в 1994 году. По состоянию на 01.01.2010 года карьер имел глубину 47 м (+349 м) при дневной отметке поверхности +396 м.

Таблица 1