

2004. -160 р. (Rus)

11. Efremenko V.G. Influence of phase and structural state of iron-based alloys for wear resistance in condition grinding high-abrasive material / V.G. Efremenko, F.K. Tkachenko, T.A. Eremenko // Vestnik of Priazovsky State Technical University: Collection of scientific work No 13. - Mariupol, 2003. -P. 113-118. (Rus)

12. Pat. Ukraine № 93302, МПК В23К 35/368. Flux-cored wire / L.S. Malinov, V.L. Malinov, A.A. Golyakenvich, L.N. Orlov; Priazovsky State Technical University; Claim 17.07.2009, Publ. 25.01.2011, Bull. № 2. (Ukr.)

Рецензент: В.И. Щегина  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.11.2011

УДК 669.14:621.785.6.16.22

©Кузьмин С.О.\*

### **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ НА ОБЪЕМНУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕЛЮЩИХ ШАРОВ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛИ**

*Показано, что объемная износостойкость мелющих шаров определяется не только их твердостью, но и типом микроструктурного градиента по сечению. Предложены режимы термоупрочнения для шаров Ø 120 мм из сталей М74, 75Г2С, 75ХГСМ.  
**Ключевые слова:** мелющие шары, термоупрочнение, твердость, износостойкость, микроструктура.*

*Кузьмін С.О. Вплив режиму термозміцнення на об'ємну зносостійкість в термозміцнених молоткових кулях з низьколегованих марок сталі. Показано, що об'ємна зносостійкість молоткових куль визначається не тільки їх твердістю, але й типом мікро структурного градієнту по перетину. запропоновано режими термозміцненні для куль Ø 120 мм зі сталей М74, 75Г2С, 75ХГСМ.*

***Ключові слова** молоткові кулі, термозміцнення, твердість, зносостійкість, мікро структура.*

***S.O. Kuzmin. The influence of thermo-hardening mode on volumetric wear resistance of grinding balls made of low-alloyed steels. It is shown that the volumetric wear resistance of grinding balls is determined not only by hardness, but also by the type of microstructural gradient in the cross section. The regimes of thermo-hardening for balls of Ø120 mm of steel М74, 75Г2С, 75ХГСМ are proposed.***

***Key words:** grinding balls, thermo-hardening, hardness, wear resistance, microstructure.*

**Постановка проблемы и анализ известных публикаций.** Стальные мелющие шары широко применяются в операциях измельчения в различных отраслях промышленности. Для повышения твердости катаные мелющие шары проходят термическое упрочнение с прокатного нагрева. При выборе оптимального режима термоупрочнения необходимо ориентироваться на получение в шарах таких структурных состояний, которые обеспечивали бы не только регламентированную стандартом твердость, но и высокий уровень эксплуатационной долговечности.

Основной причиной износа шаров при помоле руд черных и цветных металлов является абразивное воздействие. Изнашивание мелющих шаров большого диаметра (100-150 мм), ис-

\* аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» г. Мариуполь

пользуемых в условиях «водопадного» режима работы мельницы, протекает как при царапающем, так и ударном характере воздействия абразива на поверхность шара [1]. Поскольку измельчение руд ведется «мокрым» способом, абразивное изнашивание дополняется коррозионным и эрозионным [2] воздействием жидкой компоненты пульпы, что увеличивает суммарный износ мелющих тел. Таким образом, для шаров, используемым в рудных мельницах первой стадии помола, долговечность определяется уровнем абразивно-коррозионной и ударно-абразивно-коррозионной износостойкости шаровой стали [3].

При выборе режима термоупрочнения шаров важно знать, какой уровень износостойкости будет обеспечен тем или иным типом микроструктуры, с тем, чтобы подбором режима термоупрочнения добиваться оптимального градиентного микроструктурного состояния по сечению мелющих шаров. Взаимосвязь микроструктуры и износостойкости изучают, как правило, на образцах, прошедших отдельную термическую обработку. Вместе с тем, более надежные данные могут быть получены при исследовании образцов, вырезанных непосредственно из готовых изделий. Данные по структурным градиентам в мелющих шарах приведены в [4], однако до настоящего времени исследования распределения износостойкости по сечению шаров не проводились. Это затрудняло выбор режимов термического упрочнения при освоении нового вида продукции – шаров Ø 120 мм со свойствами по 3-й группе ДСТУ 3499.

**Целью работы** являлось определение характера изменения износостойкости по сечению катаных мелющих шаров из низколегированных марок стали и определение оптимального режима их термоупрочнения с целью обеспечения требований 3-й группы ДСТУ 3499\*\*.

**Материал и методики исследований.** Исследовали мелющие шары диаметром 120 мм из сталей М74 (0,75 % С; 0,28 % Si; 0,94 % Mn), 75Г2С (0,76 % С; 0,42 % Si; 1,41 % Mn) и 75ХГСМ (0,77 % С; 0,46 % Si; 0,98 % Mn; 0,38 % Cr; 0,064 % Mo). Шары проходили термоупрочнение в производственных условиях ПАО «МК «Азовсталь» по режимам, представленным в таблице. Из шаров были изготовлены темплеты, из которых на разном удалении от поверхности шара вырезали образцы размерами 5x10x20 (мм). Изнашивание проводили в лабораторной мельнице диаметром 300 мм при помоле электрокорунда. Испытания выполняли при скорости вращения 11 об/мин и 46 об/мин. Первая скорость обеспечивала преимущественно абразивный механизм изнашивания, а вторая – ударно-абразивный. В обоих случаях вместе с абразивом в мельницу добавляли водный раствор для получения пульпы с 40 % жидкой фазы по массе. Раствор по составу соответствовал технической воде Центрального ГОКа. Длительность испытаний составляла 5 ч, после чего определяли потерю массы образцов. Их износостойкость оценивали коэффициентом  $\epsilon$ , полученным делением износа эталона (отожженная сталь Ст 3) на износ образца.

Таблица

Режимы термоупрочнения и твердость мелющих шаров Ø 120 мм

№ режима	Длительность закалки, с	Температура самоотпуска (°С) / твердость поверхности (НВ) шаров из стали:		
		М74	75Г2С	75ХГСМ
1	45-50	530 / 355-378	545 / 340-365	525 / 360-380
2	68-72	470 / 435-442	не применялся	
3	80-85	390 / 460-475	415 / 455-480	385 / 464-475
4	105-110	320 / 495-514	334 / 495-520	323 / 505-534
5	120-125	255 / 534-555	268 / 524-555	250 / 540-562
6	135-140	217 / 565-578	225 / 555-572	210 / 555-578

*Прим.: Температура шаров перед закалкой - 860-890 °С, охлаждающая среда – вода (24-26 °С)*

**Изложение основного материала.** Как следует из рис. 1 и табл.1, поверхностная твердость шаров находилась в обратной зависимости от продолжительности закалки. В шарах из сталей М74 и 75Г2С твердость распределялась по сечению неравномерно. В зависимости от режима термоупрочнения имели место два варианта ее распределения: 1) с «провалом» на расстоянии 5-10 мм; в этом случае на поверхности фиксировали 39-41 HRC, в зоне «провала» – 30-35 HRC, затем твердость постепенно возрастала до 38-41 HRC и снижалась в центре до 37-38

\*\* Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Ткаченко Ф.К.

HRC; 2) с достаточно резким перепадом от высоких значений (50-63 HRC) до 40-45 HRC на расстоянии ~ 10 мм в стали М74 и ~ 20 мм – в стали 75Г2С с дальнейшей ее стабилизацией в направлении к центру. В шарах из стали 75ХГСМ твердость изменялась по сечению незначительно.

На рис. 2 представлены данные об изменении абразивно-коррозионной износостойкости по сечению шаров. В шаре из стали М74, закаленном в течение 45-50 с, по мере продвижения от поверхности к центру на глубине 7-8 мм зафиксирована область минимальной износостойкости с  $\varepsilon_a=1,90-1,99$ , которая сменяется подъемом коэффициента износостойкости до 2,42-2,43 на глубине 15-20 мм с дальнейшим по степенным снижением  $\varepsilon$  до 2,28 в центре. После закалки в течение ~70 с вместо «провала» износостойкости отмечено нарастание  $\varepsilon$  с 2,33 на поверхности до 2,49 на глубине 15 мм; в более глубоких слоях износостойкость изменяется так же, как и при закалке 45-50 с. Увеличение продолжительности закалки до 80-140 с пропорционально повысило износостойкость: в приповерхностных слоях шаров (на глубину до 7 мм) - на 15-22 %, на глубине 8-13 мм – на 5-8 %; на большей глубине изменений не произошло, за исключением некоторого увеличения износостойкости в центральных участках шаров по сравнению со слоями на глубине 20-40 мм при  $\tau_3=120-140$  с. В шарах из стали 75Г2С, в целом, наблюдался аналогичный характер изменения абразивно-коррозионной износостойкости по сечению, за исключением того, что «провал» значений  $\varepsilon$  в приповерхностной области отмечался также и после закалки в течение 80-85 с. В случае  $\tau_3=120-140$  с в шарах из стали 75Г2С была достигнута более высокая износостойкость, чем в шарах из стали М74. В отличие от описанного выше градиента износостойкости, шары из стали 75ХГСМ отличались практически неизменной износостойкостью по всему сечению. Необходимо отметить, что, несмотря на более высокий уровень твердости, шар, закаленный в течение 80-85 с, уступал в износостойкости шару, термоупрочненному при  $\tau_3=45-50$  с.

Переход от абразивно-коррозионного к ударно-абразивно-коррозионному механизму изнашивания вызвал увеличение износа образцов и некоторое уменьшение общего уровня  $\varepsilon$  и привел к определенным изменениям в распределении износостойкости по сечению шаров (рис. 3). Как и при абразивном изнашивании, здесь также было отмечено наличие «провалов» износостойкости на глубине 3-8 мм после закалки в течение 45-70 с для стали М74 и 45-50 с – для стали 75Г2С). Вместе с тем, увеличение твердости на поверхности шаров с 47 до 52 HRC (сталь М74) и с 39 до 44 HRC (сталь 75Г2С), достигнутое за счет роста  $\tau_3$ , фактически не привело к росту коэффициента  $\varepsilon$  в приповерхностной зоне, напротив, в стали 75Г2С произошло его некоторое снижение. После термоупрочнения с  $\tau_3=105-125$  с в шарах из стали 75Г2С отмечены пики  $\varepsilon$  на глубине 12 -17 мм. Для шаров из стали 75ХГСМ переход от  $\tau_3=105-110$  к  $\tau_3=120-125$  с, сопровождавшийся ростом твердости на 4-5 HRC, практически не увеличил износостойкость.

С использованием полученных результатов рассчитали объемную износостойкость шаров:

$$\varepsilon_{\text{об}} = \sum_{i=1} V_i \varepsilon_i / V_{\text{об}}$$

где  $V_i$  и  $\varepsilon_i$  – объем и коэффициент износостойкости  $i$ -го слоя.

Как следует из рис. 4, объемная износостойкость шаров растет по мере повышения продолжительности закалки, причем наиболее значительно – в шарах из стали 75Г2С и 75ХГСМ. При  $\tau_3=45-85$  с шары из этих сталей практически не имеют преимущества перед шарами из стали М74 или даже уступают им (за исключением стали 75ХГСМ при абразивном изнашивании); при дальнейшем увеличении продолжительности закалки это преимущество нарастает, особенно в абразивной износостойкости, достигая 11 % (75Г2С) и 15,3 % (75ХГСМ) при  $\tau_3=135-140$  с. Более высокая объемная износостойкость шаров из сталей с повышенным уровнем легирования объясняется большей глубиной закалки, наличием мартенситно-бейнитных участков повышенной твердости в ликвационных зонах центральной части шаров (из стали 75Г2С), а также присутствием в структуре стали 10-20 % остаточного аустенита, склонного к деформационному  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращению при изнашивании.

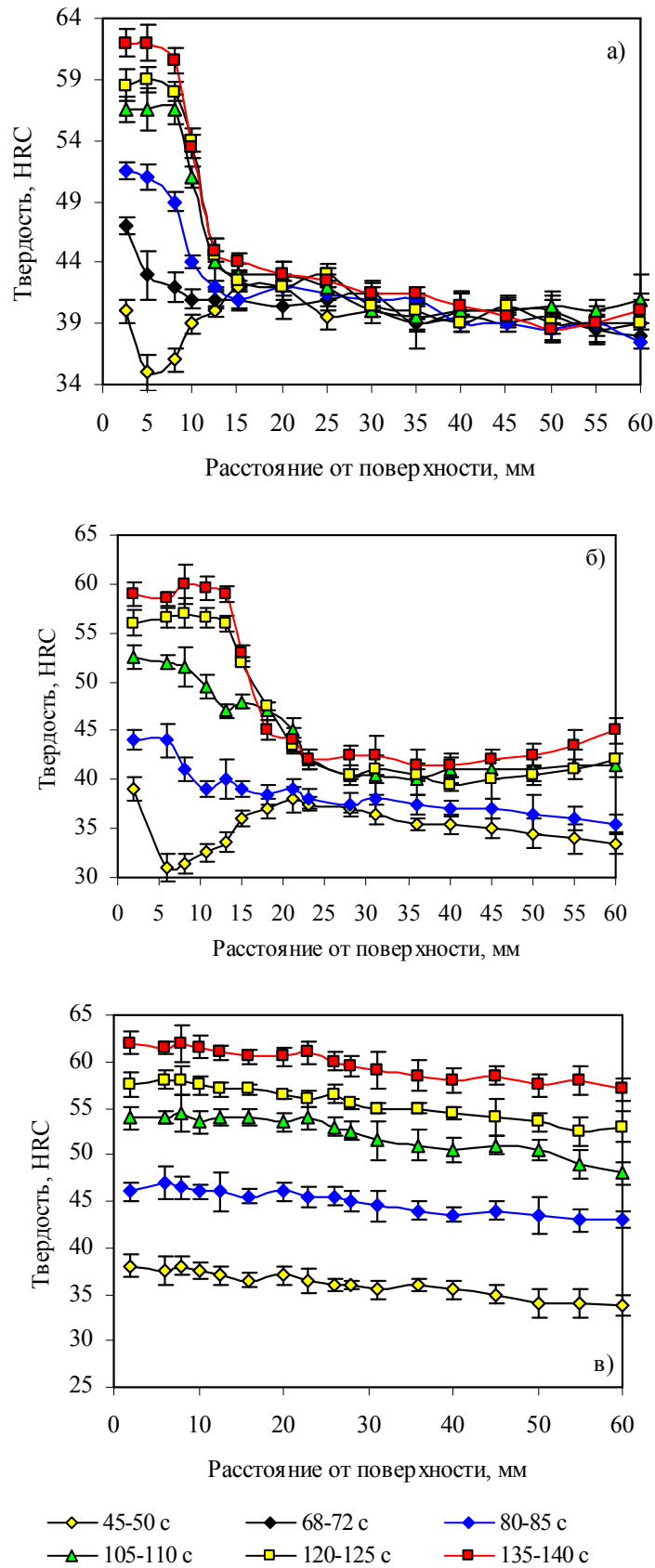


Рис. 1 – Распределение твердости по сечению термоупрочненных шаров  $\varnothing$  120 мм из сталей М74 (а), 75Г2С (б) и 75ХГСМ (в)

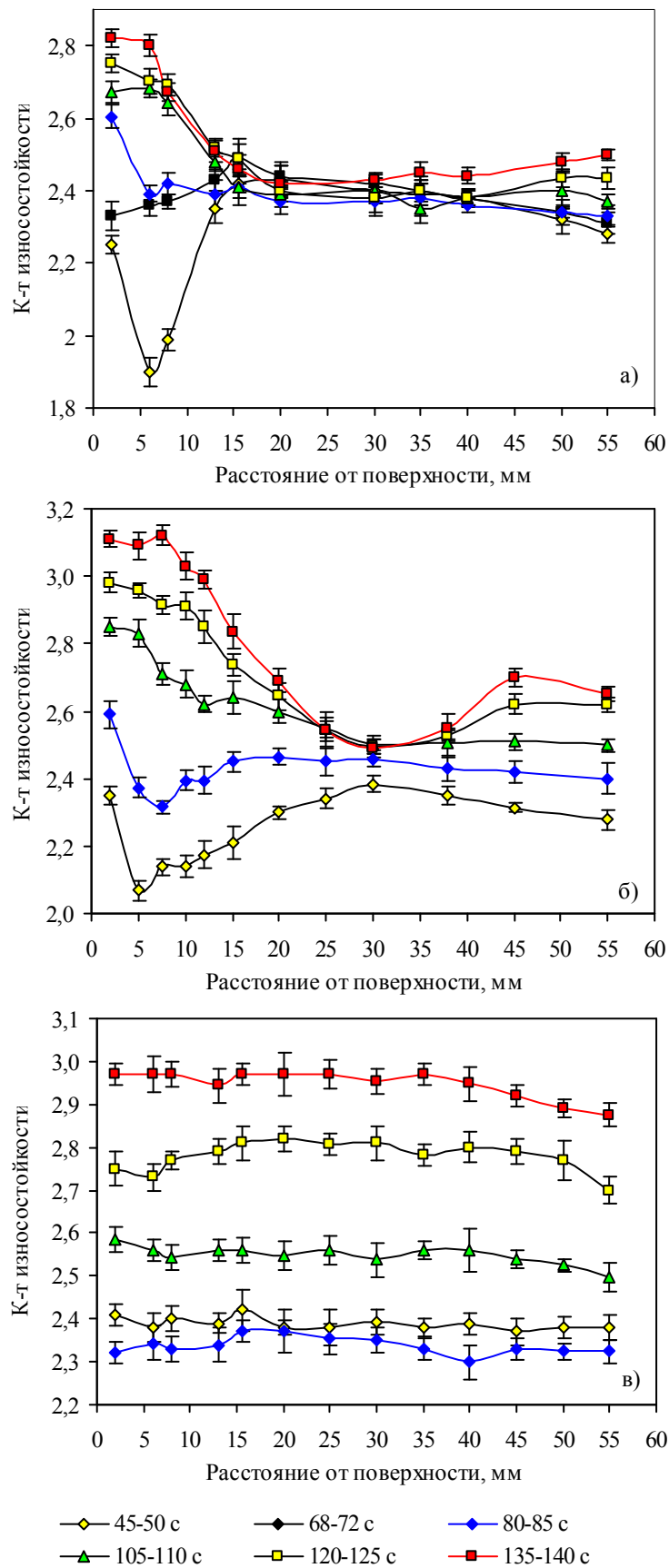


Рис. 2 - Изменение абразивно-коррозионной износостойкости по сечению

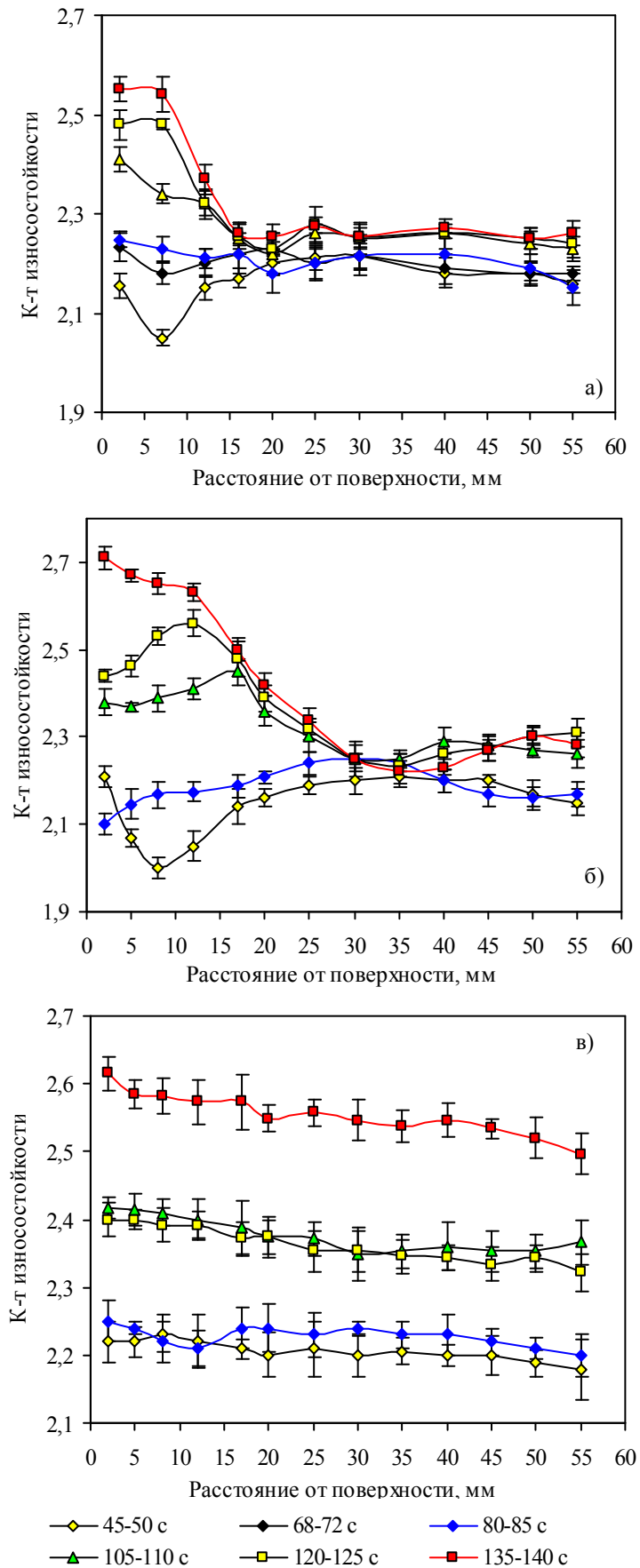


Рис. 3 - Изменение ударно-абразивно-коррозионной износостойкости по сечению

термоупрочненных шаров  $\varnothing 120$  мм из сталей М74 (а), 75Г2С (б) и 75ХГСМ (в)

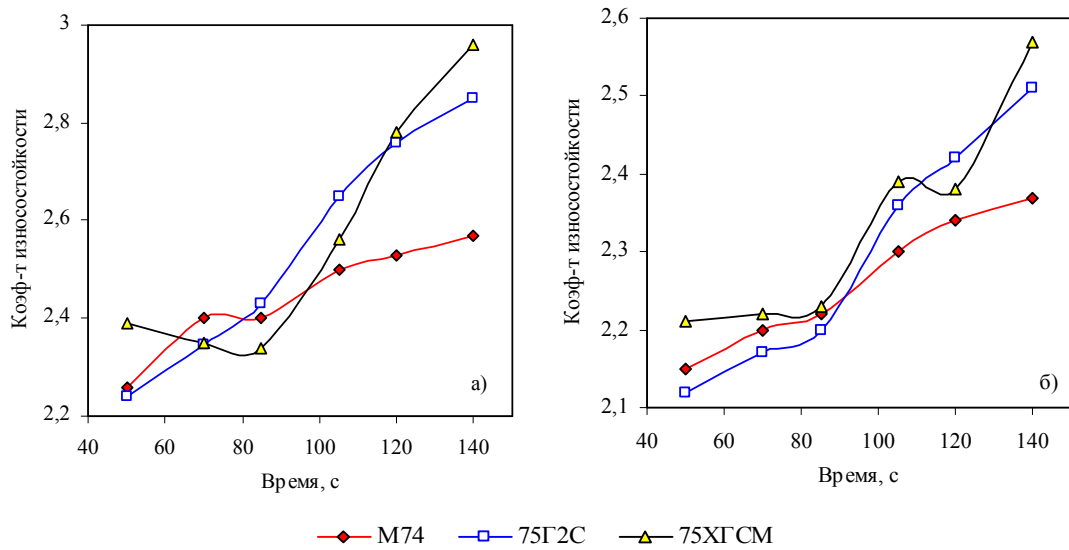


Рис. 4 - Влияние продолжительности закалки на объемную абразивно-коррозионную (а) и ударно-абразивно-коррозионную (б) износостойкость шаров диаметром 120 мм

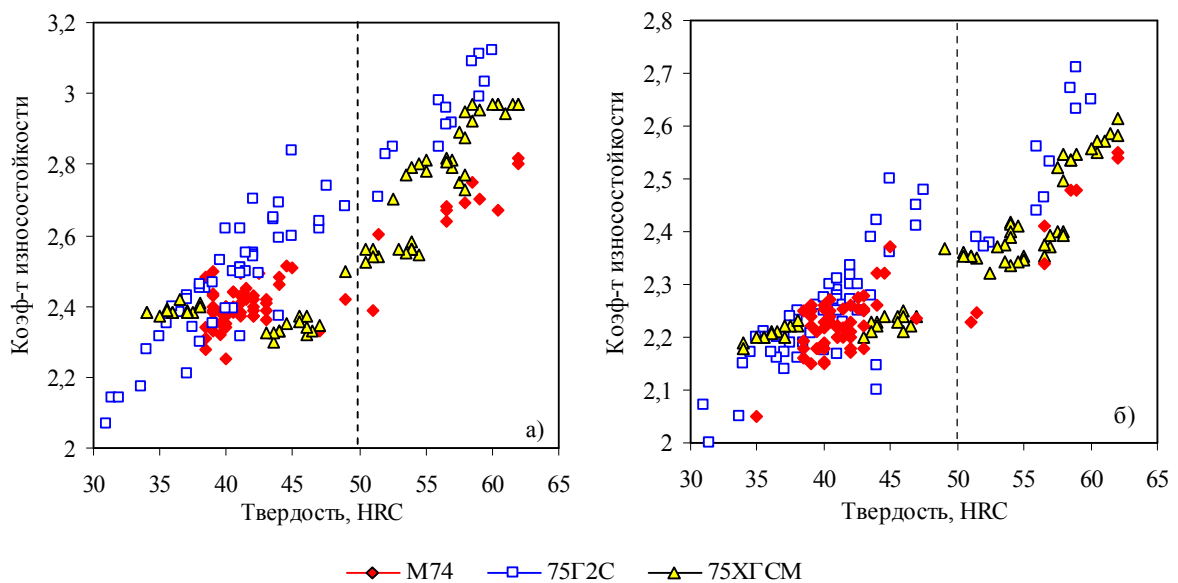


Рис. 5 - Влияние твердости на абразивно-коррозионную (а) и ударно-абразивно-коррозионную (б) износостойкость шаров из сталей М74, 75Г2С и 75ХГСМ (пунктир – нижняя граница требований 3-й группы ДСТУ 3499)

Также следует отметить, что при ударно-абразивном характере изнашивания термоупрочнение шаров из стали 75ХГСМ с закалкой 120-125 с приводит к значительному снижению объемной износостойкости по сравнению с  $\tau_3=105-110$  с (несмотря на рост объемной твердости): в этом случае объемная износостойкость шаров почти снижается до уровня износостойкости шаров из стали М74.

Анализ результатов испытаний шаров, представленных в координатах «твердость – износостойкость», еще раз подтверждает известный факт, что твердость не может служить надежным критерием эксплуатационной долговечности металлоизделий. Как видно из рис. 5, начиная с  $\sim 40$  HRC при абразивно-коррозионном и с  $\sim 45$  HRC – при ударно-абразивно-коррозионном изнашивании, разброс экспериментальных точек возрастает до  $\Delta\varepsilon=0,3-0,4$ , т.е. до 14-19%. При требуемой для 3-й группы ДСТУ 3499 твердости шаров  $\varnothing 120$  мм ( $\geq 50$  HRC) различия в износостойкости также весьма существенны, что указывает на решающую роль типа микроструктурного градиента в формировании уровня долговечности мелющих шаров. Обращает на себя внима-

ние тот факт, что точки, относящиеся к шарам из стали 75Г2С, располагаются по верхнему краю полосы экспериментальных точек, т.е. при равной твердости сталь 75Г2С в целом имеет преимущество в износостойкости перед двумя другими сталями. Этот же вывод относится и к соотношению «объемная твердость – объемная износостойкость»: из рис. 6 следует, что как при абразивном, так и при ударно-абразивном характере изнашивания это соотношение наиболее предпочтительно для шаров из стали 75Г2С. Можно, также отметить, что при равной объемной твердости шары из стали М74 не уступают шарам из стали 75ХГСМ в объемной ударно-абразивной износостойкости (см. рис. 6, б) и превосходят их в объемной абразивной износостойкости (рис. 6, а).

Стали 75Г2С и 75ХГСМ отличаются от М74 более высокой себестоимостью, следовательно, в случае их применения выигрыш от прироста долговечности шаров должен компенсировать удорожание стали. Рис. 6 позволяет определить рациональные диапазоны объемной твердости, к которым следует стремиться в шарах из сталей 75Г2С и 75ХГСМ для выполнения этого условия.

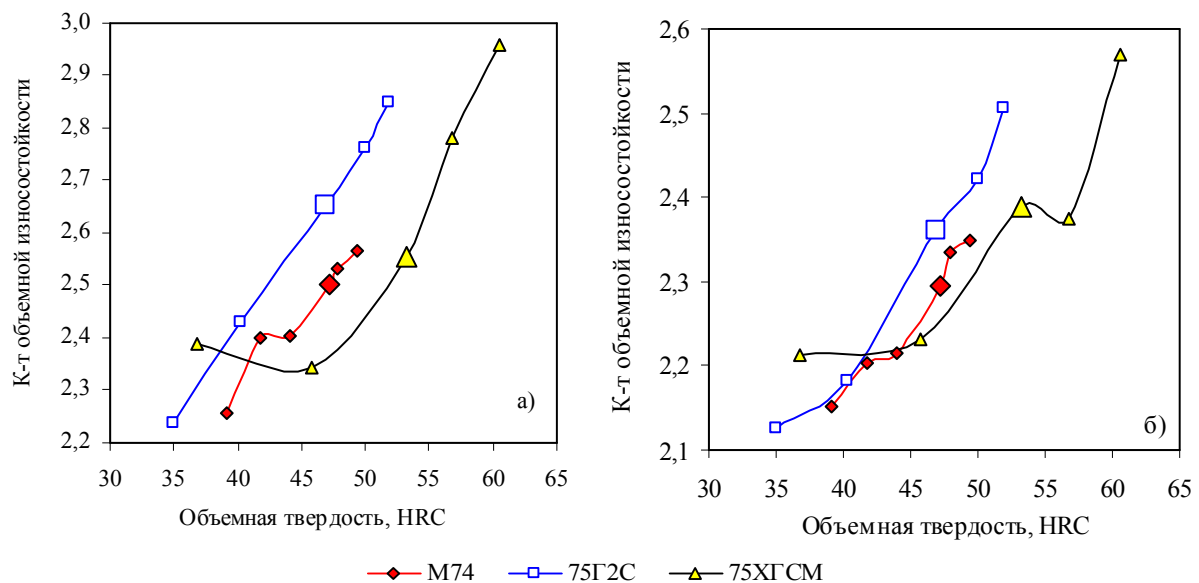


Рис. 6 - Взаимосвязь объемной твердости и объемной абразивно-коррозионной (а) и ударно-абразивно-коррозионной (б) износостойкости шаров из сталей М74, 75Г2С и 75ХГСМ (крупные маркеры – минимальные значения твердости, соответствующие 3-й группе ДСТУ 3499)

По положению крупных маркеров, обозначающих минимальную объемную твердость, при которой твердость на поверхности соответствует 3-й группе ДСТУ 3499, видно, что при достижении требуемой стандартом поверхностной твердости в 50 HRC шары из стали 75Г2С будут иметь преимущество перед шарами из стали М74 лишь на 5,57 % по абразивно-коррозионной и лишь на 3,06 % - ударно- абразивно-коррозионной износостойкости, а шары из стали 75ХГСМ – лишь на 1,89 % и 3,98 %, соответственно. При росте объемной твердости до  $\geq 50$ -52 HRC преимущество шаров из стали 75Г2С увеличивается до 9,96-13,54 % при абразивно-коррозионном и до 3,0-6,81 % - при ударно-абразивно-коррозионном воздействии. Рост объемной твердости в шарах из стали 75ХГСМ до 57-58 HRC повысит преимущество в износостойкости по сравнению с шарами из стали М74 до 9,56-16,73 % при абразивном характере изнашивания. При ударно-абразивном характере воздействия объемную твердость шаров из стали 75ХГСМ необходимо повышать не менее, чем до 60-62 HRC; в этом случае преимущество перед сталью М74 достигнет 6,38-8,80 %. Таким образом, шары 3-й группы из более легированных сталей при подборе режима термоупрочнения могут иметь существенное преимущество в эксплуатационной долговечности перед шарами из стали с невысокой прокаливаемостью.

Анализ взаимосвязи уровня объемной износостойкости мелющих шаров  $\varnothing 120$  мм с типом микроструктурного градиента, формируемого по сечению шаров при термоупрочнении [3], позволил определить требуемый тип градиента, обеспечивающего как достижений требований 3-й



группы ДСТУ 3499, так и близкий к максимальному уровень объемной износостойкости шаров. В шарах из стали М74 этому условию отвечают различные типы градиентов, поскольку все они обеспечивают близкие значения объемной износостойкости (от поверхности к центру): 1)  $(M_{\text{отп}} + \text{ВБНТ}) \rightarrow (M_{\text{отп}} + T + \text{ВБ}_{300-350}) \rightarrow T \rightarrow \text{ТС} \rightarrow (\text{ТС} + \text{С}) \rightarrow \text{С}$ ; 2)  $(M_{\text{отп}} + \text{НБ}_{250}) \rightarrow (M_{\text{отп}} + T + \text{НБ}_{250}) \rightarrow T \rightarrow \text{ТС} \rightarrow (\text{ТС} + \text{С}) \rightarrow \text{С}$ ;  $(M_{\text{отп}} + M) \rightarrow (M_{\text{отп}} + T + M) \rightarrow T \rightarrow \text{ТС} \rightarrow (\text{ТС} + \text{С}) \rightarrow \text{С}$  (где М,  $M_{\text{отп}}$ ,  $\text{ВБ}_{300-350}$ ,  $\text{НБ}_{250}$ , Т, С, ТС – мартенсит закалки; мартенсит отпуска; верхний бейнит, сформированный при 300-350 °С; нижний бейнит, сформированный при 350 °С; троостит; сорбит; троосто-сорбит).

В шарах из стали 75Г2С необходимо стремиться к получению следующих градиентных состояний микроструктуры (от поверхности к центру): 1)  $(M_{\text{отп}} + \text{НБ}_{250-300}) \rightarrow (\text{НБ}_{250-300} + A_{\text{ост}}) \rightarrow (\text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{250-300} + A_{\text{ост}}) \rightarrow (\text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{250-300} + T + A_{\text{ост}}) \rightarrow \text{ТС} \rightarrow (\text{ТС} + \text{С})$ ; 2)  $(M_{\text{отп}} + \text{НБ}_{200}) \rightarrow (\text{НБ}_{200} + A_{\text{ост}}) \rightarrow (\text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{200} + A_{\text{ост}}) \rightarrow (\text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{200} + T + A_{\text{ост}}) \rightarrow \text{ТС} \rightarrow (\text{ТС} + \text{С})$  (где  $\text{НБ}_{250-300}$ ,  $\text{НБ}_{200}$  – нижний бейнит, сформированный при 250-300 °С и 200 °С, соответственно;  $\text{ВБ}_{450}$  – верхний бейнит, сформированный при 450 °С;  $A_{\text{ост}}$  – остаточный аустенит). Лучшие результаты дает второй вариант.

В шарах из сталей М74 и 75Г2С троосто-сорбитная структура центральной зоны может дополняться мартенситно-бейнитными участками, возникающими в случае ликвационного обогащения осевой зоны шаровой заготовки по С, Мп, Si и повышающие износостойкость шаров.

В шарах из стали 75ХГСМ оптимальным является следующее чередование микроструктуры в направлении центра:  $(M_{\text{отп}} + \text{НБ}_{200}) \rightarrow (M_{\text{отп}} + \text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{200} + A_{\text{ост}}) \rightarrow (\text{ВБ}_{450} + \text{НБ}_{200} + A_{\text{ост}})$ . Наличие в структуре нижнего бейнита, сформированного при 250-300 °С, сообщает шарам из этой стали пониженную объемную износостойкость (как абразивно-коррозионную, так и ударно-абразивно-коррозионную), несмотря на обеспечение достаточно высокого уровня объемной твердости.

Указанные микроструктурные градиенты могут быть получены в катаных шарах  $\varnothing$  120 мм при термоупрочнении по следующим режимам: подстуживание с температуры прокатки до 880-910 °С и закалка в течение 105-140 с (сталь М74), 120-140 с (сталь 75Г2С), 135-140 с (сталь 75ХГСМ). Такая термическая обработка обеспечит шарам как требуемую 3-й группой ДСТУ 3499 поверхностную твердость, так и максимальную эксплуатационную долговечность.

### Выводы

1. Экспериментально получены данные о распределении абразивно-коррозионной и ударно-абразивно-коррозионной износостойкости металла по сечению термоупрочненных мелющих шаров  $\varnothing$  120 мм из сталей М74, 75Г2С, 75ХГСМ. Показано, что несмотря на общую тенденцию роста объемной износостойкости шаров по мере увеличения их твердости, последняя не может служить надежным показателем сопротивления изнашивания. Определяющую роль играет тип градиента микроструктуры по сечению шаров.
2. Повышенный уровень объемной износостойкости при равной твердости имеют шары из стали 75Г2С, закаленные в течение 120-140 с. Во многом это связано с повышенной прокаливаемостью стали и с формированием микроструктуры, содержащей в своем составе нижний бейнит, сформированный при температурах вблизи точки  $M_n$ , и остаточный аустенит, склонный к мартенситному превращению при изнашивании.

### Список использованных источников:

1. Ефременко В.Г. Особенности характера изнашивания рабочих органов барабанных мельниц / В.Г. Ефременко // Сб. научных трудов. Защита металлургических машин от поломок». – ПГТУ: Мариуполь. - 2000. - № 5. - С.67-74.
2. Iwasaki I. Corrosive and Abrasive Wear in Ore Grinding / I.Iwasaki, S.C.Riemer, J.N.Orlich, K.A.Natarajan // Wear. - 1985. - V. 103. - P. 253-267.
3. Игнатов В.А. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / В.А.Игнатов, В.К.Соленый, В.Л. Жук и др. // Металл и литье Украины. - 2001. - № 10-11. - С.31-34.
4. Ефременко В.Г. Структурные градиенты в стальных мелющих шарах, термоупрочненных с прокатного нагрева / В.Г. Ефременко, Ф.К. Ткаченко, С.О.Кузьмин и др.// Сб. научных трудов. Строительство, материаловедение, машиностроение. – ПГАСиА: Днепропетровск.-2009.-

Вып.48, ч. 2.- С.35-42.

**Bibliography:**

1. Efremenko V. The peculiarities of wear mechanism of grinding boodies for umbling mills / V. Efremenko // Collection of scientific works. Zashita metallurgicheskikh mashin ot polomok. – PGТУ: Mariupol. – 2000. -№5. – P. 67-74. (Rus.)
2. Iwasaki I. Corrosive and Abrasive Wear in Ore Grinding / I.Iwasaki, S.C.Riemer, J.N.Orlich, K.A.Natarajan // Wear. – 1985. – V. 103. – P. 253-267.
3. Ignatov V. The basic principles for the selection of materials for the manufacture of grinding media, operating under impact-abrasive, corrosion-impact-abrasive and impact-fatigue wear / V. Ignatov, V. Solenii, V. Juk etc. // Metall i litie Ukraine. – 2001. - №10-11. – P. 31-34. (Rus.)
4. Efremenko V. The structural gradients in the steel grinding balls heat-treated after rolling / V. Efremenko, F. Tkachenko, S. Kuzmin etc. // Collection of scientific works. Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. – PGASiA: Dnepropetrovsk. – 2009. Issue 48, part 2.- P.35-42. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скрєбцов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 07.11.2011