ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ МОЛОЛЬНИХ КУЛЬ ІЗ СТАЛІ 65Г ДЛЯ КУЛЬОВИХ МЛИНІВ

Штихно А. П., Алімов В. І., Передерій І. О., Єрмаков В. П.

Рассмотрено влияния параметров охлаждения при термической обработке с отдельного нагрева и с использованием тепла прокатки на структуру и свойства стали 65 Г, используемой для изготовления мелющих шаров для шаровых мельниц. Для определения длительности охлаждения до температуры самоотпуска выполнен теплотехнический расчет согласно численному методу решения дифференциального уравнения теплопроводности. Показано, что теоретические расчеты не всегда верны и требуют корректировки, т. е. проведения экспериментальных исследований. Установлено, что регулируя длительность охлаждения можно управлять конечной структурой и свойствами стали.

Розглянуто вплив параметрів охолодження при термічній обробці з окремого нагріву і з використанням тепла прокатки на структуру і властивості сталі 65 Г, що використовується для виготовлення молольних куль для кульових млинів. Для визначення тривалості охолодження до температури самовідпуска виконано теплотехнічний розрахунок згідно чисельному методу рішення диференціального рівняння теплопровідності. Показано, що теоретичні розрахунки не завжди вірні і потребують корегування, тобто проведення додаткових експериментальних досліджень. Встановлено, що регулюючи тривалість охолодження можна управляти кінцевою структурою і властивостями сталі.

Consider the effect of cooling parameters during thermal processing with separate heating using heat and rolling on the structure and properties of steel 65 G used for the manufacture of mololnyh balls for ball mills. To determine the duration of cooling to autotempered Thermal calculation is made according to the method of numerical solution of differential equations of heat conduction. It is shown that the theoretical calculations are not always true, and require adjustments, ie experimental studies. Found that adjusting the duration of cooling can be controlled final structure and properties of steel.

Штыхно А. П.	канд. техн. наук, доц. ДонНТУ shtixno@mail.ru
Алимов В. И.	д-р техн. наук, проф. ДонНТУ
Передерий И. А.	нач. отдела контроля и качества ПАО «ДМПЗ»
Ермаков В. П.	студент ДонНТУ

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

ПАО «ДМПЗ» – Публичное акционерное общество «Донецкий металлопрокатный завод», г. Донецк.

УДК 621.78.14

Штихно А. П., Алімов В. І., Передерій І. О., Єрмаков В. П.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ МОЛОЛЬНИХ КУЛЬ ІЗ СТАЛІ 65 Г ДЛЯ КУЛЬОВИХ МЛИНІВ

Важливе місце в переробці руд на гірничо-збагачувальних комбінатах займають операції подрібнення, які поглинають більше половини всіх матеріальних витрат виробництва. Подрібнення проводять у млинах з використанням в якості активних елементів металевих тіл, що мелють, найчастіше – куль. Через постійний контакт з матеріалом який подрібнюється, молольні кулі піддаються інтенсивному зносу, що при низькій стійкості змушує гірничо-збагачувальний комплекс компенсувати їх знос за рахунок придбання нових тіл. Разом з цим, найбільші втрати, викликані невисокою якістю куль, пов'язані зі зниженням видобутку корисного компонента з руди, що приводить до збільшення енергетичних і експлуатаційних витрат на тонну готової продукції. Усі ці витрати підвищують собівартість продукції гірничо-збагачувального комплексу, викликаючи подорожчання концентрату – базового для металургійної та машинобудівної галузей продукту. Ті ж самі проблеми характерні і для енергетичної, цементної, будівельної та інших галузей, які використовують операцію подрібнення при переробці своєї сировини [1].

З аналізу опублікованих даних [1–7] встановлено, що сталеві молольні кулі, які виготовляються українською промисловістю, мають в цілому невисоку і нерівномірну по поверхні твердість, малу глибину загартованості, підвищену схильність до розколу в млинах, в результаті чого в 3–5 разів поступаються аналогічним зарубіжним продуктам.

Важлива роль при виготовленні сталевих молольних куль належить і таким технологічним властивостям сталі, як здатність до крихкого руйнування, корозійно-абразивний знос, мала глибина загартованого шару, які в значній мірі залежать від режиму термічної обробки і отриманої структури. Структура, обумовлена хімічним складом металу й тривалістю охолодження, поряд з іншими факторами (величиною зерна аустеніту, наявністю внутрішніх напружень) є характеристикою, знання якої необхідно для складання подання про працездатність молольних куль.

Термічна обробка молольних куль, яка включає тепловий вплив на метал, визначає різні зміни формування структури, фазового стану, напруженого стану й відповідно властивостей, величини й розподілу мікро- і макронапруг, якими можна управляти. Деформаційно-термічна обробка може бути використана з метою підвищення міцності сталевих куль з використанням терла прокатного нагріву, в основному вуглецевих і низьколегованих сталей [2, 3, 6]. Використання тепла прокатки для проведення деформаційно-термічної обробки дозволяє значно скоротити энерго- і трудовитрати.

Метою даної роботи є вивчення впливу параметрів охолодження молольних куль з використанням тепла прокатного нагріву на структуру і властивості сталі 65Г для виготовлення куль діаметром 40 і 60 мм 3 і 4 груп міцності (ДСТУ 3499-97) для кульових млинів та підвищення їх якості.

Дослідження проводили на зразках заготівель прокату із сталі 65Г діаметром 60 мм і довжиною 70–80 мм, з якої планується виробництво сталевих молольних куль діаметром 40 і 60 мм для кульових млинів 3 і 4 груп на кульопрокатному стані ПАТ «ДМПЗ». Кулі 3 і 4 груп повинні на поверхні мати твердість не менше HRC 55, а 4 групи на глибині ½ R не менше HRC 45. Зразки заготівель були відібрані на цьому ж підприємстві для відпрацювання порівняльного режиму термічної обробки гартування при різній тривалості охолодження у воді з самовідпуском і відпуском з окремого нагріву. Різання виконувалося в умовах механічної лабораторії на ПАТ «ДМЗ» на відрізному верстаті з охолодженням.

Хімічний аналіз зразків, який представлено в табл. 1, виконували на квантометрі ARL-3000 в умовах ЦКЛ ПАТ «ДМЗ».

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваної сталі 65Г для молольних куль, % мас.

Єлемент, %	C	Ni	Si	Mn	Cr	P	S	Cu
Вміст елементів по ГОСТу	0,60–0,7	До 0,25	0,17–0,37	0,9–1,2	До 0,25	До 0,035	До 0,035	До 0,2
Фактичний хіманаліз	0,64	0,12	0,28	0,96	0,15	0,022	0,018	0,26

Макроструктуру вихідної заготовки, а саме хімічну неоднорідність (ліквації), тріщини, пори, раковини, виявляли глибоким і поверхневим травленням за допомогою оптичних приладів при збільшенні до 50 разів. Оцінка дефектів проводилася згідно ГОСТ 10243.

Мікроструктурні дослідження проводили в умовах лабораторії ДонНТУ на мікроскопі «Neophot-21» при збільшенні ×100. Фотографування проводили при збільшеннях × 250 і × 500 на мікроскопі за допомогою камери з подальшою обробкою фотографій на комп'ютері в програмі Adoble Photoshop 7.0 і Image Tool.

На отриманих фотографіях оцінили розмір зерна і визначили об'ємну частку мартенситу і троститу в сталі для оцінки глибини прогартованості сталі (50 % мартенситу).

Вимірювання твердості по перетину зразків виконували на приладі Роквелла (ТК-2М), за шкалою С. Мікростуктуру і твердість зразків вивчали по перетину за схемою, наведеною на рис. 1.

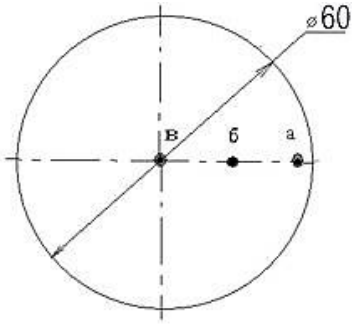


Рис. 1. Схема вивчення мікроструктури і вимірювання твердості по перетину зразків

Для призначення тривалості охолодження в воді з температури гартування і температури самовідпуску зразків виконували теплотехнічний розрахунок охолодження заготівель діаметром 60 мм по перетину згідно чисельному методу рішення диференціального рівняння теплопровідності.

Експериментальні режими термічної обробки заготівель виконували в термічній лабораторії кафедри фізичного матеріалознавства ДонНТУ. Нагрів зразків під гартування і відпуск проводили в пічах СНОЛ 1,6.2,5.1/11(600) за такими режимами:

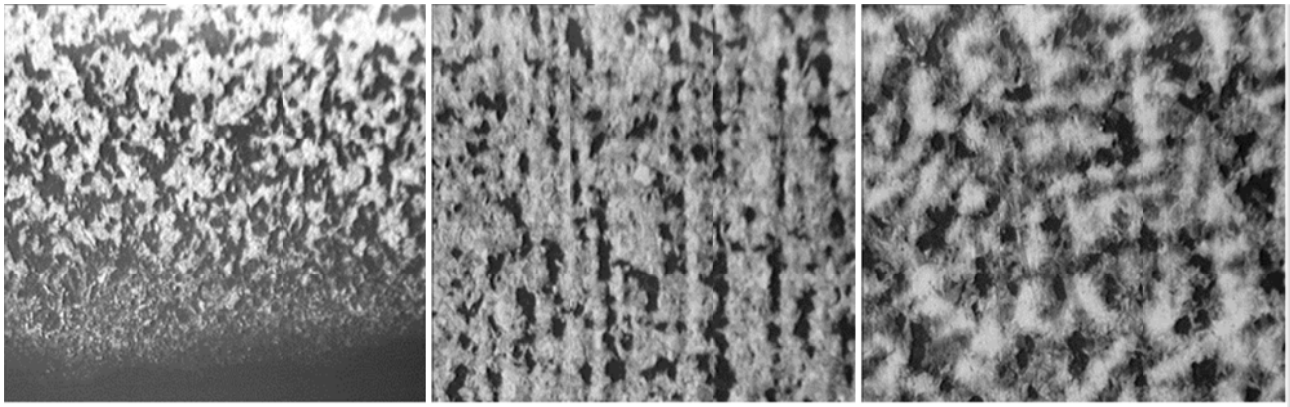
а) гартування з 790 ± 10 ºС, витримка 90 хв, повне охолодження у воді;

б) гартування з 790 ± 10 ºС , витримка 90 хв, охолодження зразків у воді 20 с, 30 с, та 60 с, далі на повітрі, відпуск при 250–270 ^{o}С, витримка 3 години, охолодження на повітрі;

в) гартування з 790 ± 10 ºС, витримка 90 хв, охолодження у воді 60 с, далі відпуск у печі при 250–270 ^{o}С, витримка 3 години, далі на повітрі.

г) гартування з 790 ± 10 ºС, витримка 90 хв, охолодження у воді 90 с, далі відпуск у печі при 250–270 °С, витримка 3 години, далі на повітрі.

У результаті дослідження макроструктури вихідної заготовки із сталі 65 Г після травлення реактивом Обергоффера було виявлено, що вона характеризується наявністю зон: корковою глибиною 0,5–0,6 мм, стовпчастих кристалів 15–17 мм і в решті перерізу – кристали рівноосні, разорієнтировані (ніздрюваті), рис. 2.



а) б) в)

Рис. 2. Макроструктура сталі 65 Г по перетину:
а – поверхня; б – позацентрова зона; в – осьова, × 50

В осьовій зоні, переважно наявність перлітної складової в дійсній структурі, в дендритній спостерігається світла ліквацийна пляма з шлаковими включеннями і тріщинами, що є результатом під усадочної ліквації. Така неоднорідність структури в осьовій зоні заготівлі при подальших нагрівах може сприяти виникненню тріщин і руйнуванню готових виробів в умовах ударно-абразивного впливу.

Мікроструктура сталі 65Г складається з перліту і уламків феритної сітки, що випала по кордонах колишнього аустенітного зерна 5–6 номери за шкалою ГОСТ 5639-82. Перліт щільної сорбітообразної будови, зустрічаються ділянки пластинчастого перліту. Поверхня металу зневуглецьована: повністю на глибину 0,25–0,30 мм, частково до 0,8 мм, і вражена одиничними розкатаними газовими бульбашками максимальної глибини 0,50 мм. Це свідчить про відсутність попередньої термічної обробки і низьку якість заготовки.

Для визначення параметрів охолодження при гартуванні куль діам. 60 мм було виконано теплотехнічний розрахунок змін температури по перетину в залежності від часу гартування в воді. Підставою для розрахунку цих параметрів послужила розробка технології самовідпуска, процесу при якому нагрів кулі проводитиметься за рахунок тепла, що збереглось після гартування у середині кулі. Такий технологічний процес сприяє зменшенню внутрішніх термічних напруг.

Необхідно визначити, скільки треба перебувати у воді кулі, щоб у середині залишилося достатньо тепла на розігрів до температур близьких температурі відпуска 250–260 °С. Розрахунок проводився від центру зразка до поверхні кулі с кроком у 3 мм. Також необхідно, щоб поверхневий шар 0,5 × R = 15 мм для куль діаметром 60 мм та 10 мм для куль діаметром 40 мм по вимогам ДСТУ повинен загартуватись і відповідати вимогам твердості для куль 3 – 4 класу міцності, з цього виходить, що гартувати треба як мінімум стільки часу, щоб на глибині 15 мм і 10 мм відповідно температура була нижче температури мартенситного перетворення – 270 °С. Зміна температури по перетину зразка ø 60мм зі сталі 65Г при охолодженні у воді протягом 60 с і подальшим охолодженням на повітрі приведено на рис. 3.

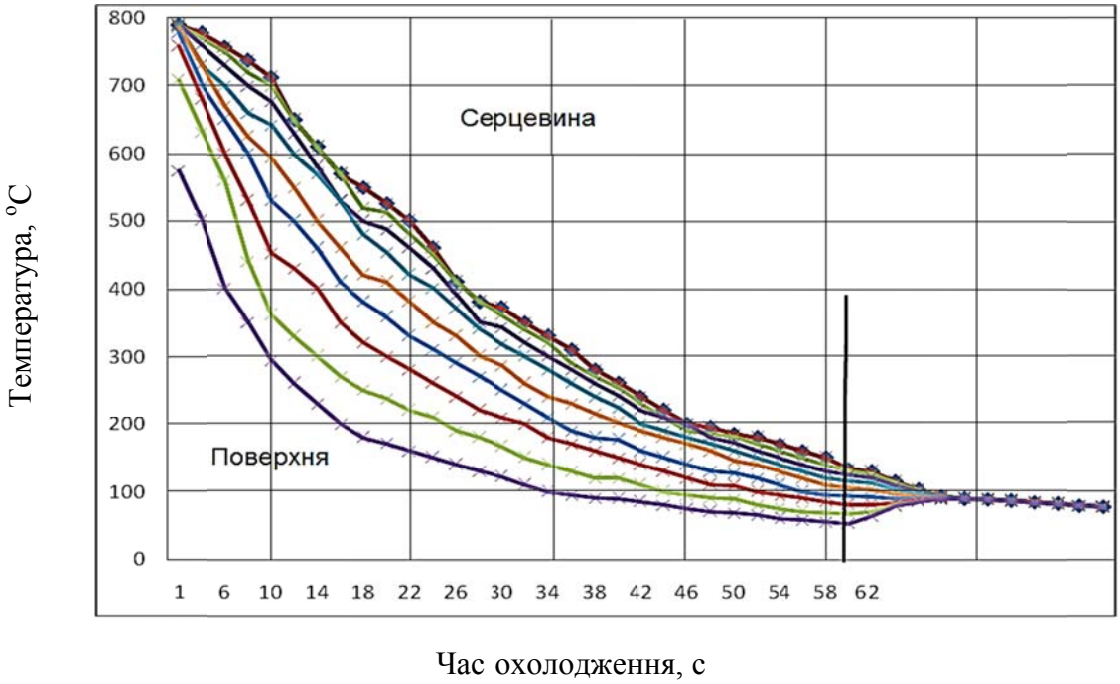


Рис. 3. Зміна температури по перетину зразка Ø 60 мм зі сталі 65Г при охолодженні у воді протягом 60 с і подальшим охолодженням на повітрі

В ході дослідження необхідного часу для загартування молольних куль було зроблено висновок, що для загартування поверхневого шару час охолодження повинен складати не менше 60 секунд, але температури, що збереглась у кулі після гартування буде не достатньо для процесу самовідпуска, тому планується відпускний бункер з підігрівом.

Після виконання експериментальних режимів, наведених вище, вивчали розподіл твердості і мікроструктури по перетину. Дані про розподіл твердості по перетину зразків зі сталі 65Г після різного часу охолодження в воді представлені на рис. 4.

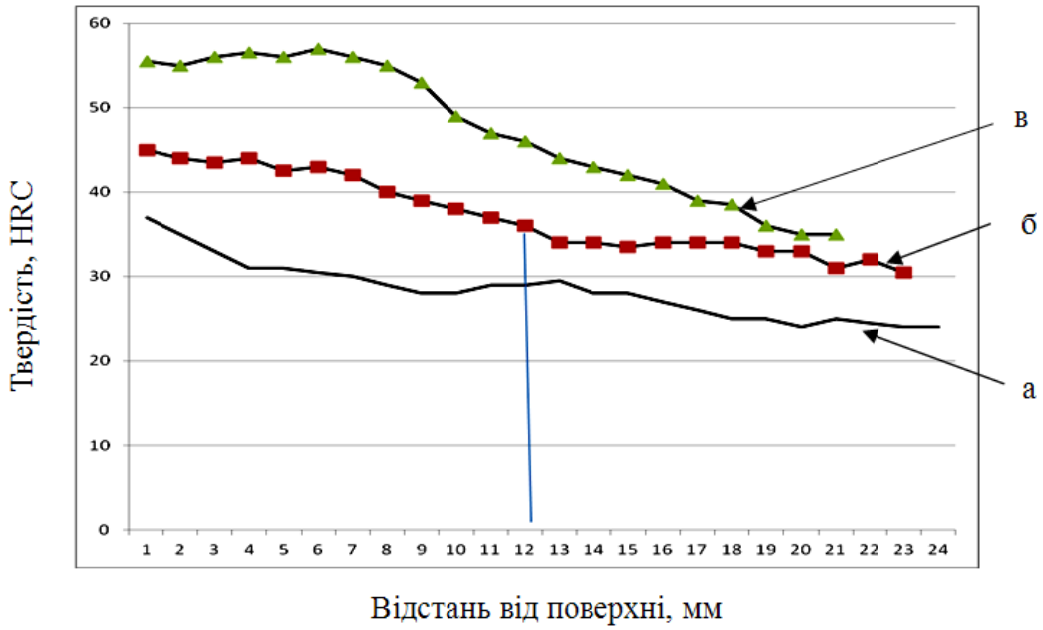


Рис. 4. Твердість по перетину зразків Ø60 мм зі сталі 65Г після гартування у воді протягом: а – 20 с; б – 30 с; в – 60 с

За результатами вимірювань твердості призначили температуру відпуску для отримання в поверхневому шарі твердості не нижче 55 HRC згідно ДСТУ для 4 групи молольних шарів. Результати вимірювання твердості після гартування і відпуску при температурі 240–260°С і вивчення мікроструктури по перетину представлені на рисунку 5 і 6 відповідно.

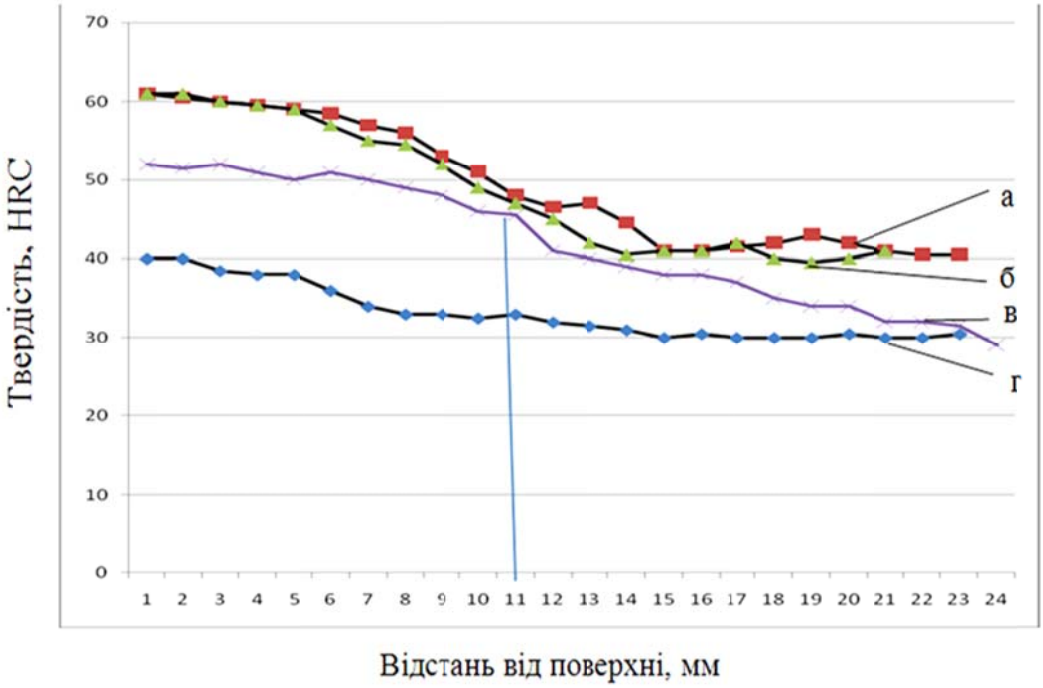
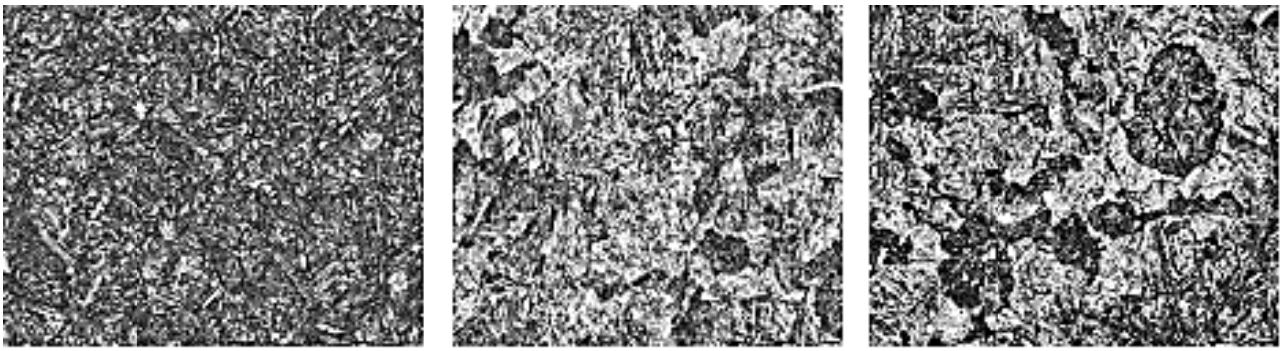


Рис. 5. Розподіл твердості по перетину зразків Ø60 мм із сталі 65Г у 2 протилежних напрямках (а, б) після повного гартування у воді і відпуску при температурі 240–260 °С (в), і 290–310 °С (г)

З аналізу графіка вимірювання твердості видно, що глибина загартованого шару зразка сталі 65Г після гартування складає 8–10 мм, що не задовольняє вимогам ДСТУ молольних куль 4 групи за твердістю, а після відпуска при 240–260 °С глибину прогартованості складає 7–8 мм а не ½ *R* (≈ 15 мм). На глибині ½ *R* твердість склала 39–40 HRC, що може задовольнити вимоги 3 групи міцності. На підставі цього було збільшено час охолодження до 90 с. При збільшенні часу охолодження заготівлі у воді до 90 с прогартованість збільшилася до 10–12 мм, що підтверджується і мікроструктурними дослідженнями.



а) б) в)

Рис. 6. Мікроструктура зразків зі сталі 65Г після гартування у воді протягом 90 с:
а – на поверхні; б – на відстані ½ *R*; в – центр, × 500

Таким чином, з аналізу проведених експериментальних режимів термічної обробки заготівель Ø60 мм із сталі 65Г, можна зробити висновок, що тривалість охолодження у воді при гартуванні повинна складати не менше 90 с перед самовідпуском, хоч по теплотехнічному розрахунку вона складає 60 с, температура відпуску для досягнення необхідної твердості поверхні (не менше 55 HRC) повинна бути 240–260 ^{o}C протягом не менше трьох годин. Глибина прогартованості заготівель досліджуваної сталі (10–12 мм) задовольняє вимогам до куль тільки 40 мм для 4 групи і 60 мм для 3 групи.

На ПАО «ДМПЗ» було здійснено експериментальний запуск кульопрокатного стану для відпрацювання його роботи і отримано декілька куль діаметром 60мм зі сталі 65Г для досліджень. З отриманих результатів по твердості і мікроструктурі встановлено, що деформація при прокатці куль підвищує твердість на 2–3 HRC і збільшує глибину прогартованості на 1–2 мм, при цьому подрібнюється структура за рахунок обтиску при прокатці, зникає осьова зона ліквації , але загалом ці показники все рівно не задовольняють вимоги ДСТУ для куль діаметром 60 мм.

ВИСНОВКИ

Показано, що теоретичні розрахунки не завжди вірні і потребують корегування, тобто проведення додаткових експериментальних досліджень. Встановлено, що, регулюючи тривалість охолодження, можна управляти кінцевою структурою і властивостями сталі. Тривалість охолодження у воді при гартуванні повинна складати не менше 90 с перед самовідпуском, хоч по теплотехнічному розрахунку вона складає 60 с, температура відпуску для досягнення необхідної твердості поверхні (не менше 55 HRC) повинна бути 240–260 ^{o}C протягом не менше трьох годин. Глибина прогартованості заготівель досліджуваної сталі 65Г (10–12 мм) задовольняє вимогам до куль тільки 40 мм для 4 групи і 60 мм для 3 групи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Экономические предпосылки использования мелющих тел повышенного качества и технологические аспекты их производства / В. Г. Єфременко [и др.] // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2007. – № 25. – С. 1–4.

2. Опыт освоения комбинатом «Азовсталь» технологии производства катаных мелющих шаров диаметром 120 мм с твердостью по 3-й группе ДСТУ 3499 / В. Г. Ефременко [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2006 г. – № 3. – С. 25–28.

3. Современная технология производства стальных мелющих шаров с улучшенными эксплуатационными характеритсиками / В. Г. Ефременко [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – № 1. – С. 11–13.

4. Освоение производства штампованных мелющих шаров диаметром 100 мм повышенной твердости / В. Н. Агафонов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2005. – № 1–2. – С. 43–44.

5. Влияние термической обработки на свойства катаных мелющих шаров высокой прокаливаемости / Ф. К. Ткаченко [и др.] // МиТОМ. – 2001. – № 8. – С. 26–28.

6. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / В. А. Игнатов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 31–34.

7. Разработка и освоение новой технологии закалки мелющих шаров с прокатного нагрева / А. Н. Клименко [и др.] // Сталь. – 1986. – № 11. – С. 71–72.

Стаття надійшла до редакції 16.11.2013 р.