

УДК 621.745.55

Ямшинський М. М., Федоров Г. Є., Платонов Є. О.

СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВІ ЗНОСОСТІЙКІ СТАЛІ ДЛЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Науково-технічний процес в машинобудуванні тісно пов'язаний із створенням нових та покращанням існуючих металевих матеріалів з особливими властивостями і, зокрема, зносостійких сплавів. Такі сплави використовують в сучасній теплоенергетиці для виготовлення робочих органів роздільно-розмельювальних машин, зокрема, броньованих плит, молоткових бил та інших деталей вуглерозмельювальних млинів.

Підвищений знос деталей вуглерозмельювальних та транспортувальних машин негативно позначається на продуктивності і надійності теплоенергетичного устаткування, що утруднює його експлуатацію і, крім того, потребує високих витрат на ремонт. Так, річні витрати на придбання та зміну зношувальних робочих елементів кулькових млинів складають 78 % вартості витрат на розмельювання палива [1].

Як зносостійкий матеріал, для виготовлення деталей вуглерозмельювальних млинів використовують переважно сталь 110Г13Л, леговану V, Mo, Ti та Cr. Ці легувальні елементи є дуже дорогими і дефіцитними матеріалами.

Хімічний склад сталі коливається в широких межах: за вуглецем від 0,9 до 1,5 %; за марганцем від 9 до 15 %; за кремнієм до 12 %; за фосфором до 0,12 %; за сіркою до 0,05 % [1]. У більшості технічних умов і стандартів рекомендують зберігати співвідношення Mn:C як 10:13 [1–3]. Ця аустенітна марганцева сталь на відміну від усіх відомих сталей має найвищу зносостійкість в умовах наклепу внаслідок ударної дії або високих контактних напружень. Підвищена здатність метастабільного марганцевистого аустеніту до наклепу пов'язана з його розпадом під час пластичної деформації і утворенням на поверхні контакту мартенситних структур.

Отже, оптимізація хімічного складу, відмова від використання дорогих та дефіцитних легувальних елементів, заміна їх на більш дешеві є актуальними питаннями для сьогодення.

Відомо, що в машинобудуванні використовують 3 групи литих сталей: низьковуглецеві (до 0,2 % C); середньовуглецеві (0,21–0,50 % C); високовуглецеві (більше 0,50 % C).

Для виготовлення зносостійких деталей використовують також білі чавуни доевтектичного або евтектичного типу з перлітною, мартенситною, мартенситно-аустенітною, аустенітною та аустенітно-феритною матрицею. Високого опору абразивному зношуванню білим чавунам надають такі ж дефіцитні і дорогі легувальні елементи.

Середньовуглецеві леговані сталі використовують для зносостійких деталей з підвищеною міцністю і таких, що не піддаються великим ударним навантаженням. Спільним для всієї групи цих сталей є необхідність термооброблення, яке полягає в гартуванні в оливі і низькотемпературному відпуску. Зносостійкість сталей цього класу підвищують додатковим легуванням хромом, титаном, марганцем, ванадієм та іншими елементами.

Зношування деталей машин та механізмів прийнято класифікувати за причинами, відповідно з якими розрізняють механічне, молекулярно-механічне, абразивне, гідроабразивне, газоабразивне та інші види зношування.

Під зносом, прийнято розуміти результат зношування, що оцінюється зменшенням розмірів. Існує також думка, що знос – це залишкова зміна розмірів і форми поверхні твердих тіл внаслідок тертя. Отже, будь-який вид зношування пов'язаний перш за все з процесом руйнування матеріалу або конкретної деталі [4, 5].

Одним з найбільш розповсюджених видів зношування деталей є абразивний знос, що проявляється в результаті ріжучої або дряпаючої дії твердих тіл або часточок, частіше всього мінерального походження об поверхню виробу. Необхідною умовою можливого прояву абразивного зношування є висока твердість в процесі тертя зношуючого тіла в порівнянні з тим тілом, що зношується [6].

Абразивне зношування, що спостерігається під час роботи спряжених деталей, поділяють на три підвиди відповідно до джерела та характеру абразивної дії [7]:

– абразивна дія на матеріал однієї із спряжених деталей твердих структурних елементів матеріалу іншої деталі;

– абразивна дія на матеріал однієї із спряжених часток, які шаржують поверхню іншої деталі;

– абразивна дія на матеріал обох спряжених деталей твердих сторонніх часток, що переміщуються між поверхнями спряжених деталей.

Абразивне зношування характерне для дуже великої кількості будівельних, дорожніх, гірничих та інших машин, де металеві деталі контактують безпосередньо з гірськими породами, що добувають, транспортують або перероблюють, рудою, вугіллям, ріжуть ґрунт тощо.

Наявність абразивних часток в рухомій рідині, що рухається по поверхні металевих деталей машини, сприяє зношуванню останніх, інтенсивність залежить від швидкості потоку, розміру, природи та форми часток, від їх концентрації в рідині, напрямку потоку по відношенню до поверхні, що зношується.

Такий знос має назву гідроабразивний знос. До деталей, що піддаються такому зношуванню, належать, наприклад, лопатки, корпуси, деталі відцентрових насосів, які перекачують пісок або шлакову пульпу, деталі гідравлічних турбін тощо.

За деяких умов руху рідини можливе утворення вихрових потоків, що призводить до появи явища кавітації, яке може бути причиною особливого виду зношування – кавітаційного.

Механізм зносу різноманітний і залежить від умов зносу, але в основному він полягає в тому, що з поверхні металу відриваються дрібні частки. У випадку абразивного зносу, коли тверді частки (наприклад піску) відривають найдрібніші шматочки металу, стійкість проти зносу буде визначатися опором металу до крихкого руйнування металу.

Стійкість проти абразивного зносу зростає із збільшенням твердості матеріалу, що підлягає зношуванню, але для різних матеріалів різною мірою [4], тому ефективним способом підвищення зносостійкості є поверхневе гартування або методи хіміко-термічного оброблення (цементация, азотування тощо). При однаковій поверхневій твердості сталі із структурою мартенсит + карбіди мають більшу зносостійкість, ніж сталі з такою ж самою твердістю, але не містять надлишкових карбідів, а сталь з крупнокристалічною структурою має меншу зносостійкість, ніж сталь з дрібнокристалічною структурою, оскільки в першій опір до крихкого руйнування менший.

Отже, головним критерієм абразивної зносостійкості матеріалу є його твердість. Проте в наш час в різних роботах [5] все частіше як критерій зносостійкості, пропонують вибір інших механічних властивостей матеріалу, що підлягає зношуванню. Практикою встановлено, що під час вибору зносостійких конструкційних матеріалів і способів зміцнення, орієнтуватися на твердість, як на єдиний засіб збільшення зносостійкості, і не завжди виправдано [6]. У роботі [7], вивчено вплив стандартних механічних характеристик сталей на зносостійкість при ударно-абразивному зношуванні та ковзанні по абразиву. Встановлено, що різні механічні властивості сталей (твердість, тимчасовий опір розриванню, межа втоми, напруження зрізу, відносне подовження, відносне звуження, ударна в'язкість) по різному і не завжди однозначно впливають на зносостійкість в крихкій і в'язкій зонах руйнування. Деякі дослідники як критерій зносостійкості пропонують використовувати механічні властивості.

У роботі [6–8] як критерій зносостійкості запропоновано модуль пластичності металів, значення якого достатньо легко визначається за стандартними механічними властивостями металів, що є в довідковій літературі.

Метою роботи є розроблення нових середньовуглецевих зносостійких сталей, які працюють в умовах інтенсивного зношування.

На основі огляду літературних джерел, вивчення умов експлуатації зносостійких деталей роздрібновальних-розмельювальних машин та на підставі аналізу сучасних проблем у роботі поставлені такі завдання:

1. Виконати дослідження твердості сталей до і після термічного оброблення.
2. Дослідити ударну в'язкість сталей до і після термічного оброблення.
3. Вивчити вплив хрому, марганцю та вуглецю на механічні властивості сталей з різним вмістом вуглецю.

Виплавлення сталі в лабораторних умовах виконували в індукційній печі ІСТ-006 з кислою футеровкою місткістю тигля 60 кг.

Шихту розраховували з урахуванням угару елементів, визначеного експериментально, %: вуглець – 5; марганець – 15; кремній – 5; хром – 8.

Зносостійкість сталей досліджували з використанням методики, яка розроблена на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів на базі НТУУ «КПІ».

Як абразивний матеріал використовували шлак фракції 5...15 мм. Швидкість обертання ротора 450 хв^{-1} , час випробовування – 20, 40, 60, 80 год.

Вплив марганцю на механічні властивості. Досліджено вплив марганцю на механічні властивості вуглецевої сталі в діапазоні концентрацій від 1,5...5,0 % при вмісті вуглецю 0,4; 0,5; 0,6 %. Установлено, що із збільшенням концентрації Mn від 1,5 % до 3,5 % твердість у литому стані для сталі з 0,4 % C зменшується з 31 HRC до 25 HRC (рис. 1, а), така ж сама залежність зберігається і для сталі з 0,5 % C і 0,6 % C, тільки з більшими значеннями твердості. Подальше підвищення вмісту марганцю сприяє зростанню твердості досліджуваних сталей і при максимальній концентрації Mn твердість досягає майже вихідного стану.

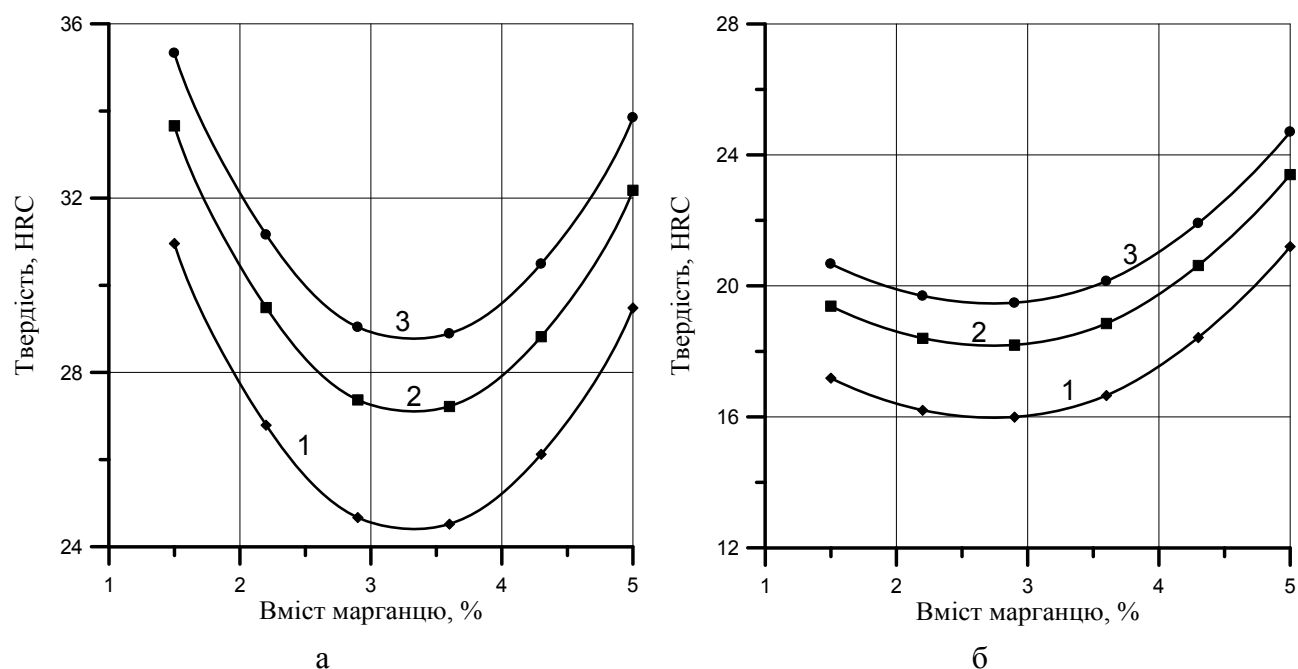


Рис. 1. Твердість сталі в литому стані (а) та після термооброблення (б) залежно від вмісту марганцю:

1 – 0,4 % C; 2 – 0,5 % C; 3 – 0,6 % C

Зниження твердості пояснюється утворенням евтектоїда, який зсуває точку S вліво, тобто практично увесь вуглець розчиняється в евтектоїді і утворюється мінімальна кількість карбідів, а після подальшого підвищення вмісту Mn спостерігається зростання карбідів (Mn_3C , Mn (Mn, Fe_3C)). Приблизно така ж сама залежність зберігається і для сталей після термооброблення (рис. 1, б).

Ударна в'язкість сталі в литому стані знаходиться в межах $0,1 \dots 1,0$ МДж/м² (рис. 2, а), а в термообробленому стані ударна в'язкість цих сталей знаходиться в межах від $0,315$ до $1,21$ МДж/м² (рис. 2, б). Максимальне значення ударної в'язкості становить при вмісті Mn 3,5 %. Підвищення Mn знижує ударну в'язкість внаслідок утворення карбідів. Таким чином, отримання максимальних механічних властивостей для виливків, що працюють в умовах абразивного і помірного ударно-абразивного зносу вуглецева сталей має вмістити $2,5 \dots 3,5$ % марганцю.

Вплив хрому на механічні властивості. Досліджено вплив хрому на механічні властивості сталей в діапазоні концентрації від $1,5 \dots 3,5$ % за фіксованим значенням Mn = 3,5 % і вмістом вуглецю 0,4; 0,5; 0,6 %. Установлено, що з підвищенням концентрації Cr твердість сталі підвищується з 23 HRC до 33 HRC (рис. 3, а) для сталі із вмістом 0,4 % C. Збільшується твердість і для сталей з 0,5 % C і 0,6 % C. Подібна залежність за твердістю зберігається для сталей і після термооброблення (рис. 3, б). Такий вплив Cr на твердість сталі пояснюється його карбідоутворювальною здатністю. Відомо [11], що при вмісті хрому до $5 \dots 7$ % утворюються комплексні карбіди (Cr, Fe_3C), які підвищують твердість.

Підвищення концентрації Cr до 2,5 % сприяє підвищенню ударної в'язкості з 0,6 до $1,3$ МДж/м² для сталі із вмістом 0,4 % C після термооброблення. Подальше зростання концентрації Cr зменшує ударну в'язкість (рис. 3).

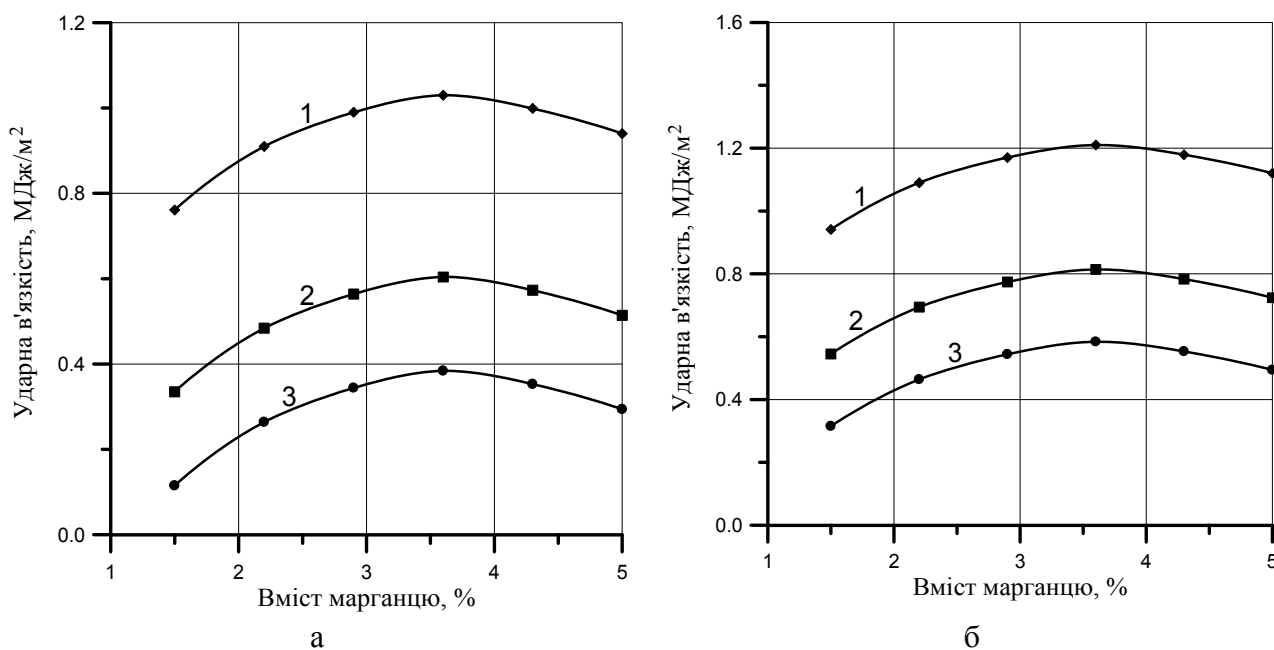


Рис. 2. Ударна в'язкість сталі в литому стані (а) та після термооброблення (б) залежно від вмісту марганцю:

1 – 0,4 % C; 2 – 0,5 % C; 3 – 0,6 % C

Таку зміну ударної в'язкості сталі після термооброблення можна пояснити, гомогенізацією структури із підвищенням концентрації Cr до 2,5 %. Далі переважає карбідоутворення Cr.

Отже, для досягнення оптимальних механічних властивостей вуглецева сталь має містити $1,5 \dots 2,5$ % Cr.

Для сталей, що працюють в умовах абразивного зносу, вміст хрому слід підвищувати до 3,5 %, а для сталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зносу – обмежувати 1,8...2,7 %.

Вплив вуглецю на механічні властивості. У вуглецевих сталях, що працюють в умовах ударно-абразивного зносу, вміст вуглецю змінюється від 0,3 до 0,8 %.

Досліджено вплив вуглецю на механічні властивості в діапазоні концентрацій від 0,35 % до 0,60 % при фіксованому вмісті Mn = 3,5 % і хрому 1,5; 2,5; 3,5 %.

Установлено, що із підвищенням вмісту С твердість сталі в литому стані та після термооброблення збільшується, (рис. 4, а), що пояснюється утворенням карбідів Mn і Cr.

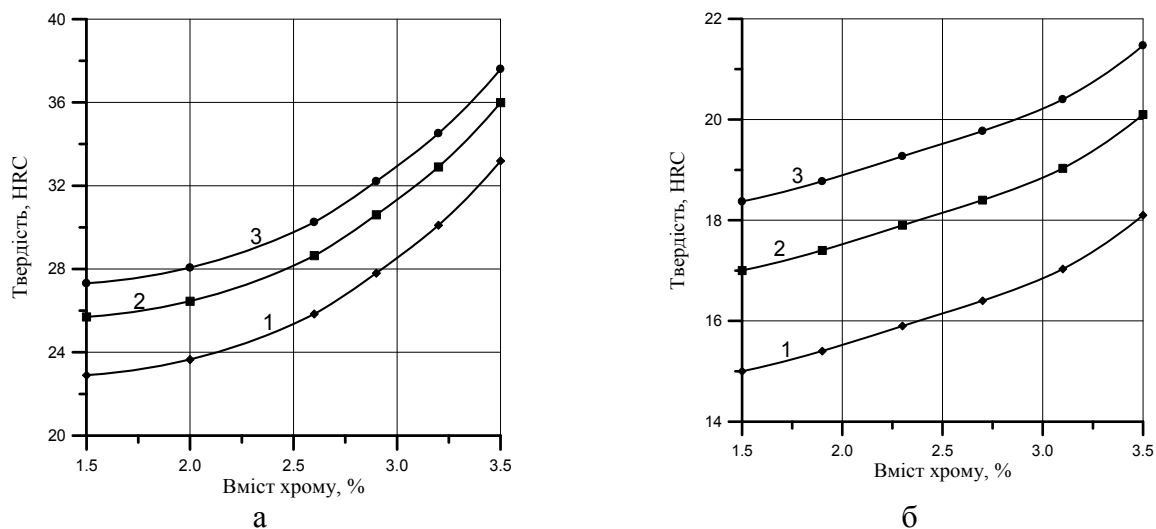


Рис. 3. Вплив хрому на твердість сталі в литому стані (Mn = 3,5 %) (а) та після термооброблення (б):

1 – 0,4 % С; 2 – 0,5 % С; 3 – 0,6 % С

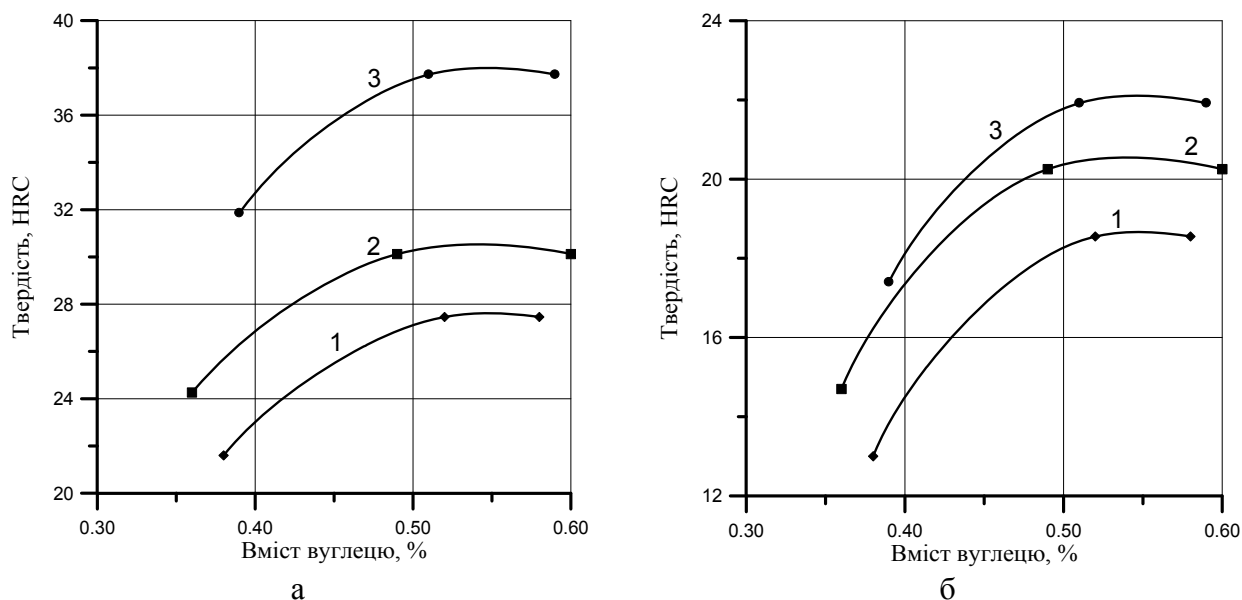


Рис. 4. Вплив вуглецю на твердість сталі в литому стані (Mn = 3,25 %) (а) та після термооброблення (б):

1 – 1,5 % Cr; 2 – 2,5 % Cr; 3 – 3,5 % Cr

Максимальне значення ударної в'язкості сталей з хромом і марганцем досягається при 0,50...0,55 % С, (рис. 5, а, б).

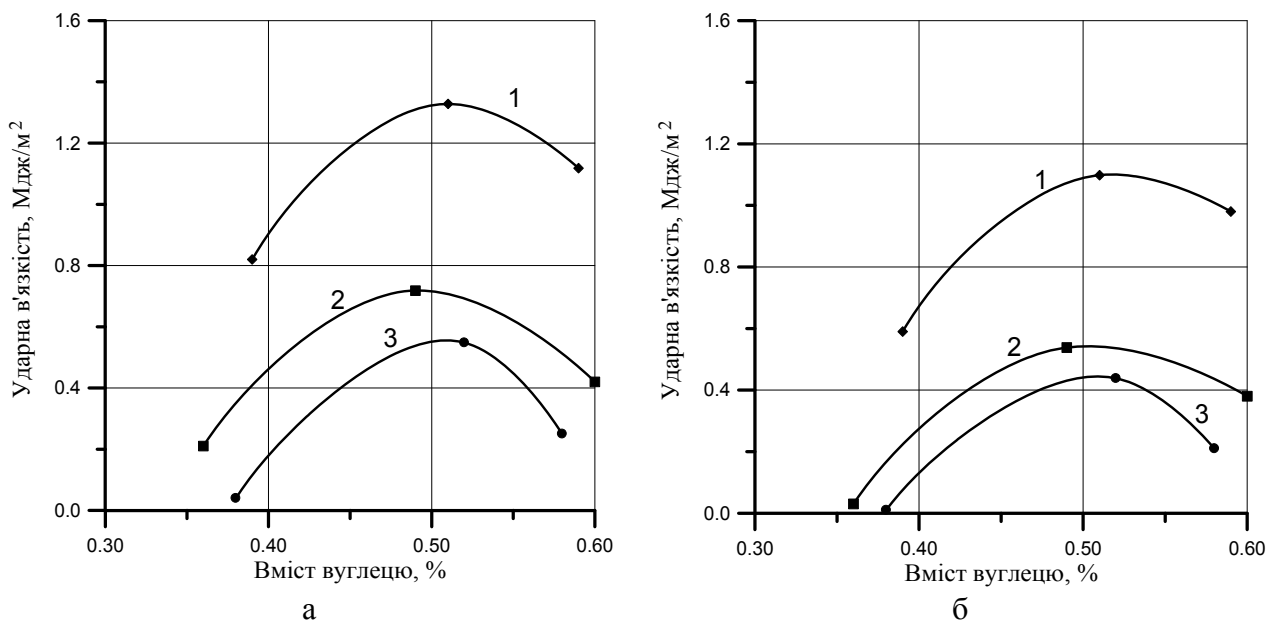


Рис. 5. Вплив вуглецю на ударну в'язкість сталі в литому стані (Mn = 3,5 %) (а) та після термооброблення (б):

1 – 1,5 % Cr; 2 – 2,5 % Cr; 3 – 3,5 % Cr

Таким чином, для виробництва литих деталей, що працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зносу доцільно використовувати низьколеговані сталі з 0,50...0,55 % С.

ВИСНОВКИ

Аналізом літературних даних та попередніх досліджень встановлено, що як легувальні елементи для підвищення зносостійких виливків з вуглецевої сталі доцільно використовувати Cr, Mn, Si, Ti, В. Вивчено вплив вуглецю, хрому і марганцю на твердість та ударну в'язкість сталі.

На підставі проведених досліджень рекомендовано зносостійку низьколеговану сталь хімічного складу, %: 0,4...0,6 С; 1,5...3,5 Cr; 1,5...3,5 Mn, 0,3...0,8 Si.

Установлено, що використання сталі такого хімічного складу дає змогу виготовити зносостійкі деталі з твердістю 27...29 HRC та ударною в'язкістю близько 1,2 МДж/м².

Зносостійкість рекомендованої марки сталі в умовах абразивного зносу знаходиться на рівні сталі 110Г13Л, при значній економії легувальних елементів та енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Износостойкие сплавы для отливок дробильно-размольного оборудования / С. П. Дорошенко, В. А. Лютый, В. Я. Жук, Г. Е. Федоров, А. Е. Кузьменко, Е. А. Платонов. – Москва : ЦНИЛПЭстроймаш, 1978. – 40 с.
2. Цытин И. И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства / И. И. Цытин. – М. : Металлургия, 1983. – 175 с.
3. Гудремон Э. Специальные стали / Э. Гудремон. – М. : Металлургия, 1966. – 736 с.
4. Гуляев А. Металловедение / А. Гуляев. – М. : Металлургия, 1978. – 640 с.
5. Войнов Б. А. Износостойкие сплавы и покрытия / Б. А. Войнов. – М. : Машиностроение, 1980. – 120 с.
6. Макаревич О. П. Производство вливков из специальных сталей / О. П. Макаревич, Г. С. Федоров, С. О. Платонов. – К. : Видавництво НТУУ «КПІ», 2005. – 721 с.
7. Нехендзи Ю. А. Стальное литье / Ю. А. Нехендзи. – Научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1948. – 767 с.
8. Новые стали и сплавы в машиностроении / под ред. Ю. М. Лахнина. – М. : Машиностроение, 1976. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2011 р.