

## АБРАЗИВНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ В УМОВАХ ЗНОШУВАННЯ ЗАКРІПЛЕНИМ АБРАЗИВОМ

Олександр Добровольський<sup>1</sup>, Валерій Косенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03680, Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна

<sup>2</sup>Університет "Україна", 03115, вул.Львівська, 23, Київ, Україна

## ABRASIVE WEAR RESISTENCE UNDER AUSTENITIC STEELS ARE FIXED ABRASIVE WEAR

Alexander Dobrovolsky<sup>1</sup>, Valeriy Kosenko<sup>2</sup>

Kyiv national University of Construction and Architecture,  
03680, Povitroflotsky avenue, 31, Kiev, Ukraine,

<sup>2</sup>University "Ukraine", 03115, vul. Lvivska, 23, Kyiv, Ukraine

**АНОТАЦІЯ.** Наведені значення абразивної зносостійкості сталі 110Г13Л та інших марок зносостійких аустенітних сталей, які були отримані, досліджені і почали застосовуватись останнім часом для виготовлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Результати випробування отримані за єдиною стандартною методикою при терті зразків на машині Х4-Б.

**Ключові слова:** аустенітні зносостійкі сталі, абразивна зносостійкість, абразив.

**АННОТАЦИЯ.** Приведены значения абразивной износостойкости стали 110Г13Л, а так же других марок аустенитных сталей, которые были получены, исследованы и стали применяться в производстве для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Результаты исследований получены при использовании единой стандартной методики с применением машины трения Х4-Б.

**Ключевые слова:** аустенитные износостойкие стали, абразивная износостойкость, абразив.

**ABSTRACT. Purpous.** The results of studies of modern abrasive wear resistance of wear-resistant austenitic steels. **Methodology / approach.** The results obtained using a single standard methodology using friction machine. Х4-Б. **Finding.** Shows the values of the abrasive wear resistance of steel 110Г13Л, as well as other brands of austenitic steels that have been received, investigated and have been used in production for the manufacture of parts operating under conditions of intense abrasive wear .. **Reserch lemitation / implication.** It is shown that the abrasive wear resistance, durability became equal 110Г13Л may Kmet carbon steel containing 2% carbon and durability steels alloyed with chromium and (or) exceeds nitrogen 110Г13Л steel wear resistance by 1.5 times. **Originaliti / volue / Creation.** Need to be more primanyat new wear-resistant austenitic steels. **Key words:** austenitic wear resistant steel, abrasiv wear resistance, abrasive.

### ВСТУП

Значна частина енергетичних витрат виникає через абразивне зношування, якому підлягають деталі сільськогосподарських машин, дорожньо-будівельних, гірничих, транспортних машин і засобів транспортування, вузли металургійного обладнання, металорізальних верстатів тощо [1]. Воно виникає при контактуванні деталей з ґрунтом, рудою, вугіллям і породою, золою, попелом, пилом, які потрапляють на поверхню тертя, металічною стружкою, окисними плівками, що закріпилися на поверхні тертя, нагаром, продуктами зношування і т. п. Впровадження у виробництво нових зносостійких матеріалів наразі є актуальною задачею у машинобудуванні.

### МЕТА І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Механізм і інтенсивність абразивного зношування суттєво залежать від властивостей абразиву і умов тертя. Умови дії абразиву на деталь різні. Абразиви можуть мати більшу або меншу твердість, крихкість, міцність, бути закріпленими або у вигляді сипучої маси. Абразив може рухатись з різними швидкостями, повільно або дуже динамічно (з ударом), діяти на деталь під різним тиском, рухатись в суміші з газами

або рідиною, діяти під різним кутом до поверхні деталі тощо. В цих умовах може підвищуватись температура поверхні тертя, можуть змінюватись поверхневі властивості матеріалу, що зношується – збільшувати або, навпаки, зменшувати свою міцність,

твердість та інші властивості. В такому багатофакторному впливі на матеріали однозначно визначитися із зносостійкістю як з властивістю неможливо. Таким чином – зносостійкість не властивість матеріалу, а результат взаємодії різних факторів.

Щоб наблизити поняття зносостійкості до поняття властивості треба обмежити коло факторів, що діють на матеріал при абразивному зношуванні. Для цього в роботах [2,3] було класифіковано абразивне зношування за видами з врахуванням ступеня закріпленості абразиву, а також характеру його дії на деталь, що зношується. В практиці один вид зношування може накладатися на інший. Але для орієнтування можна виділити той вид зношування, який переважає при роботі деталі і користуватися даними, отриманими при відповідних дослідженнях. Можна також визначити частку кожного виду в загальному зношуванні; в цьому випадку його слід оцінювати за законом адитивності.

Найбільш поширеним в практиці лабораторних досліджень абразивної зносостійкості різних матеріалів став метод випробування на машині тертя Хрущова – Бабічева Х4-Б (ГОСТ 17367-71) [2], який відноситься до методів випробування закріпленим абразивом. Практично зношування закріпленим абразивом відбувається при роботі скребкових конвеєрів, ножів бульдозерів, ковшів екскаваторів, гірничого інструменту під час тертя штанги бура по породі, при обробці матеріалів абразивним інструментом тощо. Для інших видів абразивного зношування результати випробування зносостійкості за цим методом можна оцінювати орієнтовно з деякими поправками або взагалі неможливо.

В даній роботі наведені результати випробування матеріалів, виконані за єдиною стандартною методикою Хрущова-Бабічева [2].

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зносостійкість характеризувалась показником відносної зносостійкості  $\varepsilon$ , яка розраховується за однією з формул, наведених нижче:

$$\varepsilon = \Delta V_e / \Delta V_i; \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta m_e \rho_i / \Delta m_i \rho_e; \quad (2)$$

$$\varepsilon = \Delta m_e / \Delta m_i, \quad (3)$$

де  $V_e$  і  $V_i$  - відповідно об'єми еталона і зразка після випробування;  $m_e$  і  $m_i$  - відповідно, маси еталона і зразка, які випробовуються;  $\rho_e$  і  $\rho_i$  - відповідно щільність матеріалів еталона і зразка, які випробовуються. Якщо щільності еталона і зразка будуть однакові, застосовують формулу (3). Як матеріал еталона використовують відпалене технічне залізо, вміст вуглецю в якому не перевищує 0,02% або відпалену сталь 45, як абразив застосовують корундову абразивну шкурку, твердість якої складає HV20150...22500 МПа.

Випробування на машині тертя Х4-Б різних сталей показало, що на зносостійкість переважно впливає їх твердість [2]. Залежно від марки і виду термічної обробки твердість сталей може мати значення HV від 0,1 до 8 ГПа. Вуглецеві сталі без термічної обробки характеризуються низькими значеннями зносостійкості, що не перевищує значень  $\varepsilon = 1,5$ , а після гартування і низького відпуску такі сталі як У8...У12 за твердістю HV 7-8 ГПа набувають значення відносної абразивної зносостійкості  $\varepsilon = 2,6$ . Низько- та середньо леговані сталі у відпаленому або нормалізованому стані за рахунок збільшення твердості при легуванні володіють відносно більшою абразивною зносостійкістю. Конструкційні низько леговані сталі 15Х, 20Г, 15ХМ та інші (HV1,59-1,77 ГПа) мають  $\varepsilon = 1,12- 1,25$ , а сталі з більшою кількістю вуглецю і легуючих елементів 30ХРА, 40Х2Н2МА, 40ХМФА, 30ХН2МФА та інші (HV 2,4-2,72 ГПа) мають  $\varepsilon = 1,7-1,92$ . Після гартування і низького відпуску їх зносостійкість майже не відрізняється від значень вуглецевих сталей і звичайно не перевищує  $\varepsilon = 2,6$  [2].

При виборі зносостійких сталей слід враховувати також звичайну особливість ставати більш крихкими при збільшенні їх твердості. В багатьох випадках, особливо в умовах великих навантажень на деталь та певних складних умов її роботи, незважаю-

чи на відносно високі показники зносостійкості, що перебільшують  $\epsilon = 2.6$ , застосовувати вищезазначені сталі, неможливо. Було створено клас аустенітних зносостійких сталей, які характеризуються високою в'язкістю, незначною твердістю, міцністю і високою зносостійкістю в складних важких умовах експлуатації. Для цих сталей твердість не стає головною характеристикою, що обумовлює високу абразивну зносостійкість. Ці сталі після гартування отримують метастабільну аустенітну структуру, яка в процесі експлуатації в умовах роботи при високому тиску і абразивно-ударних навантаженнях здатна перетворюватись в мартенситну структуру. При цьому деформована поверхня деталі стає більш твердою і зносостійкою, а вся деталь продовжує зберігати структуру аустеніту з усіма його високими властивостями в'язкості і міцності. Вперше дослідив на прикладі сталі 110Г13Л можливість використати це явище англійський металург Р.А. Гадфільд [4, 5]. В зв'язку з цим сталь 110Г13Л називають сталлю Гадфільда.

Сталь 110Г13Л (ГОСТ 977-88) має такі характеристики. Після лиття структура її складається з аустеніту і карбідів  $(Fe, Mn)_3C$ , що виділяються по границях зерен. Міцність і в'язкість такої сталі низька. Для її підвищення відлиті вироби загартують з температури 1100 °С у воді. В процесі витримки при 1100 °С карбіди розчинюються і після гартування сталь набуває метастабільну аустенітну структуру з наступними механічними властивостями:  $\sigma_B = 800...1000$  МПа,  $\sigma_{02} = 250...350$  МПа,  $\delta = 35...45\%$ ,  $\varphi = 40..50\%$ , HV2-2,5 ГПа. Деталі з такими механічними властивостями (щоби дробарок, коронки землерийних машин та інші) встановлюють на машини. В процесі експлуатації на поверхні деталей діють сили, під дією яких пластично деформуються поверхневі шари. В результаті пластичної деформації метастабільний аустеніт перетворюється в мартенсит, відбувається зміцнення металу в поверхневому шарі і підвищення твердості до HV6 ГПа. Велика твердість на поверхні деталі обумовлює її високу зносостійкість. В процесі експлуатації поверхневі шари поступово

зношуються, але наступна пластична деформація сприяє перетворенню аустеніту в мартенсит, що обумовлює відносно високу зносостійкість сталі ( $\epsilon = 3$ ) протягом всього часу роботи деталі.

Сталь 110Г13Л (ГОСТ 977-88) широко застосовують в промисловості як зносостійкою. Її переваги перед іншими сталями виявляються лише при великих динамічних або статичних навантаженнях. При невеликих навантаженнях в умовах абразивного зношування деформаційне мартенситне перетворення не відбувається, в зв'язку з чим зносостійкість сталі 110Г13Л стає низькою і застосування її стає невиправданим. В цих умовах слід застосовувати інші матеріали.

Абразивна зносостійкість сталей з аустенітною структурою залежить від ступеня метастабільності аустеніту і чим вона вище, тим більше зносостійкість. Стабільний аустеніт не володіє високим опором абразивній дії. Наприклад, зносостійкість загартованої сталі 20Х18НД і 110Г13Л зі стабільною аустенітною структурою близька до зносостійкості вуглецевих сталей тієї ж твердості [2].

Більшу абразивну зносостійкість, ніж сталь 110Г13Л, має сталь з аустенітно-мартенситною структурою, що містить карбіди титану або цирконію і мінімальну кількість евтектик. Їх відносна зносостійкість досягає значень  $\epsilon = 4,8 - 7,5$ . Збільшенню абразивної зносостійкості цих сталей сприяють домішки молібдену і бору. Після відпалу абразивна зносостійкість хромотитанових і хромоцирконієвих сталей знижується, але після гартування з наступним низьким відпуском її значення наближується до тих, які є у литих сталей, а іноді і перевищують їх.

На основі сталі 110Г13Л були розроблені і випускаються такі марки аустенітних зносостійких сталей: 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ, 120Г13Х2БЛ, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13Х2ТЛ, 110Г13ХМЛ, 110Г13ФТЛ. Всі вони містять багато дорогих легуючих елементів. Крім того, весь технологічний цикл, починаючи з виплавки високомарганцевих сталей і закінчуючи складальними роботами, пов'язаний зі шкідливими з екологічної точки зору про-

цесами видання в атмосферу оксидів марганцю.

З метою покращення робочих характеристик, зниження економічних витрат, а також гігієнічних і екологічних умов при виготовленні сталей були досліджені і виготовлені нелеговані вуглецеві і економічно леговані аустенітні метастабільні сталі. Для досягнення потрібного комплексу властивостей були застосовані такі хімічні елементи як хром і азот.

Показано [6-10], що аустенітну метастабільну структуру має вуглецева сталь, що містить 2% вуглецю, якщо її загартувати з 1130 °С. Значення її відносної зносостійкості складає  $\epsilon = 3$  при твердості HV4 ГПа. Метастабільна структура такої сталі при високих тисках і пластичній деформації перетворюється на мартенситну і працює подібно сталі 110Г13Л. У вуглецевих сталей з меншою кількістю вуглецю ніж 2% твердість після гартування стає вищою, а абразивна зносостійкість – меншою. При збільшенні в сталі кількості вуглецю до 2% температури початку  $M_n$  і кінця мартенситного перетворення  $M_k$  знижуються. При цьому  $M_n$  цієї сталі складає 20°С, а  $M_k$  - менше ніж -100°С. Це приводить до збільшення кількості аустеніту після її гартуванні (90% і більше). Крім аустеніту в структурі з'являється невелика кількість мартенситу. Твердість зразків після гартування дорівнює 3,5...4,5 ГПа. Відповідно зменшується і твердість сталі. Перед гартуванням у воді сталь нагрівають до температури 1130°С.

При випробуванні на машині тертя Х4-Б із застосуванням карборундової шкурки вуглецеві сталі з метастабільною аустенітною структурою характеризуються більшою зносостійкістю ніж з мартенситною. За даними роботи [7] відносна зносостійкість аустеніту складає 4,3, мартенситу – 3, фериту + 65% цементиту – 2,5, фериту – 1. Крім того на прикладі сталі У8 визначено, що після відпуску загартованої сталі цієї марки відносна зносостійкість її поступово знижується і при температурі відпуску 300°С складає 2. Відомо, що для зняття внутрішніх напружень після гартування обов'язково слід виконувати відпуск, а це

повинно призводити до зниження зносостійкості.

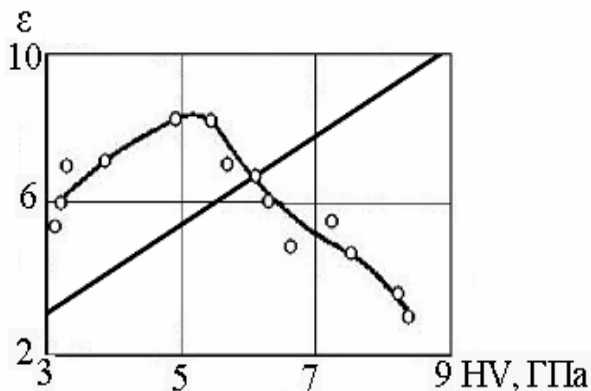
Таким чином, з усіх структур вуглецевих сталей найбільшою зносостійкістю володіють сталі, що містять 2% вуглецю і були загартовані на аустеніт, незважаючи на свою незначну твердість, яка значно менша за твердість мартенситу і цементиту. Тому зносостійкість сталі з 2% вуглецю після гартування з 1130 °С є найбільш стійкою до абразивного зношування серед всіх сталей системи Fe - Fe<sub>3</sub>C. Слід також відмітити, що зносостійкість аустенітних марганцевих сталей, що були досліджені за тією ж методикою, не перевищує значень зносостійкості вуглецевої сталі з 2% вуглецю [10]. В майбутньому вуглецеві сталі, що містять 2% вуглецю, знайдуть своє місце в промисловості. Слід також рахуватися з тим, що вуглецеві сталі мають незначну прогартовуваність. Тому їх можна рекомендувати для виготовлення деталей невеликої товщини, а саме, до 15...20 мм. Така властивість обмежує її застосування. В той же час треба визначити її позитивні характеристики – ця сталь є більш дешевою і при її виготовленні покращуються екологічні умови.

Перспективним є також шлях заміни сталі 110Г13Л економічно легуваними сталями, які містять хром, або хром і азот. При легуванні хромом сталі, що містить 1% вуглецю, і гартування її у воді утворюється метастабільний аустеніт. Метастабільний аустеніт з'являється також при легуванні низько вуглецевих сталей азотом. Ці відомості були використані при виявленні оптимального складу зносостійких сталей. Було досліджено вплив хімічного складу метастабільних сталей систем Fe-Cr-N, Fe-Mn-C, Fe-Cr-C і різних термообробок на стабільність аустеніту і, відповідно, на механічні властивості. В результаті порівняння абразивної зносостійкості сталей, що містять 1...1,2% азоту або 1% вуглецю і 18% хрому було виявлено, що у сталей 100Х18 і 0Х18А1Д зносостійкість у 1,5 рази перевищує зносостійкість сталі 110Г13Л [11].

Таким чином, абразивна зносостійкість аустенітних сталей прямо не залежить від їх твердості. Такий же висновок можна зробити і для сталі Х12Ф1, яка в результаті

гартування з температури 1170 °С отримує аустенітно-мартенситну метастабільну структуру. В результаті такого гартування вміст аустеніту в структурі складає 83,7 % , мікротвердість дорівнює HV 5,2 ГПа, відносна абразивна зносостійкість  $\varepsilon = 8,2$ . (рис. 1).

Після гартування цієї сталі з температур більших або менших ніж 1170 °С утворюються структури, які містять меншу кількість метастабільного аустеніту. В результаті відносна зносостійкість таких зразків стає меншою і дорівнює:  $\varepsilon = 2$  (при гартуванні з 1020 °С),  $\varepsilon = 3$  (при гартуванні з 1050 °С) або  $\varepsilon = 5,3$  (при гартуванні з 1230 °С).



**Рис. 1.** Залежності  $\varepsilon$  від HV для сталі X12Φ1, отримані за розрахунком ( пряма лінія) та експериментально (точки)

**Fig. 1.** Dependence of  $\varepsilon$  - HV for steel X12Φ1 obtained by calculation (straight line) and experimental (points)

## ВИСНОВКИ

Показано, що абразивна зносостійкість аустенітних сталей прямо не залежить від їх твердості. Вона залежить від метастабільності аустеніту після гартування, а також характеру легування хімічними елементами. Абразивну зносостійкість, що дорівнює зносостійкості сталі 110Г13Л, може мати вуглецева сталь, яка містить 2% вуглецю. Ще більшою зносостійкістю володіють леговані аустенітні сталі. Зносостійкість сталей, легованих хромом і (або) азотом перевищує зносостійкість сталі 110Г13Л в 1,5 рази. Показано, що в багатьох випадках, коли зазвичай застосовується сталь 110Г13Л, її можна замінювати сучасними

більш ефективними абразивнозносостійкими сталлями.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Бриков М. М.* Розробка та застосування матеріалознавчих основ підвищення зносостійкості залізвуглецевих сплавів при абразивному зношуванні: Автореф. дис. д-р. техн. наук – Запоріжжя, 2008. – 241 с.
2. *Добровольский А.Г., Кошеленко П.И.* Абразивная износостойкость материалов: Справочное пособие.- Киев: Тэхника, 1989. – 128 с.
3. *Добровольський О.Г.* Класифікація видів абразивного зношування. – Київ: АВІА, 2007. – С. 106-111.
4. *Гуляев А.П.* Материаловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
5. *Металлы и сплавы.* Справочник. Под редакцией *Ю.П. Солнцева*; НПО "Профессионал", НПО "Мир и семья"; Санкт-Петербург, 2003 г, 210 с.
6. *Брыков Н.Н., Брыков М.Н.* Проблема соприкосновения сталей и сплавов абразивному изнашиванию // Проблемы триботехники, №1, 2006, 93 – 107 с.
7. *Брыков М.Н.* Применение железоуглеродистых сплавов в условиях абразивного изнашивания // Проблемы трибологии, 2005, № 2. – С.147-151.
8. *Брыков М.Н.* Абразивное изнашивание железоуглеродистых сплавов // Трение и износ. – 2006, С. 105-109.
9. *Брыков М.Н.* Испытание металлических материалов на абразивное изнашивание при повышенных температурах // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004, № 1. – С. 94-97.
10. *Брыков Н.Н., Брыков М.Н.* Проблема соприкосновения сталей и сплавов абразивному изнашиванию // Проблемы триботехники, №1, 2006. – С. 93 – 107.
11. *Белозерова Т.А.* Повышение износостойкости высокоуглеродистых и высокоазотистых сталей со структурой метастабильного аустенита: Автореф. ... Дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2004. – 159 с.

## REFERENCES

1. *Brikov M.M.* 2008. Rozrobka that zastosuvannya materialoznavchih foundations pidvishchennya znosostiykosti zalizovugletsevih splyviv with abrasive znoshuvanni: Dis. Dr.,

- [Development and application of material science basics increasing wear resistance of iron alloys in abrasive wear: Abstract dissertation of Doctor Engineering Sciences]. Zaporizhzhya, 241.
2. *Dobrovolsky A.G, Koshelenko P.I. 1989.* Abrasive wear resistance of materials: Reference posobie [The abrasive wear resistance of materials: Reference posobie]. Kiev, Technik Publ., 128.
  3. *Dobrovolsky A.G, 2007.* Classification of types of abrasive wear [Classification of abrasive wear]. Kyiv, Avia Publ., 106-111.
  4. *Gulyaev A.P. 1978.* Materials science [Materials Science]. Moscow, Metallurgy Publ., 647.
  5. *Metals and alloys. 2003.* Directory. Edited by *Solntseva J.P.*, [Metals and alloys], NGO "Professional", NGO "Peace and family" Publ., St. Petersburg, 210.
  6. *Brykov N.N, Brykov M.N., 2006.* The problem of resistance of steels and alloys abrasion [The problem of resistance of steels and alloys abrasion]. Problems tribotechnology [Problems tribotechnology], No.1, 93-107.
  7. *Brykov M.N, 2005.* Application of iron-carbon alloys in the conditions of abrasive wear [The use of iron-carbon alloys in the conditions of abrasive wear]. Problems of Tribology [Problems of tribology], No. 2, 147-151.
  8. *Brykov M.N., 2006.* Abrasive wear of iron-carbon alloys [The abrasive wear of iron-carbon alloys]. Friction and wear [Friction and wear], 105-109.
  9. *Brykov M.N., 2004.* Testing of metallic materials for abrasive wear at elevated temperatures [Test for metallic materials abrasion at elevated temperatures] *Novi materiali i tehnologii in metalurgii that mashinobuduvanni* [New materials and technologies in metallurgy and machine building], No. 1, 94-97.
  10. *Brykov N.N, Brykov M.N. 2006.* The problem of resistance of steels and alloys abrasion [The problem of resistance of steels and alloys abrasion]. Problems tribotechnology [Problems tribotechnology], No. 1, 93-107.
  11. *Belozeroва T.A, 2004.* Dis. Ph.D. Improving the durability of high-and High-Carbon Steels with the structure of metastable austenite [Increased durability and high-carbon steel with the structure of High-metastable austenite]. Ekaterinburg, 159.