

УДК 669.15:620.17.004.12:620.18

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА МІЦНІСТЬ І ПЛАСТИЧНІСТЬ СЕРЕДНЬО- ТА ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛЕЙ

WEIDONG HUI¹, А. Ю. БОРИСЕНКО², Є. С. КЛЕМЕШОВ²,
GUOJUN YAN¹, М. Ю. АМБРАЖЕЙ³, О. Д. МАЛИШ⁴

¹ Yancheng Polytechnic College, China;

² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро;

³ Національна металургійна академія України, Дніпро;

⁴ ДП "Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут
трубно-ї промисловості ім. Я. Ю. Осади", Дніпро

Наведено механічні властивості сталі з вмістом вуглецю 0,56 і 0,81% за розтягу при 800 та 1100°C. Показано, що міцність середньовуглецевої сталі за температури аустенізації вища, ніж високовуглецевої. Методом комп'ютерного моделювання визначено напруження за рівномірної та локалізованої деформації аустеніту сталі, які залежать від вмісту вуглецю і температури випробування, та пояснено отримані експериментальні результати.

Ключові слова: *сталь, аустеніт, гаряча деформація, механічні властивості.*

Mechanical properties of steel with a carbon content of 0.56 and 0.81% in tension at 800 and 1100°C are presented. It is shown that the strength of medium-carbon steel at austenitizing temperatures is higher than that of high-carbon steel. The method of computer modeling is used to determine the stress of uniform and localized deformation of austenite steel depending on the carbon content and the test temperature and on this basis the obtained experimental results are explained.

Keywords: *steel, austenite, hot deformation, mechanical properties.*

Вступ. Знання механічних властивостей конструкційних сталей в аустенітному стані залежно від температури нагрівання необхідне для вдосконалення технологічних процесів виробництва сталевих прокатів. Прикладом є виробництво залізничних коліс [1] та катанки [2], технологічні режими гарячої пластичної деформації яких постійно вдосконалюють для поліпшення механічних властивостей та зниження енерговитрат на деформацію [3–5]. Особливості поведінки аустеніту сталей з різним вмістом вуглецю необхідно також враховувати для вдосконалення існуючих технологій кування [6, 7] та розроблення нових процесів виробництва прокату на ливарно-прокатних агрегатах [8].

Необхідність вивчення механічних властивостей вуглецевих сталей за підвищених температур актуалізувалася у зв'язку з утворенням поверхневих дефектів залізничних коліс [9–11]. Показано [9, 10], що за температури 700 та 800°C міцнісні характеристики колісної сталі марки КП-2 (0,58% С) вищі, а пластичність нижча, ніж сталі марки КП-Т (0,66% С). Проте там, пов'язуючи отримані результати з впливом вуглецю на температуру аустенізації сталі, не розкривають механізму цього впливу. Аналіз літературних джерел щодо механічних властивостей аустеніту показав, що це питання цікавить дослідників досить давно, зокрема, встановлено [12] інтенсивне зниження границі міцності зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі та температури аустенізації, але це явище досі не пояснили.

Мета роботи – визначити механічні властивості середньо- та високовуглецевої сталей за високих температур і теоретично інтерпретувати отримані результати.

Матеріал та методика. Досліджували зразки литої середньовуглецевої колісної сталі марки КП-2 з хімічних складом (mass%): 0,56 C; 0,34 Si; 0,69 Mn; 0,016 P; 0,013 S та литої високовуглецевої кордової сталі марки 80 (mass%): 0,81 C; 0,19 Si; 0,30 Mn; 0,005 P; 0,012 S.

Механічні випробування розтягом за температури аустенізації 800 і 1100°C здійснювали на розривній машині Р-5 за швидкості навантаження 3 mm/min. Випробовували циліндричні зразки за ДСТУ ISO 6892:2022 з діаметром робочої частини 5 та 6 mm для сталі з 0,56 та 0,81% C, відповідно.

Зразки нагрівали в електричній печі опору (відхилення від заданої температури випробування не перевищувало $\pm 5^\circ\text{C}$), тривалість витримки зразків після нагрівання 5 min. Зразки, які випробовували при 800°C, для гарантованої аустенізації попередньо нагрівали до 900°C, а потім охолоджували до температури випробування.

Аналізували поведінку сталей за високотемпературного навантаження, використавши істинні діаграми розтягу в координатах S – e , які були апроксимовані рівнянням Холломона: $S = K \cdot (e - e_0)^n$, де S – істинне напруження, МПа; e – істинна (логарифмічна) деформація; e_0 – поправка, яка враховує жорсткість випробувальної машини, зміну температури тощо; K – коефіцієнт деформаційного зміцнення, МПа; n – показник деформаційного зміцнення. Параметри K та n визначали за стандартом ISO 10275:2020 на основі результатів апроксимації.

Розподіл напружень за температур випробування зразків моделювали методом скінченних елементів за допомогою програми QForm2D/3D.

Результати досліджень та їх обговорення. Підвищення температури від 800 до 1100°C призводить до значного зниження характеристик міцності сталі обох марок за меншої, але різної зміни їх характеристик пластичності (табл. 1).

Таблиця 1. Механічні характеристики середньо- та високовуглецевої сталей за різних температур аустенізації

Температура випробування, °C	Механічні характеристики сталей (0,56% C / 0,81% C)			
	σ_{UTS}	σ_{YS}	ψ	δ
	МПа		%	
800	82 / 61	59 / 31	74 / 98	61 / 72
1100	24 / 18	14 / 12	91 / 98	60 / 62

Примітка: подано усереднені результати випробувань трьох зразків.

При 800 та 1100°C міцнісні властивості сталі з 0,56% C вищі, ніж сталі з 0,81% C. Максимальну різницю значень σ_{UTS} спостерігаємо при 800°C. Характеристики ψ і δ за досліджених температур випробувань для сталі з 0,81% C вищі, ніж сталі з 0,56% C. Про більшу пластичність високовуглецевої сталі порівняно з середньовуглецевою свідчить також співвідношення $\sigma_{UTS} / \sigma_{YS}$, яке характеризує запас пластичності: що воно більше, то вища пластичність. За температур 800 і 1100°C для сталі з 0,81% C воно відповідно 2 та 1,5, а для сталі з 0,56% C – 1,4 і 1,7. Отримані результати міцності та пластичності середньо- та високовуглецевої сталей в аустенітній області корелюють з результатами праць [9, 11, 12]. Збільшення міцності та зменшення пластичності аустеніту з підвищенням вмісту вуг-

лецю в сталі – закономірний феномен, який можна пояснити існуючими уявленнями про здатність сплавів з ГЦК граткою до формування дислокаційної субструктури, від якої залежить їх деформаційне зміцнення. Розглянемо це на прикладі. На рис. 1а показано умовні діаграми розтягу зразків досліджуваних сталей при 800 і 1100°C та ділянки істинних діаграм, побудовані в межах їх рівномірної деформації (рис. 1b), а відповідні коефіцієнти та показники деформаційного зміцнення цих сталей наведено у табл. 2. Як бачимо, деформаційне зміцнення аустеніту середньовуглецевої сталі вище, ніж високовуглецевої.

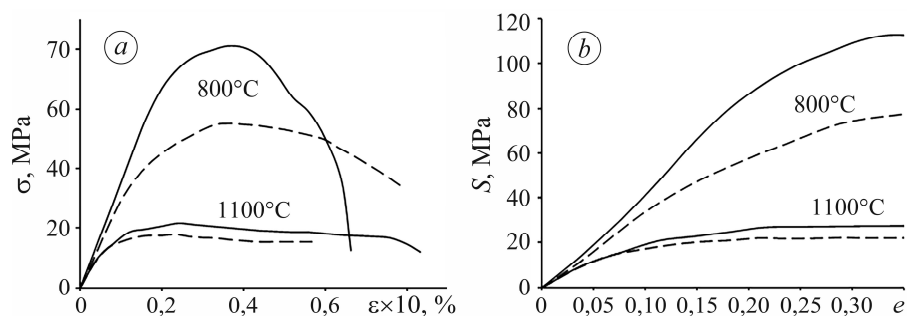


Рис. 1. Умовні (а) та істинні (b) діаграми розтягу зразків середньо- (суцільна лінія) та високовуглецевої (штрихова) сталей за різних температур аустенітизації.

Fig. 1. Conventional stress-strain diagram (a) and true-strain stress diagram (b) of samples of medium- (solid line) and high-carbon (dashed) steels at different austenitization temperatures.

Таблиця 2. Параметри деформаційного зміцнення середньо- та високовуглецевої сталей за різних температур аустенітизації

Температура випробування, °C	Константи рівняння Холломона для сталей (0,56% C / 0,81% C)	
	K, MPa	n
800	411,3 / 171,8	0,988 / 0,636
1100	50 / 34,8	0,385 / 0,269

Відомо, що здатність до пластичної деформації та субструктурного зміцнення металевих сплавів пов'язана з можливістю поперечного ковзання дислокацій та залежить від енергії дефекту упаковки γ атомних шарів кристалічної ґратки γ -Fe [13], значення якої за результатами праці [14] зростає із підвищенням вмісту вуглецю в аустеніті [15]. В результаті цього зменшується тривалість стадій легкого та множинного ковзання дислокацій, що призводить до зниження коефіцієнта деформаційного зміцнення (табл. 2). Показник деформаційного зміцнення тим вищий, що нижче значення γ , що обумовлено зменшенням здатності гвинтових дислокацій до поперечного ковзання, а крайових дислокацій – до переповзання. Таким чином, в аустеніті сталі з 0,56% C повинні превалювати стадії легкого та множинного ковзання дислокацій з утворенням розвиненішої дислокаційної субструктури, ніж в аустеніті сталі з 0,81% C, внаслідок чого зміцнення середньовуглецевої сталі в аустенітному стані інтенсивніше. Тому значення границі плинності (σ_{YS}), за яких починається формування дислокаційної субструктури, для сталі з 0,56% C та 0,81% C відповідно становили: 59 МПа і 31 МПа при 800°C та 14 МПа і 12 МПа при 1100°C (табл. 1).

Приклад візуалізації результатів моделювання за допомогою програми QForm 2D / 3D наведено на рис. 2, а впливу температури і ступеня деформації на напруження, які виникають у зразках досліджуваних сталей, – на рис. 3. Встановлено, що гаряча пластична деформація зразків сталі з 0,56% С одночасним розтягом на 5...98% при 800°C підвищує в ній напруження від 26,2 до 46,1 МПа. Для сталі з 0,81% С вони змінюються від 26,2 до 41,3 МПа. Деформація в інтервалі 5...98% при 1100°C зразків сталі з 0,56% С спричиняє зміну напружень від 12,3 до 19 МПа, а для сталі з 0,81% С – від 10,9 до 14,9 МПа. Отримані розрахункові значення напружень за температур аустенітної області вищі для середньовуглецевої сталі порівняно з високовуглецевою і підтверджують експериментальні результати.

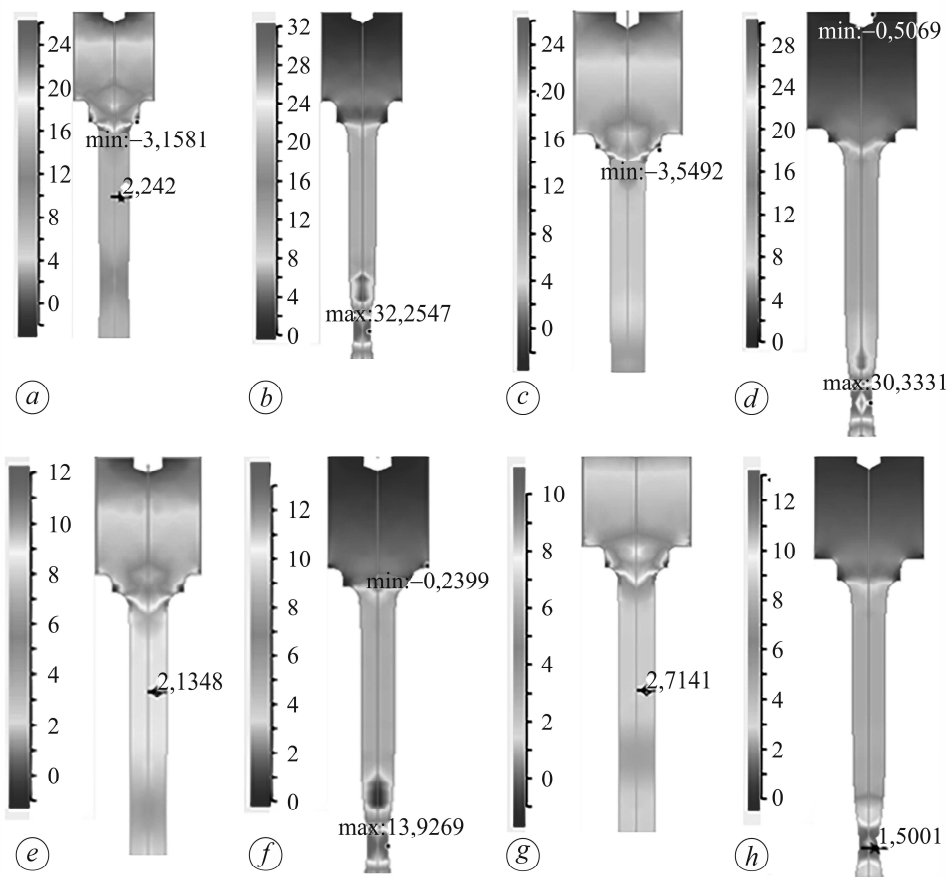


Рис. 2. Розрахунковий розподіл напружень (МПа) у зразках зі сталі з 0,56% С (а, б, е, ф) та 0,81% С (с, д, г, h) залежно від температури та ступеня деформації за випробувань розтягом: а, б, с, д – 800°C; е, ф, г, h – 1100°C; а, с, е, г – область рівномірної деформації; б, д, ф, h – локалізованої на 50% деформації.

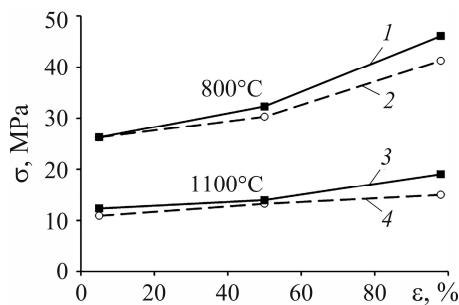
Fig. 2. Calculated distribution of stresses (MPa) in steel samples with 0.56% C (a, b, e, f) and 0.81% C (c, d, g, h) depending on temperature and degree of deformation during stress-strain tests: a, b, c, d – 800°C; e, f, g, h – 1100°C; a, c, e, g – area of uniform deformation; b, d, f, h – area of localized 50% deformation.

Важливим результатом виконаних досліджень є те, що отримані показники деформаційного зміцнення сталей з різним вмістом вуглецю дають змогу оцінити їх здатність до рівномірної пластичної деформації за різних температур аустенітизації. Відповідно до теорії Харта [16], показник n характеризує стійкість де-

формації і числово дорівнює рівномірному видовженню. Його зростання за зниження температури випробування обох сталей, особливо для сталі з 0,56% С, свідчить про більшу здатність цього металу до рівномірної формозміни за гарячої пластичної деформації. Тому з підвищенням вмісту вуглецю та температури аустенітизації зростає схильність сталі до локалізації пластичної деформації, що супроводжується утворенням пор та тріщин, тобто локальним руйнуванням.

Рис. 3. Зміна розрахункових напружень у зразках сталі з 0,56% С (■) та 0,81% С (○).

Fig. 3. Change in calculated stresses in steel samples with 0.56% C (■) and 0.81% C (○).



Отримані результати мають важливе практичне значення. Вони показують, що при виробництві сталевих прокатів необхідно враховувати меншу міцність та силу для початку пластичного плину сталі з більшим вмістом вуглецю за гарячої пластичної деформації, від якої залежить розмір зерна аустеніту та якість металопродукції за інших рівних умов.

ВИСНОВКИ

Показано, що при 800 та 1100°C міцнісні характеристики аустеніту сталі з 0,56% С вищі, ніж сталі з 0,81% С. За температури 800°C різниця значень границі міцності максимальна. Зі зниженням температури аустенітизації пластичність аустеніту сталі з 0,56% С знижується, а сталі з 0,81% С зростає. Встановлено, що деформаційне зміцнення аустеніту сталі з 0,56% С вище, ніж сталі з 0,81% С. Зниження міцності та деформаційного зміцнення сталі в аустенітному стані за підвищення в ній вмісту вуглецю – закономірне явище, яке теоретично пояснюється впливом вуглецю на енергію дефекту пакування атомів γ -Fe, від якої залежить механізм ковзання дислокацій та здатність до формування дислокаційної субструктури.

1. Колесная сталь / И. Г. Узлов, М. И. Гасик, А. Т. Есаулов, Н. Г. Мирошниченко, Ю. С. Пройдак. – К.: Техніка, 1985. – 168 с.
2. Иводитов А. Н., Горбанев А. А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. – М.: Металлургия, 1989. – 256 с.
3. Бабаченко О. І., Кононенко А. А. Тріщиностійкість залізничних коліс. – К.: Наук. думка, 2023. – 132 с. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1824-2>
4. Жучков С. М., Лохматов А. П., Кулаков Л. В. Оптимизация расхода энергии при непрерывной сортовой прокатке. – К.: Наук. думка, 2008. – 192 с.
5. Peculiarities of formation of high-carbon steel structure during rolling / V. A. Lutsenko, E. V. Parusov, O. V. Parusov, O. V. Lutsenko, I. M. Chuiko, and T. M. Golubenko // Materials Science. – 2023. – **58**, № 5. – P. 621–628. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00708-z>
6. Чухліб В. Л., Клемешов Є. С., Дия Х. Дослідження напружено-деформованого стану при осадці сталей та сплавів // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 5. – С. 34–40.
7. Розробка технологічної концепції проектування процесів кування з урахуванням впливу режиму деформування на якість поковок [Електронний ресурс] / В. Л. Чухліб, А. В. Ашкелянець, С. О. Губський, О. В. Петров, О. М. Дуванський, В. О. Палієнко, А. О. Окунь // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – 2021. – № 1. – С. 95–103. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2021.1.12>

8. *Baduk S. I. and Vorobey S. A.* The Influence of temperature and size of the cross section on the parameters of rolling casting-rolling mills for bars and rods // *Metallurgical & Mining Industry*. – 2012. – **4**, Is. 4. – P. 9–13.
9. *Andreiko I. M. and Kulyk V. V.* Temperature dependence of mechanical characteristics of wheel steels // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – P. 124–126.
<https://doi.org/10.1007/s11003-011-9378-5>
10. *Kulyk V. V., Andreiko I. M., and Vavrukh V. I.* Influence of the in-service factors on the serviceability of graphitized steel // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 3. – P. 381–387.
<https://doi.org/10.1007/s11003-015-9852-6>
11. *Kulyk V. V., Ostash O. P., and Vira V. V.* Influence of the elevated contents of silicon and manganese on the operating characteristics of high-strength wheel steel // *Materials Science*. – 2019. – **55**, № 2. – P. 143–151. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00281-4>
12. *Зайков М. А.* Прочность углеродистых сталей при высоких температурах // *Журн. техн. физики*. – 1949. – **XIX**, вып. 6. – С. 684–695.
13. *Вишняков Я. Д.* Дефекты упаковки в кристаллической структуре. – М.: Металлургия, 1970. – 216 с.
14. *Петров Ю. Н.* Дефекты и бездиффузионное превращение в стали. – М.: Наука, 1978. – 262 с.
15. *Борисенко А. Ю.* Механизмы твердорастворного упрочнения железа // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. – Днепропетровск, Ин-т черной металлургии им. З. И. Некрасова*, 2014. – Вып. 28. – С. 247–270.
16. *Hart E. W.* Theory of the tensile test // *Acta Metallurgica*. – 1967. – **15**, Is. 2. – P. 351–355.

Одержано 15.07.2024