

Механічні властивості бейнітного чавуну при підвищених температурах

Ю. М. Подрезов, К. О. Гогаєв, О. С. Коряк, Д. Г. Вербило,
С. М. Волощенко, В. В. Холявко*

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, e-mail: podrezov@materials.kiev.ua

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний
інститут ім. Ігоря Сікорського"

Проведено порівняльний аналіз істинних кривих деформаційного зміцнення при стисненні зразків з бейнітного чавуну, що гартувалися при 310 і 350 °С та випробувалися при температурах 20—300 °С. При кімнатній температурі випробувань спостерігалось двократне збільшення швидкості зміцнення в зразку, загартованому при 350 °С, схильному до фазового перетворення під дією деформації. З підвищенням температури випробувань різниця в зміцненні суттєво зменшується. Виявлений ефект пояснюється температурною чутливістю фазового перетворення.

Ключові слова: бейнітний чавун, швидкість зміцнення, деформаційно індукване фазове перетворення.

Температура деформування, безумовно, є одним з найбільш важливих факторів, що впливають на протікання TRIP-ефекту. Це пояснюється тим, що точка мартенситного перетворення, яка відповідає температурі початку перетворення залишкового аустеніту в мартенсит, в бейнітних чавунах лежить поблизу кімнатної температури. Тому в реальних виробках перебіг фазових перебудов під дією деформації може в значній мірі змінюватися в залежності від температури навколишнього середовища. В реальних польових умовах роботи сільськогосподарської техніки на фазові перебудови під дією деформації можуть впливати кліматичні зміни та якість оброблювального ґрунту, про що свідчать результати випробування на знос в різному середовищі.

В літературі практично відсутня інформація про вплив температури на механічну поведінку бейнітного чавуну, але існують публікації про механічну поведінку TRIP-сталей [1, 2]. З результатів численних досліджень, де вивчався вплив температури на протікання TRIP-ефекту, відомо, що при зниженні температури нижче кімнатної фазове перетворення інтенсифікується при малих деформаціях (спостерігається підвищення швидкості деформаційного зміцнення), але зі збільшенням деформації швидкість протікання фазового перетворення зменшується і зростання рівномірної деформації не фіксується.

Найбільші значення рівномірної деформації характерні для зразків, які випробувані при температурах ~50 °С, тобто близько до робочих температур сільськогосподарської техніки, що працює в літній період. При подальшому підвищенні температури ефект схильності до дефор-

© Ю. М. Подрезов, К. О. Гогаєв, О. С. Коряк, Д. Г. Вербило,
С. М. Волощенко, В. В. Холявко, 2016

мації (deformability) дещо зменшується, але цей механізм продовжує працювати до температур, де починає діяти ефект динамічного деформаційного старіння (ДДС).

Метою роботи є дослідження механічної поведінки бейнітного чавуну при підвищених температурах та аналіз впливу температури на механічні характеристики, що є найбільш чутливими до перетворення під дією деформації.

Основним методом досліджень були механічні випробування на стиск при підвищених температурах. Експерименти на стиск проводили на прямокутних зразках розмірами 3 x 3 x 5 мм на випробувальній машині UM-100 з автоматичним записом умовної діаграми навантаження, яка з урахуванням формозміни зразка при деформації [3] перераховувалася в істинну криву напруження—деформація. На цій кривій визначалися границя плинності $\sigma_{0,2}$, руйнівне напруження σ_r та деформація руйнування ϵ_r . Дослідження здійснювали у двох температурних інтервалах: 20—100 та 200—300 °С, тому що перший відповідає робочим температурам експлуатації сільгосптехніки, а при другому в сплавах на основі заліза спостерігається ДДС.

Проведено порівняння механічної поведінки зразків з бейнітного чавуну, що піддавалися ізотермічному гартуванню при різних температурах: при 350 °С реалізується найбільший TRIP-ефект при кімнатній температурі, при 310 °С фазове перетворення під дією деформації при кімнатній температурі практично відсутнє. Оскільки досліджували зразки, що витримувалися при ізотермічному гартуванні 1, 2 та 3 год, порівняння кривих зміцнення виконували при однаковому часі витримки.

На рис. 1 наведено криві деформаційного зміцнення зразків бейнітного чавуну, ізотермічно загартованого при 350 та 310 °С з витримкою 2 год, що випробувані в інтервалі температур 20—100 °С. За результатами випробувань визначено механічні властивості досліджених матеріалів. Їх значення наведені в табл. 1.

Границя плинності зменшується з температурою випробувань. Більш суттєво ця тенденція спостерігається в сплавах, загартованих при 310 °С. Найбільшу пластичність демонструють зразки, загартовані при 310 °С з витримкою 2 год. Зразки, що загартовані при 350 °С з витримкою 2 год, мають найменшу пластичність. В цьому температурному інтервалі пластичність всіх зразків слабко змінюється з температурою.

Як уже відзначалося, найбільш чутливим параметром до розпаду залишкового аустеніту є швидкість зміцнення. Тому з наведених на рис. 1 залежностей істинного напруження від деформації була отримана похідна, яка характеризує швидкість зміцнення. Залежність цього параметра від ступеня деформації наведена на рис. 2.

Для кількісного порівняння швидкості зміцнення зразків, загартованих при 350 та 310 °С, для кожного ступеня деформації було визначено коефіцієнт, який характеризує відношення значення швидкості зміцнення при 350 °С до значення цієї величини при 310 °С: $K = d\sigma/de_{350\text{ }^\circ\text{C}}/d\sigma/de_{310\text{ }^\circ\text{C}}$. Значення цього параметра для зразків, загартованих при 310 та 350 °С з витримкою 2 год та випробуваних при 20, 50 та 100 °С, наведені в табл. 2. З табл. 2 слідує, що найбільший відносний коефіцієнт зміцнення спостерігається при кімнатній температурі при малих ступенях деформації.

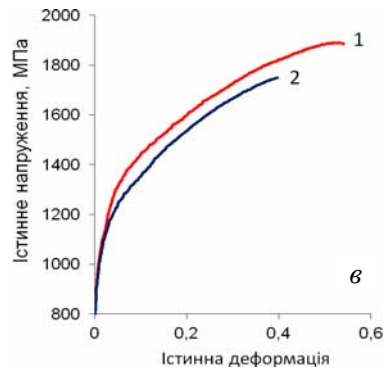
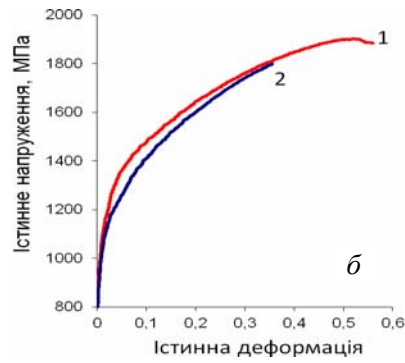
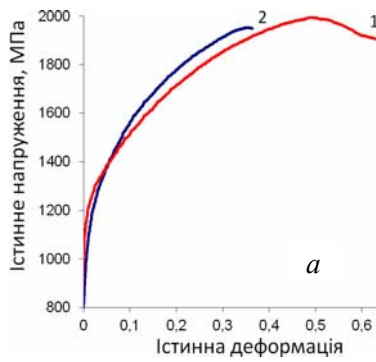


Рис. 1. Істинні криві напруження—деформація зразків бейнітного чавуну, випробуваних на стиск при температурах 20 (а), 50 (б) та 100 °С (в): 1 — загарт. при 310 °С 2 год; 2 — загарт. при 350 °С 1 год.

Т а б л и ц я 1. Механічні властивості бейнітного чавуну, випробуваного на стиск при різних температурах

$T_{\text{гарт}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Ви-тримка, год	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$			$\sigma_p, \text{ МПа}$			e_p		
		20 °С	50 °С	100 °С	20 °С	50 °С	100 °С	20 °С	50 °С	100 °С
310	1	1071	984	924	1882	1911	1826	0,45	0,50	0,48
	2	1127	1000	923	1994	1903	1890	0,63	0,56	0,54
	3	1076	1000	909	1891	1882	1834	0,45	0,51	0,48
350	1	917	1066	907	1904	1872	1795	0,47	0,45	0,49
	2	1006	989	886	1953	1799	1749	0,36	0,35	0,39
	3	1122	837	909	1956	1561	1842	0,37	0,47	0,47

Т а б л и ц я 2. Значення відносного коефіцієнта зміцнення при різних ступенях деформації

$T_{\text{вип}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	K						
	$e = 0,01$	$e = 0,03$	$e = 0,05$	$e = 0,1$	$e = 0,15$	$e = 0,2$	$e = 0,3$
20	2	1,6	1,4	1,2	1,2	1,2	1,1
50	1,6	1,3	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
100	1	1,2	1,1	1	1	1	1

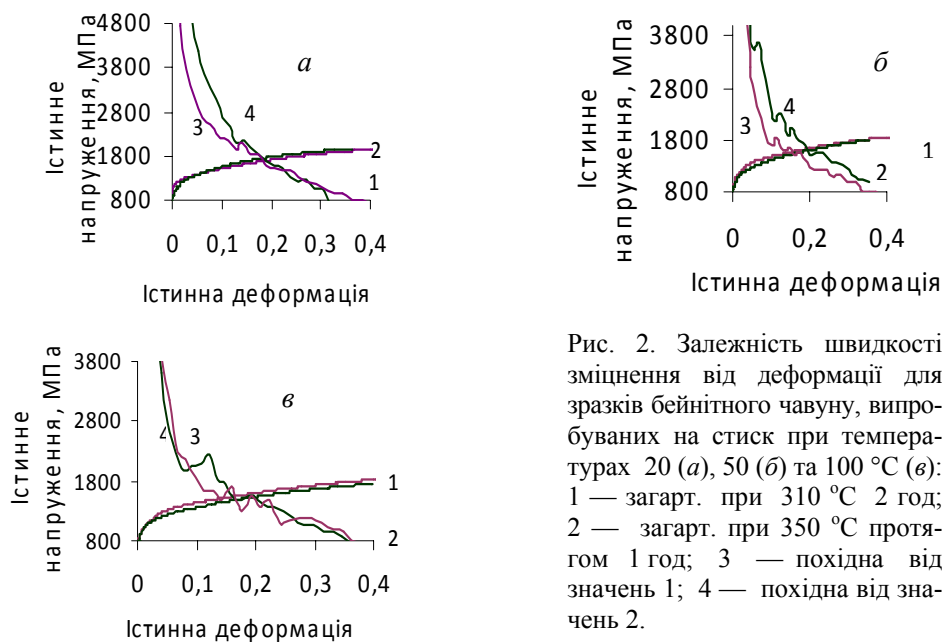


Рис. 2. Залежність швидкості зміцнення від деформації для зразків бейнітного чавуну, випробуваних на стиск при температурах 20 (а), 50 (б) та 100 °С (в): 1 — загарт. при 310 °С 2 год; 2 — загарт. при 350 °С протягом 1 год; 3 — похідна від значень 1; 4 — похідна від значень 2.

Т а б л и ц я 3. Значення деформації, що відповідають умовам локалізації бейнітного чавуну, за різних температур випробування

$T_{\text{гарт}},$ °С	Витримка, год	$\varepsilon, \%$		
		20 °С	50 °С	100 °С
310	1	21	23	18
	2	21	19	18
	3	20	15	17
350	1	21	18	20
	2	21	20	23
	3	20	23	22

Представлені на рис. 2 експериментальні залежності похідної від ступеня деформації можуть бути використані для розрахунку деформації, що характеризує схильність до локалізації досліджених матеріалів. Деформація, що відповідає моменту локалізації, визначається з умови Консидера $d\sigma/de = \sigma$. Графічно ця деформація відповідає точці перетину істинної кривої зміцнення та її похідної, як представлено на рис. 2. Отримані значення деформації локалізації наведені в табл. 3.

З отриманих даних слідує, що цей параметр дещо збільшується зі зростанням температури та часу витримки. Порівняльний аналіз істинних кривих деформаційного зміцнення при стисненні зразків, що гартувалися при 310 і 350 °С та випробувалися при температурах 20—100 °С (рис. 2, а—в), вказує на те, що найбільша швидкість зміцнення спостерігається для зразка, загартованого при 350 °С та випробуваного при кімнатній температурі (рис. 2, а). На початковій ділянці кривої навантаження швидкість зміцнення цього зразка практично в 2 рази більша, ніж загартованого при 310 °С (табл. 2). При підвищенні температури до 50 та

100 °С швидкість зміцнення знижується особливо на початкових ділянках деформації (рис. 2, б, в).

Слід відзначити, що значення рівномірної деформації, яке розраховане з істинної кривої зміцнення при стисненні згідно з методикою, описаною нами в роботі [4], дещо збільшується з підвищенням температури. Важливо, що вплив температури на обидві характеристики, котрі є чутливими до мартенситного перетворення під дією пластичної деформації, подібний до температурної чутливості цього ефекту в TRIP-сталях [1, 2].

При подальшому зростанні температури випробувань до 200 °С слід очікувати вплив ефектів ДДС. Для компактних матеріалів на основі заліза встановлено [5, 6], що ефект ДДС, який обумовлений взаємодією дислокацій з атомами вуглецю та азоту, зазвичай спостерігається в інтервалі температур 200—400 °С при швидкостях деформації 10^{-2} — 10^{-4} с⁻¹. При більш високих температурах деформаційне старіння завершується, оскільки дифузійна рухливість точкових дефектів сприяє переходу до стадії дислокаційної повзучості.

Явище ДДС, яке полягає в аномальному зростанні границі плинності та зниженні пластичності при підвищеній температурі випробувань через закріплення дислокацій домішками безпосередньо в процесі деформації, детально досліджено для компактних матеріалів на основі заліза в роботах [5—7]. В інтервалі температур ДДС відбуваються складні структурні зміни під час деформації матеріалу і, як наслідок, енергія активації при цьому механізмі деформування є змінною величиною, чутливою як до температури, так і до швидкості деформування. На високотемпературній ділянці інтервалу ДДС це значення наближається до 0,45 еВ, що характерно для ефекту взаємодії домішок з дислокаціями.

Неоднозначність теоретичного опису цього явища, різноманітність механізмів ДДС, що запропоновані багатьма дослідниками, відображають реальну складність процесу, його чутливість до температури та швидкості випробувань, типу та кількості домішок, за якими відбувається старіння, а також до параметрів вихідної структури. Теорії ДДС, що існують на даний момент, базуються на різних фізичних концепціях.

Згідно з Котреллом [8, 9], в основу першого класу теорій покладено уявлення про те, що при температурно-швидкісних умовах, коли рухливість атомів домішок співставна з рухливістю дислокацій під час деформації, дислокації можуть притягувати атмосфери домішок втілення і в цих атмосферах здатні рухатись з критичною швидкістю $V_{кр}$ при критичному напруженні $\sigma_{кр}$.

При швидкостях, які перевищують $V_{кр}$, напруження, що рухають дислокацію, зменшуються. В цьому випадку мають місце від'ємна швидкісна чутливість та пластична нестабільність матеріалу. В рамках цієї моделі пояснюються зубчаста плинність та зміщення ефекту ДДС в область більш високих температур при підвищенні швидкості деформування.

Пізніше було показано, що в умовах гальмування дислокацій різними перешкодами (дислокаціями лісу, частинками, границями зерен та субзерен) більш вірогідним є квазістатичне старіння з часом очікування біля перешкоди τ_w . Такий підхід відноситься до концепції Фриделя—Мак-Кормика [10, 11]. Цей погляд дозволив пояснити не лише температурно-

швидкісні ефекти ДДС, але й особливості формування ділянки зубчастого плинину, зокрема залежність ступеня деформації на початку цієї ділянки ε_c від швидкості та температури випробувань, від кількості домішок в матеріалі та низки структурних параметрів. Так, в роботі [12] запропоновано вирази, які в термінах теорії дислокацій описують вплив швидкості та температури випробування концентрації домішок та структури на параметр ε_c :

$$C - C_0 = (KD\tau_w)^{2/3}, \quad (1)$$

де

$$K = 3W_m/b^2kT; \quad (2)$$

$$D\tau_w \frac{\varepsilon^{m+\beta}}{\dot{\varepsilon}} \exp\left(-\frac{Q_m}{kT}\right), \quad (3)$$

$$\varepsilon_c \sim \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C_0^{3/2}}\right) \exp\left(\frac{Q_m}{kT}\right), \quad (4)$$

де C — концентрація домішок поблизу дислокації; C_0 — середня концентрація домішки по об'єму; D — коефіцієнт дифузії домішок; W_m — енергія зв'язку атому домішки з дислокацією; b — вектор Бюргера дислокації; τ_w — період очікування поблизу перешкоди; ε — деформація; $\dot{\varepsilon}$ — швидкість деформації; m та β — параметри; Q_m — енергія активація дифузії домішок.

Прямі спостереження руху дислокацій в умовах ДДС [13] однозначно свідчать про те, що відбувається стрибкоподібне переміщення дислокаційних ансамблів. Час руху між зупинками τ_m набагато менший, ніж час очікування біля перешкоди τ_w . Таким чином, існують вагомі аргументи для застосування цієї теорії для опису процесу ДДС на макрорівні, особливо у випадку фіксованого значення критичного ступеня деформації ε_c на початку зубчастої ділянки плинину.

Характер температурної залежності механічних властивостей дослідженого бейнітного чавуну однозначно вказує на протікання процесів ДДС в діапазоні температур 200—300 °С. Істинні криві зміцнення зразків,

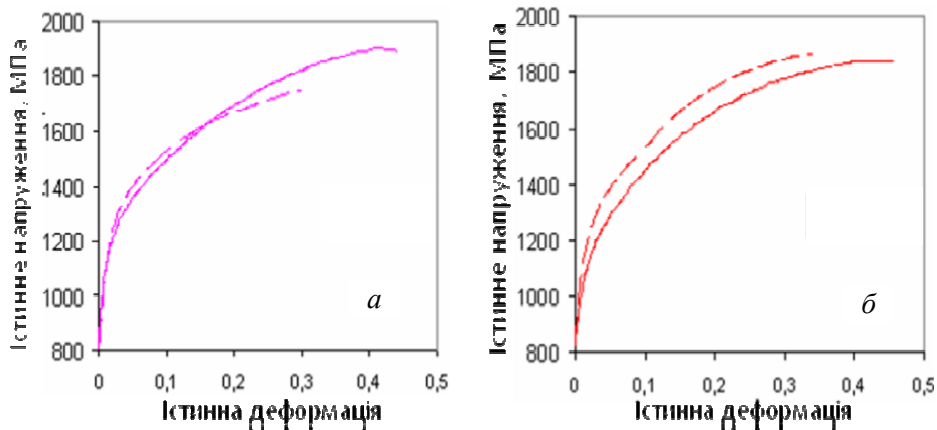


Рис. 3. Істинні криві напруження—деформація бейнітного чавуну, випробуваного на стиск за температур ДДС 200 (а) та 300 °С (б).

Т а б л и ц я 4. Механічні властивості бейнітного чавуну, випробуваного на стиск при температурах ДДС 200 та 300 °С

$T_{\text{гарт.}}$, °С	Витримка, год	$\sigma_{0,2}$, МПа		σ_p , МПа		e_p , %	
		200	300	200	300	200	300
310	1	894	1005	1940	1935	0,44	0,44
	2	987	1009	1902	1842	0,44	0,45
	3	946	937	1861	1880	0,45	0,44
350	1	860	958	1805	1874	0,40	0,43
	2	974	981	1742	1869	0,30	0,33
	3	1030	881	1845	1871	0,38	0,40

загартованих при 310 та 350 °С з витримкою 2 год, наведені на рис. 3. Отримані з відповідних кривих зміцнення значення механічних властивостей для різних режимів термообробки наведені в табл. 4.

Порівняння механічних властивостей чавуну вказує на те, що в інтервалі ДДС у всіх загартованих при 310 та 350 °С зразках збільшується границя плинності та зменшується деформація до руйнування. При цьому ефекти, що спостерігаються після гартування при 310 °С, більш суттєві, ніж після гартування при 350 °С. Зазначимо, що розраховане значення критичної деформації локалізації в інтервалі ДДС також зменшується і для всіх структурних станів знаходиться в межах 17—20%. Враховуючи, що пластичність та руйнуюче напруження при підвищенні температури випробувань від 200 до 300 °С дещо збільшуються, є підстави стверджувати, що максимальний ефект ДДС фіксується при температурах близьких до 200 °С.

Зазначимо, що при наявності характерних ознак ДДС на температурних залежностях механічних властивостей, на кривих зміцнення зразків, продеформованих в інтервалі температур ДДС, відсутня головна зовнішня ознака цього явища — пилоподібний характер кривої навантаження, зумовлений механізмом переривчастої течії.

Така особливість протікання динамічного деформаційного старіння характерна для поруватих матеріалів [14]. Цей ефект пояснюється складнощами формування безперервної смуги ковзання вздовж макрозразка. Схожий ефект виникає при взаємодії смуги ковзання з кулястим графітом, який перешкоджає утворенню макросмуги.

З наведених даних табл. 1 та 4 слідує, що при підвищенні температури від кімнатної до 100 °С відбувається незначне роззміцнення бейнітного чавуну (приблизно на 200 МПа), в діапазоні температур ДДС фіксується його повторне зміцнення. Криві зміцнення, що отримані в інтервалі ДДС та при кімнатній температурі, практично співпадають, особливо на початкових ділянках деформації. Проте руйнуюче напруження зразків, продеформованих в діапазоні ДДС, поступається цій характеристиці при кімнатній температурі через меншу деформацію до руйнування.

Взаємодія дислокацій з домішками є важливим чинником, який сприяє формуванню деформаційної субструктури, що може вплинути на подальший перебіг процесів, котрі відбуваються в бейнітному чавуні при кімнатній температурі. Тому було здійснено стискання зразків при температурі ДДС 300 °С до деформації, що відповідає формуванню деформаційної

структури ($\epsilon = 10\%$). Після цього зразки охолоджували і деформували при кімнатній температурі до руйнування.

Результати наведено на рис. 4 у вигляді умовних кривих навантаження досліджених сплавів. Видно, що деформаційне старіння в усіх випадках сприяє підвищенню деформаційного напруження (приблизно на 300 МПа при повторному навантаженні при кімнатній температурі в порівнянні з вихідною кривою), але швидкість зміцнення при цьому суттєво знижується, особливо для зразків, продеформованих при 310 °С. До того ж значно зменшується деформація до руйнування, особливо для зразка, що гартувався при 350 °С протягом 2 год.

Істинні криві деформаційного зміцнення зразків, підданих стисненню при кімнатній температурі після деформації при 300 °С, наведені на рис. 5. На цьому ж рисунку наведено перераховані з них умовні криві навантаження при розтязі.

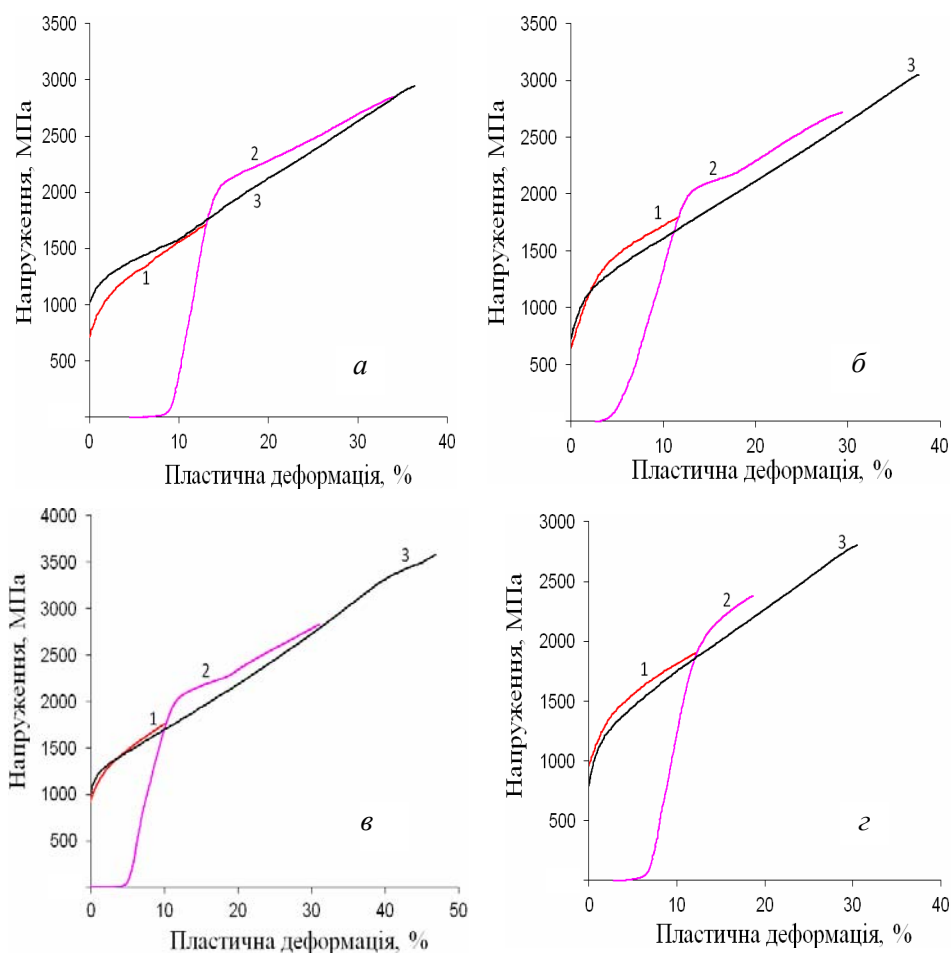


Рис. 4. Умовні криві зміцнення бейнітного чавуну, термообробленого за різними режимами: *а* — $T_{\text{гарт}} = 310$ °С, витримка 1 год; *б* — $T_{\text{гарт}} = 350$ °С, витримка 1 год; *в* — $T_{\text{гарт}} = 310$ °С, витримка 2 год; *г* — $T_{\text{гарт}} = 350$ °С, витримка 2 год; 1 — діаграма стиснення при 300 °С на деформацію $\sim 10\%$; 2 — подальша деформація того ж зразка при 20 °С до руйнування; 3 — крива навантаження при кімнатній температурі.

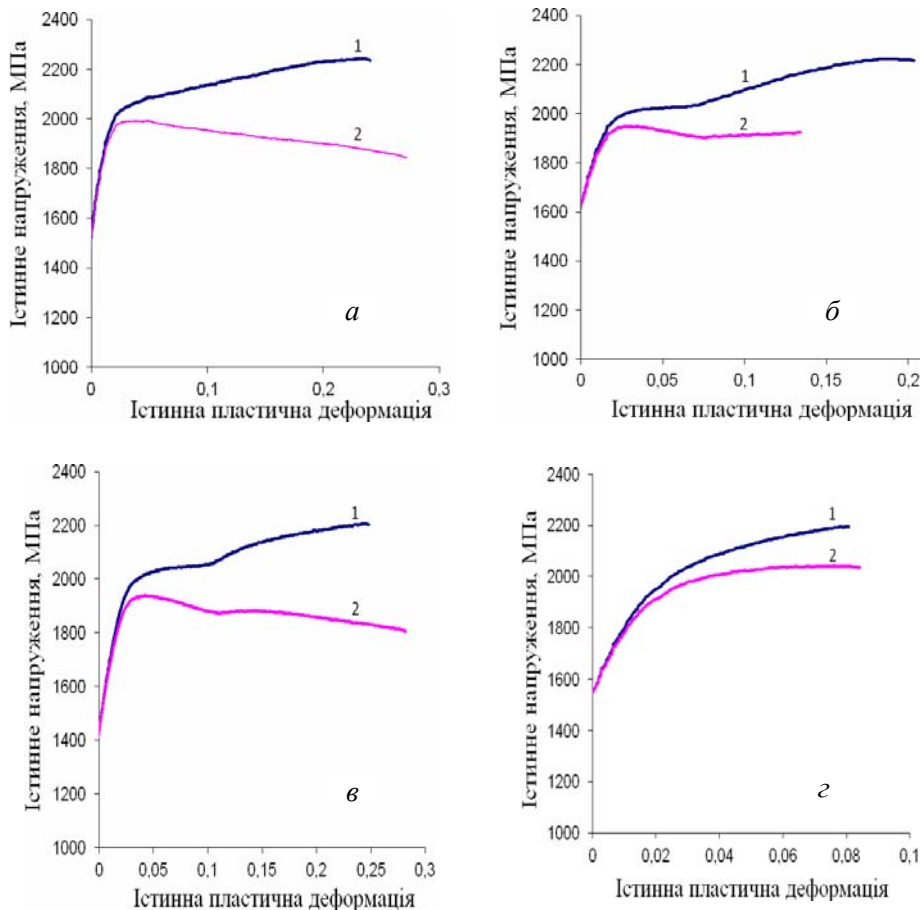


Рис. 5. Істинні та умовні криві зміцнення бейнітного чавуну, термообробленого за різними режимами: *a* — $T_{\text{гарт}} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$, витримка 1 год; *б* — $T_{\text{гарт}} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, витримка 1 год; *в* — $T_{\text{гарт}} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$, витримка 2 год; *г* — $T_{\text{гарт}} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, витримка 2 год; 1 — істинні криві зміцнення, отримані в результаті випробувань на стиск при кімнатній температурі після попереднього стиснення на 10% при $300 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — перераховані з кривих 1 умовні криві розтягу.

Характер цих кривих принципово відрізняється від кривих деформаційного зміцнення вихідних зразків. Вони більше схожі на типові криві зміцнення попередньо деформованих матеріалів [4]. Фіксується значне зміцнення на початковій ділянці деформації (до 3%), після чого спостерігається стадія лінійного зміцнення з відносно низьким (як для цього класу матеріалів) коефіцієнтом лінійного зміцнення ($\theta = 1000 \text{ МПа}$). Оскільки значення цього параметра суттєво нижче деформуючого напруження, згідно з умовою Консидера, в такому структурному стані зразки повинні мати підвищену схильність до локалізації.

Дійсно, розраховані умовні діаграми розтягу демонструють схильність до шийкоутворення при деформації 3—5%. В цьому сенсі деяку відмінність має зразок, відпалений при $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 2 год. Проте його механічну поведінку при стисненні не вдалося проаналізувати достатньо повно через відносно малу деформацію до руйнування.

Таким чином, ефекти ДДС проявляються в досліджених структурних станах бейнітного чавуну. Типовими ознаками цього механізму є підвищення границі плинності і зменшення характеристик пластичності. Стрибкоподібної діаграми навантаження не спостерігається. Зразок, попередньо продеформований на стиск в діапазоні температур ДДС, після повторного навантаження при кімнатній температурі не відтворює характерні для TRIP-ефекту особливості деформаційного зміцнення.

Висновки

Порівняльний аналіз істинних кривих деформаційного зміцнення при стисненні зразків, які гартувалися при 310 і 350 °С та випробувалися при температурах 20—100 °С, показав, що при кімнатній температурі спостерігається практично двократна різниця швидкостей зміцнення. При підвищенні температури випробування ця різниця суттєво зменшується.

Значення рівномірної деформації, яке розраховане з істинної кривої зміцнення при стисненні, дещо збільшується зі зростанням температури.

Для механізму ДДС у бейнітному чавуні властивими є наступні ознаки:

підвищення границі плинності й зменшення характеристик пластичності; стрибкоподібної діаграми навантаження не спостерігається; зразок, попередньо продеформований на стиснення в діапазоні температур ДДС, після повторного навантаження при кімнатній температурі не відтворює властиві для TRIP-ефекту особливості деформаційного зміцнення.

Характер впливу температури на параметри зміцнення бейнітного чавуну, які є чутливими до мартенситного перетворення під дією пластичної деформації, повністю співпадає з існуючою інформацією про температурну чутливість зміцнення в TRIP-сталях.

1. *Blondé R.* Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading / [R. Blondé, E. Jimenez-Melero, L. Zhao et al.] // *Mater. Sci. & Engineering.* — 2014. — **A618.** — P. 280—287.
2. *Fu B.* Micromechanical behavior of TRIP-assisted multiphase steels studied with in situ high-energy X-ray diffraction / [B. Fu, W. Y. Yang, Y. D. Wang et al.] // *Acta Mater.* — 2014. — **76.** — P. 342—354.
3. *Шапошников Н. А.* Механические испытания металлов. — М. : Машгиз, 1954.
4. *Подрезов Ю. Н.* Структурная чувствительность равномерной деформации в области нанозерен / [Ю. Н. Подрезов, В. И. Даниленко, Н. И. Даниленко и др.] // *Физика и техника высоких давлений.* — 2015. — **25.** — С. 66—89.
5. *Бабич В. К.* Деформационное упрочнение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. — М. : Металлургия, 1972. — 320 с.
6. *Cotrell A. H.* Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron / A. H. Cottrell, B. A. Bilby // *Proc. Phys. Soc. A.* — 1949. — No. 62. — P. 49—53.
7. *Обергофер П.* Техническое железо. — М. : Metallurgizdat, 1940. — 336 с.
8. *Belocky A. V.* Strengthening of steel by friction in nitrogen atmosphere / A. V. Belocky, A. I. Yurcova // *Mater. Sci. & Eng. A.* — 1988. — No. 2. — P. 40—43.
9. *Котрелл А. Х.* Прерывистая текучесть. — М. : Металлургия, 1967. — С. 210—224.
10. *Фридель Г.* Дислокации. — М. : Мир, 1967. — 643 с.

11. *McCormic P. G.* A model for the Portevin-Le-Chatelier effect in substitutional alloys // *Acta Met.* — 1972. — No. 20. — P. 351—354.
12. *A. van den Beukel.* Theory of the effect of dynamic strain ageing on mechanical properties // *Phys. Stat. Soc. (a).* — 1975. — No. 30. — P. 197.
13. *Tabata T.* The dependence of discontinuous deformation on orientation in Al—Mg single crystals / T. Tabata, H. Fujita, Y. Nakajima // *Mater. Sci. & Engineering.* — 1980. — No. 1. — P. 81—87.
14. *Подрезов Ю. Н.* Особенности деформационного поведения порошкового тела железа при одноосном растяжении / Ю. Н. Подрезов, Л. Г. Штыка, Н. П. Бродниковский // *Проблемы прочности.* — 1993. — № 4. — С. 52—64.

Механические свойства бейнитного чугуна при повышенных температурах

Ю. Н. Подрезов, К. А. Гогаев, О. С. Коряк, Д. Г. Вербило,
С. М. Волощенко, В. В. Холявко

Проведен сравнительный анализ истинных кривых деформационного упрочнения при сжатии образцов из бейнитного чугуна, закаленных при 310 и 350 °С и испытанных при температурах 20—300 °С. При комнатной температуре испытаний наблюдается двукратное увеличение скорости упрочнения в образце, закаленном при 350 °С и склонном к фазовому превращению под действием пластической деформации. При повышении температуры испытания разница в упрочнении существенно снижается. Обнаруженный эффект объясняется температурной чувствительностью фазового превращения.

Ключевые слова: бейнитный чугун, скорость упрочнения, деформационно-индуцированное фазовое превращение.

Mechanical properties of bainitic cast irons at high temperature

Yu. N. Podrezov, K. O. Gogayev, O. S. Koryak, D. G. Verbylo,
S. M. Voloschenko, V. V. Kholiyavko

A comparative analysis of stress-strain work hardening curves obtained in compressive tests at 20—300 °C is carried out for quenched at 310 and 350 °C bainitic cast irons. At room temperature testing sample's hardening rate is in two times higher for the quenched at 350 °C sample that undergoes strain-induced phase transition. The difference in hardening rate decreases with increasing of temperature. Observed phenomena is related to temperature sensitivity of the phase transition.

Keywords: bainitic cast irons, work hardening rate, strain-induced phase transition.