

## Деформаційне зміцнення бейнітного чавуну при підвищених температурах

С. М. Волощенко, кандидат технічних наук

Ю. М. Подрезов, доктор фізико-математичних наук

В. В. Холявко\*, кандидат технічних наук

Т. О. Іващук\*

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ  
\*Національний технічний університет України «КПІ» ім. І. Сікорського, Київ

*Проведено порівняльний аналіз істинних кривих деформаційного зміцнення при стисненні зразків з бейнітного чавуну, що гартувались від температури аустенізації 900 °С, охолоджувались при 310 °С і 350 °С в рідкому олові та випробувались при температурах 20 – 100 °С. При кімнатній температурі випробувань спостерігається двократне збільшення швидкості зміцнення в зразку загартованому при 350 °С, схильному до фазового перетворення під дією деформації. Зі збільшенням температури випробувань різниця в зміцненні суттєво зменшується. Виявлений ефект пояснюється температурною чутливістю фазового перетворення.*

**Р**озробка матеріалознавчих принципів структуроутворення у високоміцних чавунах бейнітного класу для реалізації механізмів, що підвищують зносостійкість виробів сільськогосподарського призначення є актуальною проблемою. Відомо, що підвищена зносостійкість та високий опір втомі пов'язаний з протіканням так званого TRIP-ефекту, коли під дією деформації відбувається фазове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит. Аналогічний ефект відомий в TRIP-сталях, які широко використовуються в автомобільній промисловості. В цьому випадку фазове перетворення сприяє різкому збільшенню зміцнення та величини рівномірного видовження, тобто фазове перетворення впливає на характер діаграми навантаження.

Виходячи з цього, проаналізовано температурну залежність механічних властивостей бейнітного чавуну в діапазоні температур випробувань 20 – 100 °С та розглянуто вплив фазового перетворення на характер кривих зміцнення.

Досліджувався бейнітний чавун (який використовується для створення лемехів та лап культиваторів) наступного складу: 3,2 – 3,4 % С, 1,4-1,6 % Si, 0,2 – 0,3 % Mn, 0,01 – 0,02 % Cr, 0,18 % Mo, 0,3 % Cu, 0,4 % Ni, 0,02 % P, S < 0,02 % та модифікатори: 7,5 % Mg, 35 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 Ва), 17,5 % Fe, 12 % модифікатор-флюс «Рефтокон» та 9 % РЗМ (ФС30РЗМ30).

Для отримання бейнітної структури виливки гартували від температури аустенізації 900 °С, охолоджували та витримували в рідкому

олові при температурі ( $T_{ox}$ ) 310 °С або 350 °С з ізотермічною витримкою протягом 1, 2 або 3 годин.

З отриманих заготовок виготовлені зразки розміром 10x10x14 мм, які були продеформовані стисненням до 30 % деформації. Зразки, у вихідному і деформованому станах досліджені на дифрактометрі ДРОН ЗМ.

Прямокутні зразки розміром 3x3x5 мм вирізали із зливка за допомогою електроерозійної різки та випробувались на стиснення на універсальній машині УТ-100 зі швидкістю  $10^{-3} \text{ c}^{-1}$  з автоматизованим записом діаграми навантаження. Умовна діаграма навантаження перераховувалась згідно з принципами теорії міцності. З цієї діаграми розраховувались значення границі плинності  $\sigma_{02}$ , руйнуючого напруження  $\sigma_p$ , деформації руйнування  $\epsilon$ .

Результати рентгенофазових досліджень показали, що пластична деформація після ізотермічного гартування при 350 °С призводить до часткового розпаду залишкового аустеніту – розпалася приблизно п'ята частина від початкової кількості (рис. 1). Розпад залишкового аустеніту при  $T_{ox}$  310 °С не спостерігався.

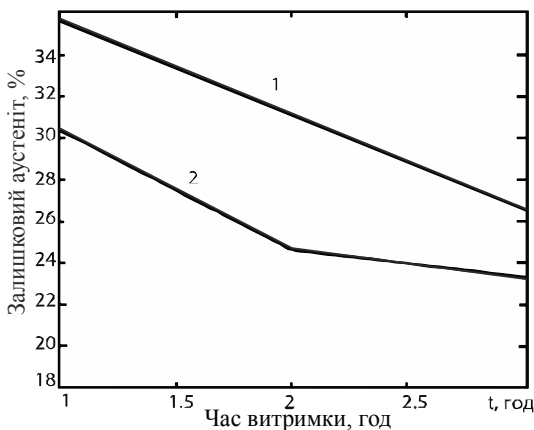


Рис. 1. Зміна кількості залишкового аустеніту від часу витримки при  $T_{ox}$ : 1 – 350 °С, вихідний стан; 2 – 350 °С, після деформування.

Така, здавалося б, невелика кількість матеріалу, що піддається перебудові з ОЦК-структури в мартенсит, може істотно впливати на процеси деформаційного перетворення, оскільки такий перехід супроводжується значною зміною об'єму. Виявлений частковий розпад аустеніту під дією деформації,  $\epsilon$ , безсумнівно, значущим для підвищення інтенсивності зміцнення. Саме ці структурні стани є предметом дослідження, оскільки реальні виробы для потреб сільгосптехніки термооброблюються за одним з вищенаведених режимів.

За результатами механічних випробувань визначено основні механічні характеристики бейнітного чавуну. Результати розрахунків наведено в табл. 1.

За даними табл. 1 побудовані температурні залежності механічних характеристик, які представлені на рис. 2.

З наведених графіків видно, що границя плинності для обох  $T_{ox}$  зменшується з підвищенням температури, але якщо для  $T_{ox}$  310 °С це зменшення спостерігається для всіх трьох термінів витримки, то для  $T_{ox}$  350 °С найбільше зниження границі плинності спостерігається при 3 годинах витримки, тоді як при 1 годині – зменшення границі плинності практично відсутнє. Найбільшу пластичність до руйнування демонструє зразок при  $T_{ox}$  310 °С протягом 2 годин. Навпаки, зразок, що витриманий при  $T_{ox}$  350 °С, демонструє найнижчі значення деформації до руйнування. Загалом

## Фазові перетворення

Таблиця 1

Механічні властивості бейнітних чавунів

Параметри витримки		20 °С			50 °С			100 °С		
$T_{ок}$ , °С	час, год.	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\epsilon$	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\epsilon$	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\epsilon$
310	1	1071	1882	0,45	984	1911	0,5	924	1826	0,48
	2	1127	1994	0,63	1000	1903	0,56	923	1890	0,54
	3	1076	1891	0,45	1000	1882	0,51	909	1834	0,48
350	1	917	1904	0,47	950	1872	0,45	907	1795	0,49
	2	1006	1953	0,36	989	1799	0,35	886	1749	0,39
	3	1122	1956	0,37	1002	1561	0,47	909	1842	0,47

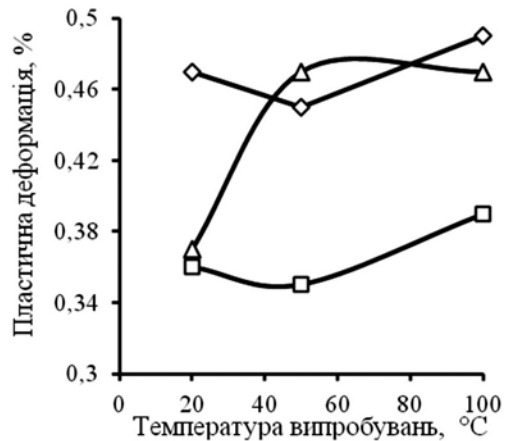
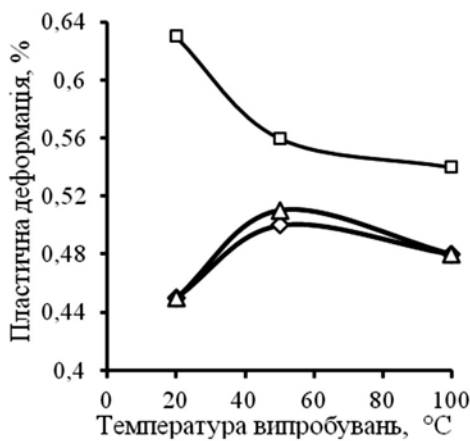
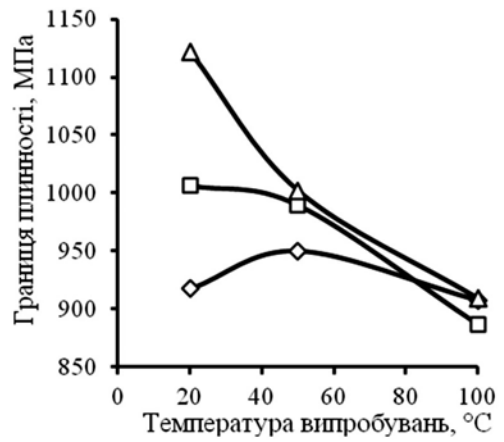
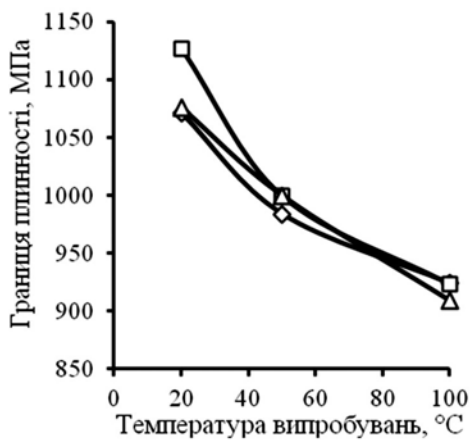


Рис. 2. Температурні залежності механічних характеристик. Межа плинності при  $T_{ок}$ : а – 310 °С, б – 350 °С; пластичність до руйнування при  $T_{ок}$ : в – 310 °С, г – 350 °С; час витримки:  $\diamond$  – 1 год;  $\square$  – 2 год;  $\triangle$  – 3 год.

## Фазові перетворення

ця характеристика слабо змінюється з температурою випробування. Зазначимо, що абсолютні величини деформації на стиснення є достатньо високими як для матеріалів такого класу.

З теорії TRIP-ефекту відомо, що фазове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит веде до збільшення швидкості деформаційного зміцнення та підвищує опір локалізації пластичної деформації. Тому в другій частині роботи було проведено порівняльний аналіз кривих деформаційного зміцнення зразків, що вивчалися. На рис. 3 наведені істинні криві деформаційного зміцнення на стиснення та проведено їх порівняння після охолодження та витримці при різних температурах для однакової тривалості витримки (2 години). В якості кількісної характеристики підвищення швидкості зміцнення в зразках, витриманих за  $T_{ox}$  350 °С, у порівнянні зі зразками, витриманими при  $T_{ox}$  310 °С, було використано коефіцієнт  $k$ , який є відношенням швидкості зміцнення при 350 °С до швидкості при 310 °С при даному ступені деформації. Значення цього коефіцієнту для різних параметрів випробування наведено в табл. 2.

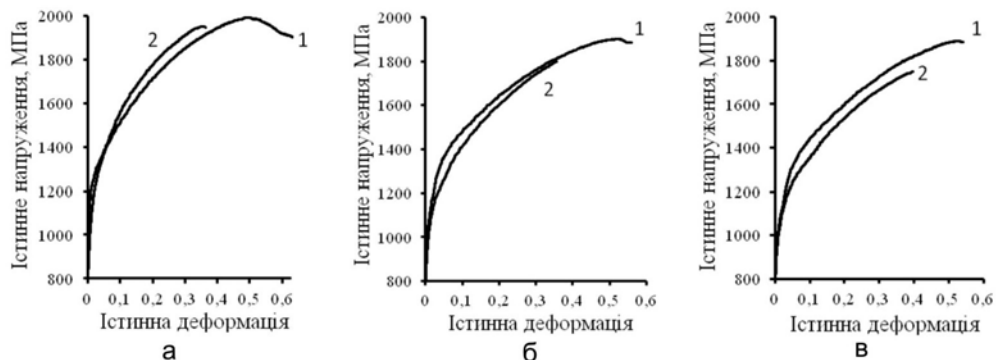


Рис. 3. Істинні криві напруження-деформація зразків бейнітного чавуну, випробуваних на стиснення при різних температурах: а – 20 °С; б – 50 °С; в – 100 °С; 1 –  $T_{ox}$  310 °С, 2 год; 2 –  $T_{ox}$  350 °С, 1 год.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта  $k$

$T_{випр.},$ °С	$\epsilon, \%$							
	1%	3%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
20	2,0	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0
50	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1
100	1,0	0,9	0,8	1,0	1,1	1,2	-	-

Як видно з табл. 2, швидкість зміцнення при більш низьких температурах випробування суттєво більша в матеріалі, витриманому при  $T_{ox}$  350 °С, ніж при 310 °С, але вже при температурі 100 °С різниця в швидкостях зміцнення практично зникає. Наведена на рис. 4 похідна була використана для оцінки схильності матеріалів до локалізації деформації за результатами випробування на стиснення. Для цього, згідно з рівнянням Консидера, на кожному графіку була визначена точка перетину кривої

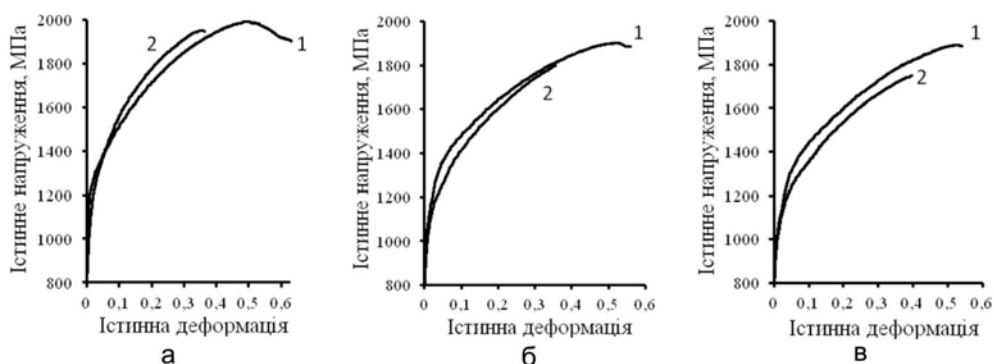


Рис. 4. Залежність швидкості зміцнення від деформації для зразків бейнітного чавуну, випробуваних на стиснення при різних температурах: а – 20 °С; б – 50 °С; в – 100 °С;  $T_{ox}$ : 1 – 310 °С, 2 год; 2 – 350 °С, 1 год; 3 – похідна від кривої 1; 4 – похідна від кривої 2.

зміцнення з її похідною. Значення деформації, при якій повинна відбуватись локалізація в досліджених зразках наведені на рис. 5.

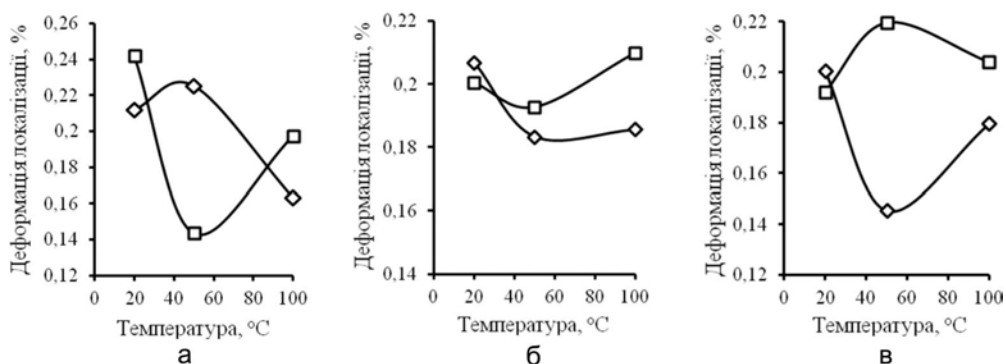


Рис. 5. Залежність деформації локалізації від температури випробувань для високоміцного чавуну, витриманому при  $T_{ox}$ :  $\diamond$  – 310 °С;  $\square$  – 350 °С; витримка: а – 1 год.; б – 2 год.; в – 3 год.

Отримані результати свідчать про те, що абсолютні значення деформації, яка відповідає моменту локалізації у всіх випадках досить великі і сягають ~ 20 %. Режим термообробки слабо впливає на цю характеристику. З літературних даних отриманих на TRIP-сталях [1 – 4] відомо, що при зменшенні температури випробувань спостерігається збільшення швидкості зміцнення на початкових ділянках деформації. Це співпадає з отриманими в даній роботі результатами. З іншого боку, з цих же публікацій відомо, що величина деформації, яка відповідає локалізації, змінюється з температурою немонотонно і максимальне значення відповідає 50 °С [3]. За результатами, отриманими нами на бейнітному чавуні, не було виявлено впливу температури випробування на деформацію локалізації.

Таким чином, TRIP-ефект, який спостерігається на бейнітних чавунах, впливає на характер кривих зміцнення, що можна пояснити близькістю температури фазового перетворення (згідно літературним даним, близько – 100 °С) до температур випробувань. Реалізація цього ефекту в

приповерхневих шарах сприяє їх різкому зміцненню і, як наслідок, значному підвищенню зносостійкості. Цей результат слід враховувати при експлуатації сільгосптехніки, оскільки вибраний температурний діапазон відповідає кліматичним умовам України.

### Література

1. Blondї R., Jimenez-Melero E., Zhao L., Wright J.P., Брьк E., Vander Zwaag S., van Dijk N.H. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading // *Materials Science & Engineering A* 618. – 2014. – P. 280 – 287.
2. Fu B., Yang W.Y., Wang Y.D., Li L. F., Sun Z.Q., Ren Y. Micromechanical behavior of TRIP-assisted multiphase steels studied with in situ high-energy X-ray diffraction // *Acta Materialia* 76. – 2014. – P. 342 – 354.
3. Yan F.K., Tao N.R., Archie F., Gutierrez-Urrutia I., Raabe D., Lu K. Deformation mechanisms in an austenitic single-phase duplex microstructured steel with nanotwinned grains // *Acta Materialia* 81. – 2014. – P. 487 – 500.
4. Wang M.-M. Nanolaminate transformation-induced plasticity–twinning-induced plasticity steel with dynamic strain partitioning and enhanced damage resistance // *Acta Materialia* 85. – 2015. – P. 216 – 228.

Одержано 18.11.16

**Т. О. Иващук, В. В. Холявко, С. М. Волощенко, Ю. М. Подрезов**

### **Деформационное упрочнение бейнитного чугуна при повышенных температурах**

#### **Резюме**

Проведен сравнительный анализ истинных кривых деформационного упрочнения при сжатии образцов из бейнитного чугуна, закаленных от температуры аустенизации 900 °С, с охлаждением в жидком олове при 310 °С и 350 °С и испытанных при температурах 20 – 100 °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 увеличении температуры испытания разница в упрочнении существенно снижается. Обнаруженный эффект объясняется температурной чувствительностью фазового превращения.

**T. Ivashchuk, V. Kholiyavko, S. Voloschenko, Yu. Podrezov**

### **Strengthening of bainitic cast irons at high temperature**

#### **Summary**

A comparative analysis of stress-strain hardening curves obtained in compressive tests at 20 – 100 °C is carried out for bainitic cast irons quenched from austenization temperature 900 °C in liquid tin at 310 °C and 350 °C. At room temperature testing sample's hardening rate is two times higher for the quenched at 350 °C sample that undergoes strain-induced phase transition. The difference in hardening rate decreases with increasing temperature. Observed phenomena is related to temperature sensitivity of the phase transition.