

К. О. Гогоєв¹
С. М. Волощенко¹
Ю. М. Подрезов¹
М. Г. Аскеров¹
М. В. Мінаков¹
Б. В. Шуригін¹

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ІЗОТЕРМІЧНОГО ГАРТУВАННЯ НА ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Досліджено вплив температури ізотермічного гартування на механічні властивості ADI матеріалів. Термообробка дослідних зразків відбувалася нагрівом вище температури перетворення феритної складової в аустеніт та ізотермічного гартування за температур від 280 до 380 °С. Як гартувальна середа використовувалось рідке олово. Вказаних діапазонах температур вивчались пластичні характеристики та параметри міцності зразків в залежності від режимів термообробки. Особливу увагу привернуто на параметри деформаційного зміцнення. Встановлено, що за температур ізотермічного гартування в діапазоні 330...360 °С під час пластичної деформації з'являється TRIP-ефект, що супроводжується високою швидкістю зміцнення матеріалу, за рахунок перетворення залишкового аустеніту в мартенсит. Зміцнення зразків під час пластичної деформації відбувається в 2 етапи. На першому етапі зміцнення відбувається традиційно за рахунок пластичної деформації залишкового аустеніту. Зі збільшенням навантаження основу зміцнення відіграє TRIP-ефект. Пластичні характеристики змінюються зі збільшенням температури гартування. За температури 280 °С міцність та твердість металу максимальна, а пластичні характеристики мінімальні. Оптимум механічних властивостей, разом з опором втомі, спостерігається в діапазоні температур 330...360 °С. Для деталей ґрунтообробної сільгосптехніки, які працюють за незначних навантажень (лапи культиваторів), має застосовуватись гартування на нижчий бейніт. В цьому випадку визначальну роль відіграє твердість.

Ключові слова: залишковий аустеніт, поверхневе зміцнення, модифікування, фазові перетворення, високоміцний чавун.

Вступ

Високоміцний чавун з кулястою формою графіту (ВЧШГ) — матеріал нового покоління, який поєднує високу міцність і задовільну пластичність. Великий вклад у створення цього матеріалу в кінці минулого сторіччя внесли українські вчені професор К. І. Ващенко та його учні, які працювали в КПІ і ІПЛ НАН України.[1]—[3]. Подальше вдосконалення цього матеріалу пов'язане з використанням спеціальної термічної обробки, яка отримала назву аустемперінга (austempering), а отриманий внаслідок такої обробки чавун названо ADI (Austempering Ductile Iron).

Ізотермічне гартування чавуну за температур 280...400 °С забезпечує формування аустро-феритної структури, яка схильна до розпаду під дією пластичної деформації з утворенням мартенситної фази. Цей особливий механізм зміцнення, який отримав назву TRIP-ефект (Transformation Induce Plasticity), сприяє підвищенню опору зношування завдяки утворенню високоміцного деформованого шару на поверхні тертя, підвищенню втомних характеристик завдяки утворенню стискаючих напружень в пластичній зоні тріщини, та покращенню демпфуючих властивостей завдяки утворенню в області мартенситного перетворення зворотних двійників [4].

Оскільки ADI є складним матеріалознавчим об'єктом, проблема досягнення необхідних службових характеристик потребує врахування багатьох чинників, здатних впливати на процес струк-

турутворення. Це дозволяє в широкому діапазоні варіювати технологічні параметри для отримання максимальних результатів. Зокрема попередніх роботах авторами визначено склад чавуну [4], [5], оптимізовано умови його отримання в литому стані, відпрацьовано режими термічної обробки [5], [6]; визначено оптимальний склад модифікаторів та розроблено технологію отримання модифікаторів шляхом прокатки порошків [7]; встановлені режими ізотермічного гартування за яких утворюється найбільша кількість залишкового аустеніту, схильного до розпаду при пластичному деформуванні [4], [8]; встановлені механізми впливу залишкового аустеніту на формування механічних властивостей та параметрів зношування бейнітних високоміцних чавунів [7], [9]. Це дозволило розробити технологічні принципи виробництва бейнітного чавуну для його застосування у виготовленні деталей змінного обладнання ґрунтообробної сільгосптехніки [7], [10], [11].

В вищезазначених роботах для визначення оптимальних технологічних параметрів гартування, за яких максимально реалізується TRIP-ефект, залучались сучасні методи рентгеноструктурного аналізу, оптичної трансмісійної та сканувальної мікроскопії. Це, безумовно, підвищило достовірність отриманих результатів. Проте, в реальних умовах базову інформацію про властивості ADI отримують з механічних випробувань. Згідно з вимогами міжнародного стандарту ASTM 897-90, розподілення ADI матеріалів за категоріями (grades) проводиться з огляду на п'ять основних механічних характеристик: твердість, HB, ударну в'язкість, K_{cu} , границю плинності, σ_{02} , границю міцності, σ_{max} , та деформацію до руйнування δ , (випробування на розтяг). Однак, у разі зміни технологічних параметрів (наприклад температури гартування) всі вищезазначені характеристики змінюються монотонно і за цими змінами важко визначити умови, за яких реалізується TRIP-ефект.

В роботі розглянуто вплив температури ізотермічного гартування на механічні властивості ADI матеріалів. Особливу увагу приділено деформаційному зміцненню, параметри якого безпосередньо пов'язані з мартенситним перетворенням під дією деформації.

Матеріал та методика

Дослідження проводились на зразках чавуну (3,44 % C; 2,62 % Si; 0,73 % Mn; 0,024 Cr; 0,54 % Cu; 0,71 % Ni). Хімічний склад забезпечував в основному перліто-феритну структуру металевої матриці, за твердості в литому стані на рівні 315...320 HB. Куляста форма графіту отримана за рахунок застосування модифікатора, який складався з 7,5 % Mg, 35 % SK25, 17 % Al. Структура чавуну створювалась в результаті аустенізуючого відпалу за 900 °C з витримкою протягом 30 хв та подальшого ізотермічного загартування в рідкому олові за температур 280, 310, 330, 350, 370 та 400 °C з витримкою протягом 90 хв.

На зразках, отриманих за різних режимів термообробки, проведено комплекс механічних випробувань. Випробування на розтяг та стиск виконувались на випробувальних машинах UTS-100 та CERAMTEST, вимірювання твердості — методом Брінеля, ударної в'язкості — на копрі КД-300.

Результати експериментів

В табл. 1 наведені результати механічних випробувань, які є результатом усереднення мінімум п'яти вимірювань.

Таблиця 1

Механічні властивості зразків ADI після ізотермічного гартування за різних температур

$T_{\text{в.в.тр.}}$, °C	σ_{02} , МПа	σ_m , МПа	δ , %	HB	K_{cu} , Дж/см ²	H/σ_{02}
280	1043	1432	2,4	447	49	0,428571
310	910	1237	3,4	397	51,5	0,436264
330	824	1116	2,8	345	45	0,418689
350	751	1041	3,2	347	55	0,462051
380	673	880	3,8	323	90	0,479941
400	602	876	1,1	357	26	0,593023

Зміна твердості з температурою має тенденцію до зменшення зі зростанням температури гартування, але різке зниження твердості спостерігається лише за низьких температур гартування. Мінімальні значення ударної в'язкості близько 30 Дж/см² демонструють вихідні зразки та зразки, загартовані за температури 400 °C. За температури гартування вище 380 °C матеріал демонструє найбільшу ударну в'язкість 90 Дж/см². Цю температуру слід розглядати, як вищу границю інтер-

валу де формується структура аустоперінгу. В інтервал температур гартування 350...280 °C ударна в'язкість дещо знижується, але залишається на рівні 55...45 Дж/см².

Границя плинності та границя міцності зменшуються з ростом температури ізотермного гартування. Важливо, що границя міцності змінюється з температурою гартування швидше, ніж границя плинності. Отримані значення деформації до руйнування для всіх структурних станів знаходяться в межах 2,5...4 %. Спостерігається тенденція до незначного підвищення з ростом температури гартування. Винятком є зразок, загартований за температури 400 °C, який демонструє аномально низьку рівномірну деформацію.

Узагальнюючи отримані результати, слід зауважити, що властивості матеріалів, загартованих за температури від 280 до 370 °C, вкладаються в 5 grades за класифікацією ASTM 897-90. Зразки загартовані на 400 °C знаходяться за межами регламентованих значень, що вказує на те, що ця термообробка не є ефективною для реалізації переваг аустоперінга.

З отриманих даних видно, що чутливість твердості до зміни температури гартування значно менша, ніж для границі плинності. Як наслідок, співвідношення між твердістю та границею плинності суттєво збільшується зі зниженням температури гартування. Цей ефект, як і швидша зміна руйнуючого напруження в порівнянні з границею плинності, пояснюється відмінностями в механізмах зміцнення матеріалів, загартованих за різних температур.

Характерні криві навантаження зразків, загартованих за температур 280 °C, 350 °C, а також вихідного не загартованого зразка, показані на рис. 1а. Очевидно, що на початковій частині діаграми навантаження швидкість зміцнення зразка, який загартований при 280 °C значно вище, ніж у зразка, що загартований при 350 °C, а останній зміцнюється швидше, ніж вихідний зразок. Такий характер зміцнення пояснює чутливість руйнуючої напруги до температури ізотермного гартування, але певною мірою відрізняється від попередніх даних авторів, де вища швидкість зміцнення в матеріалах, що загартовані на середній бейніт (тобто, саме за температури 350 °C), пов'язувалась з реалізацією TRIP-ефекту [7], [9]. Слід зазначити, що така особливість зміцнення зафіксована за умови достатньо великих ступенів попередньої деформації. На жаль, випробування на розтяг не дозволяють проаналізувати зміцнення за великих деформацій через невелику деформацію до руйнування. Тому для аналізу закономірностей зміцнення за великих деформацій використана м'якша схема випробування — тестування на стиснення. Криві навантаження зразків, випробуваних на стиснення показані на рис. 1б. Ці діаграми використані для розрахунку стандартних механічних властивостей досліджених сплавів при стисненні. Механічні властивості зразків ADI, випробуваних на стиснення, подані в табл. 2.

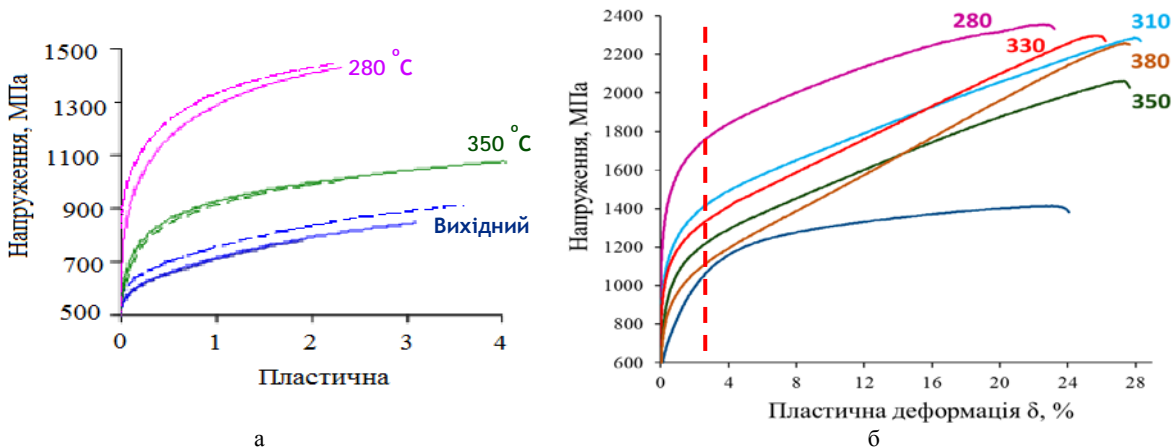


Рис. 1. Криві зміцнення: а — під час розтягу; б — під час стиснення зразків ADI, загартованих за різних температур

Порівняльний аналіз результатів випробувань на розтяг та стиснення показав, що характер зміни границі плинності за температурою в обох випадках схожий, хоча абсолютні значення у випробуваннях на стиснення приблизно на 10 % вищі, що свідчить про наявність SD-ефекту, який характеризує відмінність (stress differential) в деформуючому напруженні при розтягу та стисненні. Найчастіше цей ефект спостерігається в дисперсно-зміцнених матеріалах і пов'язаний з утворенням пор навколо дисперсних часток з концентрацією дислокацій поблизу границь розподілу. Зважаючи на наявність графітових включень, цей механізм може працювати в чавунах зі сфероїдезованим графітом.

Механічні властивості зразків ADI, випробуваних на стиснення

$T_{\text{в.випр.}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{02}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{max}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\sigma_{08}, \text{МПа}$	H_{cp}	H/σ_{08}	$\theta, \text{МПа}$
вихідні	737,6	1697,9	24,96	849	310	0,36	—
280	1020,0	2217,7	12,85	1436	447	0,31	3130
310	876,5	2338,9	24,33	1197	399	0,33	3420
330	732,0	2229,6	22,29	1097	360	0,32	4340
350	739,0	1961,1	23,01	1009,75	344	0,34	3480
380	681,0	2116,7	26,77	913	323	0,35	4610
400	653,0	2009,6	16,81	981,5	360	0,36	—

Значні зміни співвідношення H/σ_{02} , подані в табл. 1, можна пояснити, беручи до уваги, що співвідношення між твердістю та напруженням плинну є сталою величиною лише у разі 8 % деформації. За такої деформації коефіцієнт пропорційності між цими величинами дорівнює 0,3. Випробування на стиснення дозволяють визначити напруження плинну у разі деформації 8 % та визначити співвідношення між цим напруженням та твердістю. Наведені в табл. 2 експериментально визначені значення цього співвідношення близькі до 0,3 та слабо змінюються з температурою гартування. Тобто спостерігається аномальна зміна співвідношення між твердістю та границею плинності, пов'язана з різними законами зміцнення в матеріалах, що загартовані за різних температур.

Оскільки при стисненні схема навантаження «м'якша» ніж при розтягу, деформація до руйнування значно більша і для всіх температур ізотермічної витримки змінюється в діапазоні 25...30 %. Це дозволяє проаналізувати вплив умов гартування на закономірності зміцнення в широкому інтервалі деформацій. Порівняння кривих зміцнення, отриманих під час випробувань на розтяг (рис. 1а) та початкової (виокремлено пунктиром) ділянки кривої зміцнення при стисненні (рис. 1б) вказує на однаковий характер впливу температури гартування на зміцнення: на початковій частині діаграм навантаження: швидкість зміцнення зразків тим вище, чим нижче температура гартування. Проте, далі ця тенденція змінюється на протилежну. Зі збільшенням ступеня деформації стисненням (приблизно за межами пунктиру на рис. 1б) кут нахилу діаграм навантаження виявляється вищим у зразків, загартованих за високої температури.

В роботі [12] А. Нафаль першим звернув увагу на особливу поведінку кривих зміцнення (ADI) матеріалів. Обробивши криву напруження-деформація в логарифмічних координатах $\ln \sigma - \ln \epsilon$, він виявив зміну показника деформаційного зміцнення зі збільшенням деформації (рис. 2а). Експериментальні дані апроксимуються двома прямими в усьому діапазоні напруги. При пластичній деформації ϵ близько 1 % фіксується збільшення нахилу цієї залежності. З аналізу кривих зміцнення в роботі [12] дійшли висновку, що початковий сегмент залежності $\ln \sigma - \ln \epsilon$ відповідає механізму деформації залишкового аустеніту. За вищих деформацій механізм змінюється завдяки деформаційним процесам, викликаним мартенситними перетвореннями, які активізуються, коли деформація аустеніту вичерпана. Збільшення показника n зі збільшенням деформації викликане деформаційно індукованим мартенситним перетворенням в ході випробування на розтяг. Збільшення ступеня пластичної деформації стимулює мартенситне перетворення, що призводить до росту величини n з деформацією. Тобто, передбачена А. Нафалем зміна механізму зміцнення, яке відбувається за малих деформацій, повинна приводити до більшої інтенсивності зміцнення в матеріалах зі середнім бейнітом, де TRIP-ефект інтенсивніше.

В наших експериментах на стиснення точніші значення деформації, що відповідає зміні механізму зміцнення, визначені з аналізу чутливості швидкості зміцнення до деформації. Значення швидкості зміцнення визначались через відповідну похідну на діаграмах стиснення (рис. 1б).

Початкова (0—2 %) частина залежності швидкості зміцнення від деформації зразків, загартованих за різних температур і випробуваних на стиснення, показана на рис. 2б. На початковій частині діаграм швидкість зміцнення вища у зразків загартованих за нижчої температури, але у разі істинної деформації $\epsilon > 0,01$, вищу швидкість зміцнення демонструють зразки, загартовані за вищих температур, оскільки вони мають схильність до мартенситного перетворення. Зміна механізму зміцнення відбувається за відносної деформації 1 %, що добре узгоджується з результатами роботи [12].

За великих ступенів деформації діаграми навантаження добре апроксимуються прямими лініями. Їхній кут нахилу $\theta = d\sigma/de$ характеризує швидкості зміцнення в області деформацій 5...25 %. З даних табл. 2 видно, що швидкість зміцнення зразка, який загартований за 330 °С приблизно в півтора рази вища, ніж у зразка, загартованого за температури 280 °С, завдяки тому, що відбувається мартенситне перетворення під час деформації. Таке підвищення швидкості зміцнення пояснюється зміною механізму зміцнення від дислокаційного (за малих деформацій) до TRIP-ефекту (за великих деформацій).

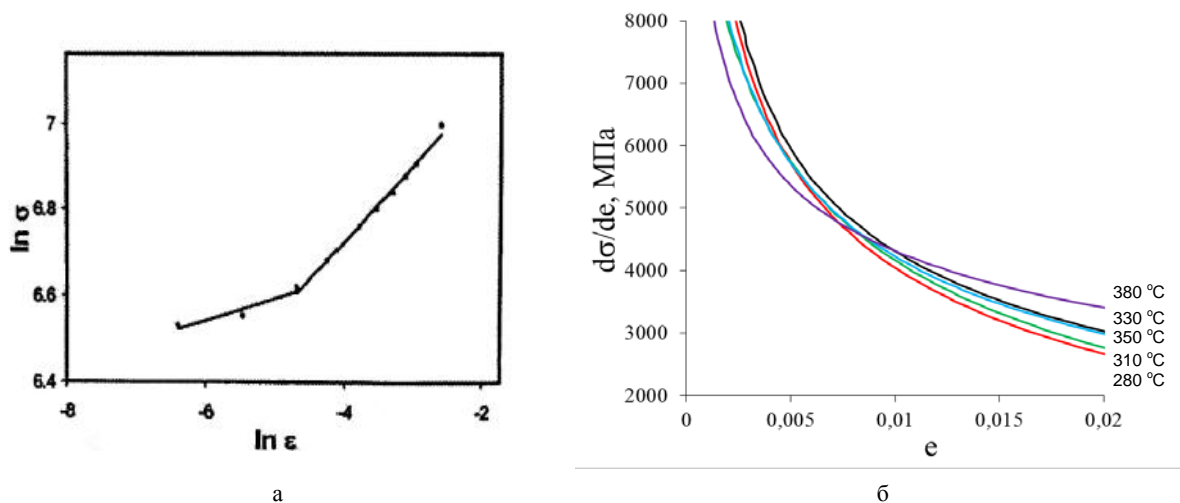


Рис. 2. Криві зміцнення ADI, перераховані в координатах: а — $\ln \sigma - \ln \epsilon$ [12]; б — $d\sigma/de - \epsilon$

Висновки

1. Механічні властивості дослідженого бейнітного чавуна, загартованого за різних температур задовольняють вимогам ASTM 897-90 крім зразків загартованих за температури 400 °С. Твердість, границя плинності, границя міцності зменшуються з підвищенням температури гартування, пластичність та ударна в'язкість збільшується.

2. На кривих зміцнення при стисненні спостерігається дві ділянки: в області малих деформацій швидкість зміцнення тим вища, чим нижча температура гартування, в області великих деформацій, навпаки — швидкість зміцнення значно вища в матеріалах, загартованих за вищих температур. Ефект пояснюється зміною механізму зміцнення від дислокаційного — за малих деформацій до TRIP-ефекту за великих деформацій.

3. Максимальний прояв TRIP-ефекту спостерігається за температур гартування 330...350 °С. Як наслідок, зразки, загартовані за цих температур демонструють найкращий опір втомі, мінімальне зношування та підвищену схильність до демпфірування.

4. Температуру гартування 330...350 °С доцільно використовувати під час виготовлення деталей землеробно-технічної техніки (лемеші, розрихлювачі тощо), що експлуатуються за помірного навантаження, близько 1 МПа). В цьому випадку різке підвищення зносостійкості відбувається завдяки реалізації TRIP-ефекту в деформованому приповерхневому шарі виробів.

5. Наведені результати натурних випробувань свідчать про безумовну перспективність використання бейнітного чавуну для виготовлення деталей сільгосптехніки. Порівняння результатів механічних випробувань з експлуатаційними характеристиками матеріалів, отриманих за різними режимами гартування, дозволяє вдосконалити та оптимізувати умови термообробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] К. И. Вашенко, и Л. Софрони, *Магнєвий чугун*. М., Киев: Машгиз, 1960, 485 с.
- [2] М. В. Волощенко, *Термическая обработка высокопрочного чугуна*. Киев: Гостехиздат УССР, 1961, 97 с.
- [3] В. Л. Найдєк, В. П. Гаврилюк, и И. Г. Неижко, *Бейнітний високопрочний чугун*. Киев, Украина, 2008, 140 с.
- [4] К. О. Гогаєв, Ю. М. Подрезов, и С. М. Волощенко, «Новые области использования высокопрочных чугунов,» в *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*, т.1, Киев, Украина: Академпер, 2018, 652 с.
- [5] С. М. Волощенко, «Бейнітний високоміцний чавун для ґрунтообробної техніки,» *Агроекспертиза*, № 7, с. 50-51, 2006.
- [6] С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, М. Г. Аскеров, і В. Т. Варченко, «Дослідження властивостей високоміцного чавуну для лемешів в залежності від хімічного складу та режимів термообробки,» *Зб. наук. праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії,»* Краматорськ. № 1 (11), с. 56-61, 2008.

- [7] С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, О. І. Шейко, М. Г. Аскеров, «Спосіб виготовлення модифікатора», *Патент України № 88530*, Бюл. № 20, 2009.
- [8] С. М. Волощенко, В. В. Непомнящий, М. Г. Аскеров, Т. В. Мосина, и Н. Д. Бега, «Влияние термической обработки на фазовый состав и свойства высокопрочного чугуна», *Сталь*, № 8, с. 64-69, 2013.
- [9] К. А. Гогаєв, Ю. Н. Подрезов, С. М. Волощенко, К. Є. Гринкевич, И. В. Ткаченко, и М. В. Коваленко, «Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна», *Проблеми тертя та зношування*, № 4, 2017.
- [10] С. С. Антоненко, С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, О. М. Миропольский, Г. М. Резинка, і Г. І. Семчук, «Робочий орган культиватора», *Патент України № 99964*. Бюл. № 12 05.06.15.
- [11] К. О. Гогаєв, і С. М. Волощенко, «Бейнітний чавун для швидкозношуваних змінних деталей сільгосптехніки», *Вісник Національної академії наук України*, № 9, с. 64-68, 2015.
- [12] Adel Nofal, “Advances in the Metallurgy and Applications of ADI,” *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, vol. 2, Issue 1, January 2013.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.08.2020

Гогаєв Казбек Олександрович — д-р техн. наук, професор, завідувач відділу № 10, e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua ;

Волощенко Сергій Михайлович — д-р техн. наук, провідний науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу № 10, e-mail: volosch@ipms.kiev.ua ;

Подрезов Юрій Миколайович — д-р ф.-м. наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу № 8, e-mail: yupodrezov@ukr.net ;

Аскеров Мукафат Гейбат огли — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу № 10, e-mail: mukafatask@gmail.com ;

Мінаков Микола Веніамінович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу № 8, e-mail: vbyfrjd86@gmail.com ;

Шуригін Борис Вікторович — науковий співробітник, науковий співробітник відділу № 8; e-mail: bvsch@i.ua

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

K. O. Gogaev¹
S. M. Voloshchenko¹
Y. M. Podrezov¹
M. G. Askerov¹
M. V. Minakov¹
B. V. Shurygin¹

Influence of Isothermal Hardening Temperature on Strengthening of High-Strength Irons during Deformation

¹Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine, Kyiv

The influence of isothermal hardening temperature on mechanical properties of ADI materials is investigated. Heat treatment of the experimental samples consisted of heating above the temperature of conversion of the ferrite component into austenite and isothermal hardening at temperatures from 280 to 380 °C. Liquid tin was used as the quenching medium. In the specified temperature ranges, the plastic characteristics and strength parameters of the samples depending on the heat treatment modes were studied. Particular attention is paid to the parameters of deformation hardening. It is established that at isothermal hardening temperatures in the range of 330...360 °C during plastic deformation, the TRIP effect appears, the appearance of which is accompanied by a high rate of hardening due to the conversion of residual austenite into martensite. Strengthening of samples at plastic deformation has 2 stages. At the first stage, the hardening takes place according to the traditional mechanism due to the plastic deformation of residual austenite. With increasing load, the basis of strengthening is the TRIP effect. Plastic characteristics change with increasing tempering temperature. At 280 °C, the strength and hardness of the metal is maximum, and plastic characteristics are minimal. The optimum mechanical properties, including fatigue resistance, is observed in the temperature range 330...360 °C. For parts of tillage machinery that work at low loads (cultivator legs) should be used hardening on the lower bainite. In this case, the hardness plays a more important role.

Keywords: residual austenite, surface hardening, modification, phase transformations, high-strength cast iron.

Gogaev Kazbek A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department No. 10, e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua ;
Voloshchenko Sergey M. — Dr. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Leading Researcher of the Department No. 10,
 e-mail: volosch@ipms.kiev.ua ;

Podrezov Yuriy M. — Dr. Sc. (Phys-Math.), Senior Researcher, Head of the Department No. 8, e-mail:
 yupodrezov@ukr.net ;

Askerov Mukafat G. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher of the Department No. 10, e-mail:
 mukafatask@gmail.com ;

Minakov Mykola V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher of the Department No. 8, e-mail:
 vbyfrjd86@gmail.com ;

Shurygin Boris V. — Researcher, Researcher of the Department No. 8, e-mail: bvsch@i.ua

К. А. Гогаев¹
С. М. Волощенко¹
Ю. Н. Подрезов¹
М. Г. Аскеров¹
Н. В. Минаков¹
Б. В. Шуригин¹

Влияние температуры изотермической закалки на упрочнение высокопрочного чугуна при деформации

¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев

Исследовано влияние температуры изотермической закалки на механические свойства ADI материалов. Термообработка опытных образцов проходила при нагреве выше температуры превращения ферритной составляющей в аустените и изотермической закалки при температурах от 280 до 380 °С. В качестве закалывающей среды использовалось жидкое олово. В указанных диапазонах температур изучались пластические характеристики и параметры прочности образцов в зависимости от режимов термообработки. Особое внимание уделено параметрам деформационного упрочнения. Установлено, что при температурах изотермического закалывания в диапазоне 330...360 °С при пластической деформации проявляется TRIP-эффект, появление которого сопровождается высокой скоростью упрочнения за счет преобразования остаточного аустенита в мартенсит. Упрочнение образцов при пластической деформации происходит в 2 этапа. На первом этапе упрочнение проходит традиционно, за счет пластической деформации остаточного аустенита. При увеличении нагрузки основу упрочнения играет TRIP-эффект. Пластические характеристики меняются с увеличением температуры закалки. При 280 °С прочность и твердость металла максимальная, а пластические свойства минимальны. Оптимум механических свойств, в том числе сопротивление усталости, наблюдается в диапазоне температур 330...360 °С. Для деталей почвообрабатывающей сельхозтехники, работающих при незначительных нагрузках (лапы культиваторов) нужно применять закалывание на нижний бейнит. В этом случае определяющую роль играет жесткость.

Ключевые слова: остаточный аустенит, поверхностное упрочнение, модифицирование, фазовые превращения, высокопрочный чугун.

Гогаева Казбек Александрович — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом № 10, e-mail: gogaev@ipms.kiev.ua ;

Волощенко Сергей Михайлович — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела № 10, e-mail: volosch@ipms.kiev.ua ;

Подрезов Юрий Николаевич — д-р ф.-м. наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом № 8, e-mail: yupodrezov@ukr.net ;

Аскеров Мукафат Гейбат оглы — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела № 10, e-mail: mukafatask@gmail.com ;

Минаков Николай Вениаминович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела № 8, e-mail: vbyfrjd86@gmail.com ;

Шуригин Борис Виктрович — научный сотрудник, научный сотрудник отдела № 8; e-mail: bvsch@i.ua