

ENGINEERING SCIENCES

ВПЛИВ УМОВ ІЗОТЕРМІЧНОГО ГАРТУВАННЯ НА ПСЕВДОПРУЖНУ ПОВЕДІНКУ БЕЙНІТНОГО ЧАВУНУ¹*д.т.н., проф. Подрезов Ю. М.,*²*Романко П. М.,*³*к.т.н., доц. Холявко В. В.,*⁴*Марченко Н. М.**Україна, м. Київ, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України*¹*завідувач відділом фазових перетворень,*²*м.н.с. відділу фізичного матеріалознавства легких сплавів,*⁴*м.н.с. відділу фазових перетворень.**Україна, м. Київ, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*³*доцент кафедри фізики металів*DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31012019/6293**ARTICLE INFO****Received:** 09 November 2018**Accepted:** 14 January 2019**Published:** 31 January 2019**KEYWORDS**ADI cast iron,
isothermal quenching,
bainite structure,
damping,
pseudo-elastic twins,
hardening,
tendency to dampening**ABSTRACT**

Application of ductile cast iron ADI is feasible and cost-effective, provided that there is a clear understanding of the mechanisms for the formation of their high complex mechanical properties. The use of such materials for the production of variable parts of machinery, or in other units of automobile and machine building will significantly extend the life of the equipment. It is established that the level of mechanical characteristics of the ADI cast iron varies in full accordance with the theoretical concepts of the influence of the tempering temperature on the formation of mechanical properties of such materials. The previous plastic deformation does not affect the mechanism of formation of pseudo-elasticity. The tendency to dampening increases with an increase in the temperature of isothermal quenching. The damping behavior of a material is a consequence of the formation of pseudo-elastic twins in the structure of the transformed martensite.

Citation: Подрезов Ю. М., Романко П. М., Холявко В. В., Марченко Н. М. (2019) Vplyv Umov Izotermichnoho Hartuvannia na Pseudoprzhnu Povedinku Beinitnoho Chavunu. *World Science*. 1(41), Vol.1. doi: 10.31435/rsglobal_ws/31012019/6293

Copyright: © 2019 Подрезов Ю. М., Романко П. М., Холявко В. В., Марченко Н. М. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

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 і його учні, які працювали в Київському політехнічному інституті та Інституті проблем матеріалознавства НАН України, а також дослідники Дніпропетровської металургійної академії під керівництвом академіка Ю.М.Тарана - Жовніра. Подальше вдосконалення цього матеріалу пов'язане з використанням спеціальної термічної обробки, яка отримала назву аустемперінга (austempering), а отриманий внаслідок такої обробки чавуну було названо ADI (austempering ductile iron). Ця термообробка полягає в ізотермічному гартуванні чавуну при температурах 280°C – 400°C, що

забезпечує формування бейнітної структури, зі значною кількістю залишкового аустеніту, який схильний до розпаду під дією пластичної деформації з утворенням мартенситної фази [1]. Таке перетворення сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей виробів, що працюють в умовах складного навантаження, зокрема змінних деталей землеоброблювальної техніки [2, 3].

ADI матеріали демонструють більш високий опір зношуванню завдяки зміцненню високовуглецевим аустенітом, який перетворюється в мартенсит, створюючи високоміцне середовище в приповерхневому шарі [1, 4], також високий опір втомі в порівнянні з іншими чавунами (сірим, метастабільним, високоміцним) [3, 5], високий опір динамічному навантаженню [1,6]. Такий комплекс властивостей забезпечує конкурентну спроможність високоміцних чавунів у порівнянні з іншими промисловими сталями. Температура ізотермічного гартування впливає на формування структури і, як наслідок, на механічні та службові характеристики ADI матеріалів. В попередніх роботах авторів [3, 7] було продемонстровано вплив температури гартування на характеристики зношування в умовах, наближених до параметрів експлуатації лоп культиваторів та лемішей плугів.

Враховуючи, що змінні елементи конструкцій культиваторів та плугів працюють при постійному динамічному навантаженні, ще однією важливою характеристикою, що впливає на їх працездатність, окрім міцності та зношування, є схильність до демпфування статичних та динамічних навантажень, що характерно для матеріалів, які демонструють мартенситне перетворення під дією пружної або пластичної деформації. Дослідженню параметрів демпфування ADI чавуну й присвячена дана робота.

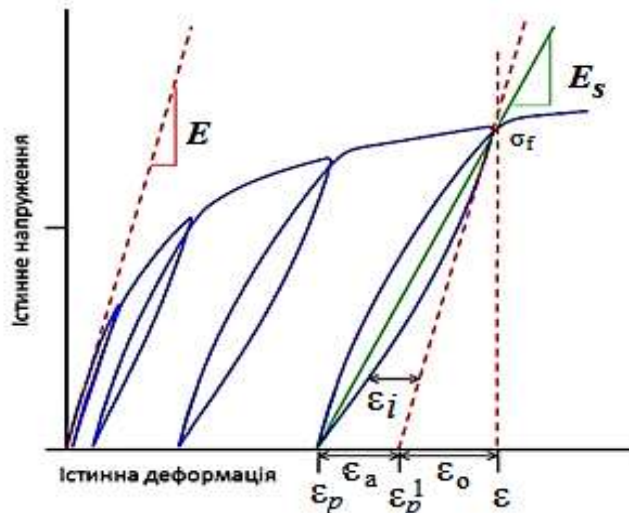
Матеріали та методика досліджень. В роботі досліджувався високоміцний чавун наступного складу: (3,2 ÷ 3,4) % C, (1,4 ÷ 1,6) % Si, (0,2 ÷ 0,3) % Mn, (0,01 ÷ 0,02) % Cr, 0,18 % Mo, 0,3 % Cu, 0,4 % Ni, 0,02 % P, S < 0,02 %. Куляста форма графіту була отримана за рахунок застосування модифікатора, який складався з 7,5 % Mg, 35 % СК25, 17 % Al, 9 % SiBa (20 Ba), 17,5 % Fe, 12 % модифікатору-флюсу «Рефтокон» та 9% РЗМ (ФС30РЗМ30). Модифікатори виготовлялись прокатуванням порошкових сумішей за технологією, яка описана в роботах [8, 9]. Бейнітна структура чавуну створювалась в результаті аустенізуючого відпалу при 880°C з витримкою протягом 40 хв та подальшого ізотермічного загартування в рідкому олові при температурах 280°C, 300°C та 340°C з витримкою протягом двох годин.

Оскільки динамічні навантаження в елементах конструкцій відбуваються з відносно малою частотою але при достатньо великих навантаженнях в роботі використано квазістатичний метод визначення схильності до демпфування [10]. Ця методика передбачає статичне випробування зразка на одновісний розтяг з пульсуючим циклом «навантаження – розвантаження» на різних ділянках кривої зміцнення та реєстрацією квазіпружних гістерезисних петель, площа яких характеризує здатність матеріалу розсіювати енергію. Запропонований метод є особливо цікавим для матеріалів, що демонструють мартенситне перетворення під час деформації, оскільки кількість мартенситу змінюється під час деформування та залежить від структурного стану матеріалу, який визначається температурою ізотермічного гартування.

В виконаних експериментах зразки для механічних випробувань мали форму циліндра з діаметром $\varnothing 3$ мм і довжиною робочої частини $l_0 = 15$ мм. Експерименти на розтяг виконувалися згідно стандарту ДСТУ EN10002 – 1:2006, зі швидкістю деформації 10^{-3} с^{-1} на машині 1246-2300/2 конструкції НИКИМП. Видовження фіксувалося тензометричним датчиком безпосередньо з робочої частини зразка. Конструкція тензометра дозволяла вимірювати деформацію зразка при кімнатній та підвищених температурах з чутливістю за деформацією не гірше $2 \cdot 10^{-5}$ та вимірювати модуль пружності з похибкою не більше 2 %.

Демпфуючу здатність матеріалу визначали з експериментів на розтяг методом вимірювання статичної петлі гістерезису [10]. Для отримання гістерезисної петлі, зразок після певної пластичної деформації повністю розвантажувався до $\sigma = 0$ з такою ж швидкістю, як і при навантаженні, після чого повторно навантажувався з цією ж швидкістю. Ця операція повторювалась багаторазово при різних попередніх деформаціях. На рис. 1 схематично зображена деформаційна крива з гістерезисними петлями.

Враховуючи симетричний характер гістерезисної петлі, по кривим наведеним на рис. 1 достатньо просто розрахувати традиційні характеристики псевдопружності, які запропоновані в роботах [12 - 14]: псевдопружну деформацію ε_i , пружну деформацію ε_0 , повну деформацію $\varepsilon_a + \varepsilon_0$, ефективний модуль Юнга E_s , та проводити порівняльний аналіз цих параметрів (рис. 2). Крім того, на лінійній ділянці кожної псевдопружної петлі можна визначити модуль пружності E , та прецизійну границю пружності ($\sigma_{0,002}$), яка відповідає початку відхилення від класичної (лінійної) пружності.



E — модуль пружності, σ_f — деформуюче напруження на початку розвантаження, ϵ — повна деформація, ϵ_p — істинна пластична деформація; ϵ_i — псевдопружна деформація при розвантаженні; ϵ_a — повна псевдопружна деформація; E_s — ефективний модуль Юнга.
 Рис.1. Схематична деформаційна крива з гістерезисними петлями [11]

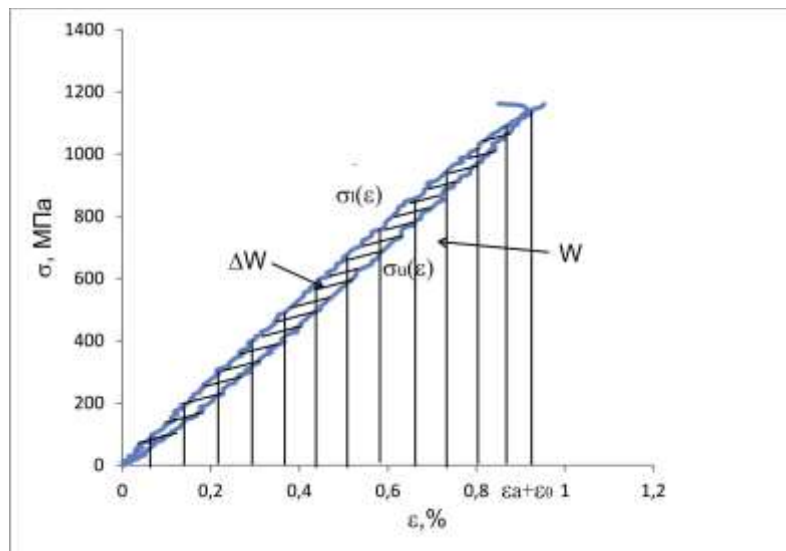


Рис.2. Розрахунок відносної здатності деформованого матеріалу накопичувати пружну енергію за рахунок пружного двійникування на прикладі чавуну, загартованого при 340 °С, та попередньої деформації $\epsilon_p = 1,98 \%$.

В разі утворення псевдопружних петель, які характеризують розсіяння енергії при деформації, схильність до демпфування може бути охарактеризована відносною здатністю деформованого матеріалу накопичувати пружну енергію за рахунок пружного двійникування, як відношення площі петлі до подвоєного амплітудного значення пружної енергії [10].

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{(\int_0^{\epsilon_a + \epsilon_0} \sigma_l(\epsilon) d\epsilon - \int_0^{\epsilon_a + \epsilon_0} \sigma_u(\epsilon) d\epsilon)}{\int_{\epsilon_a + \epsilon_0}^0 \sigma_l(\epsilon) d\epsilon}, \tag{1}$$

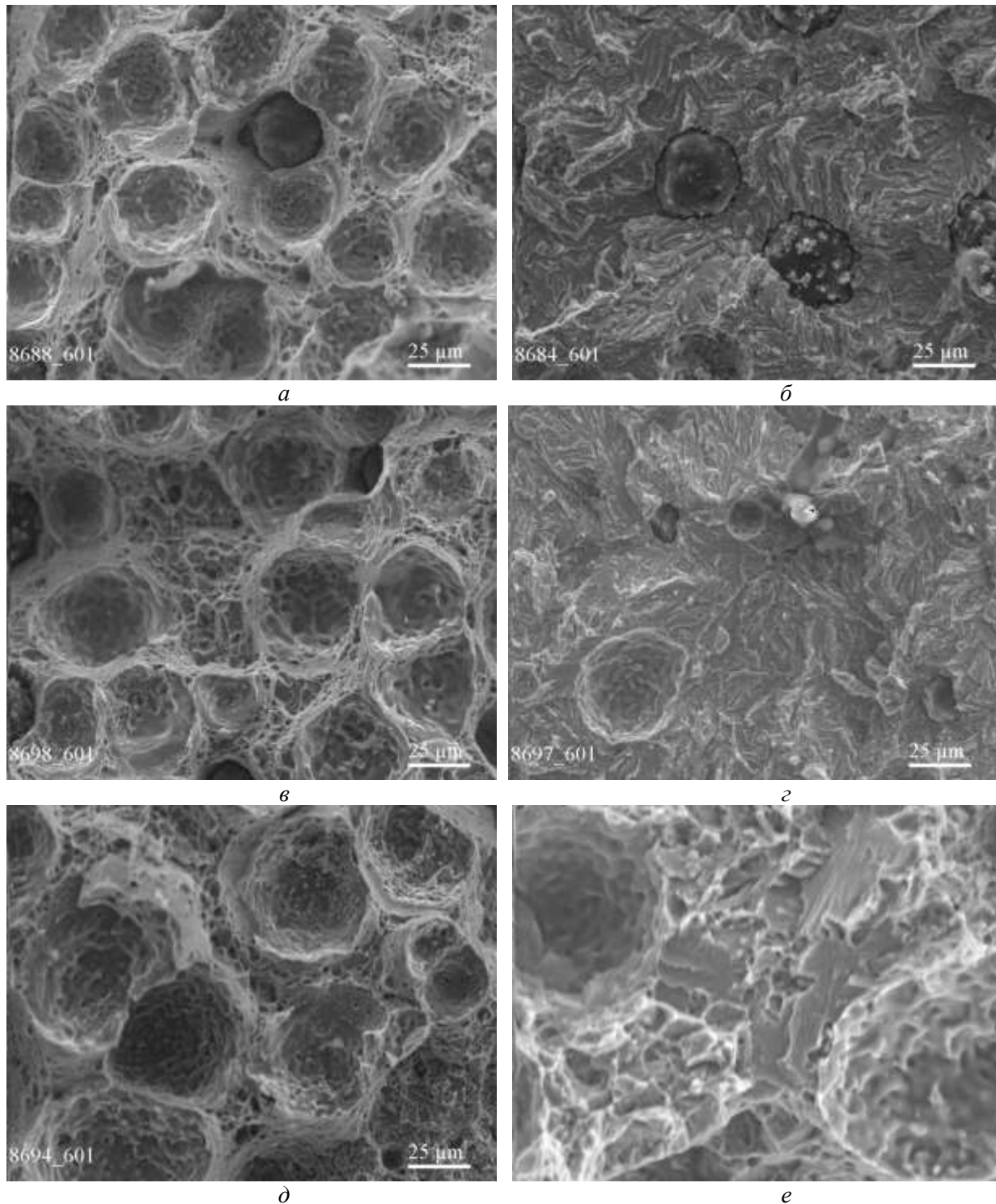
де: ΔW — енергія затрачена на передвійникування; W — загальна питома пружна енергія, що накопичується матеріалом.

Результати експериментів та їх обговорення. Перед початком досліджень демпфуючих властивостей ADI чавуну було необхідно визначити рівень його базових механічних характеристик. В табл. 1 наведено результати статичних випробувань досліджених зразків на одновісний розтяг. Отримані результати знаходяться у повній відповідності до теоретичних уявлень про вплив температури гартування на формування механічних властивостей ADI чавуну [16, 17]: границя плинності зменшується зі збільшенням температури гартування, а пластичність збільшується.

Таблиця 1 – Механічні характеристики ADI чавуну

Температура ізотермічного гартування, T_{it} , $^{\circ}\text{C}$	Границя плинності, σ_{02} , МПа	Границя міцності, σ_B , МПа	Пластична деформація, $\epsilon_{пл}$, %	Модуль Юнга, E , ГПа
280; 2 год	1129	1393	1,2	157
300; 2 год	1016	1178	1,3	151
340; 2 год	895	1090	2,9	149

Результати фрактографічного аналізу наведено на рис. 3.



а – 280 $^{\circ}\text{C}$, ямкове руйнування; *б* – 280 $^{\circ}\text{C}$, ділянки сколу; *в* – 300 $^{\circ}\text{C}$, ямкове руйнування; *г* – 300 $^{\circ}\text{C}$, ділянки сколу; *д* – 340 $^{\circ}\text{C}$, ямкове руйнування; *е* – 340 $^{\circ}\text{C}$, ділянки сколу.

Рис. 3. Поверхні руйнування ADI чавунів, ізотермічно загартованих при різних температурах

На поверхні руйнування всіх структурних станів переважає ямковий рельєф та видно частинки кулястого графіту. Але інколи зустрічаються ділянки, що руйнуються сколом, що вказує на наявність більш крихкого мартенситу. Кількість цих ділянок збільшується при підвищенні температури ізотермічної витримки. Такі структурні зміни пояснюються тим, що при більш високих температурах дифузійна рухливість атомів заліза вище, й процес перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$ на перших етапах іде активніше. Тим не менш, основною рушійною силою розпаду аустеніту є градієнт концентрації вуглецю в середині обох фаз. Чим глибше в γ -фазу проростають зерна α -фази, тим меншим він стає на границі розподілу обох фаз, що уповільнює процес розпаду. Таким чином, ізотермічна витримка при температурах $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 340\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до збереження більшої кількості аустеніту, який при подальшій пластичній деформації перетворюється в крихкий мартенсит [16]. Цей результат співпадає з отриманими нами в попередніх роботах даними [18] про розпад залишкового аустеніту в мартенсит, в яких методами рентгенівських досліджень було показано, що саме середній бейніт демонструє найбільшу частку перетворень залишкового аустеніту в мартенсит під дією пластичної деформації.

На рис. 4 наведено деформаційні криві в координатах «напруження – деформація» з петлями гістерезису, які були отримані при дослідженні ADI чавуну, ізотермічно загартованого при різних температурах.

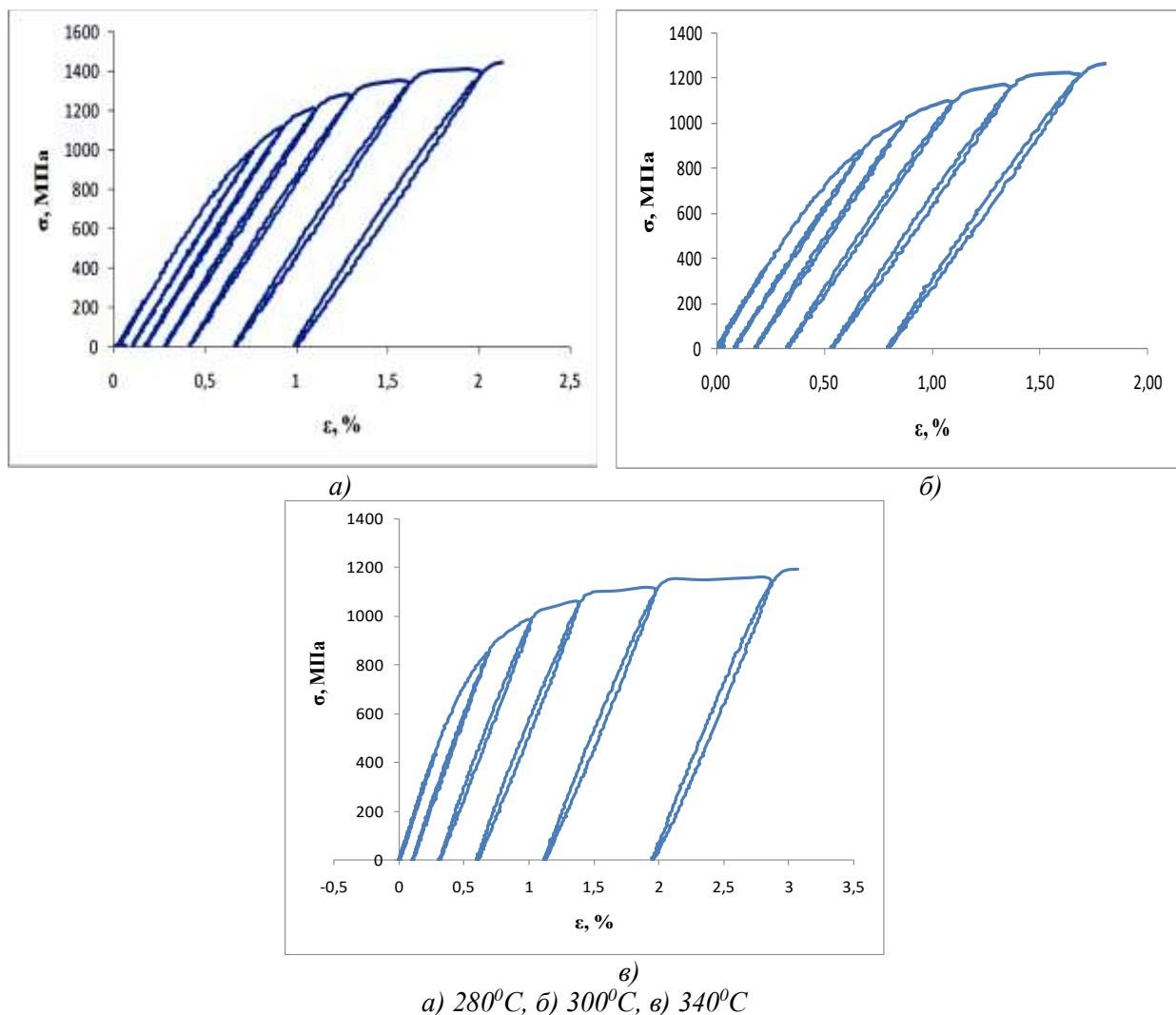


Рис. 4. Деформаційні криві з петлями гістерезису ADI чавуну, ізотермічно загартованого при різних температурах

У всіх трьох досліджених випадках простежується загальна закономірність: розмір петлі збільшується із зростанням ступеню попередньої пластичної деформації.

Розрахунок відносної здатності деформованого матеріалу накопичувати пружну енергію за формулою (1) демонструє змінність демпфуючої здатності ADI чавуну в залежності від ступеню деформації для різних температур гартування (див. рис. 5).

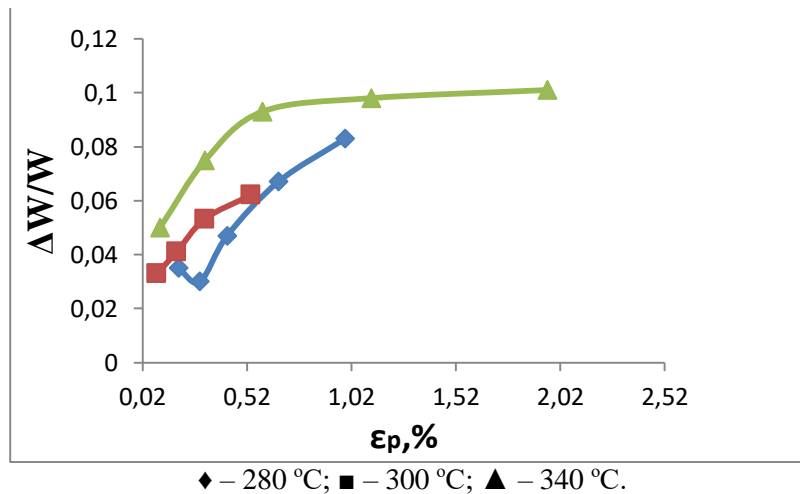


Рис. 5. Залежність параметру $\Delta W/W$, від ступеню попередньої деформації ϵ_p , для ADI чавуну, загартованого при різних температурах

Результати експерименту показують, що у всіх випадках схильність до демпфування різко збільшується зі збільшенням ступеню деформації. При цьому ізотермічне загартування при температурах 280⁰С та 300⁰С, як зазначають автори [3], призводить до формування дрібнодисперсної структури нижнього бейніту. Саме тому схильність до демпфування цих зразків майже однакова. В той же час, ізотермічне гартування при температурі 340⁰С сприяє формуванню середнього бейніту, який має менш дрібнодисперсну пластинчасту структуру та містить більшу кількість залишкового аустеніту, що підвищує схильність до демпфування, порівняно з нижнім бейнітом.

Для порівняння псевдопружності ADI чавуну при різних ступенях попередньої деформації, висхідні ділянки пружних петель переміщувались до нульового значення деформації без урахування попередньої пластичної складової. Розрахунок діаграм псевдопружності показує, що у всіх трьох досліджених випадках висхідна частина петель, які отримані після різних ступенів попередньої деформації практично співпадає. Відповідні криві наведено на рис.6.

Для прецизійного дослідження псевдопружної складової з отриманих діаграм спочатку була виділена ділянка повної, зворотної, пружної деформації. Для цього від сумарної деформації віднімалась пластична складова, ($\epsilon - \epsilon_p$) (рис. 1). Оскільки, пружна складова деформації зразка, значно перевищує псевдо пружну, для прецизійного дослідження зміни напруження в області псевдо пружності з отриманих діаграм $\sigma - (\epsilon_a + \epsilon_0)$ псевдопружна складова виокремлювалась шляхом віднімання значення пружної деформації для кожного прикладеного напруження σ . Розраховані таким чином залежності $\sigma(\epsilon_i)$ для зразка, загартованого при 340⁰С, наведені на рис.6.

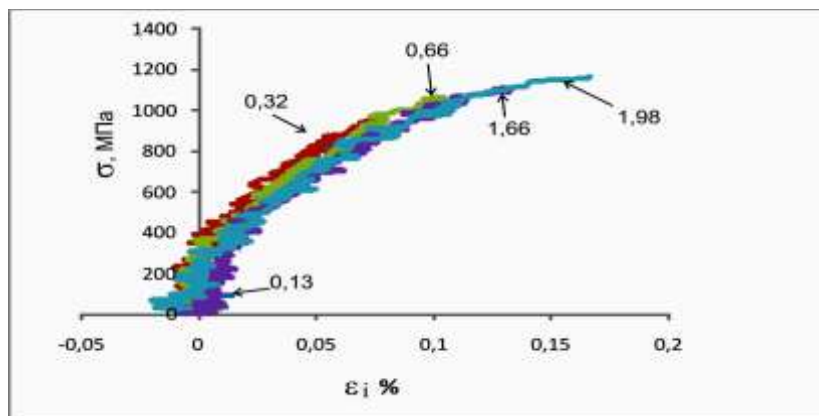


Рис.6. Виокремлена ділянка псевдопружної деформації для зразка, загартованого при 340⁰С (біля кожної лінії вказано рівень попередньої пластичної деформації)

Певна розмитість кривих пов'язана з наближенням деформаційних параметрів до границі розрізнення випробувальної машини (датчика переміщення). Навіть в такому вигляді діаграми псевдопружності, отримані при різних ступенях пластичної деформації, практично співпадають, що свідчить про те, що величина попередньої пластичної деформації не впливає на характер кривих, а лише на остаточні значення напруження та величини псевдопружної деформації. Тобто деформаційні дефекти, що виникають при пластичній деформації не вносять додаткового впливу на механізм утворення псевдопружності.

Інша картина спостерігається, якщо порівнювати криві псевдопружності при однакових ступенях попередньої деформації в зразках, що були загартовані при різних температурах (рис. 7).

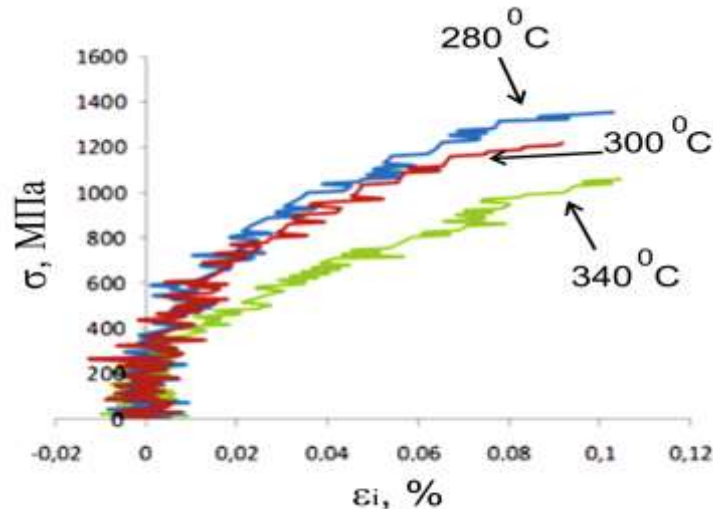


Рис. 7. Виокремлені висхідні ділянки псевдопружних петель ADI чавуну, загартованого при різних температурах

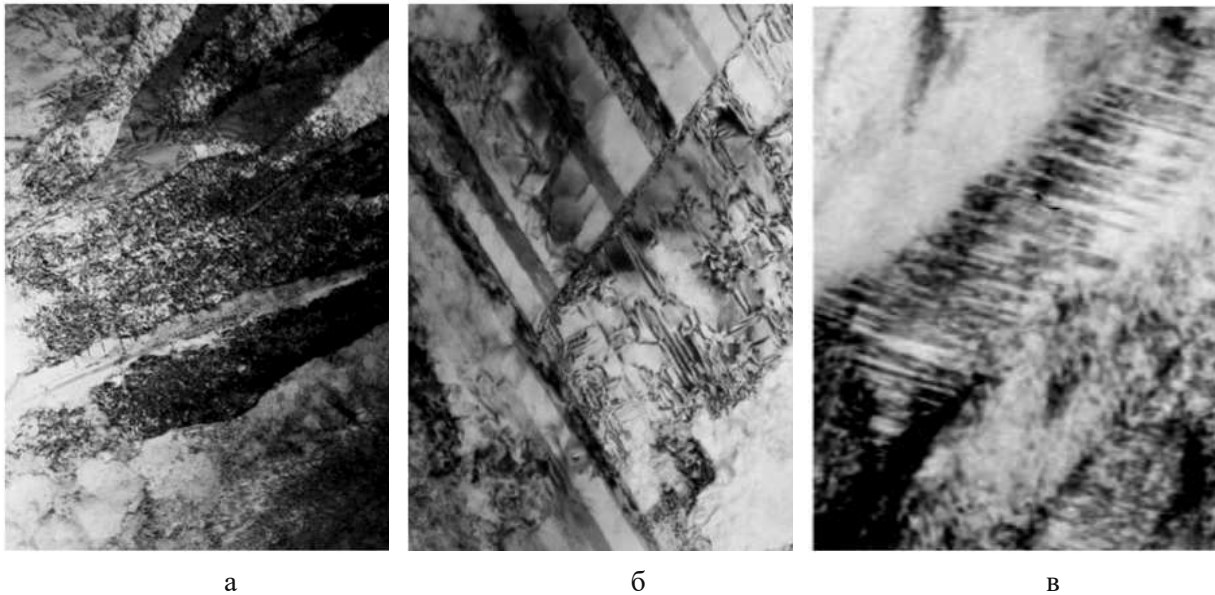
В цьому випадку характер кривих залежить від умов гартування. Зі збільшенням температури гартування значно зростає деформація, що відповідає однаковим значенням напруження. Своєрідне полегшення утворення петель в зразках загартованих при більш високих температурах можна пояснити покращенням умов утворення мартенситу під дією деформації, як це було показано нами вище та в попередніх роботах [7, 18]. В зразках підданих ізотермічному гартуванню при температурі 350°C в процесі деформації реалізується зсувний механізм росту мартенситної фази. У відповідності до сучасних уявлень про механізм псевдопружної поведінки матеріалів мартенситного класу [19], основною фізичною причиною, що визначає їх особливу механічну поведінку є утворення псевдопружних двійників, які компенсують неспівпадиння пружних полів, що виникають в наслідок різниці параметрів кристалічних ґраток аустеніту та мартенситу [20].

Механізм деформаційного зміцнення ADI чавуну пов'язаний з високою щільністю дислокаційних петель. Окрім значної щільності дислокацій, додаткове зміцнення створює двійникування, внаслідок якого формуються додаткові когерентні границі (див. рис. 8), які гальмують рух дислокацій, зміцнюючи матеріал [21, 22]. Процес двійникування стає можливим внаслідок виникнення високого ступеню спотвореності кристалічної ґратки протягом перетворення аустеніта в мартенсит.

Висновки. В результаті проведення комплексних досліджень встановлено, що:

1) Поверхня руйнування зразків має здебільшого ямкову структуру. Руйнування відбувається, в тому числі, й по поверхнях сфероїдизованих графітних включень, які забезпечують підвищену міцність чавуну. Кількість ділянок, що руйнуються сколом збільшується зі збільшенням температури гартування, що пояснюється збільшенням кількості мартенситу перетворення з ростом температури ізотермічного гартування.

2) Схильність до демпфування високоміцного чавуну різко збільшується зі збільшенням ступеню попередньої деформації. При цьому структура середнього бейніту має підвищену схильність до демпфування, порівняно з нижнім бейнітом.



а) феритні пластини ($\times 22000$); б) аустенітні зерна з двійниковими дислокаціями ($\times 35000$);
в) когерентні границі двійників всередині мартенситних пластин ($\times 140000$)

Рис. 8. Електронномікроскопічні зображення структури АДІ чавуну [21]

3) Попередня пластична деформація не впливає на механізм утворення псевдопружності. Полегшення утворення деформаційних петель в зразках, ізотермічно загартованих при більш високих температурах, пояснюється покращенням умов утворення мартенситу під дією деформації. Основною фізичною причиною, що визначає особливу механічну поведінку високоміцного чавуну з бейнітною структурою $\epsilon \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення з одночасним утворенням псевдопружних двійників, які компенсують неспівпадіння пружних полів, що виникають в наслідок різниці параметрів кристалічних ґраток аустеніту та мартенситу.

4) Подальші дослідження АДІ чавуну будуть спрямовані на підтвердження саме двійникового механізму псевдопружності. Встановлення параметрів та кінетики двійникування дозволить розробити рекомендації щодо оптимальної технології виготовлення змінних деталей ґрунтооброблювальної техніки, а також ряду тонкостінних деталей автомобілів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Myszka D. Microstructure transformation during plastic deformation of the austempered ductile iron / D. Myszka, L. Olejnik, M. Kácbyzyk // Archives of foundry engineering. – Issue 1/2009, Vol. 9. – PP. 169-174.
2. Brezina R. Application of ductile iron in the manufacture of ploughshares / R. Brezina, J. Filipek, J. Šenberger // Res. Agr. Eng. – 2004 (2), 50. – PP. 75–80.
3. Волощенко С.М. Особливості бейнітного високоміцного чавуну з огляду виробництва швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки / С.М. Волощенко, К.О. Гогаєв, М.Г. Аскеров, Ю.М. Подрезов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017, №4. – С. 81-87
4. Гогаєв К.А. Влияние температуры и условий нагружения на характеристики износа бейнитного чугуна / К.А. Гогаєв, Ю.Н. Подрезов, С.М. Волощенко, К.С. Гринкевич, И.В. Ткаченко, М.В. Коваленко // Проблемы тертя та зношування. – 2017, № 3 (76). – С. 42-51.
5. Harding, R.A. The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron // Metals and Materials. – 2007, 45(1). – PP. 1–16.
6. Mohammad Baba Zadeh Wear Characteristics of ADIs: A Comprehensive Review on Mechanisms and Effective Parameters / Mohammad Baba Zadeh, Hamid Pour Asiabi // J. Basic. Appl. Sci. Res. – 2013, 3(2). – PP. 646-656.
7. Voloschenko S. Wear Feature of Bainitic Cast Iron Used in Agricultural Machinery/ S. Voloschenko, Y. Podrezov, V. Kholyavko, M. Kovalenko // Металознавство та обробка металів. – 2017, № 3. – С.28 – 33.
8. Гогаєв К.А. Технологические принципы получения композиционных комплексных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. Часть II. Условия компактирования структура и свойства модельных двухкомпонентных систем Fe-FeSi и Al-FeSi / К.А. Гогаєв, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // Порошковая металлургия. – 2016, № 7/8. – С. 52 – 59.

9. Гогаев К.А. Технологические принципы получения композиционных комплексных модификаторов методом прокатки порошковых смесей. Часть III. Методы получения и свойства многокомпонентных прессовок и прокатных полос из порошковых модификаторов разных составов./ К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов и др. // Порошковая металлургия. – 2016, № 9/10.– С. 3 – 10.
10. Писаренко Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – Киев: Наук.думка, 1971. – 375 с.
11. Nagarajan D. Anelastic Behavior of Mg-Al and Mg-Zn Solid Solutions / D. Nagarajan, X. Ren, C. H. Cáceres // Materials Science&Engineering. – 2017, A681. – P. 253–267.
12. Cáceres C.H. Pseudoelastic behaviour of cast magnesium AZ91 alloy under cyclic loading–unloading / C.H. Cáceres, T. Sumitomo, M. Veidt // Acta Materialia. –2003, 51. – P. 6211–6218.
13. Mann G.E. Reversible plastic strain during cyclic loading–unloading of Mg and Mg–Zn alloys / G.E. Mann, T. Sumitomo, C.H. Cáceres, J.R. Griffiths // Materials Science and Engineering. – 2007, A 456. – P. 138–146.
14. Molnar P. Reversible motion of twin boundaries in AZ31 alloy and new design of magnesium alloys as smart material / Peter Molnar, Andriy Ostapovets, Aleš Jager // Materials and Design. – 2014, 56. – P.509–516.
15. Малка О. М. Температурна чутливість псевдопружної поведінки в циклі навантаження – розвантаження Mg та сплаву Mg-9Al-0,2Ca-0,08Ti / О.М. Малка, П.М. Романко, Ю.М. Подрезов, К.О. Валуйська // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2016, вып.21. – С.98 – 109.
16. Найдек В.Л. Бейнитный высокопрочный чугун / В.Л. Найдек, В.П. Гаврилюк, И.Г. Неижко. – Киев: ФТИМС, 2008. – 140 с.
17. Garin J.L. Strain-induced martensite in ADI alloys / J.L. Garin, R.L. Mannheim // Journal of Materials Processing Technology. – 2003, no 143-144. – PP. 347-351.
18. Гогаев К.А. Влияние остаточного аустенита на механические свойства и характеристики износа бейнитного чугуна с шаровидным графитом // К.А. Гогаев, С.М. Волощенко, Ю.Н. Подрезов, Н.В. Минаков, Н.М. Марченко // Электронная микроскопия и прочность материалов. – 2016, вып.21. – С.38 – 50.
19. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni–based shape memory alloys / K. Otsuka, X. Ren // Progress in Materials Science. – 2005, V. 50. – PP. 511-678.
20. Косевич А. М. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А.М. Косевич, В. С. Бойко // УФН. – 1971, Т. 104, вып. 2. – С. 202-254.
21. Nofal A. Advances in the Metallurgy and Applications of ADI / Adel Nofal // Journal of Metallurgical Engineering. – 2013, Vol 2, Iss. 1. – P. 1-18.
22. Krzynska A. The Mystery of ADI / A. Krzynska and Kaczorowski M. // Archieves of Foundry Engineers. – 2007, vol.7, iss.4. – PP. 111-114.