

УДК 669.131.2:539.551

Т. М. МИРОНОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Матеріалознавство ім. академіка Ю. М. Тарана», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (067) 713 83 65, ел. пошта t.myronova@mail.ru

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ПЛАСТИЧНІСТЬ БІЛИХ ЧАВУНІВ

Мета. Розробка режимів термічної обробки білого чавуну для зміни структури їх евтектичної складової, а саме: порушення монолітної будови цементитного каркасу ледебуритних колоній і суцільності евтектичної сітки, а також зміна її розташування на більш сприятливе, з точки зору пластичної деформації. **Методика.** В якості матеріалів використовували доевтектичні білі чавуни з різним вмістом вуглецю (2,92...3,35 %), а також із додатковим легуванням ванадієм 3,81 %. Сплави піддавали попереднім відпалам та випробовували на гаряче кручення. **Результати.** У результаті досліджень було показано, що роздроблення карбідної сітки за допомогою пластичного деформування сприяє покращенню механічних властивостей білих чавунів, але має труднощі в застосуванні, що обумовлені їх низькою пластичністю. Вивчено вплив різних режимів попередніх відпалів, що включали ізотермічні витримки при різних температурах, а також багаторазові витримки й термоцикування на структуру та пластичність білих доевтектичних чавунів. Досліджено вплив ступеня евтектичності та попередньої термічної обробки на гарячу пластичність білих чавунів різних складів. **Наукова новизна.** Визначено, що термічна обробка, яка викликає фазову подвійну $\alpha \rightarrow \gamma$ перекристалізацію при температурах 860–950 °С і перлитизацію при 720–680 °С, сприяє суттєвому підвищенню пластичності як у нелегованих, так і легованих ванадієм білих чавунах. Це відбувається за рахунок розділення матричної карбідної фази в колоніях ледебуриту новими фазовими межами, особливо карбідного перетворення при легуванні ванадієм. **Практична значимість.** Використання попереднього відпалу з фазовою перекристалізацією дозволило підвищити пластичність доевтектичних білих чавунів. Отриманий рівень пластичності чавуну відповідає пластичності сталей карбідного класу, що забезпечує успішну деформацію куванням та вальцюванням.

Ключові слова: білі чавуни; зносостійкість; евтектичні карбіди; деформування; термічна обробка; фазові перетворення; пластичність

Вступ

У сучасному машинобудуванні велика кількість деталей виготовляється з чавунів різних типів та складів [17, 20]. Білі чавуни багато в чому задовольняють сучасні вимоги до зносостійких деталей та інструменту, проте їх конструкційна міцність та стійкість до динамічних навантажень часто недостатня [4]. Специфіка евтектичної сітки, що утворюється під час кристалізації виробів з білого чавуну, призводить до викришення карбідів при терті, а особливо при ударному зносі. Змінити будову ледебуритних колоній, де матричною фазою є крихкий цементит, за допомогою термічної обробки майже неможливо.

Загальним положенням для майже всіх сплавів евтектичного типу є позитивний вплив обробки, що сприяє подрібненню евтектичної сітки, причому це стосується і залізобуглецевих, і кольорових сплавів. Особливо суттєво цей вплив проявляється, якщо первинна фаза є

більш пластичний твердий розчин, а евтектика утворюється на базі більш крихких складових [11, 19].

Ще починаючи з 30-х років минулого століття і до сьогодення результатами досліджень було доведено [2, 6, 13], що пластична деформація значно сприяє поліпшенню механічних характеристик білого чавуну, перетворюючи його в матеріал з унікальним комплексом властивостей, що поєднує високу твердість, зносостійкість [5], міцність, здатність протистояти ударним навантаженням і коливанням температури. Позитивно впливає пластичне деформування і на властивості сірих особливо високоміцних чавунів. Після обробки тиском значно поліпшується демпфувальна здатність цих сплавів [7, 12, 14–16].

Принципова можливість деформування білих чавунів доведена низкою робіт вчених, у яких проаналізовано деякі склади та режими обробки тиском білого чавуну, а також пропо-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

нується застосовувати деформований чавун як матеріал для прокатних валків, деталей і вузлів машин [11, 18]. Але низький рівень пластичності в литому стані унеможливує використання обробки тиском цих сплавів у промислових умовах. Керування структуроутворенням у білих чавунах для підвищення їх пластичності є актуальною і важливою проблемою. Важливо також скористатися досвідом дослідження пластичності високовуглецевих легованих сталей ледебуритного класу, що є структурними аналогами білих чавунів [9]. Але принципова відмінність цих сплавів полягає в тому, що у евтектиках на базі спеціальних карбідів матричною фазою є пластичний аустеніт, а в ледебуриті білих чавунів – крихкий цементит. Отримання в чавунах евтектичної складової на базі спеціальних карбідів, таких як Cr_7C_3 , VC, TiC та ін., потребує високого легування [3, 17]. Таким чином, дослідження впливу термічної обробки на структурні зміни в білих чавунах, що приводять до підвищення їх пластичності, є актуальним завданням.

Мета

Метою роботи є використання термічної обробки білого чавуну для зміни структури його евтектичної складової, а саме, порушення монолітної будови цементитного каркасу ледебуритних колоній і суцільності евтектичної сітки, а також зміна її розташування на більш сприятливе з позиції пластичної деформації.

Методика

У роботі виконано дослідження доевтектичних білих чавунів з різним вмістом вуглецю 2,92...3,35% та хрому 0,5...0,7% (для гарантованого відбілу), що названі в роботі нелегованими, а також легованого ванадієм 3,81%, причому структура цього сплаву в литому стані складається з дендритів аустеніту та суцільної евтектичної сітки, колонії якої переважно являють собою ледебурит стільникової будови.

Для вивчення впливу перекристалізації на структурні зміни в білому чавуні проводили відпалі з багаторазовими ізотермічними витримками за різними режимами: *режим 1* – при 1 050 °C або 1 140 °C, 10 год або 20 год; *режим 2* – 860 °C, 2 год + 680 °C, 4 год; *режим 3* – дворазове проведення режиму 2; *режим 4* –

860 °C, 2 год + 680 °C, 4 год + 1 000 °C, 5 год; а також термоциклювання: нагрівання до 950 °C, витримка 5 хв і охолодження на повітрі.

Рівень пластичності визначали з допомогою випробувань на гаряче скручення на машині СМЕГ-10-Т.

Результати

Металографічний аналіз зразків, відпалених при температурі 1 050 °C і 1 140 °C, показав, що при цих температурах уже під час 10-тигодинної витримки наявні процеси формозміни кристалів цементиту й аустеніту, а саме сфероїдизація та коалесценція (рис. 1).

При цьому ледебуритний карбід стає ще більш монолітним.

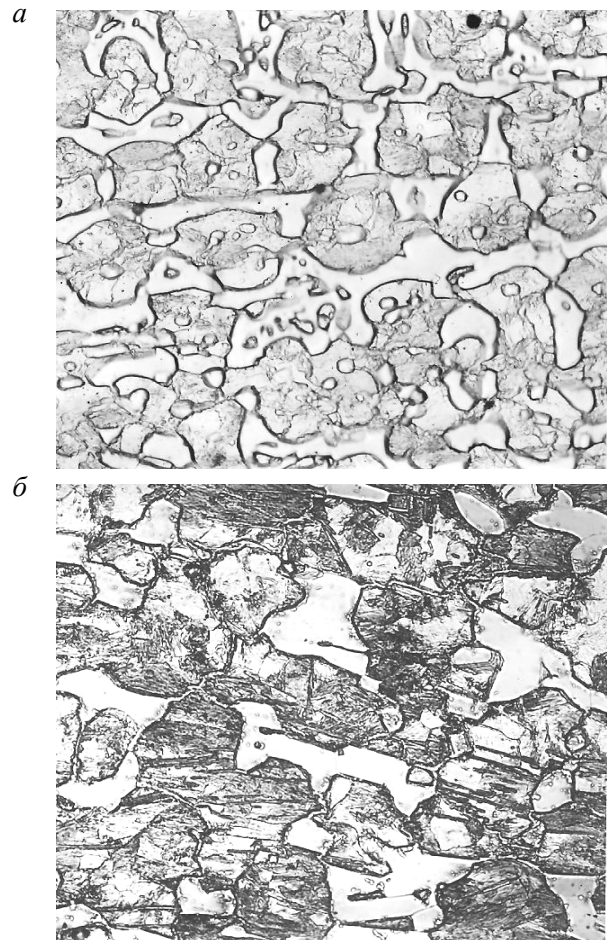


Рис. 1. Сфероїдизація і коалесценція цементиту і аустеніту в процесі 10-тигодинної витримки.

Травлення електролітичне:
а – 1 050 °C; б – 1 040 °C ×500

При поясненні описаних процесів слід виходити з рівняння Томсона [3]:

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$$X_{\Gamma} = X_{\infty} e^{-2\sigma MV/RT_{\Gamma}},$$

де X_{∞} – концентрація вуглецю у твердому розчині при плоскій межі розділу з карбідом; X_{Γ} – концентрація вуглецю в розчині, рівноважному з карбідом на межі розділу з радіусом кривизни r ; M , V – молекулярна вага та питомий об'єм карбиду; R , T – газова стала і температура; σ – міжфазна поверхнева енергія.

У тонких гілочках ледебуритного аустеніту вміст вуглецю знижений, тому що поверхня карбиду тут увігнута й характеризується малим радіусом кривизни. Вміст вуглецю в плоских базових дендритах аустеніту колоній і в товстих гілках первинного аустеніту набагато вище. Оскільки гілочки ледебуритного аустеніту пов'язані або з плоскими дендритами евтектичного аустеніту, або з гілками первинного аустеніту, між ними можливий дифузійний обмін вуглецем. Вуглець з великих гілок аустеніту переміщується на дрібні гілочки евтектичного аустеніту. Ці гілочки, насичуючись вуглецем, трансформуються в карбід. Великі ділянки аустеніту, збіднюючись вуглецем, стають ненасиченими, у них розчиняється частина карбиду. У результаті тонкі гілки ледебуритного аустеніту перетворюються в карбід, а гілки первинного і великі ділянки ледебуритного аустеніту товщають.

Проте при температурі 1 050 °С ледебуритні колонії ще зберігають свою закономірну будову й розташування, хоча евтектичні карбіди стають більш монолітними.

Після відпалу при температурі 1 140 °С структура чавуну складається з окремих цементитних монолітних включень і твердого розчину (продуктів його розпаду). Евтектична сітка фактично розбивається, проте ділянки цементиту залишаються досить великими й можуть служити джерелами зародження тріщин при деформації. Величина цементитних ділянок 10^{-3} – $5 \cdot 10^{-3}$ см.

Таким чином, підвищення температури нагріву викликає прискорення процесів сфероїдизації і коалесценції структурних складових, проте 10-тигодинний відпал навіть при температурах, досить близьких до температури оплавлення, не приводить до формування структури, більш сприятливої для пластичної деформації, а саме до розділення евтектичного цементиту й розосередження його у твердому

розчині, хоча безперервність евтектичної сітки більшою чи меншою мірою порушується.

Структура білого чавуну після проведення відпалу за режимом 2 практично не змінюється (рис. 2).

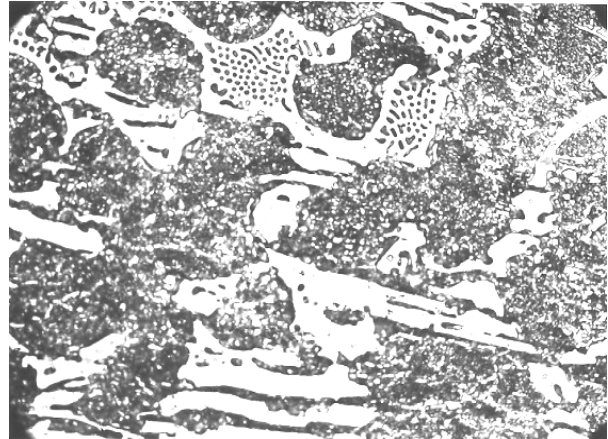


Рис. 2. Структура білого чавуну після одноразового двоступеневого відпалу, $\times 500$

Відпал за режимом 2 повторювали дворазово і чотириразово. Температура вищого ступеня (860 °С) вибиралася з розрахунку більш повного переведення продуктів евтектоїдного розпаду в аустенітний стан, а більш низької (680 °С) – для повного евтектоїдного розпаду аустеніту й сфероїдизації продуктів перетворення.

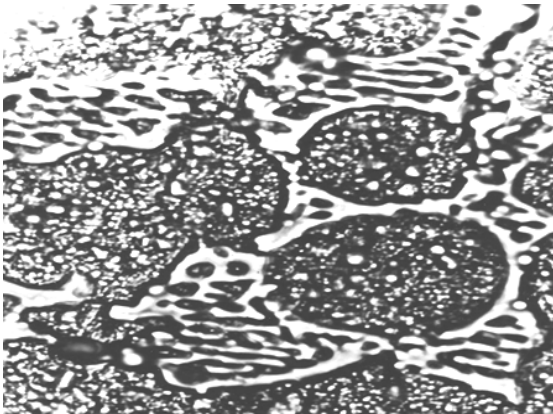
При дворазовому та чотириразовому повторенні відпалу за режимом 2 колонії стільникового ледебурити частково трансформуються в колонії, що нагадують пластинковий ледебурит (рис. 3). Відбувається з'єднання ділянок евтектичного аустеніту – «стільників». У цементиті виникають субмежі, за якими здійснюється розділення цементиту й з'єднання аустенітних ділянок. Передумовою виникнення цих субмеж є сам механізм утворення стільникового ледебуриту під час кристалізації. Цементит при пошаровому зростанні може трохи випереджати аустенітні прошарки. Про це свідчить прямолинійність і орієнтація цементитних блоків, а також форма фронту кристалізації евтектики. Біля аустенітних пластин рідина збагачується домішками, на кромках з'являються виступи (рис. 4).

Зростання аустенітних виступів призводить до збагачення рідини, що їх розділяє, вуглецем. Починається проростання цементиту в проміжках між виступами. Оскільки воно відбувається

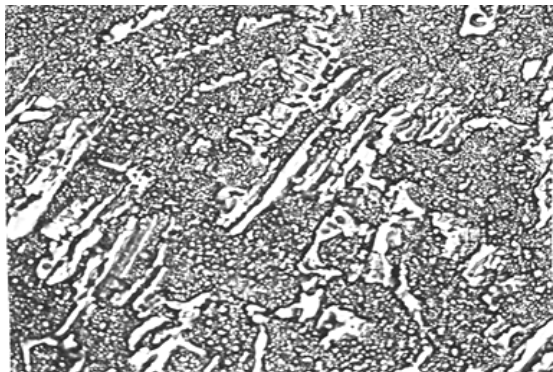
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

в площині (001), яка характеризується найсильнішими міжатомними зв'язками в цементиті, то швидкість проростання велика. Між сусідніми блоками утворюються перетинки (рис. 4), пластинкова структура переходить в стрижневу, що притаманна так званому стільниковому ледебуриту. Місця змикання цементитних пластин більш дефектні й збагачені домішками, тому тут полегшено формування субструктури.

а



б



в

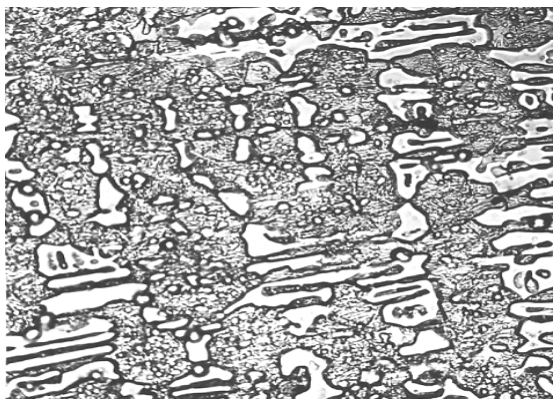


Рис. 3. Трансформація стільникового ледебуриду в колонії, що нагадують пластинковий ледебурит. Електролітичне травлення: а – після режиму 3, $\times 1\ 000$; б – після чотириразового повторення режиму 2; в – після режиму 4; $\times 500$

Поряд з цим наявне розділення цементитних пластин за механізмом, що описаний в роботі [1]. Згідно з ним раніше плоска міжфазна поверхня аустеніту й карбіду втрачає стійкість з розвитком субзернистої структури. У напрямку меж аустеніту карбід розростається, а вздовж власних меж розчиняється.

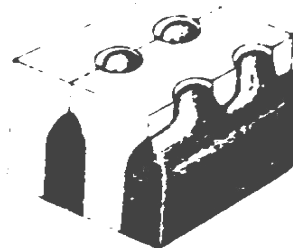
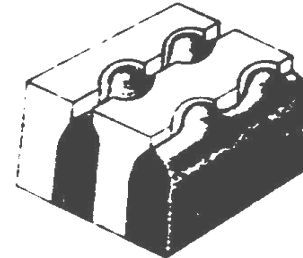
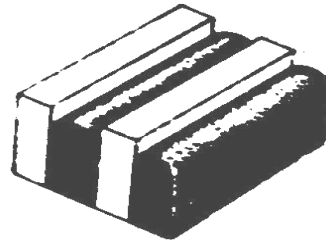


Рис. 4. Схема переходу пластинкової структури евтектики в стільникову при кристалізації [2]

Утворення субзернистої структури також сприяє розвитку сфероїдизації завдяки, наприклад, створенню шляхів полегшеної дифузії атомів [1, 22], з переміщенням яких пов'язане перепакуння ґрат карбіду й аустеніту.

У процесі відпалу із багатьма витримками в результаті $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ перетворення, а також різниці коефіцієнтів теплового розширення цементиту й аустеніту наявний фазовий наклеп, а слідом за ним і рекристалізація, що призводять до утворення субструктури в обох фазах.

Із збільшенням температури третього ступеня відпалу (режим 4) розподіл і сфероїдизація евтектичного цементиту прискорюються. Структура чавуну, обробленого за режимом 3 і 4, на-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ближається до структури після чотириразового накладення відпалу за режимом 2, але все ж більш помітно трансформування стільникового ледебуриту в колонії, подібні пластинковому ледебуриту. Проте структура більш сфероїдизована після обробки за режимом 4. Причиною цього є підвищення не тільки температури, але й часу останньої ізотермічної витримки.

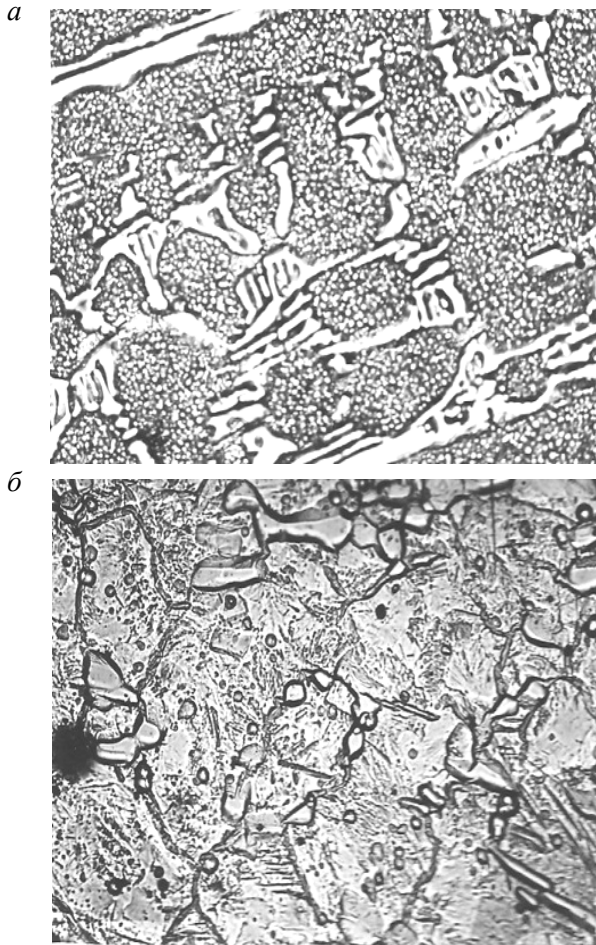


Рис. 5. Структура білого чавуну після термоциклічної обробки ($950 \rightleftharpoons 20$ °С), $\times 500$:
 а – до накладення високотемпературного відпалу;
 б – після подальшого 5-тигодинного відпалу при 1000 °С

Ефективно впливає на структурні зміни й термоциклювання. Багаторазові нагриви та охолодження викликають накопичення дефектів кристалічної будови структурних складових за рахунок різної теплопровідності й коефіцієнтів теплового розширення фаз. Після восьмиразового термоциклювання ($950 \rightleftharpoons 20$ °С) у структурі чавуну відбуваються зміни (рис. 5), подібні тим, які спостерігаються в процесі ба-

гатоступеневих відпалів (режим 3 та 4). Вплив термоциклічної обробки особливо позначається при подальшому накладенні високотемпературної витримки. Під час цього ступеня реалізується підвищення дефектності кристалічної будови, що має особливо важливе значення для розвитку процесу рекристалізації. У свою чергу, виникнення нових меж сприяє поділу й сфероїдизації цементиту (рис. 5). У цьому випадку евтектична сітка повністю розбивається, цементитні включення розосереджуються у твердому розчині поряд із вторинними карбідами.

Для досліджень впливу попереднього відпалу з $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ перетворення зразки чавуну з вмістом вуглецю 3 % піддавали відпалу згідно з режимом 3. Після такої обробки виконували випробування на гаряче кручення (рис. 6).

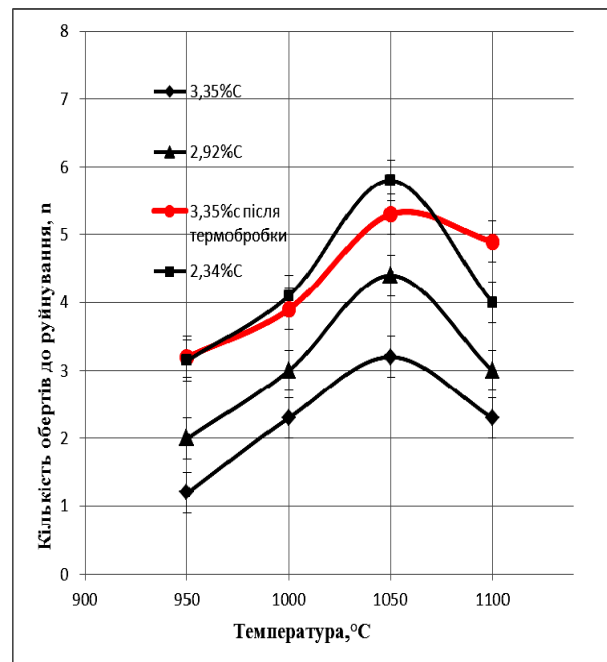


Рис. 6. Результат випробування на гаряче кручення нелегованих білих чавунів з різним вмістом вуглецю, який піддавали післяливарному відпалу та додатковій термічній обробці.

Зіставивши отримані результати, можна зробити висновок, що рівень пластичності білого чавуну з підвищенням вмісту вуглецю знижується. Проте рівень пластичності сплаву, що містить 2,92 % С, після попередньої термічної обробки, а саме застосування режиму 3, майже відповідає рівню пластичності чавуну, що містить 2,34 % С, тобто в структурі має набагато меншу частку евтектичних колоній.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Таким чином, після запропонованого багатоступеневого відпалу пластичність чавуну, що містить 2,92 % С, підвищилася приблизно на 20 %.

Для вивчення впливу структурних складових білого чавуну, легованого ванадієм, на рівень гарячої пластичності використовували сплав з вмістом вуглецю 3,16 % і ванадію 3,81 %. Випробування виконували на зразках, підданих різним попередніми обробкам:

1) литі зразки, відпалені за режимом 1 000 °С 3 год, 680 °С 4 год;

2) литі зразки, піддані подвійному відпалу: 1 000 °С 3 год, 680 °С 4 год, охолодження на повітрі, 1 000 °С 5 год, 680 °С 4 год.

Початкова структура зразків до випробування наведена на рис. 7.

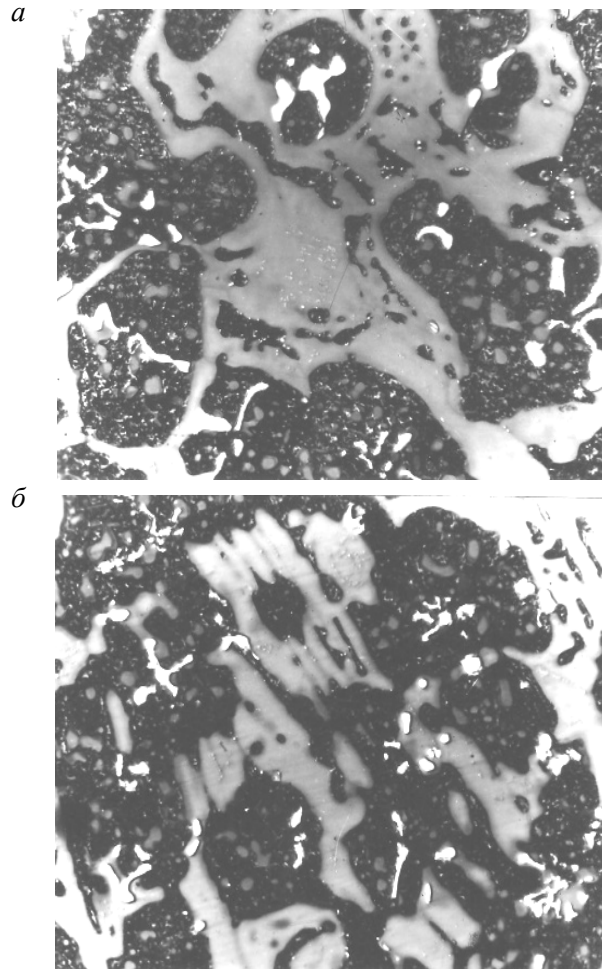


Рис. 7. Мікроструктура дослідного чавуну, що містить 3,16 % С і 3,81 % V, підданого тепловій обробці, $\times 1\,000$. Теплове травлення:
а – після відпалу 1 000 °С 3 год, 680 °С 4 год;
б – після дворазового відпалу 1 000 °С 3 год, 680 °С 4 год + 1 000 °С 5 год, 680 °С 4 год

Характер температурної залежності пластичності для чавуну, легованого ванадієм, такий самий, як і для нелегованого сплаву, тобто криві мають куполоподібну форму (рис. 7).

Максимальна кількість обертів до руйнування спостерігається в інтервалі температур 1 050–1 100 °С, незалежно від попередньої обробки зразків і відповідає рівню пластичності деяких швидкорізальних сталей, наприклад таких, як Р6М5 [8, 9].

Відпал з подвійною перекристалізацією призводить до підвищення рівня пластичності, який при всіх температурах випробування вищий, ніж при одноразовому відпалі. Особливо значний приріст пластичності в цьому випадку спостерігається при більш низьких температурах 950–1 050 °С. Кількість обертів до руйнування в цьому інтервалі температур збільшується майже в 1,5 разу, порівняно зі зразками, відпаленими одноразово. У результаті цього відбувається розширення температурного інтервалу, сприятливого для деформування (рис. 8).

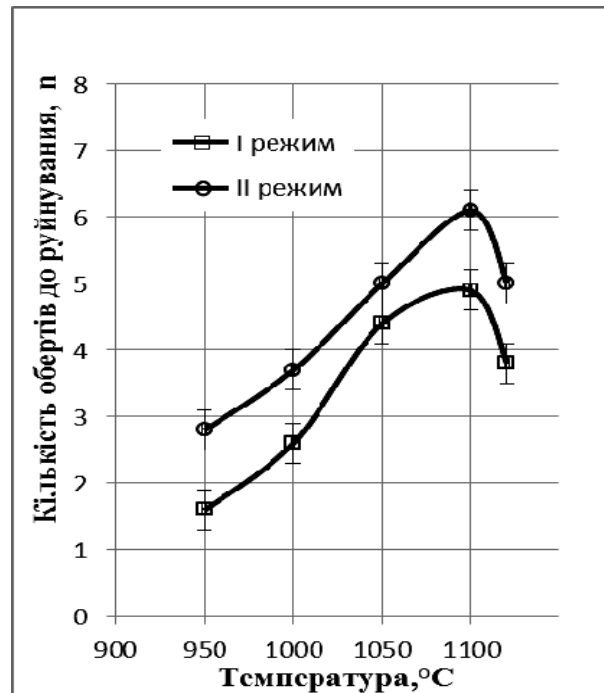


Рис. 8. Гаряча пластичність при крученні чавуну з 3,16 % С і 3,81 % V. Попередня обробка: I – 1 000 °С, 3 год, 680 °С, 4 год; II – 1 000 °С, 3 год, 680 °С, 4 год; охолодження на повітрі; 1 000 °С, 5 год, 680 °С, 4 год

Збільшення кількості витримок, за яких відбувається $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ перехід, має позитивний вплив на розвиток карбідного перетворення

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

$(\text{Fe, V})_3\text{C} \rightarrow \text{VC} + \text{A} + \text{Fe}_3\text{C}$ в ледебуриті чавунів, легованих ванадієм [8, 9]. Тому в структурі зразків, відпалених двічі, виділяється більша кількість ванадієвих карбідів, ніж у разі однофазової фазової перекристалізації. Утворення аустенітних прошарків навколо нових карбідів ванадію і їх злиття призводить до розділення цементитних кристалів. Крім того, вони діляться по власних субмежах, появі яких сприяє фазовий наклеп і рекристалізація, що спостерігаються за такого режиму теплової обробки.

Таким чином, ще до деформування порушується монолітність цементитного каркасу в ледебуриті, а також збільшується протяжність міжфазних меж цементит/карбід ванадію.

а



б

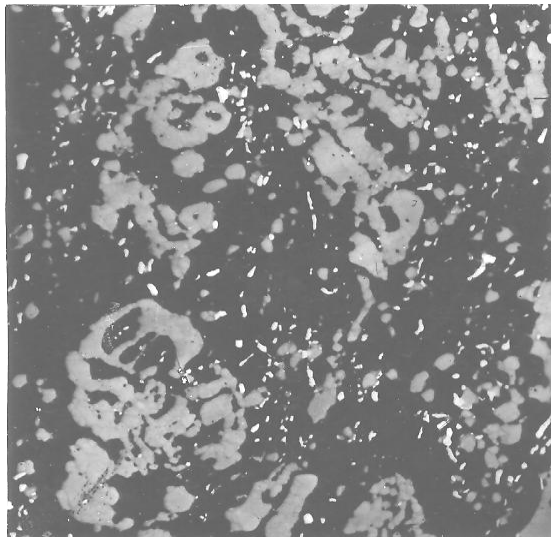


Рис. 9. Структурні зміни у ванадієвих чавунах у процесі гарячого кручення, $\times 500$:
а – поблизу переходу робочої частини зразка у захвати; б – поблизу місця руйнування

Особливо відчутно це позначається при температурах 950–1 020 °С. Початкова структура дворазово відпалених зразків виявляється більш підготовленою для деформування. У цьому інтервалі зразки, оброблені за режимом дворазового повторення відпалу, мають найвищі показники пластичності (рис. 8).

Дослідження мікроструктури випробуваних зразків показали, що існує нерівномірність деформації по довжині зразка від місця руйнування до захватів (рис. 9).

Як і у випадку з нелегованими білими чавунами, у поздовжньому перерізі структура змінюється від сильно деформованої до структури, що майже не зазнала змін.

У процесі високотемпературної витримки може відбуватися також поділ цементиту в результаті розчинення по субмежах. Це, у свою чергу, порушує безперервність цементитної оболонки в ледебуритних колоніях ще до завершальних актів деформування. Ефективність такої обробки зростає з підвищенням температури відпалу. При деформуванні цементитні кристали безперешкодно діляться по субмежах, а також по міжфазних межах карбідів заліза і ванадію (рис. 10).

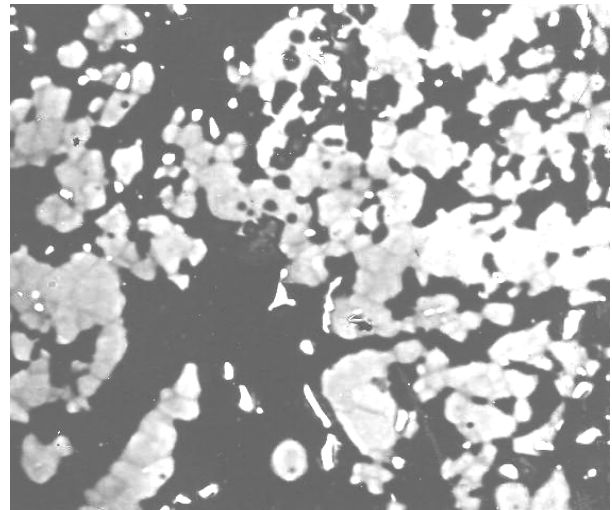


Рис. 10. Розділення кристалів цементиту по утворених субмежах та межах $\text{VC}/(\text{Fe, V})_3\text{C}$, $\times 850$.
Теплове травлення

Таким чином, попередня обробка ванадієвого чавуну, що викликає розвиток карбідного перетворення, у результаті якого відбувається розчленування цементиту евтектичних колоній, сприяє суттєвому підвищенню рівня пластичності сплаву.

Наукова новизна та практична значимість

1. Теплова обробка, що включає багаторазову фазову перекристалізацію, сприяє порушенню монолітності цементитного каркасу ледебуритних колоній і суцільності евтектичної сітки. У процесі багаторазового відпалу спостерігається трансформація колоній стільникового ледебуриту в колонії, будова яких нагадує пластинковий ледебурит, при цьому роль матричної фази переходить від цементиту до аустеніту.

2. Під час дослідження структурних змін у нелегованих білих чавунах у процесі пластичної деформації при температурах 950–1200 °С встановлено, що пластичність білого чавуну залежить від кількості евтектики, особливостей її будови і розташування. Вищу пластичність мають чавуни, евтектика яких не утворює суцільної сітки і колонії ледебуриту мають пластинкову будову. Пластинковий ледебурит більш бажаний з позиції пластичності чавуну, оскільки в ньому матрицею є аустеніт, на відміну від стільникового ледебуриту, де матрицею є крихкий цементит.

3. Тривала витримка при температурах вище 1000 °С сприяє сфероїдизації та коалесценції евтектичних карбідів та призводить до утворення більш грубої структури, яка не сприяє підвищенню пластичності.

4. Термоциклювання в поєднанні з подальшою високотемпературною витримкою сприяє формуванню структури, яка складається з ізольованих цементитних включень, розгалужених у твердому розчині, що є сприятливим з позиції пластичності білого чавуну.

5. Подвійна фазова перекристалізація викликає фазовий наклеп у фазах, сприяє виникненню субзернистих меж та розділенню по них евтектичних карбідів. Використання попереднього відпалу з подвійною $\alpha \rightarrow \gamma$ перекристалізацією при температурах 860–950 °С та подвійною перлітизацією при 720–680 °С сприяє суттєвому підвищенню пластичності як в нелегованих, так в легованих ванадієм білих чавунах.

6. Ледебуритні чавуни, що леговані ванадієм, мають підвищену пластичність. Пластична деформація ініціює карбідні перетворення, що відбуваються як у процесі високотемпературного відпалу, так і в ході безпосередньої деформації ванадієвих чавунів. Виділення карбідів

ванадію, що викликають додаткову напругу при деформації і нагріванні, сприяє фрагментації цементитних кристалів.

7. Утворення карбідів VC при карбідному перетворенні в легованому ванадієм цементиті істотним чином сприяє підвищенню пластичності сплаву. При деформації відбувається розділення карбідних кристалів по нових міжфазних кордонах. Утворення нових фаз перешкоджає зародженню тріщин і зупиняє їх поширення в карбідах і на їх міжфазній поверхні.

Використання попереднього відпалу з фазовою перекристалізацією дозволило підвищити пластичність доевтектичних білих чавунів. Отриманий рівень пластичності чавуну відповідає рівню пластичності сталей карбідного класу, наприклад швидкорізальних. Це дозволяє рекомендувати використання даної попередньої обробки для забезпечення успішного деформування доевтектичних білих чавунів куванням та вальцюванням в промислових умовах.

Висновки

1. Результати виконаних досліджень показали, що за допомогою відпалів з багаторазовою фазовою перекристалізацією можна впливати на структуру евтектичної складової білих чавунів.

2. Карбідні перетворення, що відбуваються в легованому ванадієм цементиті, сприяють суттєвому підвищенню пластичності ледебуритного чавуну, майже до рівня сталей карбідного класу, що підлягають обробці тиском.

3. Завдяки використанню розроблених режимів попередніх відпалів, а також складів економно легованих білих чавунів, рекомендовано застосування пластичного деформування цих сплавів для виробництва деталей підвищеної зносостійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баранов, А. А. О сфероидизации эвтектического карбида быстрорежущей стали / А. А. Баранов, Л. И. Иванов // *Металлофизика*. – 1968. – Вип. 27 – С. 91–94.
2. Баранов, С. А. Ковка чугуна / С. А. Баранов // *Сообщения Всесоюзного ин-та металлов*. – 1931. – № 8. – С. 22–25.
3. Бунин, К. П. Основы металлографии чугуна / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. – М.: *Металлургия*, 1969. – 415 с.
4. Вакулєнко, И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформи-

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- ровани / И. А. Вакуленко. – Д. : Gaudeamus, 2003. – 94 с.
5. Вакуленко, І. О. Втома металевих матеріалів в конструкціях рухомого складу / І. О. Вакуленко. – Д. : Маковецький, 2012. – 152 с.
 6. Витмозер, А. Деформация чугунов / А. Витмозер // Проблемы современной металлургии. – 1955. – № 4 (22). – С. 104–117.
 7. Исследование особенностей структурообразования высокопрочного чугуна при плазменной обработке / В. И. Гуринович [и др.] // Литье и металлургия : ежеквартальный научно-произв. журн. – 2012. – № 2. – С. 129–133.
 8. Мигачев, Б. А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов : справ. / Б. А. Мигачев, А. И. Потапов. – М. : Металлургия, 1980. – 88 с.
 9. Миронова, Т. М. О механизмах влияния фазовых переходов на поведение эвтектических карбидов при деформировании / Т. М. Миронова, Т. Р. Донская, А. Ю. Сидорова // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Фізика, радіоелектроніка». – Д., 2012. – Т. 20, № 2. – С. 97–104.
 10. Миронова, Т. Повышение пластичности белого чугуна методом иницирования фазовых превращений в эвтектическом цементите / Т. Миронова // New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering. – 2012. – № 24. – P. 252–256.
 11. Миронова, Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т. М. Миронова, В. З. Куцова. – Д. : Дриант, 2009. – 190 с.
 12. Петрушин, Г. Д. Неупругие свойства высокопрочного чугуна с деформированным графитом / Г. Д. Петрушин, А. Г. Петрушина, С. А. Головин // МиТОМ. – 2011. – № 2. – С. 27–33.
 13. Погодин-Алексеев, Г. И. Обработка давлением отливок белого чугуна / Г. И. Погодин-Алексеев // Вестн. машиностроения. – 1951. – № 14. – С. 57–60.
 14. Покровский, А. И. Горячая пластическая деформация чугуна: структура, свойства, технологические основы / А. И. Покровский. – Минск : Белорусская наука, 2010. – 256 с.
 15. Покровский, А. И. Пластическое течение включений цементита и графита при обработке давлением чугуна / А. И. Покровский // Литье и металлургия : ежеквартальный научно-произв. журн. – 2013. – № 1. – С. 88–95.
 16. Пономарев, А. С. Совершенствование технологии изготовления осесимметричных изделий из высокопрочного чугуна за счёт выбора термомеханических режимов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Пономарев Андрей Сергеевич ; Моск. гос. технол. ун-т "Станкин". – М., 2011. – 118 с.
 17. Сильман, Г. И. Белые легированные чугуны с композиционной структурой / Г. И. Сильман // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 94–100.
 18. Скобло, Т. С. Исследование пластичности чугуна для прокатных валков / Т. С. Скобло, Э. Л. Воробьева // Сортопрокатное пр-во. – 1973. – № 6. – С. 105–111.
 19. Фирстов, С. А. Титановые «чугуны» и титановые «стали» / С. А. Фирстов, С. В. Ткаленко, Н. Н. Кузьменко // МиТОМ. – 2009. – № 1. – С. 14–29.
 20. Щербединский, Г. В. Чугун как перспективный материал XXI столетия / Г. В. Щербединский // МиТОМ. – 2005. – № 7. – С. 83–93.
 21. Carbide Transformations Eutectic Cementite During The Hot Working of Chromium Vanadium Alloy White Irons / P. F. Nichnicovskaya, T. M. Mironova, Ju .N. Taran et al. – Pittsburg : The Minerals & Metals Society, 1993. – 51 p.
 22. Mittemeijer, Eric J. Fundamentals of Materials Science / Eric J. Mittemeijer. – New York : Springer, 2011. – 500 p.

Т. М. МИРОНОВА^{1*}

^{1*}Каф. «Материаловедение им. академика Ю. М. Тарана», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (067) 71 38 365, эл. почта t.mironova@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Цель. Разработка режимов термической обработки белого чугуна для изменения структуры их эвтектической составляющей, а именно: нарушение монолитного строения цементитного каркаса ледебуритных колоний и сплошности эвтектической сетки, а также изменение ее расположения на более благоприятное, с точки зрения пластической деформации. **Методика.** В качестве материалов использовали доэвтектические белые чугуны с разным содержанием углерода (2,92...3,35 %), а также с дополнительным легированием ванадием 3,81 %. Сплавы подвергали предварительным отжигам и испытывали на горячее кручение. **Результаты.** В результате исследований было показано, что дробление карбидной сетки с помощью

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

пластического деформирования способствует улучшению механических свойств белых чугунов, однако имеет трудности в применении, которые обусловлены их низкой пластичностью. Изучено влияние различных режимов предварительных отжигов, которые включали изотермические выдержки при разных температурах, а также их многократное повторение и термоциклирование на структуру и пластичность белых доэвтектических чугунов. Исследовано влияние степени эвтектичности и предварительной термической обработки на горячую пластичность белых чугунов разных составов. **Научная новизна.** Установлено, что термическая обработка, которая вызывает фазовую двойную $\alpha \rightarrow \gamma$ перекристаллизацию при температурах 860–950 °С и перлитизацию при 720–680 °С, способствует существенному повышению пластичности как в нелегированных, так и легированных ванадием белых чугунах. Это происходит за счет деления матричной карбидной фазы в колониях ледебурита новыми фазовыми границами, особенно за счет карбидного превращения при легировании ванадием. **Практическая значимость.** Применение предварительного отжига с фазовой перекристаллизацией позволило повысить пластичность доэвтектических белых чугунов. Полученный уровень пластичности чугуна соответствует пластичности сталей карбидного класса, что обеспечит успешную деформацию ковкой и прокаткой.

Ключевые слова: белые чугуны; износостойкость; эвтектические карбиды; деформирование; термическая обработка; фазовые превращения; пластичность

T. M. MYRONOVA^{1*}

^{1*}Деп. «Material Science named after Yu. M. Taran», National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Av., 4, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (067) 713 83 65, e-mail t.myronova@mail.ru

THE INFLUENCE OF PRE-HEAT TREATMENT ON WHITE CAST IRONS PLASTICITY

Purpose. The development of heat treatment modes of white cast irons for structure changes in their eutectic constituent, namely in disturbing the monolithic structure of ledeburite colonies cementite structure and eutectic net continuity. Also the mentioned heat treatment modes are targeted to the eutectic net shift for the most suitable position from the point of plastic deforming. **Methodology.** The hypoeutectic white cast irons with 2.92...3.35% carbon content and additionally alloyed by 3.18% vanadium have been used as the research materials. The mentioned alloys have been pre-heat treated and hot twist tested. **Findings.** The research results showed that the carbide net breaking by plastic deforming leads to cast irons mechanical properties increasing but has difficulties in implementation due to the white cast irons low plasticity. The influence of different pre-heat treatment modes on structure and plasticity of white hypoeutectic cast irons have been investigated. They include the isotherm soaking under the different temperatures as well as multiply soakings and thermo-cycling. The influence of eutectic level, as well as pre heat treatment modes on different composition white cast irons hot plasticity have been investigated. **Originality.** It was determined that the heat treatment, which leads to double $\alpha \rightarrow \gamma$ recrystallization under 860-950°C and reperlitization under 720-680°C results in significant increase of plasticity, as well as in un-alloyed and alloyed by vanadium white cast irons. It takes place due to carbide matrix phase separation in ledeburite colonies by new phase boundaries forming especially due to carbide transformations under vanadium alloying. **Practical value.** The implementation of pre-heat treatment with phase recrystallization resulted in hypoeutectic white cast irons plasticity increasing. The obtained level of cast iron plasticity corresponds to the one of carbide class steels, which ensures the successful deformation by forging and rolling.

Keywords: white cast irons; wear resistance; eutectic carbides; deforming; heat treatment; phase transformations; plasticity

REFERENCES

1. Baranov A.A., Ivanov L.I. O sferoidizatsii evtecticheskogo karbida bystrorezhushchey stali [About spheroidization of eutectic carbide of the fast-cutting steel]. *Metalofizika* [Physics of metals], 1968, issue 27, pp. 91-94.
2. Baranov S.A. Kovka chuguna [Cast iron smithing]. *Soobshcheniya Vsesoyuznogo instituta metallov – Reports of All Union Institute of Metals*, 1931, no. 8, pp. 22-25.
3. Bunin K.P., Malinochka Ya.N., Taran Yu.N. *Osnovy metallografii chuguna* [Fundamentals of cast iron metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 415 p.
4. Vakulenko I.A. *Struktura i svoystva uglerodistoy stali pri znakoperemennom deformirovanii* [Structure and properties of the carbon steel during alternating deformation]. Dnipropetrovsk, Gaudeamus Publ., 2003. 94 p.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

5. Vakulenko I.O. *Vtoma metalevykh materialiv v konstruktivnykh rukhomoho skladu* [Fatigue of metallic materials in the construction of rolling stock]. Dnipropetrovsk, Makovetskyi Publ., 2012. 152 p.
6. Vitmozzher A. Deformatsiya chugunov [Cast iron deformation]. *Problemy sovremennoy metallurgii – Problems of Modern Metallurgy*, 1955, no. 4 (22), pp. 104-117.
7. Gurinovich V.I. Issledovaniye osobennostey strukturoobrazovaniya vysokoprochnogo chuguna pri plazmennoy obrabotke [Investigation of the features of structure formation of high-stress cast iron during plasma processing]. *Litye i metallurgiya – Casting and Metallurgy*, 2012, no. 2, pp. 129-133.
8. Migachev B.A., Potapov A.I. *Plastichnost instrumentalnykh staley i splavov* [Plasticity of instrument steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 88 p.
9. Myronova T.M., Donskaya T.R., Sidorova A.Yu. O mekhanizmax vliyaniya fazovykh perekhodov na povedeniye evtekticheskikh karbidov pri deformirovani [On the influence mechanisms of the phase transitions to the behavior of eutectic carbides during deformation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya "Fizyka, radioelektronika"* [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series "Physics, electronics"], 2012, vol. 20, no. 2, pp. 970-104.
10. Myronova T. Povysheniye plastichnosti belogo chuguna metodom initsirovaniya fazovykh prevrashcheniy v evtekticheskom tsementite [Plasticity increase of the white cast iron by the initiation of phase transformations in the eutectic cementite]. *New Technologies and Achievements in Metallurgy and Materials Engineering*, 2012, no 24, pp. 252-256.
11. Myronova T.M., Kutsova V.Z. *Struktura i svoystva deformiruyemykh chugunov* [Structure and properties of the deformed cast irons]. Dnipropetrovsk, Driant Publ., 2009. 190 p.
12. Petrushin G.D., Petrushina A.G., Golovin S.A. Neprugiye svoystva vysokoprochnogo chuguna s deformirovannym grafitom [Inelastic properties of high-strength cast iron with deformed graphite]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2011, no. 2, pp. 27-33.
13. Pogodin-Alekseyev G.I. Obrabotka davleniyem otlivok belogo chuguna [Pressing of castings from white cast iron]. *Vestnik mashinostroyeniya – Bulletin of Mechanic Engineering*, 1951, no. 14, pp. 57-60.
14. Pokrovskiy A.I. *Goryachaya plasticheskaya deformatsiya chuguna: struktura, svoystva, tekhnologicheskiye osnovy* [Hot plastic deformation of cast iron: structure, properties, technological bases]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 256 p.
15. Pokrovskiy A.I. Plasticheskoye techeniye vklyucheniya tsementita i grafita pri obrabotke davleniyem chuguna [Plastic flow of cementite and graphite inclusions in cast iron during pressing]. *Litye i metallurgiya – Casting and Metallurgy*, 2013, no. 1, pp. 88-95.
16. Ponomarev A.S. *Sovershenstvovaniye tekhnologii izgotovleniya osesimmetrichnykh izdeliy iz vysokoprochnogo chuguna za schet vybora termomekhanicheskikh rezhimov*. Kand. Diss. [Improvement manufacturing technology of axisymmetric products of high-strength cast iron by selecting the thermomechanical modes. Cand. Diss.]. Moscow, 2011, 118 p.
17. Silman G.I. Belyye legirovannyye chuguny s kompozitsionnoy strukturoy [White alloyed cast irons with composition structure]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2005, no. 7. pp. 94-100.
18. Skoblo T.S., Vorobyeva E.L. Issledovaniye plastichnosti chuguna dlya prokatnykh valkov [Study of cast iron plasticity for mill rolls]. *Sortoprokatnoye proizvodstvo – Mill for Rolling Production*, 1973. no. 6, pp. 105-111.
19. Firstov S.A., Tkalenko S.V., Kuzmenko N.N. Titanovyie «chuguny» i titanovyie «stali» [Titanium "irons" and titanium "steels"]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2009, no. 1, pp. 14-29.
20. Shcherbedinskiy G.V. Chugun kak perspektivnyy material XXI stoletiya [Cast iron as a promising material of the XXI century]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment of Metals*, 2005, no. 7, pp. 83-93.
21. Nichnicovskaya P.F., Myronova T.M., Taran Ju.N., Pirogova E.V., Decker R.F. Carbide Transformations Eutectic Cementite During The Hot Working of Chromium Vanadium Alloid White Irons. Pittsburg, The Minerals & Metals Society Publ., 1993. 51 p.
22. Mittemeijer Eric J. *Fundamentals of Materials Science*. New York, Springer Publ., 2011. 500 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. В. Ю. Карповим (Україна); д.т.н., проф. І. О. Вакулєнком (Україна)

Надійшла до редколегії 05.08.2012

Прийнята до друку 04.11.2013