

УДК 621.7.0142:669.112

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.53

МОЖЛИВІСТЬ ОТРИМАННЯ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ З БІЛОГО ЧАВУНУ З ПІДВИЩЕНОЮ ПЛАСТИЧНІСТЮ

Миронова Т. М.

Український державний університет науки і технологій

Анотація. У роботі проведено дослідження технології виготовлення листового прокату, товщиною до 2 мм із білого ледебуритного чавуну, легованого ванадієм. Визначено вплив параметрів гарячої прокатки на структуру чавуну. Після термічного оброблення рівень механічних властивостей чавунного листа відповідає властивостям високоміцних броньових сталей, а показники твердості навіть їх перевершують.

Ключові слова: білий чавун, легування, карбідне перетворення, кування, пластичність, прокатування, механічні властивості.

Вступ

Одним із найважливіших завдань сучасної промисловості є підвищення міцності листового прокату сталі, що вирішується завдяки легуванню та застосуванню термомеханічного оброблення. З іншого боку, нині застосовують виливки з легованих білих чавунів, які використовуються для зносостійких виробів, наприклад футерувальних плит розмельних агрегатів та бронеплит різноманітного призначення [1–4]. Однак для використання чавунних виробів необхідно підвищення їхньої стійкості до ударних навантажень, тобто підвищення ударної в'язкості. Оброблення тиском перетворює білі чавуни на матеріали з унікальним комплексом властивостей, що поєднує високу твердість та зносостійкість зі здатністю протистояти ударним навантаженням та коливанням температури [1].

Аналіз публікацій

Структура білого доевтектичного чавуну складається з дендритів аустеніту (продуктів його розпаду в процесі охолодження) та евтектичних колоній, що розташовані навколо цих кристалів у вигляді суцільної або переривчастої сітки. Наявність великої кількості карбідної фази в структурі цих сплавів обумовлює високу твердість і зносостійкість, але морфологія евтектичних колоній ледебуриту, де матричною фазою є крихкий цементит, підвищує здатність руйнуватися й викришуватися під час ударів, знижуючи експлуатаційну стійкість.

Подрібнення евтектичних карбідів у процесі пластичного деформування перетворює білі чавуни на матеріали з унікальним комплексом властивостей, що поєднують високу

твердість та зносостійкість зі здатністю протистояти ударним навантаженням та коливанням температури.

На кафедрі матеріалознавства та термічної обробки металів УДУНТ розроблено вміст ледебуритних чавунів та режими термомеханічного оброблення, що дозволяють здійснити їх оброблення тиском у промислових умовах. Підвищення пластичності досягається завдяки використанню карбідних перетворень у легованому ванадієм евтектичному цементиті [5–10]

Мета та постановка завдання

Метою є вивчення можливості отримання листа з білого чавуну обробленням тиском для подальшого його використання як виробів з підвищеною зносостійкістю та ударною в'язкістю, наприклад, бронеплит футеровки млинів і дробарок, а також броні для захисту від куль і осколків.

Необхідно дослідити вплив технологічних параметрів гарячого кування литих чавунних заготовок, відпалу та подальшої прокатки на структуру та властивості листа з метою подальшого їх застосування для броньових плит різноманітного призначення.

Дослідження впливу термодформаційного оброблення на структуру та властивості чавунного листового прокату

Для вивчення властивостей чавуну, що містить від 2,7 до 2,85 % вуглецю та до 2 % ванадію, під час пластичної деформації здійснювали 30кг плавку печі ЛЗ-67 (30кг). Виплавлення дослідних сплавів здійснювали для максимального наближення їхніх складів до промислових (без шкідливих домішок). Як шихтові матеріали використовували пере-

дільний чавун, брутталі 10 і промислові феросплави. Чавун розливали у виливниці квадратного перерізу (висота в прибутковій частині – 215 мм, перетин вгорі – 135 135 мм, внизу – 100100 мм). Отримані зливки піддавали двоступінчастому відпалу: I ступінь – 900 °С протягом 3 годин; II ступінь – 680 °С протягом 4 годин; нагрівання – не більше ніж 100 °С / год, охолодження – до 200 °С з пічкою.

На першому ступені відбувається початкова стадія карбідного перетворення в легованому ванадієм цементиті [5,6], а на другому – фазова $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перекристалізація твердого розчину. Вплив другого ступеня позначається під час нагрівання чавуну під гарячу деформацію, коли в процесі аустенізації продуктів евтектичного розпаду виникає ефект фазового наклепу, що сприяє формуванню оптимального розміру зерна аустеніту.

Відпал забезпечував релаксацію ливарних напружень та підготовку структури білого чавуну до подальшої пластичної деформації. Усі види термооброблення заготовок здійснювали в силітових та муфельних печах.

Спочатку зливки деформували на ковально-пресовому обладнанні ЗАТ «ФЕРРИТ» – кували на молоті на смугу 30 × 100 мм з кількома проміжними підігрівками (0,5 год), потім застосовували проміжний відпал за 1050 °С протягом 2 годин для підвищення пластичності чавуну. Температурний інтервал кування – від 1050 до 850 °С. Сумарний ступінь деформації становив 70 %. Для отримання прямокутної заготовки кування злитків було здійснено за 4 проходи.

Така схема забезпечила високу якість поверхні та деформованість поковок, які були використані для прокатки листа. Для досліджень вибирали зразки на різних етапах кування, які також піддавали проміжному відпалу.

Деформацію попередньо прокованих заготовок здійснювали на двовалковому лабораторному стані Інституту чорної металургії на валках із гладкою бочкою. Спочатку заготовки додатково відпалювали за двоступінчастим режимом з витримками під час аустенізації та перлітизації. Прокатку заготовок здійснювали поетапно з обтисканням на кожному проході від 1 до 2 мм. Спочатку, коли сумарна деформація не перевищувала 30 %, підігрівання заготовок до вихідної температури здійснювали після кожного проходу. Потім нагрівання здійснювали після трьох послідовних проходів. Проміжною витримкою за температури 1050 °С варіювали від 0,1 до 1,0 год.

Для білих чавунів велике значення на перших етапах деформування має стан більш крихкої структурної складової, зокрема ледебуриту. У цій роботі використані закономірності структуроутворення в евтектичному карбіді заліза під час його легування в процесі термодформаційного оброблення. Карбідні перетворення сприяють пластифікуванню цементиту й істотно підвищують пластичність чавуну [5].

З метою створення одного з варіантів технології виробництва виробів із білого чавуну методом деформації було розроблено та випробувано технологічну схему, що містить гарячу ковку та прокатку поковок.

Кування здійснювали в такий спосіб: після деформації ϵ до 15 % заготовки піддавали проміжному відпалу за 1050 °С протягом 2 годин, потім після остигання заготовок нижче ніж 800 °С відновлювали кування з проміжними підігрівками протягом 0,5 години.

У легованому ванадієм цементиті ще в процесі попереднього оброблення відбувається фазове перетворення: в пересиченому ванадієм цементиті виділяються карбіди ванадію, внаслідок чого частина цементиту знеуглецюється та перетворюється на аустеніт, водночас вміст ванадію в карбіді заліза знижується. Схематично це перетворення можна записати так: $(\text{Fe}, \text{V})_3\text{C} \rightarrow \text{VC} + \text{аустеніт} + \text{Fe}_3\text{C}$ (рис. 1).

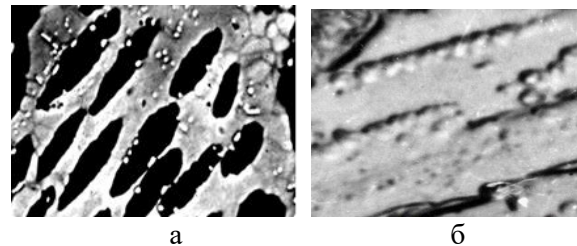


Рис. 1. Утворення карбідів MC у легованому ванадієм евтектичному цементиті: а – у процесі відпалу, $\times 1000$; б – у процесі гарячої прокатки, $\times 2500$

Це перетворення спостерігається в процесі теплового оброблення перед деформуванням та сприяє порушенню монолітності цементиту в колоніях ледебуриту внаслідок утворення міжфазних кордонів VC/Fe₃C (рис. 1, а). Але унікальність цього фазового переходу у ванадієвих чавунах полягає в тому, що, з одного боку, об'ємний ефект від виникнення карбідів VC у цементиті сприяє генеруванню дислокацій та полегшує процес їх пересування під час пластичної деформації завдяки під-

вищенню концентрації нерівноважних вакансій, а з іншого боку, на дефектах, зокрема на дислокаціях та смугах ковзання, полегшується процес зародження нових кристалів (рис. 1, б). Таким чином, деформація є своєрідним стимулятором фазових перетворень. Ефект пластифікування цементиту безпосередньо в процесі деформування називається дактилюванням [5, 6]. Завдяки цьому ефекту пластичність чавуну підвищується в 2–2,5 рази.

Попереднє гаряче кування значною мірою стимулює та прискорює процес розпаду цементиту на аустеніт та карбіди ванадію в процесі високотемпературної витримки. Попередня деформація менше ніж на 5 % не ефективна, помітних структурних змін, як порівняти з вихідним станом чавуну після відпалу, не відбувається [8]. Зі збільшенням ступеня деформації збільшується дефектність цементиту та процес його розпаду під час наступного нагрівання та подальшої витримки активізується. Збільшення ступеня попередньої деформації більше ніж на 15 % для литої заготовки є небезпечним, оскільки пластичність чавуну збільшується безпосередньо в процесі оброблення тиском в міру подрібнення евтектичних карбідів.

Застосування проміжного відпалу сприяє процесу розпаду цементиту, який пришвидшується в поверхневих шарах внаслідок зневуглицювання. Глибина зневуглицюваного шару після відпалу в атмосфері вуглекислого газу протягом від 2 до 5 г становить від 2 до 5 мм. Мікроструктура цього шару складається з аустеніту та дрібнодисперсних частинок VC. У перехідному шарі спостерігаються також залишки цементиту, що не зазнав розпаду. Твердість зневуглицюваного шару чавуну – 21 HRC, тоді як твердість чавуну в центральній частині зливка – щонайменше 40 HRC. Таким чином, відбувається утворення пластичної оболонки, в якій здійснюється подальше деформування. У процесі кування пластичний шар поступово зменшується, тобто «розковується», до 0,5 мм, водночас поверхня не має тріщин або розривів. Запропонована схема дозволяє значно підвищити деформованість чавунних заготовок [10].

Для здійснення процесу прокатування досліджували вплив температури та тривалості нагрівання на мікроструктуру кованих заготовок. Оптимальною температурою нагрівання є 1050 °C. Підвищення температури до 1100 °C може спричинити локальне оплавлення евтектичної складової у процесі прокати внаслідок додаткового розігріву дефор-

мації. Тривалі високотемпературні витримки призводять до інтенсивної сфероїдизації та коалесценції евтектичних карбідів, заростання стільників аустеніту та грубішання колоній ледебуриту (рис. 2а), тому тривалість високотемпературних витримок катаної заготовки має бути скорочена до 1 години і менше. Мінімальні обтискання за 1 прохід мають становити 1,0 мм, максимальні – 10,0 мм.

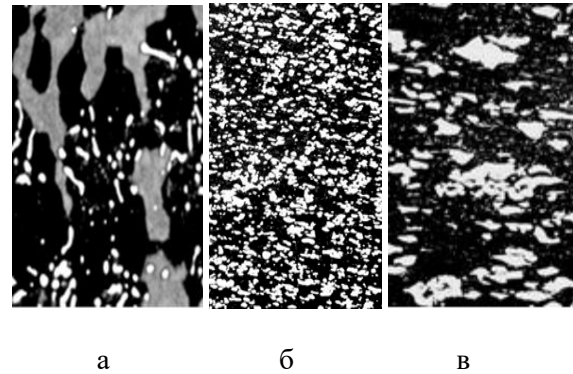


Рис. 1. Мікроструктура листа білого чавуну, товщиною 2,0 мм: а – після відпалу протягом 5 год за температури 1050 °C; б, в – після прокатування із стисканнями за кожний прохід 10 мм (б) і 1 мм (в); а – $\times 500$, б, в – $\times 100$.

Режими прокатування значною мірою впливають на кінцеву структуру листа. Наприклад, збільшення обтискання в кожному проході до 10 мм і нагрівання заготовки після кожного обтиснення до вихідної температури з короткостроковою витримкою 0,25 год призводить до рекристалізаційних процесів і переважного розподілу евтектичних карбідів вздовж кордонів, що утворюються [8].

Процес карбідного перетворення в цементиті здійснюється. Водночас процес деформації з малими обтисканнями (1 або 2 мм) і проміжними нагріваннями заготовки в інтервалі від 30 до 60 хв призводить до більш інтенсивного виділення карбідів ванадію в цементиті та значного витягування, а не дроблення цементиту. Таким чином, карбідна фаза за великих обтиснень подрібнюється інтенсивніше та рівномірно розподіляється в твердому розчині (рис. 2 б, в).

Після прокати твердість чавунного листа, товщиною 2,6 мм, становить 47 HRC. За допомогою термічного оброблення можна змінювати механічні властивості деформованого чавуну в широких межах завдяки зміні

структури матриці, що оточує карбідні домішки [11].

У табл. 1 наведено деякі механічні властивості чавунного листопрокату після термічного оброблення.

Рівень міцності дактильованого чавуну після оброблення тиском та гартування відповідає рівню міцності деяких куленепробивних сталей, наприклад, для сталі 35X2H2T $\sigma_b = 1700$ МПа за більш низької твердості -450HRB

Таблиця 1 – Вплив термічного оброблення на механічні властивості чавуну після деформування

Вид оброблення листа	HRC	σ_b , МПа	$\sigma_{\text{виг}}$ (МПа)	Ударна в'язкість 10^2МДж/м^2
Відпал за 660 °С 3 г	37	620	850-	84
Гарт. 860 °С + відпуск за 150 °С	65	1700	1570	37

Більш тонкі листи таких чавунів можуть використовуватися для створення композицій багат шарової броні з підвищеною балістичною стійкістю з декількох матеріалів з різними властивостями [4]

Висновки

Використання карбідного перетворення в легуюваному ванадієм цементиті дозволило здійснити комбіноване оброблення тиском й отримати із чавунних виливків лист, товщиною до 2 мм.

Застосовано технологічну схему виробництва поковок з білого чавуну, що складається з попереднього відпалу, кування зі ступенем деформації від 10 до 15 %, проміжного відпалу та остаточного кування з сумарним значенням $\varepsilon = 70$ %.

Здійснено прокатування отриманих куванням заготовок та досліджено вплив термодеформаційних параметрів на структуру чавуну. Збільшення часу обтискання в кожному проході до 10 мм є найбільш ефективним

Застосування кінцевого термічного оброблення після деформування чавуну забезпечує рівень механічних властивостей, що відповідає властивостям високоміцних броньових сталей, а показники твердості навіть їх перевершують.

Література

1. Сплави на основі заліза / Мазур В. І., Куцова В. З., Носко О. А., Ковзель М. А. Київ: вид. Політехніка, 2015. 275 с.

2. https://udhtu.edu.ua/wpcontent/uploads/2017/08/Paht_2729.pdf.
3. Cimpoeu S. The mechanical metallurgy of armour steels. Land division defence science and technology group. Commonwealth of Australia. 2016. P 42. URL: <https://apps.dcti.mil/>.
4. Розробка параметрів комплексної технології обробки основних жорстких елементів протикольових бронезилетів / Дейнеко Л. М. та ін. Металознавство та термічна обробка металів. 2019. № 3. С. 17–25.
5. Myronova T. White cast iron plasticity increasing using the method of phase transformations initiation in tutectic cementite. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Dyja, Anna Kawalek. 2012. Czestochowa. Series Monographs. № 24. P. 252–256.
6. Use of the dactyling effect to obtain a compositional structure in white iron during forming APEM IOP Conf. Series / Myronova T., Ashkelianets A., Chukhlib V., Biba N.: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Publishing / DOI:10.1088 / Електронне видання: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1164/1/012005>.
7. Миронова Т. . Використання фазових перетворень в евтектичних карбідах для підвищення пластичності сталей та чавунів. МТОМ. 2017. № 1. С.15–19
8. Mironova T., Proidak S. Peculiarities of alloying effect on the eutectic cementite behavior under hot rolling. New trends in production engineering. 2019. V. 2. Issue. P. 289–300. DOI 10.2478/ntpe-2019-0093.
9. Myronovs T., Stradomski Z. Effect of alloying on the eutectic cementite recrystallization after hot deformation. new technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by henryk radomiak, jaroslaw borysa. Czestochowa. 2015. Series Monographs, № 48. P. 330–334.
10. Дослідження особливостей поведінки двошарових чавунних заготовок в процесі кування / Миронова Т. М., Ашкелянєць А. В., Петруша А. А., Бояркін В. В. Обробка металів тиском: зб. наук. пр. 2019. № 2 (49). С. 76–81.
11. Миронова Т. М., Семенова І. О., Давидюк А. В. Дослідження впливу режимів нагріву СВЧ на структуру та твердість сортового прокату з дактильованого чавуну. Теплотехніка, енергетика і екологія в металургії: колективна монографія: в 2 кн. 2017. Книга 2. С. 280–283.

References

1. Splavy na osnovi zaliza / Mazur V. I., Kutsova V. Z., Nosko O. A., Kovzel M. A. Kyiv: vyd. Politekhnikha, 2015. 275 s.
2. https://udhtu.edu.ua/wpcontent/uploads/2017/08/Paht_2729.pdf.

3. Cimpoeu S. The mechanical metallurgy of armour steels. Land division defence science and technology group. Commonwealth of Australia. 2016. P 42. URL: <https://apps.dtic.mil/>.
4. Rozrobka parametriv kompleksnoi tekhnologii obrobky osnovnykh zhorskykh elementiv protykolovykh bronezhyletiv / Deineko, L. M. ta in. Metal science and heat treatment of metals. 2019. № 3. С. 17–25. [in Ukrainian].
5. Myronova T. White cast iron plasticity increasing using the method of phase transformations initiation in eutectic cementite. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Duja, Anna Kawalek. 2012. Czestochowa. Series Monographs. № 24. P. 252–256.
6. Use of the dactyling effect to obtain a compositional structure in white iron during forming APEM IOP Conf. Series / Myronova T., Ashkelyanets A., Chukhlib V., Biba N.: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Publish видання:
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1164/1/012005>.
7. Mironova T. M. Viktoristannya fazovih pere-tvoren v evtektichnih karbidah dlya pidvishennya plastichnosti stalej ta chavuniv. MTOM. 2017. №1. S. 15–19.
8. Mironova T., Proidak S. Peculiarities of alloying effect on the eutectic cementite behavior under hot rolling. New trends in production engineering. 2019. V. 2. Issue. P. 289–300. DOI 10.2478/ntpe-2019-0093.
9. Myronovs T., Stradomski Z. Effect of alloying on the eutectic cementite recrystallization after hot deformation. new technologies and achievements in metallurgy and materials engineering: a collective monograph edited by Henryk Radomiak, Jaroslaw Boryca. Czestochowa. 2015. Series Monographs, № 48. P. 330–334.
10. Doslidzhennya osoblivostej povedinki dvo-sharovih chavunnih zagotivok v procesi kuvann-ya / Mironova T. M., Ashkelyanec A. V., Petrusha A. A., Boyarkin V. V. Obrabotka metallov davleniem: tematich. Sb. nauchn. tr. 2020. №2 (49). 2020. S. 76–81.
11. Mironova T. M., Semenova I. O., Davidyuk A. V. Doslidzhennya vplivu rezhimiv nagrivu SVCh na strukturu ta tverdist sortovogo prokatu z daktilovanogo chavunu. Teplotehnika, energetika i ekologiya v metallurgii: kollektivnaya monografiya: v 2 kn. 2017. Kniga 2. S. 280–283.

Міронова Тетяна Михайлівна, д.т.н., проф. каф. матеріалознавства і термічної обробки металів, t.myronova.myh@gmail.com, тел. +38 067-713-83-65, Український державний університет науки і технологій, проспект Ю. Гагаріна 4, кімн. 220,

м. Дніпро, 49600, Україна.

Possibility of obtaining rolled sheet from white iron with increased plasticity

Abstract. Problem. In the work, a study of the technology of manufacturing sheet metal up to 2 mm thick from white ledeburite cast iron alloyed with vanadium was carried out. Cast-iron purveyances forged preliminary. After forging purveyances were rolled with the different wringing out. At rolling a total degree of deformation was 70 %. The additional annealing helped to bring down hardness of sheet and moulding of pipes became possible. White cast-iron has high plasticity because there are phase transformations in a vanadium eutecticum cementite. **Goal.** The goal of work is a study of sheet rolling of white cast-iron's bars to use for the armour and weld-fabricated pipes. **Methodology.** Experimental cast iron contains 2.7–2.85 % C and up to 2 % V. 30 kg of castings were melted. The total degree of deformation was 70 %. After forging, rolling was carried out on a two-roll laboratory mill on rolls with a smooth barrel. **Results.** The technological scheme for the production of white cast iron forgings is applied, which includes preliminary annealing, forging with a degree of deformation from 10 to 15 %, intermediate annealing and final forging with a total $\epsilon = 70$ %.

Originality The use of carbide transformation in vanadium-doped cementite made it possible to carry out combined pressure treatment and obtain sheets up to 2 mm thick from iron castings Preliminary hot forging greatly stimulates and accelerates the process of cementite disintegration into austenite and vanadium carbides during high-temperature exposure. Rolling of forging blanks was carried out and the influence of thermal and deformation parameters on the structure of cast iron was investigated. **Practical value.** Application of final heat treatment after deformation of cast iron provides a level of mechanical properties that corresponds to the properties of high-strength armor steels, and the hardness indicators even exceed them. Thinner sheets of such cast iron can be used to create compositions of multi-layer armor with increased ballistic resistance from several materials with different properties.

Key words: white cast iron, alloying, carbide transformation, forging, plasticity, rolling, mechanical properties

Myronova Tetiana, professor, Doct. of Science, Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, t.myronova.myh@gmail.com, tel. +38 067-713-83-65. Ukrainian State University of Science and Technology, r. 220, 4 Yury Gagarin avenue, Dnipro, 49600, Ukraine.