

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.01

doi: 10.31498/2225-6733.45.2022.276233

© Дан Л.О.¹, Трофімова Л.О.²**ЩОДО РОЛІ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНИТУ В ПОЛІПШЕННІ КОМПЛЕКСУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ**

В статті розглянуті та проаналізовані переваги високоміцного чавуну як конструкційного матеріалу. Доведено, що залишковий аустеніт, що отримується при термічній обробці і перетворюється в мартенсит під час навантаження, дозволяє суттєво підвищити рівень механічних та експлуатаційних характеристик виробів. Вказані сучасні напрямки отримання залишкового аустеніту в високоміцних чавунах.

Ключові слова: високоміцний чавун, залишковий аустеніт, бейніт, ізотермічне гартування.

L.O. Dan, L.O. Trofimova. On the role of residual austenite in improving the complex of properties of ductile cast iron. This article is analyzing the prospects and ways to expand the field of applying ductile cast iron-high-strength cast iron in technology. Ductile cast iron occupies a special place among structural materials. With the same level of mechanical properties, having less specific weight than steel, it provides less weight of products in comparison with steel. This reduces the consumption of raw materials and energy resources in the manufacture and operation of machines and mechanisms. There is a positive effect both in terms of economy and ecology. In addition, ductile cast iron has better casting properties than steel. In recent years, scientists and engineers have focused their efforts on finding new ways to improve the complex of mechanical and operational properties of ductile cast iron. This will make it possible to expand the field of their application and obtain additional advantages. A very effective direction – obtaining bainite matrix and a great amount of stable austenite in the structure of ductile cast iron by heat treatment allows to realize martensitic transformation in the most loaded parts during their operation and thereby increases adaptability. In this case, in addition to the traditional type of heat treatment – one-stage isothermal hardening, the technology of two-stage isothermal hardening is actively implemented, which allows for providing more dispersed ferrite and more stable austenite in the structure. A fundamentally new approach to obtaining the favorable microstructure of ductile cast iron is the organization of a foundry and heat treatment complex that makes it possible to obtain the ferrite-austenite mixture in the structure of ductile cast iron directly from the cast state, bypassing a separate heat treatment operation.

Key words: ductile cast iron, residual austenite, bainite, isothermal hardening.

Постановка проблеми. Сьогодні під час проектування будь-якого технічного продукту крім експлуатаційних характеристик враховують його «екологічність» («green-ness»). За визначенням авторів [1] цей показник характеризує об'єм використаної енергії та вплив на навколишнє середовище (випромінювання, викиди тощо) як під час виробництва виробу, так і протягом його служби. Під час обговорення екологічності машини та механізму тема зниження ваги є досить актуальною. Крім зменшення кількості ресурсів, задіяних у виробничому циклі, результатом

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, AGH UST, Academic Centre for Materials and Nanotechnology, Cracow, Poland, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

зниження ваги буде зменшення витрати палива, необхідного для приведення машини в рух, а отже, кількості парникових газів, що виділяються.

Останніми роками велику увагу вчених та інженерів сконцентровано на дедалі ширшому застосуванні високоміцних чавунів (ВЧ). Переваги високоміцного чавуну – його менша, ніж у сталі, питома вага і можливість одержання виробів з нього різними методами лиття, найменш енергетично затратними порівняно з куванням, зварюванням, екструзією. Крім цього високоміцний чавун характеризується кращою, ніж високоміцна сталь, оброблюваністю.

З іншого боку, такий чавун у 2,5 рази важчий за алюмінієві сплави, але в 3 рази міцніший, а також істотно дешевший. Він має високу рідкоплинність під час заповнення ливарних форм, що із застосуванням методів точного лиття дає змогу успішно конкурувати з алюмінієвими сплавами [2]. За даними World Foundry Organization з 2000 по 2015 рік випуск виливків з високоміцного чавуну виріс з 24 до 32% від загального обсягу литва за рахунок зменшення кількості сталевих виливків [3].

Разом з тим, слід зазначити, що потенціал цього матеріалу розкритий не повністю. Забезпечення в його структурі за рахунок термічної обробки в поєднанні з відповідною системою легування залишкового аустеніту – це один з ефективних шляхів підвищення комплексу його механічних та експлуатаційних властивостей, а, отже, розширення можливостей застосування.

Чому так важлива наявність залишкового аустеніту в структурі? Відповідь знайдено давно. У процесі експлуатації деталей, у структурі металу яких міститься залишковий аустеніт, реалізується мартенситне перетворення в найбільш навантажених ділянках. За словами автора [4] таким чином матеріал адаптується до умов експлуатації, зміцнює сам себе в міру необхідності, і таким чином повною мірою розкриває закладений у нього потенціал.

Мета статті – проаналізувати роль залишкового аустеніту у формуванні комплексу механічних та експлуатаційних властивостей високоміцних чавунів, а також способів його отримання з погляду розширення можливостей їх застосування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Залишковий аустеніт разом із мартенситом і бейнітом є однією з головних структурних складових загартованої сталі та чавуну, яка може чинити різнобічний вплив на їхні властивості.

Наприкінці XIX століття у Франції Ф. Осмонд, вивчаючи цементовані зразки сталі після загартування, виявив цікаву особливість у їхніх властивостях. Так, у міру збільшення вмісту вуглецю до 1,3 мас. %, їхня твердість зростала, а потім, за подальшого збільшення вмісту вуглецю, починала зменшуватися. Після ретельного дослідження зразків він зробив висновок, що структура сталі складається принаймні з двох частин. Одна з них, тверда і магнітна, була такою ж, як у загартованих сталях з меншим вмістом вуглецю. Інша складова, м'яка і немагнітна, за властивостями нагадувала структуру сталі Гадфільда. Дещо пізніше, Осмонд назвав цю складову загартованих високовуглецевих сплавів заліза аустенітом [5].

Питання про вплив хімічного складу сталі на кількість залишкового аустеніту докладно розглянуто в монографії В.Д. Садовського та О.А. Фокіної [6]. Показано, що кількість залишкового аустеніту під час загартування високовуглецевих сталей може досягати до 60%, а в легованих конструкційних – до 10-15%. У структурі загартованих маловуглецевих сталей залишкового аустеніту майже немає. У сталях із вмістом вуглецю менше ніж 0,6 мас. % кількість залишкового аустеніту становить 2-3%. Крім хімічного складу на кількість залишкового аустеніту можуть впливати й інші чинники: температура нагріву сталі та режим охолодження під час загартування, а також зовнішні чинники. Серед зовнішніх чинників слід насамперед відзначити вплив пружних напружень, пластичної деформації, обробки холодом і магнітного поля [7].

З огляду на сказане, природно було б припустити, що в чавунах: сірих, високоміцних, з вмістом вуглецю понад 2% після термообробки може також бути присутнім залишковий аустеніт.

Дійсно, реалізація деяких режимів термічної обробки чавунів, як-от і високоміцних, забезпечує в їхній структурі наявність залишкового аустеніту. Під час навантаження такого чавуну, що містить у структурі залишковий аустеніт, відбувається фазове перетворення аналогічно до відомого ефекту в TRIP-сталях. Це позитивно впливає на службові характеристики і значно збільшує можливості застосування цього матеріалу в різних галузях техніки [8].

Формування сприятливої структури чавуну під час термообробки пов'язане з вибором температури загартування і часом витримки за цієї температури, температурою відпуску і часом витримки за цієї температури. Прийнято вважати, що найкраще поєднання міцнісних і пластичних властивостей забезпечує бейнітна матриця чавуну (в англійській літературі такі чавуни отримали назву Austempering Ductile Iron – ADI). Отримання такої матриці пов'язане з проведенням ізотермічного загартування [9].

Аналізуючи роботи [9-13], можна дійти висновку, що режим ізотермічного загартування складається з наступних двох операцій: перша – аустенітизація, що проводиться за температури 850-920°C, або до ~ 950°C [10], та витримка; друга – переохолодження аустеніту з подальшим його розпадом в ізотермічних умовах при температурі 320-450°C, або в діапазоні 300-500°C [10], та подальше охолодження на повітрі.

Бейнітні структури утворюються в результаті перетворення аустеніту при температурі 250-500°C і безперервного охолодження аустенізованого чавуну зі швидкістю, вищою за критичну, або за ізотермічної витримки аустенізованого чавуну в інтервалі температур бейнітного перетворення [9-13]. При цьому аустеніт за температури 500-350°C розпадається на ферит (α -фазу) і γ -аустеніт із підвищеним вмістом вуглецю. Надмірно тривала витримка за температури розпаду аустеніту призводить до утворення дисперсних карбідів.

З наведених у роботі [8] даних видно, що під час ізотермічного загартування високоміцного чавуну в області температур 350°C виникає понад 30% залишкового аустеніту, який є досить стабільний і практично не перетворюється на мартенсит за подальшої витримки. Результати досліджень [8] деформованих зразків показали, що пластична деформація призводить до часткового розпаду залишкового аустеніту. Розпадається приблизно п'ята частина від початкової кількості. Така, здавалося б, невелика кількість матеріалу, що піддається перетворенню з ОЦК структури на мартенсит, істотно впливає на процеси деформаційного перетворення, оскільки цей перехід супроводжується значною зміною об'єму. Отримані результати підтверджують той факт, що в широко відомих TRIP-сталях зміна вмісту залишкового аустеніту від 10 до 8% призводить до практично триразового їхнього зміцнення в діапазоні деформації 0-10% [14]. Безсумнівно, що виявлений навіть частковий розпад аустеніту під дією деформації є значущим для зміцнення.

Що стосується вибору оптимальних температур загартування, то в роботі [12] було встановлено, що реакція аустенітизації не може бути завершена при температурі 850°C, оскільки в матриці все ще існує доєвтектоїдний ферит. Температура аустенітизації 1000°C, на думку авторів, призведе до утворення великих зерен і може знизити процентний вміст вуглецю в аустеніті. У цьому випадку після охолодження утворюється більше мартенситу. Це призведе до збільшення крихкості. Оптимальне поєднання міцнісних і пластичних властивостей можна отримати при використанні температури аустенітизації від 900 до 950°C за часу аустенітизації від двох до трьох годин.

Згідно з домінуючими уявленнями [12-17], механічні властивості ADI визначаються такими трьома факторами: долею аустеніту, насиченого вуглецем, вмістом вуглецю в ньому, а також морфологією фериту. Швидкість зародження фериту контролюється ступенем переохолодження. За високого переохолодження зароджується більше феритних пластин. Крім того, відсотковий вміст вуглецю в аустеніті залежить в основному від швидкості дифузії атомів вуглецю, яка полегшується високою температурою аустеніту. Тому низка дослідників [18-21] запропонувала двоетапний процес ізотермічного загартування для отримання дрібногочастого фериту та стабільнішого аустеніту з вищим вмістом вуглецю в матриці ADI для поліпшення механічних властивостей. У двоетапному процесі повністю аустенізований високоміцний чавун спочатку охолоджують до низької температури (250-265°C, витримка 5 хв.) [20, 21] для зародження феритних пластин. Потім температуру ізотермічної витримки підвищують за постійної швидкості нагріву або зразки переміщують в іншу піч із вищою температурою (290-400°C, витримка 2 години) для зростання феритних пластин і полегшення дифузії вуглецю в аустеніт.

Порівняно з одностадійним ADI, пластинки фериту в матриці двостадійного ADI дрібніші. Різниця в розмірі феритних пластин між двома типами ADI стає значною, коли температура охолодження знижується до 250°C [20].

Вміст вуглецю в стабільному аустеніті за двостадійного режиму ізотермічного загартування за даними рентгеноструктурного аналізу виявився вищим, ніж за одностадійного, на 2-10%

залежно від температури остаточної витримки [20]. Одночасно при цьому відзначалося збільшення твердості на 14-18%, межі міцності на 9-15% (максимальне значення ~1600 МПа при температурі витримки 290°C) і в'язкості руйнування, K_{IC} , на 10% (максимальне значення ~75 МПа·м^{1/2} при температурі витримки 370°C) з одночасним зниженням відносного подовження в 1,5 рази [20].

Порівнюючи зношування зразків із «двостадійного» ADI і загартованого за звичайним режимом високоміцного чавуну внаслідок тертя ковзання під тиском, автори [22] виявили таку особливість. Твердість металу з наближенням до поверхні, що зазнала зносу, у «звичайного» ВЧ зменшувалася, а у «двостадійного», навпаки, збільшувалася. При цьому втрата маси при зношуванні в другому випадку була значно меншою, ніж у першому. Рентгеноструктурний аналіз деформованих при зношуванні шарів «двостадійного» ADI виявив зменшення кількості аустеніту з 41 до 26%.

Недоліками традиційного виробництва ADI методом ізотермічного загартування є висока трудомісткість і енергоємність процесу, а також використання спеціального термічного устаткування і рідких охолоджувальних середовищ у вигляді розплавів солей, лугів і металів зі шкідливими викидами.

У цьому плані цікавими є роботи [23, 24], в яких високий комплекс механічних та експлуатаційних властивостей високоміцного низьколегованого Cr-Ni-Mo-Cu чавуну отримували не ізотермічним загартуванням, а звичайним загартуванням і відпуском. Загартування в оливі з температури нагріву 930°C (витримка 3 години) забезпечило в металевій матриці зразків високоміцного чавуну мартенсит і залишковий аустеніт. Після відпуску за температури 400°C разом із кулястим графітом у структурі були присутні дрібнодисперсний перліт і залишковий аустеніт. При цьому за рахунок мартенситного перетворення під час навантаження досягалося оптимальне поєднання механічних властивостей і зносостійкості.

Оригінальний комплексний спосіб лиття – ізотермічного загартування деталей з високоміцного чавуну розробили автори [25]. Спосіб дає змогу отримувати виливки з ADI з литого стану без застосування додаткової термообробки. З метою зниження витрат на обладнання для обробки виливків і поліпшення екологічних умов такої обробки спосіб містить затвердіння розплаву ВЧ у піщаній формі з сипучого піску, виготовленій у контейнерній опоці, охолодження затверділого виливка в цій формі, видалення виливка із сипучого піску форми за температури 850-1000°C, охолодження виливка до 300-500°C в контейнерній опоці, засипання в контейнерну опоку піску з температурою 300-500°C з подальшою витримкою виливка при цій температурі.

Висновки

Аналіз літератури показав наступне:

1. Високоміцний чавун є перспективним конструкційним матеріалом. Він володіє високими характеристиками міцності і пластичними характеристиками, хорошими ливарними властивостями, меншою питомою вагою, ніж сталь, і меншою вартістю, ніж алюмінієві сплави. Тому він може успішно замінити їх, забезпечуючи меншу вагу і меншу вартість машин і механізмів.

2. За допомогою термічної обробки в структурі високоміцного чавуну можна отримати залишковий аустеніт, який у процесі експлуатації під навантаженням зазнає мартенситного перетворення. Це надає матеріалу властивість адаптивності та додатково покращує експлуатаційні характеристики деталей.

3. При цьому вибір системи легування, температури і часу аустенітизації, температури і часу ізотермічної витримки дає змогу ефективно керувати формуванням структури високоміцного чавуну, зокрема отримувати бейнітну матрицю, залишковий аустеніт у потрібній кількості та з необхідним ступенем стабільності для найкращого поєднання його механічних і службових властивостей.

4. Крім подібного традиційного підходу до формування структури і властивостей високоміцного чавуну розроблено технології, які або не потребують тривалої термічної обробки, або взагалі виключають термічну обробку як окрему операцію.

Перелік використаних джерел:

1. Keough J.R. Austempered Ductile Iron (ADI) - A Green Alternative for India [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.foundryinfo-india.org/images/pdf/TS-2A-IV.pdf>.
2. Fras E. Thin Wall Ductile and Austempered Iron Castings as Substitutes for Aluminum Alloy Castings / E. Fras, M. Gorny // Archives of Foundry Engineering. – 2010. – Volume 10, № 3. – Pp. 5-10.
3. Census of world casting production. Total casting tons hits 112 million [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.thewfo.com/contentfiles/downloads/49.pdf>.
4. Малинов Л.С. Получение в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита и реализация эффекта самозакалки при нагружении для использования внутренних резервов – перспективное направление в ресурсосбережении / Л.С. Малинов // Строительство, Материаловедение, Машиностроение. – 2003. – Вып. 22. – С. 88-93.
5. Тыркель Е. История развития диаграммы железо-углерод / Е. Тыркель. – М. : Машиностроение, 1968. – 280 с.
6. Садовский В.Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В.Д. Садовский, Е.А. Фокина. – М. : Наука. – 1986. – 113 с.
7. On the Role of Retained Austenite in the Structure of Alloyed Steels and the Effect of External Factors / V.M. Schastlivtsev, Yu.V. Kaletina, E.A. Fokina, A.Yu. Kaletin // The Physics of Metals. – 2014. – Vol. 115, № 9. – Pp. 904-917. – Mode of access: <https://doi.org/10.1134/S0031918X14090105>.
8. Возможности импортозамещения сменных деталей грунтообрабатывающей сельхозтехники литыми изделиями из высокопрочного бейнитного чугуна / С.М. Волощенко, К.А. Гогаев, Ю.Н. Подрезов, М.Г. Аскеров, А.М. Миропольский // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 38-50. – (Серія: Нові рішення в сучасних технологіях). – Mode of access: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.02>.
9. Найдек В.Л. Бейнитный высокопрочный чугун / В.Л. Найдек, В.П. Гаврилюк, И.Г. Неижко. – К. : Наука, 2008. – 140 с.
10. Покровский А.И. Использование высокопрочного бейнитного чугуна для изготовления зубчатых колес / А.И. Покровский, Л.Р. Дудецкая // Литье и металлургия. – 2015. – № 2. – С. 126-136.
11. Полухин М.С. Разработка и использование чугунов с шаровидным графитом с повышенными механическими и триботехническими свойствами : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Полухин Максим Сергеевич. – Брянск, 2009. – 148 с.
12. A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons / B. Wang, G.C. Barber, F. Qiub, Q. Zoub, H. Yang // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9, №1. – Pp. 1054-1069. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.074>.
13. Wilk-Kolodziejczyk D. Comparative analysis of the properties of the nodular cast iron with carbides and the austempered ductile iron with use of the machine learning and the support vector machine / D. Wilk-Kolodziejczyk, K. Regulski, G. Gumienny // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – № 87. – Pp. 1077-1093. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8510-y>.
14. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading / R. Blondé, E. Jimenez-Melero, L. Zhao, J.P. Wright, E. Brück, S. van der Zwaag, N.H. van Dijk // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – № 618. – Pp. 280-287. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.008>.
15. Hsu Cheng-Hsun. A study on microstructure and toughness of copper alloyed and austempered ductile irons / Cheng-Hsun Hsu, Kuan-Ting Lin // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 528, №18. – 2011. – Pp. 5706-5712. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.035>.
16. Cui J. Microstructures and Mechanical Properties of a Wear-Resistant Alloyed Ductile Iron Austempered at Various Temperatures / J. Cui, L. Chen // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – № 46. – Pp. 3627-3634. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2928-y>.
17. Donnini R. Assessment of the microstructure evolution of an austempered ductile iron during austempering process through strain hardening analysis / R. Donnini, A. Fabrizi, F. Bonollo // Metals

- and Materials International. – 2017. – № 23. – Pp. 855-864. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12540-017-6704-y>.
18. Soenoko R. The effects of two-steps austempering heat treatment on the tensile strength and toughness of nodular cast iron / R. Soenoko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 8. – Pp. 277-282.
 19. Dakre V. Mechanical Characterization of Austempered Ductile Iron Obtained by Two Step Austempering Process / V. Dakre, D.R. Peshwe, S.U. Pathak // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2017. – №70. – Pp. 2381-2387. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1099-5>.
 20. Yang J. Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process / J. Yang, S.K. Putatunda // Materials & Design. – 2004. – Vol. 25, № 3. – Pp. 219-230. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2003.09.021>.
 21. Yan F.K. Deformation mechanisms in an austenitic single-phase duplex microstructured steel with nanotwinned grains / F.K. Yan, N.R. Tao, F. Archie // Ibid. – 2014. – № 81. – Pp. 487-500. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.054>.
 22. Kumari U.R. Study of wear behaviour of austempered ductile iron / U.R. Kumari, P.P. Rao // Journal of Materials Science. – 2009. – № 44. – Pp. 1082-1093. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/s10853-008-3195-8>.
 23. Дан Л.А. Разработка нетрадиционной технологии изготовления прокатных валков из Cr-Ni-Mo ВЧШГ / Л.А. Дан, Л.А. Трофимова, Л.Н. Шварц // Вестник Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь. – 2005. – Вып. 15. – С. 84-87.
 24. Дан Л.А. Технология изготовления чугуновых прокатных валков для условий мелкосерийного и единичного производства / Л.А. Дан, Л.А. Трофимова, И.В. Мороховский // Известия ВУЗов, Черная металлургия. – 2011. – № 1. – С. 44-47.
 25. Пат. 2196835 Российская Федерация, МПК C21D5/02, C21D1/20, B22D27/04. Способ получения различной структуры металлической матрицы в заготовках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом из литого состояния / К.В. Макаренко, И.К. Кульбовский. – Заявл. 13.07.2000; опубл. 20.01.2003, Бюл. № 2.

References:

1. Keough J.R. Austempered Ductile Iron (ADI) - A Green Alternative for India Available at: <http://www.foundryinfo-india.org/images/pdf/TS-2A-IV.pdf> (accessed 15 August 2022).
2. Fras E., Gorny M. Thin Wall Ductile and Austempered Iron Castings as Substitutes for Aluminum Alloy Castings. *Archives of Foundry Engineering*, 2010, volume 10, № 3, pp. 5-10.
3. Census of world casting production. Total casting tons hits 112 million Available at: <http://www.thewfo.com/contentfiles/downloads/49.pdf> (accessed 10 August 2022).
4. Malinov L.S. Poluchenie v strukture stali i chugunov metastabil'nogo austenita i realizatsiia efekta samozakalki pri nagruzhennii dlia ispol'zovaniia vnutrennikh rezervov – perspektivnoe napravlenie v resursosberezhenii [The receipt in the structure of steels and cast iron austenitis and the implementation of the self-proclaiming of the self-adjusting when using internal reserves is a prominent direction in resource conservation]. *Stroitel'stvo, Materialovedenie, Mashinostroenie – Construction, materials science, mechanical engineering*, 2003, vol. 22, pp. 88-93. (Rus.)
5. Tyrkel' E. *Istoriia razvitiia diagrammy zhelezo-uglerod* [The history of the development of the iron-carrier diagram]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 280 p. (Rus.)
6. Sadovskii V.D., Fokina E.A. *Ostatochnyi austenit v zakalenoj stali* [Residual austenite in hardened steel]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 113 p. (Rus.)
7. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A., Kaletin A.Yu. On the Role of Retained Austenite in the Structure of Alloyed Steels and the Effect of External Factors. *The Physics of Metals*, 2014, vol. 115, № 9, pp. 904-917. doi: 10.1134/S0031918X14090105.
8. Voloshchenko S.M., Gogaev K.A., Podrezov Iu.N., Askerov M.G., Miropol'skii A.M. Vozmozhnosti importozameshcheniia smennykh detalei gruntoobrabatyvaiushchei sel'-khoztekhniki litymi izdeliiami iz vysokoprochnogo beinitnogo chuguna [Possibilities of import substitution of replaceable parts for soilcultivating agricultural machinery by parts from high-strength bainitic cast iron]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Novi rishennia*

- v suchasnikh tekhnologiiakh – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technology*, 2019, № 1, pp. 38-50. doi: 10.20998/2413-4295.2019.01.02. (Rus.)
9. Naidek V.L., Gavriiliuk V.P., Neizhko I.G. *Beinitnyi vysokoprochnyi chugun* [Beynite high -strength cast iron]. Kyiv Nauka Publ., 2008. 140 p.
 10. Pokrovskii A.I., Dudetskaia L.R. *Ispol'zovanie vysokoprochnogo beinitnogo chuguna dlia izgotovleniia zubchatykh koles* [The use of high-strength baynite cast iron for the manufacture of gear wheels]. *Lit'e i metalurgiiia – Foundry production and metallurgy*, 2015, № 2, pp. 126-136. (Rus.)
 11. Polukhin M.S. *Razrabotka i ispol'zovanie chugunov s sharovidnym grafitom s povyshennymi mekhanicheskimi i tribotekhnicheskimi svoistvami*. Diss. kand. techn. nauk [Development and use of cast iron with spherical graphite with increased fur and tribotechnical properties. Cand. tech. sci. diss.]. Bryansk, 2009. 148 p. (Rus.)
 12. Wang B., Barber G.C., Qiub F., Zoub Q., Yang H. A review: phase transformation and wear mechanisms of single-step and dual-step austempered ductile irons. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, №1, pp. 1054-1069. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.074.
 13. Wilk-Kolodziejczyk D., Regulski K., Gumienny G. Comparative analysis of the properties of the nodular cast iron with carbides and the austempered ductile iron with use of the machine learning and the support vector machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, № 87, pp. 1077-1093. doi: 10.1007/s00170-016-8510-y.
 14. Blondé R., Jimenez-Melero E., Zhao L., Wright J.P., Brück E., van der Zwaag S., van Dijk N.H. Mechanical stability of individual austenite grains in TRIP steel studied by synchrotron X-ray diffraction during tensile loading. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, № 618, pp. 280-287. doi: 10.1016/j.msea.2014.09.008.
 15. Hsu Cheng-Hsun, Kuan-Ting Lin. A study on microstructure and toughness of copper alloyed and austempered ductile irons. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, №18, 2011, Pp. 5706-5712. doi: 10.1016/j.msea.2011.04.035.
 16. Cui J., Chen L. Microstructures and Mechanical Properties of a Wear-Resistant Alloyed Ductile Iron Austempered at Various Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, № 46, pp. 3627-3634. doi: 10.1007/s11661-015-2928-y.
 17. Donnini R., Fabrizi A., Bonollo F. Assessment of the microstructure evolution of an austempered ductile iron during austempering process through strain hardening analysis. *Metals and Materials International*, 2017, № 23, pp. 855-864. doi: 10.1007/s12540-017-6704-y.
 18. Soenoko R. The effects of two-steps austempering heat treatment on the tensile strength and toughness of nodular cast iron. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2014, vol. 8, pp. 277-282.
 19. Dakre V., Peshwe D.R., Pathak S.U. Mechanical Characterization of Austempered Ductile Iron Obtained by Two Step Austempering Process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2017, №70, pp. 2381-2387. doi: 10.1007/s12666-017-1099-5.
 20. Yang J., Putatunda S.K. Improvement in strength and toughness of austempered ductile cast iron by a novel two-step austempering process. *Materials & Design*, 2004, vol. 25, № 3, pp. 219-230. doi: 10.1016/j.matdes.2003.09.021.
 21. Yan F.K., Tao N.R., Archie F. Deformation mechanisms in an austenitic single-phase duplex microstructured steel with nanotwinned grains. *Ibid*, 2014, № 81, pp. 487-500. doi: 10.1016/j.actamat.2014.08.054.
 22. Kumari U.R., Rao P.P. Study of wear behaviour of austempered ductile iron. *Journal of Materials Science*, 2009, № 44, pp. 1082-1093. doi: 10.1007/s10853-008-3195-8.
 23. Dan L.A., Trofimova L.A., Shvarts L.N. *Razrabotka netraditsionnoi tekhnologii izgotovleniia prokatnykh valkov iz Cr-Ni-Mo VChShG* [Development of non-traditional technology for the manufacture of rolling rolls from CR-Ni-MO IDSHG]. *Vestnik Priazovckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2005, vol. 15, pp. 84-87. (Rus.)
 24. Dan L.A., Trofimova L.A., Morokhovskii I.V. *Tekhnologiiia izgotovleniia chugunnykh prokatnykh valkov dlia uslovii melkoseriinogo i edinichnogo proizvodstva* [Technology for the manufacture of cast-iron rolling rolls for the conditions of small-scale and single production]. *Izvestiia VUZov*,

- Chernaia metallurgiiia – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2011, № 1, pp. 44-47.
25. Makarenko K.V., Kul'bovskii I.K. *Sposob polucheniia razlichnoi struktury metallicheskoii matritsy v zagotovkakh iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom iz litogo sostoianiia* [A way to obtain various structures of a metal matrix in blanks of high-strength cast iron with spherical graphite from a cast state]. Patent RU, no. 2196835, 2003.

Рецензент: І.Ю. Малишева
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 15.09.2022

УДК 669.74

doi: 10.31498/2225-6733.45.2022.276234

© Шмельцер К.О.¹, Кормер М.В.², Мирошніченко Д.В.³, Чупринов Є.В.⁴

ВПЛИВ СТУПЕНЮ ЗМІШУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПІДГОТОВКИ ВУГІЛЬНИХ ШИХТ

В умовах погіршення сировинної бази та неритмічності поставок вугільних концентратів на коксохімічні підприємства при вирішенні проблеми якісної підготовки вугільної шихти для коксування одним з ключових моментів, який необхідно враховувати, є досягнення ступеню змішування вугільної шихти за всіма показниками до 98-99%. За результатами досліджень в умовах КХВ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено, що причиною низького ступеню змішування є велика кількість компонентів в шихті, мінливість їх фізико-хімічних показників. Встановлено, що підвищення гомогенності шихти обумовлює збільшення механічної міцності коксу за показником M_{25} на 2-4%, при цьому стиранність за M_{10} зменшується на 0,5%. Рекомендовано здійснювати організоване змішування вугільної шихти за допомогою змішувальних машин.

Ключові слова: вугілля, вугільна шихта, організоване змішування, однорідність технологічних властивостей, багатобасейнова сировинна база.

E.O. Shmeltser, M.V. Kormer, D.V. Miroshnichenko, E.V. Chuprinov. Influence of the degree of mixing on the quality of preparation of coal batches. The low degree of mixing is due to the large quantity of components in the of the batch, irregular supply of coal concentrates, fluctuations in their physical and chemical parameters. Research results indicate that increasing the homogeneity of the coal batch through the introduction of organized mixing will improve the physical and mechanical properties of coke. It should be noted that the smallest effect from the use of mixing units is achieved with the batch preparation scheme, which involves grinding all its components in one crushing unit. At the same time, the use one crusher instead two or four makes it possible to achieve a high degree of homogeneity of the batch. In the final grinding schemes, which provide for group or differentiated grinding the components of batch is required to use mixing machines. To ensure the efficiency mixing the components of the coal batch, it is desirable to install mixers in the transfer nodes, on the transfer of the batch from the conveyor to the conveyor or on top of the coal

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-6830-8747, shmelka0402@gmail.com

² канд. хім. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-6509-0794, maprina1955@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, dvimir79@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com