

УДК 621.78:669.131.7:629.4

Пам'яті академіка НАН України Ю. М. Тарана-Жовніра

ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ADI У ВИРОБНИЦТВО ЕЛЕМЕНТІВ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

УЗЛОВ К. І., *д. т. н., проф.*Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Анотація. Постановка проблеми. Впровадження у виробництво інмолд- та елмаг-процесів дозволило ефективно використовувати модифікатори, які надійно забезпечують формування у структурі чавуну графіту кулястої форми. Наступний потужний технологічний спосіб підвищення механічних та експлуатаційних властивостей ливарних виробів із чавуну з кулястим графітом – це термічна обробка у твердому стані з одержанням металевої матриці зі структурою «нижній або верхній бейніт». **Об'єкти дослідження:** чавуни з різною формою графітної складової за ГОСТ 1412 – 85, ДСТУ 3925 – 99, ГОСТ 7293 – 85. Дослідження властивостей матеріалів проводили порівняно з вимогами європейського та американського регіональних стандартів DIN EN 1564:1997, ASTM:A897M – 90. **Результати та їх обговорення.** Перші суттєві кроки в освоєнні термічної обробки високоміцних чавунів здійснили вчені з СРСР у середині 1950-х років. Яскравий внесок у розвиток вказаних наукових та практичних положень зробили Ю. М. Таран та К. П. Бунін зі співробітниками. Технологія ізотермічного гартування чавунів із кулястим графітом в Європі, Америці, Японії та інш. регіонах світу одержала активний розвиток із середині 80-х років ХХ сторіччя. В 1990-х роках набрали чинності міжнародні нормативні документи – ASTM:A897M-90 та DIN EN 1564:1997. Саме в той час, враховуючи актуальність проблеми та світовий рівень поширення технології ADI, роботи, що стосуються теоретичних досліджень та розробки практичних заходів у галузі ізотермічного гартування чавунів із кулястим графітом, були відновлені на кафедрі матеріалознавства НМетАУ під керівництвом Ю. М. Тарана. З урахуванням встановлених закономірностей формування бейнітної матриці різних типів створено та впроваджено у промислове виробництво технологічні схеми термічного зміцнення ADI для деталей залізничного призначення. Одержані результати досліджень дозволили розробити та впровадити національний нормативний документ ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006. **Висновок.** Наукові положення в галузі дослідження фазових перетворень матриці чавунів в умовах зсувно-дифузійної перекристалізації, започатковані Ю. М. Тараном, у ході активного розвитку дозволили організувати на сучасному етапі широке промислове впровадження індустріальних рішень і продовжують розвиватись на кафедрі матеріалознавства НМетАУ.

Ключові слова: чавун із пластинчастим графітом; чавун із кулястим графітом; термічна обробка; аустемперинг; структуроутворення; механічні властивості; нормативна документація; елементи рухомого складу; залізниця

ИНДУСТРИАЛЬНОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ADI В ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

УЗЛОВ К. И., *д. т. н., проф.*Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днепр, 49005, Украина, тел. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Аннотация. Постановка проблемы. Внедрение в производство инмолд- и элмаг-процессов позволило эффективно использовать модификаторы, которые надежно обеспечивают формирование в структуре чугуна графита шаровидной формы. Следующим мощным технологическим способом повышения механических и эксплуатационных свойств литейных изделий из чугуна с шаровидным графитом является термическая обработка в твердом состоянии с формированием металлической матрицы со структурой нижнего или верхнего бейнита. **Объекты исследования:** чугуны с разной формой графитной составляющей по ГОСТ 1412 – 85, ДСТУ 3925 – 99, ГОСТ 7293 – 85. Исследование свойств материалов проводили в сравнении с требованиями европейского и американского региональных стандартов DIN EN 1564:1997, ASTM:A897M – 90. **Результаты и их обсуждение.** Первые существенные шаги в освоении термической обработки высокопрочных чугунов были сделаны учеными из СССР в середине 1950-х годов. Заметный вклад в развитие указанных научных и практических положений был сделан Ю. Н. Тараном и К. П. Буниным с сотрудниками. Технология изотермической закалки чугунов с шаровидным графитом в Европе, Америке, Японии и др. регионах мира получила активное развитие со середины 80-х годов ХХ столетия. В 1990-х годах были введены в действие международные нормативные документы – ASTM:A897M-90 и DIN EN 1564:1997. Именно в это время, принимая во внимание актуальность проблемы и мировой уровень распространения технологии ADI, работы, посвященные теоретическим исследованиям и разработке практических мероприятий в области изотермической закалки чугунов с шаровидным графитом, были

восстановлены на кафедре материаловедения НМетАУ под руководством Ю. Н. Тарана. С учетом изученных закономерностей формирования бейнитной матрицы разных типов созданы и внедрены в промышленное производство технологические схемы термического упрочнения ADI для деталей железнодорожного назначения. Полученные результаты исследований позволили разработать и внедрить национальный нормативный документ ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006. **Вывод.** Научные положения в области исследования фазовых превращений матрицы чугунов при сдвигово-диффузионной перекристаллизации, созданные Ю. Н. Тараном, в ходе активного развития позволили организовать на современном этапе широкое промышленное внедрение индустриальных решений и продолжают развиваться на кафедре материаловедения НМетАУ.

Ключевые слова: чугун с пластинчатым графитом; чугун с шаровидным графитом; термическая обработка; аустемперинг; структурообразование; механические свойства; нормативная документация; элементы подвижного состава; железные дороги

INDUSTRIAL IMPLEMENTATION OF ADI TECHNOLOGIES FOR ELEMENTS OF RAILWAYS ROLLING STOCK PRODUCTION

UZLOV K.I., *Dr. Sci. (Tech.), Prof.*

Materials Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Gagarina ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 950-14-08, +38 (095) 416-97-70, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

Abstract. Case history. Implementation of inmol- and elmag-processes in production has allowed an efficient use of modifications, which reliably ensure formation of spheroidal graphite in the structure of cast iron. The following powerful technological means of mechanical and operational properties improving of casting products from nodular graphite cast iron is a heat treatment in a solid state with the receipt of the metal matrix with the structure of lower or upper bainite. **Objects of study:** cast irons with different form of graphite component as per GOST 1412-85, DSTU 3925-99, GOST 7293-85; properties investigation of materials was carried out in comparison with the requirements of European and American regional standards DIN EN 1564:1997, ASTM:A897M-90. **Results and discussion.** The first significant steps in the development of heat treatment of high-strength cast irons have been made by scientists from USSR in the middle of 1950s. A striking contribution to the development of the mentioned scientific and practical provisions has been made by Yu. N. Taran and K. P. Bunin with collaborators. Isothermal hardening technology for spheroidal graphite cast irons in Europe, America, Japan and others regions of the world received an active development since the middle of 80-ies of the 20th century. In the 1990s were entered in actuality international normative documents – ASTM:A897M-90 and DIN EN 1564:1997. Once in a while, given the urgency of the problem and the world level of ADI technology distribution, the work relating to theoretical research and development of practical activities in the field of nodular graphite cast irons isothermal hardening, were recovered at materials science department of NMetAU under Yu.N. Taran's leadership. With regard to established peculiarities of bainite different types matrix formation created and implemented into industrial production ADI thermal strengthening technological schemes for parts of railway destination. Obtained results allowed to developing and implementing the national normative document TU U 27.1-23365425-620:2006. **Conclusion.** Scientific regulations in the field of phase transformations study of cast irons matrix at replacement/diffusional recrystallization, based by Yu. N. Taran, during active development allowed at the present stage organizing the widespread industrial implementation of technological solutions and continuing evolving at materials science department of NMetAU.

Keywords: flake graphite iron; spheroidal graphite iron; heat treatment; austempering; structure formation; mechanical properties; normative documentation; elements of rolling stock; railroads

Постановка проблеми

До ХХ сторіччя, у зв'язку з пластинчастою формою графіту, чавуни традиційно супроводжувала слава крихкого з невисокою міцністю [14] матеріалу. Впровадження у виробництво інмолд- та елмаг-процесів («Дженерал Моторс» [16]) дозволило ефективно використовувати модифікатори, які надійно забезпечують формування у структурі чавуну графіту кулястої форми. При цьому цей клас чавунів одержав найменування «високоміцний» [1].

Наступним потужним технологічним способом підвищення механічних та експлуатаційних властивостей ливарних виробів із чавуну з кулястим графітом стала термічна обробка у твердому стані з одержанням металевої матриці зі структурою «нижній або верхній бейніт» [14] – ізотермічне гартування (аустемперинг). Така процедура

забезпечує цьому класу матеріалів ADI (Austempered Ductile Iron) [16], тобто – БЧКГ (бейнітному чавуну з кулястим графітом), конкурентну спроможність порівняно навіть із конструкційними сталями, які традиційно використовують у машинобудуванні.

Об'єкти дослідження

Матеріалом досліджень були чавуни з різною формою графітної складової за ГОСТ 1412 – 85 «Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки», ДСТУ 3925 – 99 «Чавун із кулястим графітом для виливків. Марки», ГОСТ 7293 – 85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки». Аналіз властивостей досліджених матеріалів проводили відповідно з вимогами європейського та американського регіональних стандартів DIN EN 1564:1997 «Austempered Ductile Cast Iron»,

ASTM:A897M – 90 «Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings».

Результати та їх обговорення

Як зауважують закордонні спеціалісти [16] з посиланням на працю [2] вчених із СРСР «перші суттєві кроки в освоєнні термічної обробки високоміцних чавунів були зробленими в середині 50-х років» минулого століття. Справді, в Радянському Союзі технології ізотермічного гартування (аустемперингу) чавунів здобули пильну увагу в 50–60-х роках ХХ сторіччя. Яскравий внесок у розвиток вказаних наукових та практичних положень зробили Ю. М. Таран та К. П. Бунін зі співробітниками [1; 5; 6].

Через те, що деякі економічні та технологічні особливості радянської промисловості висунули на перше місце технології графітизуючого відпалу (зокрема, дуже низька вартість природного газу), набутий досвід не одержав гідного розвитку. Враховуючи такий стан речей, незважаючи на те, що ГОСТ 7293-70 передумовлював дві марки бейнітного чавуну з кулястим графітом – ВЧ 100-4 та ВЧ 120-4, наступний ГОСТ 7293-85 ці чавуни з аустемперингом втратив. Крім того, національний стандарт ДСТУ 3925-99, який змінив собою в Україні ГОСТ 7293-85, таку ситуацію не виправив.

У той самий час технологія ізотермічного гартування чавунів із кулястим графітом в Європі, Америці, Японії та інших регіонах світу одержала активний розвиток [16–19] саме із середини 80-х років ХХ сторіччя.

Це зумовлено тим [14; 16–19], що переваги ADI у використанні вказаного класу матеріалів замість, наприклад, деформованих сталей для зубчастих коліс та шестерень пов'язані в першу чергу зі зниженням вартості, оскільки лиття має більш наближену форму до кінцевого виробу, внаслідок чого знижуються витрати матеріалу під час механічної обробки і кількість замін різального інструменту. Стійкість інструменту при цьому зростає за рахунок наявності у чавуні природного мастила – графіту. Процес термічної обробки чавуну суттєво коротший за сталь. Ці фактори, за розрахунками праці [16], знижують вартість виробу на 50 %. Деталі з ADI, крім того, мають вагу на 10 % меншу за сталеві. Завдяки цьому знижується загальна вага транспортного засобу, а це означає суттєве скорочення витрат палива. До того ж, завдяки чудовій демпфувальній здатності графіту гасити вібрації, робота механізмів стає майже безшумною. При цьому такі зубчасті колеса з ADI мають чудові значення циклічної і контактної-фрикційної втомленості.

Закономірно, для встановлення загального та багатократного використання технічних вимог до ADI, були розроблені, узгоджені, затверджені та набрали чинності міжнародні нормативні документи – американський (1990) ASTM:A897M-90 та Європейський DIN EN 1564:1997 (1997, тобто за два

роки до набуття чинності ДСТУ 3925-99 – див. вище).

Саме на початку 90-х років минулого сторіччя, враховуючи актуальність проблеми та світовий рівень поширення технології ADI, спираючись на досвід попередніх досягнень [1; 5; 6], роботи, що стосуються теоретичних досліджень та розробки практичних заходів у галузі ізотермічного гартування чавунів із кулястим графітом, відновили [15] на кафедрі матеріалознавства НМетАУ.

Під керівництвом Ю. М. Тарана був проведений ретельний аналіз сучасних уявлень про кінетику бейнітного перетворення металевої матриці чавунів із кулястим графітом [20] про загальні закономірності та специфічні особливості зсувної та зсувно-дифузійної перекристалізації в залізвуглецевих сплавах [7]. Побудовано діаграми твердофазних перетворень аустеніту за ізотермічного гартування легованих чавунів спеціального призначення з карбідною високовуглецевою складовою [3], половинчастих чавунів [8], чавунів із кулястим графітом [20]. Розроблено оптимальні параметри аустемперингу чавунів різних типів [3; 7; 8; 20] з погляду забезпечення найкращих показників механічних властивостей виробів відповідного призначення.

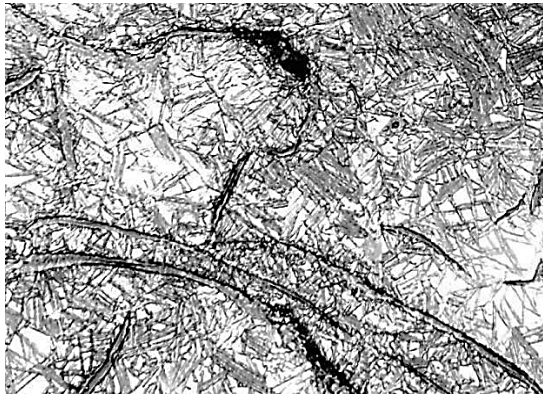
Створені технологічні рішення були індустріально використані у виробничих процесах термічного зміцнення лопаток і плит броньового захисту шрітOMETних машин на ВО «Південмаш» та каландрових валів на ВАТ «Дніпроважпапірмаш».

На початку нового тисячоліття науково-технічна рада Укрзалізниці щодо «Визначення напрямків робіт із модернізації візків вантажних вагонів» від 06.05.2001 року прийняла рішення про визначення хімічного складу та параметрів зміцнювальної термічної обробки чавунних фрикційних клинів з одночасним їх маршрутним випробуванням на залізничних шляхах України. При цьому, кресленням М1698.00.002 як матеріалу для виготовлення фрикційних елементів візків вантажних вагонів був передбачений чавун із пластичним графітом СЧ25 за ГОСТ 1412-85 у термозміцненому методом аустемперингу стані.

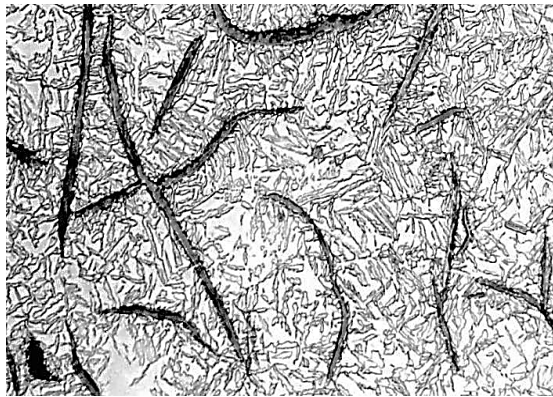
Дослідження були проведені під керівництвом Ю. М. Тарана [9], цього чавуну з бейнітною матрицею (рис. 1) показали підвищення щонайменше у 5 разів його зносостійкості в експлуатації в парах тертя із загартованими до показників твердості 400 НВ сталями 40Х та 30ХГСА порівняно з відповідними характеристиками стандартно передумовлених матеріалів.

Але, за даними аналізу механічних властивостей ізотермічно загартованих зразків чавуну СЧ25, було показано [9], що, незважаючи на досягнення безумовного поліпшення зносостійкості матеріалу, завдяки пластинчастій формі графітної складової, цей клас чавунів характеризується дуже незадовільними показниками пластичності та в'язкості (відносне видовження нульове –

руйнування розривних зразків відбувалося без утворення шийки, $KCU = 2,0 \text{ Дж/см}^2$), через що його майбутнє у виробництві конструктивних елементів візка залізничного вагона було поставлене під сумнів [9].



a



б (b)

Рис. 1. Мікроструктура ($\times 500$) чавуну марки СЧ25 після ізотермічного гартування з бейнітною матрицею: а – нижній бейніт, б – верхній бейніт / Fig. 1. Microstructure ($\times 500$) of cast iron grade SCH25 after isothermal hardening with bainite matrix: a – lower bainite, b – upper bainite

Як наслідок, у креслення М1698.00.002-І було внесено зміну щодо матеріалу для виготовлення фрикційного клина вантажного вагона на ВЧ 450-10 за ДСТУ 3925-99. Завдяки кулястій формі графіту у високоміцному чавуні у процесі його аустемперингу очікуваним було одержання приросту не тільки зносостійкості в указаних вище фрикційних парах візка вантажного вагона, а і механічних властивостей, зокрема в'язкості та відносного видовження.

Перші дослідно-промислові зразки ЧКГ виробництва ПАТ КСЗ [11] задовольнили очікування розробників технології, виробників і споживачів продукції, яка обговорюється. Тоді, за результатами маршрутних випробувань візків, оснащених фрикційними елементами із БЧКГ, у 2004 році учасники «Технічної наради» на ПАТ «Крюковський вагонзавод» у складі представників Укрзалізниці, Мінпромполітики, ПАТ «КВБЗ», ВАТ «Азовмаш», ВАТ «Дніпровагонмаш», ВАТ «Стахановський вагонзавод», ПАТ «КСЗ» та ін. прийняли рішення: «в ресорному підвищенні застосувати клин, виготовлений з високоміцного термічно зміцненого чавуну – 360...440 НВ».

Із метою реалізації цього рішення Державна адміністрація залізничного транспорту України створила підприємство ТОВ «А. Стакі-Рейл» (сучасна юридична назва – ТОВ «Амстед-Рейл»), на якому було організовано промислове виробництво елементів візків вантажних вагонів за технологіями ADI [12].

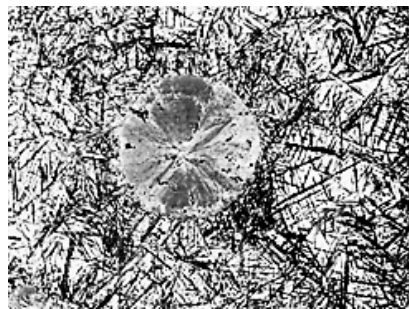
Перш ніж організувати промислове впровадження продукції, яка обговорюється, у серійне виробництво, необхідним було її нормативне забезпечення в Україні (див. вище). Одержані результати досліджень дозволили розробити та впровадити національний нормативний документ ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006 «Чавун із кулястим графітом, ізотермічно зміцнений методом аустемперингу для виливків». Рівень властивостей БЧКГ національних технічних умов порівняно з вимогами закордонних стандартів наведено в таблиці.

Таблиця

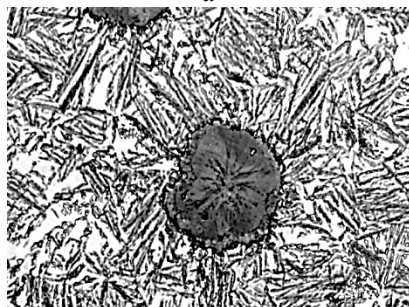
Механічні характеристики БЧКГ за ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006 порівняно з вимогами національного, міждержавного та закордонних стандартів / Mechanical properties of ADI according to TU U 27.1 – 23365425 – 604:2006 in comparison with requirement of national, interstate and foreign standards

№ з/п	Марка чавуну	Нормативний документ	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ_5 , %	Твердість, НВ
			Не менше			
1	EN-GJS-1200-2	EN 1564:1997	1 200	500	2	340...440
2	Grade 1400/1100/1	ASTM A897M	1 400	1 100	1	388...477
	Grade 1200/850/4		1 200	850	4	341...444
3	ВЧ 1000-2	ДСТУ 3925-99	1 000	700	2	270...360
	ВЧ100	ГОСТ 7293-85				
4	БЧКГ 1300-2	ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006	1 300	1 100	2	≥ 390
	БЧКГ 800-7		800	500	7	≥ 240

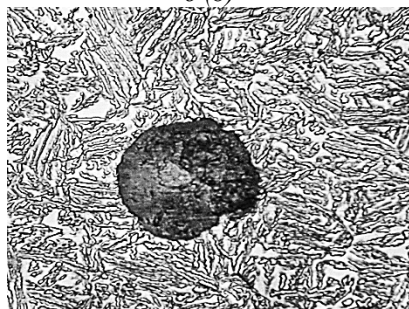
Таблиця 1 демонструє той факт, що вимоги до БЧКГ у створеному нормативному документі не поступаються рівню властивостей, передумовлених закордонними стандартами, завдяки чому вироби за ТУ У 27.1 – 23365425 – 604:2006 мають преференційне поєднання властивостей міцність / пластичність / в'язкість порівняно з відповідними деталями зі стандартних ЧКГ. При цьому забезпечується значне, в декілька разів, підвищення показників зносостійкості [7; 9; 11; 12; 20].



а



б (b)



в (c)

Рис. 2. Мікроструктура ($\times 500$) БЧКГ після аустемперингу в різних температурних інтервалах ізотермічного перетворення: а – 260 °С – нижній бейніт, б – 360 °С – змішана структура, в – 420 °С – верхній бейніт /
Fig. 2. Microstructure ($\times 500$) of ADI after austempering in different temperature intervals of isothermal transformation: a – 260 °C – lower bainite, b – 360 °C – mixed structure, c – 420 °C – upper bainite

Результати праць [7–12] свідчать, що досягнення чавунами з кулястим графітом після аустемперингу механічних характеристик (табл.), зіставних із рівнями властивостей стандартних сталей (навіть легованих), дозволяє розглядати БЧКГ як безпосередні замітники сталевих виробів, що традиційно використовуються, зокрема, для широкої номенклатури елементів рухомого складу залізниць.

У рамках лабораторних і промислових експериментів, крім того, були встановлені три температурні інтервали ізотермічного розпаду аустеніту ADI за зсувно-дифузійним механізмом, у яких формується бейнітна матриця різного типу (рис. 2), що сприяє отриманню поєднань, на вибір, високого рівня твердості, міцності та в'язкості виробів [13].

З урахуванням установлених температурних інтервалів формування бейнітної матриці різних типів розроблено технологічні схеми термічного зміцнення чавунів із кулястим графітом для деталей залізничного призначення за створеними ТУ У 27.1-23365425-604:2006, що дозволило прогнозно призначати режими аустемперингу БЧКГ для отримання різних типів бейнітної матриці виробів зі специфічними умовами експлуатації: фрикційних елементів візків вантажних вагонів високої твердості – нижній бейніт; конструкційних елементів із високими показниками міцності, пластичності та в'язкості – верхній бейніт (закладні деталі залізобетонних шпал та головки і штуцери з'єднувальних рукавів гальмових магістралей вагонів); деталі машин, що мають здатність до зміцнення у ході експлуатації – «змішана, перехідна» структура (елементи кар'єрних машин) [див., наприклад, 13].

Висновок

Наукові положення в галузі дослідження фазових перетворень матриці чавунів в умовах зсувно-дифузійної перекристалізації та управління закономірностями її структуроутворення, започатковані Ю. М. Тараном близько 60 років тому [1; 5; 6], у ході активного розвитку дозволили організувати на сучасному етапі широке промислове впровадження індустріальних рішень і продовжують розвиватись на кафедрі матеріалознавства НМетАУ, яка носить ім'я вченого, у напрямі поглиблення нових теоретичних знань і розширення практичних рішень [10] як для ADI, так і для легованих чавунів із карбідною високовуглецевою складовою [4].

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чугун с шаровидным графитом: монография / [К. П. Бунин, Ю. Н. Таран, А. В. Черновол]. – Киев : Изд-во АН УССР, 1955. – 98 с. – Режим доступа: <http://ntb.misis.ru:591/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:501692>
2. Демидова Т. Г. Изотермическая закалка чугуна с шаровидным графитом / Т. Г. Демидова, М. Н. Кунынский // Литейное производство. – 1955. – № 2. – С. 20–22. – Режим доступа: <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=3141829>

3. Куцов А. Ю. Дилатометричне дослідження твердофазних перетворень в білому чавуні, легovanому хромом / А. Ю. Куцов, Ю. М. Таран, К. І. Узлов, М. Ф. Євсюков // *Металознавство та обробка металів*. – 1999. - № 3. - С.44-49. – Режим доступу: <http://mtom.pgasa.dp.ua/issue/view/3506>
4. Куцова В. З. Вплив термічної обробки на зносостійкість та перерозподіл легуючих елементів у структурі чавуну 280×32НЗФ в процесі зносу тертям / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, А. В. Гребенева, І. В. Ратнікова, П. Ю. Швець // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. - № 1 (298). - С. 72–80. – Режим доступу: <http://www.metaljournal.com.ua/1-298-2016/>
5. Таран Ю. Н. Повышение износостойкости валков непрерывных тонколистовых станов / Ю. Н. Таран, А. Е. Кривошеев, Л. С. Рудницкий, И. Е. Лев // *Сталь*. – 1959. – № 7. – С. 28–36. – Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8234
6. Таран Ю. Н. Исследование изотермического распада аустенита в валковом чугуна / Ю. Н. Таран, А. Е. Кривошеев, Ю. К. Бунина // *Литейное производство*. – 1965. – № 7. – С. 57–63. – Режим доступу: <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=3141829>
7. Таран Ю. Н. Общие закономерности и специфические особенности сдвиговой и сдвигово-диффузионной перекристаллизации в железоуглеродистых сплавах / Ю. Н. Таран, К. И. Узлов, А. Ю. Куцов // *Теория и практика металлургии*. – 1997. – № 2. – С.40-45. – Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=54432
8. Таран Ю. Н. Исследование кинетики бейнитного превращения в половинчатом чугуна / Ю. Н. Таран, К. И. Узлов, А. Ю. Куцов, М. Ф. Евсюков // *Теория и практика металлургии*. – 1999. - № 2. - С.40-42. – Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=54432
9. Таран Ю. Н. Термоупрочненные чугуны с пластинчатым графитом для фрикционных деталей железнодорожного назначения / Ю. Н. Таран, К. И. Узлов, А. И. Бабаченко, Л. А. Моисеева // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 2. – С. 67–70. – Режим доступу: <http://www.metaljournal.com.ua/mgp-02-2003/>
10. Узлов К. І. Вибір раціонального залізвуглецевого сплаву для виготовлення литих деталей візків вантажних вагонів / К. І. Узлов // *Металознавство та обробка металів*. – 2015. - №1 (68). - С.41-47. – Режим доступу: <http://mtom.pgasa.dp.ua/issue/view/3506>
11. Узлов К. И. Производство опытной партии отливок «фрикционный клин» из термоупрочненных чугунов с шаровидным графитом / К. И. Узлов, А. Н. Хулин, В. Е. Эйдлис, Ю. П. Шамраев // *Металургическая и горнорудная промышленность*. - 2005. – № 1 (229). – С. 65–67. – Режим доступу: <http://www.metaljournal.com.ua/mgp-01-2005/>
12. Узлов К. И. Промышленное освоение технологии аустемперинга чугунов с шаровидным графитом на предприятии «А.Стаки-Рейл» / К. И. Узлов, А. Н. Хулин, Ж. А. Деметьева, В. В. Хливной, В. И. Дидковский // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. - № 4 (238). – С.79–81. – Режим доступу: <https://www.metaljournal.com.ua/mgp-04-2006/>
13. Узлов К. И. Анализ характера разрушения промышленных изделий из высокопрочных бейнитных чугунов в зависимости от структурного состояния их матрицы / К. И. Узлов, А. Н. Хулин, А. Ю. Борисенко, В. И. Сухомлин, // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. - № 4 (262). - С. 73–77. – Режим доступу: <http://www.metaljournal.com.ua/4-262-2010/>
14. Elliott R. *Cast Iron Technology* / R. Elliott. – London, Boston, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington : Butterworth, 1988. – 244 p. – Режим доступу: <http://ru.bookzz.org/book/2368276/6dba82>
15. Hamid Ali A. S. Austempering of Low Manganese Ductile Irons. Part 4. Relationship Between Mechanical Properties and Microstructure / A. S. Hamid Ali, K. I. Uzlov, N. Darwish, R. Elliott // *Mater. Sci. Technol.* – Jan. 1994. – Vol. 10. – Pp. 35–40. – Режим доступу: <http://link.springer.com/journal/10853>
16. Harding R. Engineers cast new roles for iron / R. Harding // *New scientist*. – 1986. – Pp. 40–43. – Режим доступу: <https://www.newscientist.com/issues/>
17. Rundman K. B. The Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron / K. B. Rundman, D. J. Moore, T. N. Rouns // *J. Heat. Treat.* – Michigan Technological University, USA, 1988. – № 5 (2). – Pp. 79–95. – Режим доступу: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=1842
18. Schmidt I. Unlubricated Sliding Wear of Austempered Ductile Iron / I. Schmidt, A. Schuchert // *Z. Metallkd.* – Ruhr-Universität, Bochum, Germany, Dec. 1987. – № 78 (12). – Pp. 871–875. – Режим доступу: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11669-012-9997-z>
19. Takita M. Effect of Retained Austenite on Properties of Austempered Ductile Iron / M. Takita, Y. Ueda // *Cast Met.* – Nagoya University, Japan 1988. – № 1 (3). – Pp. 147–155. – Режим доступу: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF02645338>
20. Taran Yu. N. The Bainite Reaction Kinetics in Austempered Ductile Iron / Yu. N. Taran, K. I. Uzlov, A. Yu. Kutsow // *J. de Phys. IV.* – 1997. – Vol. 7, Colloque C5, Nov. – Pp. 429–434. – Режим доступу: <http://jp4.journaldephysique.org/en/>

REFERENCES

1. Bunin K.P., Taran Yu.N. and Chernovol A.V. *Chugun s sharovidnym grafitom* [Spheroidal Graphite Iron]. Kyiv : Publ. Academy of Science of Ukraine, 1955, 98 p. (in Russian).
2. Demidova T.G. and Kunjavsky M.N. *Izotermicheskaya zakalka chuguna s sharovidnym grafitom* [Spheroidal Graphite Iron Isothermal Quenching]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry Industry]. 1955, no. 2, pp. 20–22. (in Russian)
3. Kutsow A.Yu., Taran Yu.N., Uzlov K.I. and Evsyukov M.F. *Dilatometrichne doslidzhennya tverdogfaznih peretvoren' v bilomu chavuni, legovanomu hromom* [Dilatometrical Study of Solid State Transformations in White Iron Alloyed with Chromium]. *Metалознавство та обробка металів* [Metals Science and Metals Treatment]. 1999, no. 3, pp. 44–49. (in Ukrainian)
4. Kutsova V.Z., Kovzel M.A., Grebeneva A.V., Ratnikova I.V. and Shvets P.Yu. *Vpliv termichnoi obrobki na znosostijkist' ta pererospodil leguyuchih elementiv u strukturi chavunu 280×32N3F v procesi znosu teryam* [Heat Treatment Effect on Wear Resistance and Redistribution of Alloying Elements in Iron 280×32N3F Structure During the Wear Friction Proceeding].

- Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and Mining Industry]. 2016, no. 1 (298), pp. 72–80. (in Ukrainian)
5. Taran Yu.N., Krivosheev A.E., Rudnitsky L.S. and Lev I.E. *Povyshenie iznosostojkosti valkov nepreryvnyh tonkolistovyh stanov* [Increasing of Thin Sheet Continuous Mill Rolls Wear Resistance]. *Stal'* [Steel]. 1959, no. 7, pp. 28–36. (in Russian)
6. Taran Yu.N., Krivosheev A.E. and Bunina Yu.K. *Issledovanie izotermicheskogo raspada austenita v valkovom chugune* [Study of Austenite Isothermal Transformation in Roll Iron]. *Litejnoe proizvodstvo* [Foundry Industry]. 1965, no. 7, pp. 57–63. (in Russian)
7. Taran Yu.N., Uzlov K.I. and Kutsov A.Yu. *Obschie zakonomernosti i specificheskie osobennosti sdvigovoy i sdvigovo-diffuzionnoj perekristallizacii v zhelezouglerodistykh splavakh* [General Principles and Specific Peculiarities of Replacing and Replace – Diffusion Recrystallization in Iron – Carbon Alloys]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 1997, no. 2, pp. 40–45. (in Russian)
8. Taran Yu.N., Uzlov K.I. and Kutsov A.Yu. *Issledovanie kinetiki bejnitnogo prevrascheniya v polovinchatom chugune* [Kinetic of Bainite Transformation Study in Mottled Iron]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 1999, no. 2, pp. 40–42. (in Russian)
9. Taran Yu.N., Uzlov K.I., Babachenko A.I. and Moiseeva L.A. *Termouprochnennye chuguny s plastinchatym grafitom dlya frikcionnykh detalej zheleznodorozhnogo naznacheniya* [Heat Treated Flake Graphite Irons for Railroad Application Friction Elements]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2003, no. 2, pp. 67–70. (in Russian)
10. Uzlov K.I. *Vibir racional'nogo zalizovuglecevoogo splavu dlya vigotovlennya litih detalej vizkiv vantazhnykh vagoniv* [Selection of Rational Iron - Carbon Alloy for Freight Car Bogies Casting Elements Production]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metals Science and Metals Treatment]. 2015, no. 1 (68), pp. 41–47. (in Ukrainian)
11. Uzlov K.I., Khulin A.N., Eidlis V.E. and Shamraev Yu.P. *Proizvodstvo opytnej partii otlivok «frikcionnyj klin» iz termouprochnennykh chugunov s sharovidnym grafitom* [Experimental Lot of Castings “Friction Wedge” Production from Heat Treated Spheroidal Graphite Iron]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2005, no. 1 (229), pp. 65–67. (in Russian)
12. Uzlov K.I., Khulin A.N., Dement'eva J.A., Khlivnoy V.V. and Didkovsky V.I. *Promyshlennoe osvoenie tehnologii austemperinga chugunov s sharovidnym grafitom na predpriyatii «A.Staki-Rejl»* [Technology of Spheroidal Graphite Iron Austempering Industrial Development on “A.Stacki – Rail” Enterprise]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2006, no. 4 (238), pp. 79–81. (in Russian)
13. Uzlov K.I., Khulin A.N., Borisenko A.Yu. and Sukhomlin V.I. *Analiz haraktera razrusheniya promyshlennykh izdelij iz vysokoprochnykh bejnitnykh chugunov v zavisimosti ot strukturnogo sostoyaniya ih matricy* [Industrial ADI Products Destruction Character Depending on Structural Condition of Their Matrix]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2010, no. 4 (262), pp. 73–77. (in Russian)
14. Elliott R. *Cast Iron Technology*. London, Boston, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington: Butterworth, 1988, 244 p.
15. Hamid Ali A. S., Uzlov K.I., Darwish N. and Elliott R. Austempering of Low Manganese Ductile Irons. Part 4. Relationship Between Mechanical Properties and Microstructure. *Mater. Sci. Technol.* Jan. 1994, vol. 10, pp. 35–40.
16. Harding R. Engineers cast new roles for iron. *New scientist*. 1986, 6 March 1986, pp. 40–43.
17. Rundman K.B., Moore D.J. and Rouns T.N. *The Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron*. J. Heat. Treat. Michigan Technological University, USA, 1988, no. 5 (2), pp. 79–95.
18. Schmidt I. and Schuchert A. Unlubricated Sliding Wear of Austempered Ductile Iron. *Z. Metallkd.* Ruhr-Universitat, Bochum, Germany, 1987, no. 78, (12), pp. 871–875.
19. Takita M. and Ueda Y. Effect of Retained Austenite on Properties of Austempered Ductile Iron. *Cast Met.* Nagoya University, Japan, 1988, no. 1 (3), pp. 147–155.
20. Taran Yu.N., Uzlov K.I. and Kutsov A.Yu. [The Bainite Reaction Kinetics in Austempered Ductile Iron]. *J. de Phys.* IV. 1997, vol. 7, Colloque C5, Nov, pp. 429–434.

Надійшла до редколегії 13.03.2017

Прийнята до друку 18.03.2017