
НОВІ МЕТОДИ ТА ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ

УДК 621.74.02; 621.74.041; 669.13 (03)

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. наук. співр.,

e-mail: doro55v@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН Україна (Київ, Україна)

СПОСОБИ ОХОЛОДЖЕННЯ ВИЛИВКІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ЛТО-ПРОЦЕСУ, ЩО ВЗАЄМОДОПОВНЮЄ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ТА ТЕРМООБРОБКИ

У ливарному виробництві у розвиток способів регульованого охолодження виливків після затвердіння їх у піщаній формі запропоновано поєднання лиття з термообробкою (ТО), яке можна назвати ЛТО-процесом. Розглянуто умови застосування ЛТО-процесу для виливків із залізовуглецевих сплавів із середнім та високим вмістом вуглецю. ФТІМС НАН України за 2018–2019 роки отримано низку патентів України на способи взаємодоповнення лиття і ТО як різновидів ЛТО-процесу, в яких в якості ТО використано ізотермічне гартування виливків. Найбільш зручний для ЛТО процес лиття в піщаних вакуумованих формах, пісок з яких легко висипається після припинення вакуумування, не перешкоджаючи видаленню гарячого виливка з форми. Для випадків прилипання ливарної фарби до поверхні виливка, піщаних залишків або місцевих зон пригару, особливо для крупних виливків, запропоновано спосіб гартування шляхом подачі на гарячий виливок повітряно-піщаної суміші, як при піскоструминній обробці. Виконано короткий огляд низки робіт, опублікованих за останні роки, про вплив змінних технологічних характеристик, механічних властивостей, мікроструктури на процес виготовлення двофазного високоміцного чавуну (ВЧ) типу ADI. Уданий час відзначено істотне зростання досліджень і розробок у всьому світі, присвячених отриманню двофазних і багатофазних мікро- і макронеоднорідних структур, що містять ферит, аусферит, бейніт, мартенсит, карбіди, карбонітриди, інтерметаліди та їх поєднання. Завдяки цьому поліпшують властивості відомих залізовуглецевих сплавів, що піддаються ізотермічному гартуванню за традиційними схемами. Ізотермічно загартований чавун ADI з можливістю регульованого введення вільного (проевтектоїдного) фериту в металеву матрицю дозволяє підвищити оброблюваність виливків, що дає підстави для включення технології ТО такого ADI до складу ЛТО-процесу поряд з іншими відомими методами ТО.

Ключові слова: охолодження виливків, термообробка, залізовуглецеві сплави, ізотермічне загартування, високоміцний чавун, ADI, ЛТО-процес, ферит, аусферит.

У ливарному виробництві у розвиток способів регульованого охолодження виливка після затвердіння його в піщаній формі запропоновано поєднання лиття з термообробкою (ТО), яке можна назвати ЛТО-процесом. В останні роки зростає увага до такого виду ТО, як Austempering – ізотермічне гартування чорних металів із середнім та високим вмістом вуглецю, яке створює металургійну структуру, що називається бейнітом. Austempering використовується для збільшення міцності, ударної в'язкості металу і дає більш низький ступінь деформації, ніж у ви-

Нові методи і прогресивні технології лиття

падках традиційного гартування і відпускання. Деталі нагрівають до температури приблизно на 200–300 °С нижче температури затвердіння металу, потім досить швидко охолоджують до температури початку бейнітного перетворення (за відомою традиційною схемою) і витримують протягом часу, достатнього для отримання бажаної бейнітної мікроструктури.

Зокрема, ізотермічно загартований високоміцний чавун (ВЧ), що є має назву англійською Austempered Ductile Iron (ADI), являє собою ВЧ з оптимальним поєднанням міцності, пластичності та ударної в'язкості. Він може служити значною альтернативою сталі і алюмінієвим сплавам через більш низьку густину (7,2 г/см³ проти 7,85–7,87 г/см³ для сталей) і більш низькі виробничі витрати через менше споживання енергії. Як матеріал, що практично має властивості сталі і чавуну, ADI близький за собівартістю виробництва до чавуну, одержуваного не за кілька переділів як сталь, а як чавун – за один (ЛТО-процес) або два процеси (традиційно роздільні процеси лиття і ТО). Тим самим розширення застосування ADI дасть значну економічну вигоду.

ФТІМС НАН України за 2018–19 роки отримано патенти України №№ 12373, 131581, 131907, 131968, 133701 (повний опис яких за номером патенту є на сайті Укрпатенту <http://base.uipv.org/searchINV/>), а також подано заявки №№ u201903780, u201906835, u201906841 і u201906852 на патентування способів взаємодоповнення лиття і ТО, як різновидів ЛТО-процесу. Традиційно виконується окремо від ливарного процесу така ТО, як ізотермічне гартування, для отримання чавуну типу ADI або ізотермічно загартованої сталі складається з чотирьох стадій: 1) аустенізація при температурі 850–1000 °С протягом 0,3–1,0 год або довше, особливо для чавунів; 2) гартування до температури бейнітного перетворення (за <10 с зі швидкістю охолодження, що залежить від легуючих елементів і відповідно до С-подібних кривих на діаграмі ізотермічного перетворення аустеніту найбільш критична в межах 700–500 °С [1, 2]); 3) ізотермічна витримка при 250–450 °С; 4) охолодження до кімнатної температури.

При ЛТО економляться час і енерговитрати шляхом вилучення гарячого чавунного або сталевого виливка при температурі аустенітного стану (без стадії 1 для традиційної ТО) з піщаної форми. А потім гарячий виливок гартують згідно 2–4 стадій, виключаючи перлітне і мартенситне перетворення, за винятком, що мартенситне перетворення використовують в окремих нових спеціальних способах ТО.

Загальні схеми охолодження залізовуглецевих сплавів для більшості видів ТО, що традиційно застосовують, включають нагрівання до температури аустенізації (рис. 1) [2, 3]. На думку автора, практично всі види ТО, що містять нагрівання та витримку виливка для аустенізації, придатні для взаємодоповнення з процесами лиття в разі

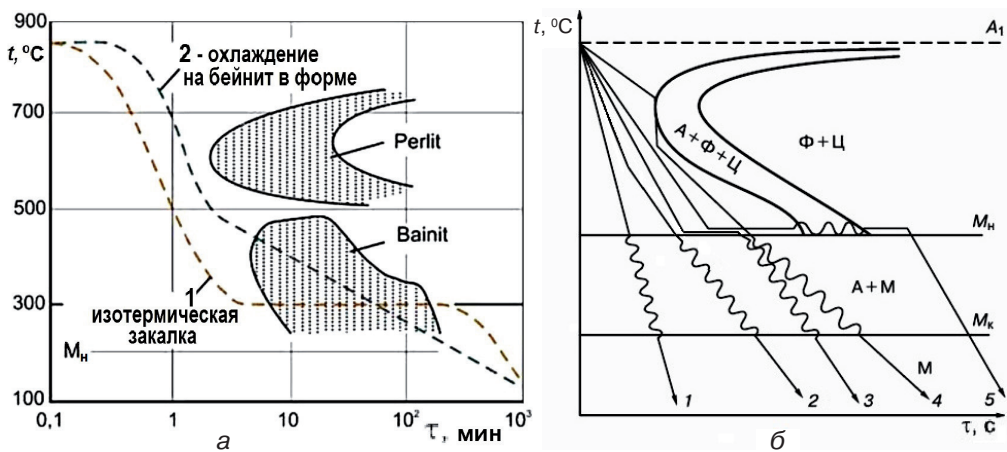


Рис. 1. Схеми охолодження (температура t – час τ): а – при ізотермічному гартуванні та охолодженні графітованих чавунів [2]; б – при різних способах гартування сталі [3] (1 – безперервне гартування в одному охолоджувачі; 2 – переривчасте гартування в двох середовищах; 3 – ступінчасте гартування; 4 – «ідеальний» режим охолодження; 5 – ізотермічне гартування; Ф – ферит; А – аустеніт; Ц – цементит; М – мартенсит)

Структура металевої матриці, кількість включень кулястого графіту, модуль Юнга, інші механічні властивості та склад випробовуваних матеріалів [8] (при вмісті Mg в DI, IDI, ADI 0,3–0,05 %)

Матеріал	Мікроструктура	шт./мм ²	E, GPa	σ_B , MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	δ , %	HB	C	Si	Mn	Cu
DI-400	100 % ферит	220	160	440	305	19	150	3,30	2,80	0,10	0,07
DI-600	3,5 % ферит–65 % перліт	310	165	722	426	10	220	3,70	2,20	0,18	0,44
DI-700	5 % ферит–95 % перліт	244	161	805	487	8	244	3,80	2,40	0,20	1,10
IDI PD 06	перліт – ферит	280	170	855	592	8	260	3,50	2,20	0,10	0,10
IDI	перліт – ферит	220	170	758	455	10	240	3,70	2,40	0,10	0,07
ADI 800	аусферит	244	170	858	551	15	270	3,80	2,61	0,10	0,83
ADI 1050	аусферит	244	163	1110	794	13	330	3,83	2,41	0,10	0,93
ADI 1050	аусферит	244	161	1160	831	12	350	3,50	2,80	0,10	0,93
ADI 1200	аусферит	244	148	1330	1046	7	370	3,40	2,91	0,10	1,10
42CrMo4	сорбіт (після Q&T)	–	210	1026	882	14	305	0,38	0,15	0,10	0,02

вирішення проблеми швидкого вибивання гарячого виливка з форми, маючи на увазі, що до 80 % виливків із залізовуглецевих сплавів виготовляють у піщаних формах. Крім швидкого вилучення з форми, поверхня виливка повинна бути чистою від залишків формувальних матеріалів для ефективного впливу на неї гартівних середовищ.

Якщо ливарники звично пишаються майстерністю формовки, то концепція ЛТО-процесу звертає увагу на майстерність вибивки та охолодження виливка. Ці проблеми

перш за все відносяться до технології ливарної форми, зокрема забезпечення легкої вибивальності формувальної суміші, запобігання пригару на поверхні виливка, а також до процесів очищення виливків. Результат вирішення цих проблем полягає у відпрацюванні операцій швидкого вилучення гарячого виливка з чистою поверхнею із форми з подальшою передачею гарячого виливка без стадії 1 відразу до стадії 2 в зазначеному вище традиційному переліку стадій процесу Austempering. Іншими словами, замість нагрівання холодного виливка в термічній печі (відповідно до стадії 1), ми його «нагріваємо» у плавильній печі, з рідкого металу отримуючи гарячий вилівок в аустенітному стані при необхідній температурі.

Найбільш зручний для ЛТО процес лиття в піщаних вакуумованих формах (ВПФ- та ЛГМ-процеси, що забезпечують до 3–4 % литва у світі), пісок з яких легко висипається після припинення вакуумування, практично не перешкоджаючи видаленню гарячого виливка з форми. Для випадків прилипання ливарної фарби до поверхні виливка, піщаних залишків або місцевих зон пригару, особливо для великих виливків і в місцях підведення до них металу, запропоновано спосіб гартування шляхом подачі на гарячий підвішений (або що лежить на гратчастому піддоні) і, що обертається, в камері вилівок повітряно-піщаної суміші (як при піскоструминній обробці) [4], включаючи використання щільового сопла або двох і більше сопл.

У камерах піскоструминної обробки відпрацьований матеріал зазвичай осипається вниз і надходить в сепаратор, а потім – знову на обробку. Різний ступінь усадки при охолодженні гарячих металу і неметалевого забруднення сприяє легкому відділенню останнього, що допустимо також для виливків, вибитих в аустенітному стані із піщано-глинистих форм по-сирому. У камері піскоструминної обробки практично всякий наліт швидко видаляється з поверхні виливка разом з виконанням його охолодження. Способи охолодження методом піскоструминної обробки доступні для автоматизації, в тому числі з застосуванням роботів-маніпуляторів, а також кількох форсунок, що забезпечують рівномірний чи регульований потік дисперсного матеріалу навколо виливка. Запропонований спосіб піскоструминної обробки гарячого виливка з аустенітного стану [4] є ще одним методом взаємодоповнення швидкого охолодження (гартування на стадії 2) виливка (за схемами на рис. 1) і очищення його поверхні.

Розмірковуючи про можливі перспективи розвитку ЛТО-процесу з адаптацією його до формувальних технологій, розглядали таку інформацію. З 110 млн т виливків, виготовлених у світі в 2017 р., частка виливків з сірого, високоміцного і ковкого чавунів складає 76,2 млн т, а зі сталі – 11,3 млн т [5]. В Україні при об'ємі близько 0,5 млн т виливків в 2016 р., за даними асоціації АЛУ, з чавуну отримано 47,8 %, а зі сталі – 44,3 % литва. У Росії при об'ємі литва 4,25 млн т в 2017 р. 52 % отримано з чавуну і 27 % – зі сталі, при цьому 42 % литва отримано в сирих піщано-глинистих формах [6]. Про вигоди від виробництва ізотермічно загартованого ВЧ типу ADI свідчать порівняльні дані механічних властивостей литого ВЧ та ADI, аналіз таких даних наведено, зокрема, в оглядах [7, 8]. У таблиці показано характеристики зразків дев'яти марок ВЧ (ductile iron, DI), в тому числі чотирьох ADI, а також однією конструкційної сталі 42CrMo4 (після ТО типу Q & T) [8].

Видно, що межа міцності σ_B термообробленого чавуну ADI 1200 утричі вища, ніж DI-400 в литому стані. А по хімічному складу перший з них головним чином відрізняється лише міддю (близько на 1 %), якою можна дошихтувати розплав другого чавуну, якщо з нього виплавляти перший. Однак твердість чавуну ADI 1200 є на рівні 370 HB, яка в 2,47 рази вища, ніж у DI-400, що може ускладнити його механообробку.

Серед технологічних перешкод реалізації ЛТО-процесу для лиття в піщано-глинистих формах по-сирому можуть бути труднощі в досягненні однаково швидкого охолодження всіх частин виливка через неможливість швидкого видалення піщаних стрижнів або очищення від формувальної суміші всієї поверхні виливки. Усунення такої перешкоди залежить від розробки, крім піскоструминного охолодження-очи-

Нові методи і прогресивні технології лиття

щення, нових комбінованих способів, наприклад, чергування спреєрного чи повітряного охолодження з піскоструминним очищенням.

Для реалізації ЛТО-процесу пропонується задіяти весь накопичений досвід традиційних технологій ТО, що відомі раніше без поєднання з ливарним процесом. Розглянемо основні положення цих технологій ТО, зокрема ізотермічного гартування з деякими останніми для нього тенденціями розвитку. Механізм формування бейнітної структури при ізотермічному загартованні в чавуні в цілому аналогічний сталі [9]. Відмінність чавуну складається головним чином в уповільненні бейнітного перетворення, збільшення максимальної кількості залишкового аустеніту і зміщення цього максимуму в бік більшого часу, що пояснюється великим вмістом кремнію і марганцю. Факторами, що впливають на структуру бейнітного чавуну, є: хімічний склад, температура і тривалість аустенізації (для роздільного лиття і ТО), швидкість охолодження до температур проміжного (бейнітного) перетворення, температура і тривалість ізотермічної витримки.

Особливості реалізації технології ізотермічного гартування чавунів у виробничих умовах полягають у наступному [9]: температура аустенізації чавуну (або видалення гарячого вилівка з ливарної форми) в інтервалі 850–950 °С; таке швидке перенесення з температури аустенітного перетворення до температури ізотермічного перетворення, що виключає утворення перліту. Для цього в традиційному процесі ТО, як правило, застосовують соляні ванни з температурою 200–400 °С в залежності від необхідної структури металу. Максимальний час повного перетворення аустеніту для будь-якого чавуну практично не перевищує 4 год, короблення вилівок при цьому незначне.

За останні кілька років зріс інтерес до підвищення міцності ВЧ і сталі за допомогою ТО для отримання двофазних [10] або багатофазних [11] мікро- і макронеоднорідних структур (аусферит, бейніт, мартенсит, карбіди, карбонітриди, інтерметаліди та їх різноманітне поєднання), які поліпшують властивості, що отримані раніше (зокрема, за схемами на рис. 1) в ізотермічно загартованих залізобуглецевих сплавах. Прикладом цього є інноваційні двофазні (dual phase) за металевою матрицею ізотермічно загартовані DP-ADI чавуни, які мають більшу пластичність, ніж традиційно термічно оброблені (однофазні за матрицею) ADI, завдяки своїй мікроструктурі, що складається з аусфериту AF (традиційна мікроструктура ADI) і вільного (проевтектоїдного) пересиченого вуглецем фериту FF, а також властивого для ВЧ кулястого графіту Gr, ілюстрація такої структури – на рис. 2 [10].

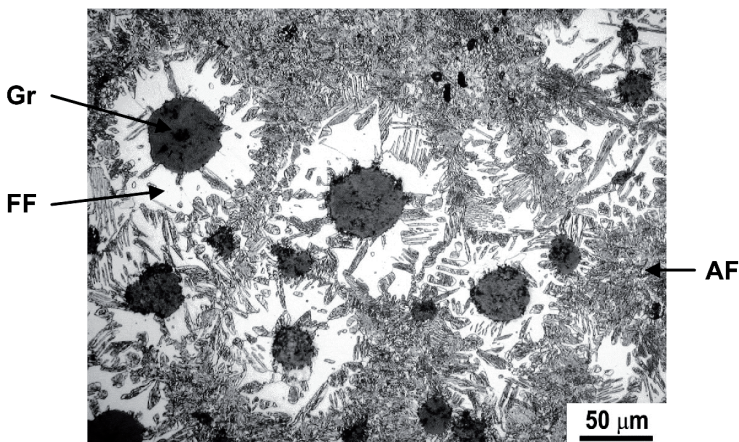


Рис. 2. Приклад мікроструктури ізотермічно загартованого DP-ADI чавуну [10] після традиційної ТО – аустенізації при 820 °С в міжкритичному інтервалі ($\alpha + \gamma + Gr$) температур з ізотермічною витримкою при 400 °С; AF – аусферит; FF – вільний ферит; Gr – кулястий графіт

Нові методи і прогресивні технології лиття

На рис. 3 показано приклад розрізу діаграми Fe–C–Si паралельно стороні Fe–C при концентрації Si = 2,0 % та приклад температур для чавуну з вмістом вуглецю C = 3,6 %; сірим кольором забарвлено область міжкритичного інтервалу температур, з такого роду інтервалу ізотермічно загартовано чавун з мікроструктурою на рис. 2.

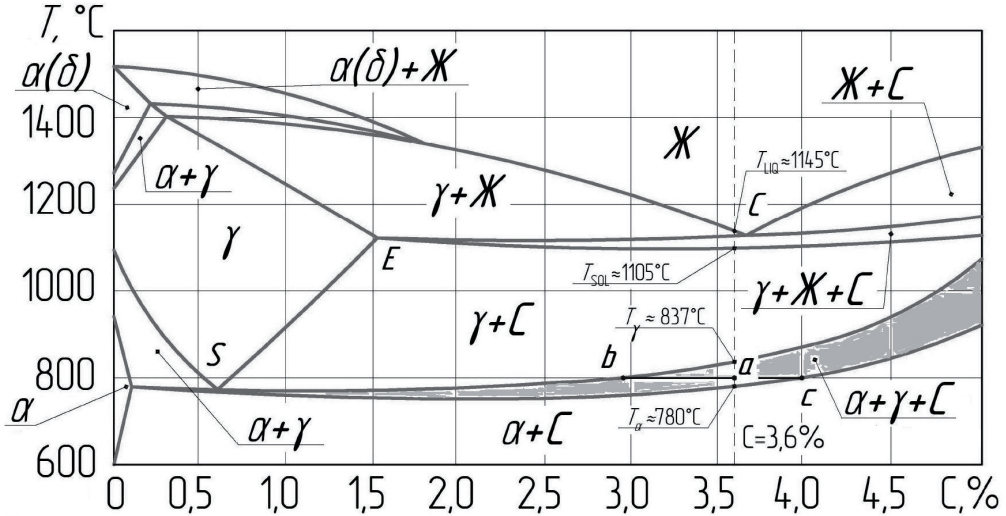


Рис. 3. Розріз діаграми Fe–C–Si паралельно стороні Fe–C при концентрації Si = 2,0 % [12]; α – ферит, γ – аустеніт, Ж – рідина, C – вуглець (графіт); область міжкритичного інтервалу температур забарвлено сірим кольором

Двофазна металева матриця DP-ADI може забезпечувати широкий діапазон механічних властивостей (рис. 4, 5) регулюванням відносного співвідношення компонентів проевтектоїдного фериту і аусфериту, тим самим методом такої ТО покращуючи властивості литого ВЧ [10]. При цьому двофазний ADI стає придатним для нових застосувань у виливках деталей, що працюють в тих критичних умовах, де необхідною вимогою є поєднання високої міцності і пластичності. Крім того, введенням вільного

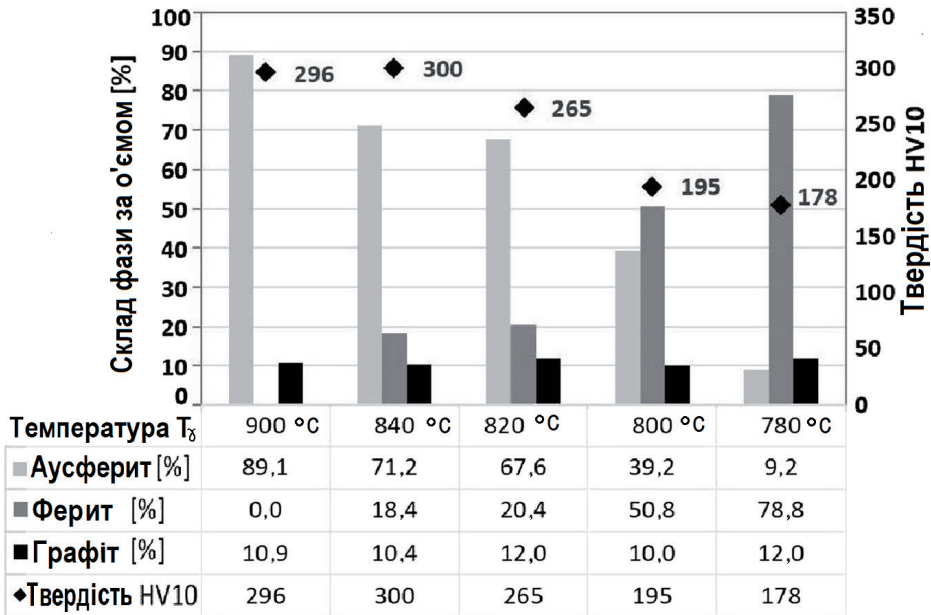


Рис. 4. Вплив відносного вмісту фаз (% за об'ємом) в мікроструктурі ізотермічно загартованого чавуну DP-ADI на його твердість [10]; T_a – температура аустенізації при ТО відповідно до стадії 1

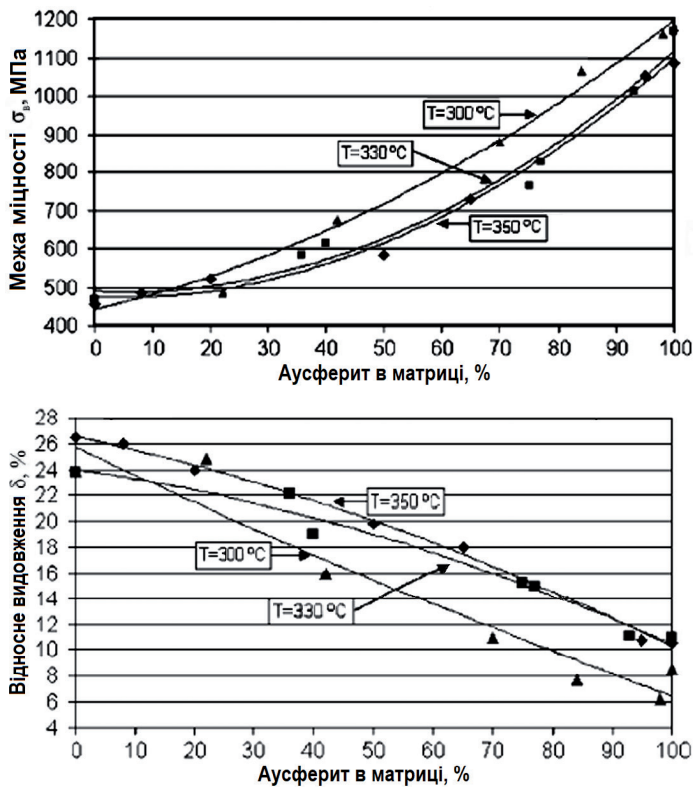


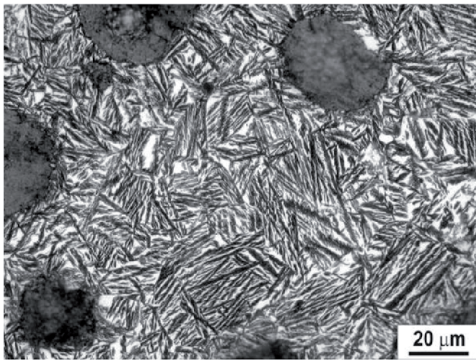
Рис. 5. Вплив відносного вмісту аусфериту (%) в чавуні DP-ADI на його межу міцності і відносне видовження при трьох значеннях температури T ізотермічної витримки [10]

фериту в металеву матрицю може бути досягнута підвищена оброблюваність ADI шляхом зниження його твердості (рис. 4). На рис. 6 показано приклади мікроструктури DP-ADI чавунів, фазовий склад яких показано на рис. 4. Типовий вміст кремнію для ADI підтримують в межах 3,30–3,80 % (таблиця). Також доречно зауважити, що (за рис. 4, 6) більш нагріті частини вилівка перед гартуванням після ТО отримують більшу твердість і міцність, а холодніші (тонкостінні, опуклі, зовнішні, виступаючі та частіше всього визначені для обробки) матимуть меншу твердість та міцність завдяки більшій частці фериту.

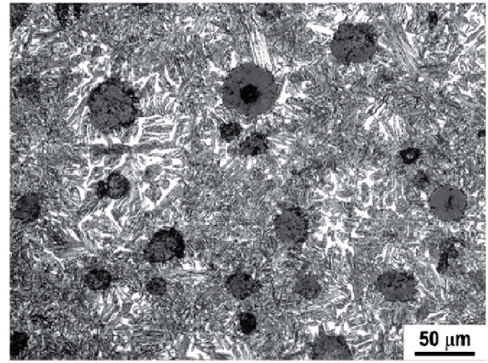
На рис. 7, 8 показано приклади використання двофазного DP-ADI для деталей рульового управління автомобіля, що поєднують високу міцність, підвищену надійність, малу вагу і прийнятну здатність піддаватися обробці, що працюють при змінних навантаженнях і критично важливих для безпечної експлуатації автомобіля [10, 13].

Висновки

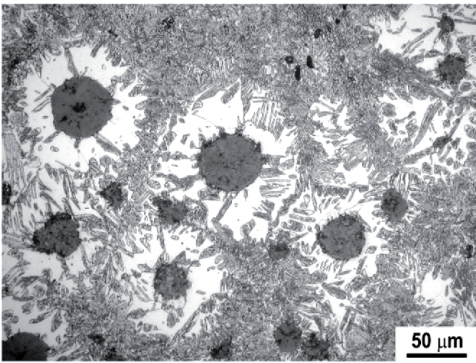
Таким чином, у даній статті розглянуто умови розробки нового ЛТО-процесу, що являє собою взаємодоповнення двох технологій: лиття і ТО отриманих виливків із залізовуглецевих сплавів. Виконано короткий огляд низки робіт, опублікованих за останні роки, про вплив технологічних змінних, механічних властивостей, мікроструктури на процес виготовлення двофазного ВЧ типу DP-ADI [10, 13]. У даний час відзначено істотне зростання досліджень і розробок у всьому світі, присвячених отриманню двофазних і багатофазних мікро- і макронеоднорідних структур, що містять ферит, аусферит, бейніт, мартенсит, карбіди, карбонітриди, інтерметаліди та їх різноманітне поєднання [11]. Завдяки цьому поліпшують властивості розроблених раніше залізовуглецевих сплавів, що піддаються ізотермічному гартуванню, наприклад, по традиційним схемам (рис. 1). Ізотермічно загартований чавун DP-



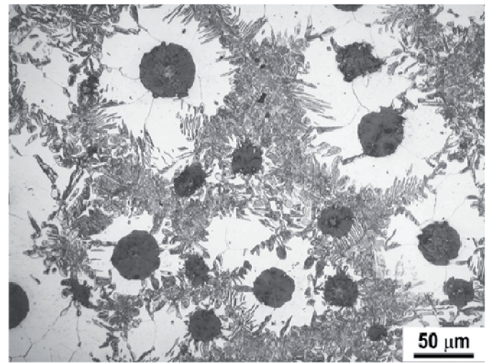
а



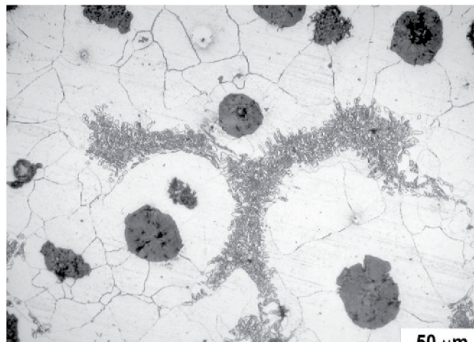
б



в



г



д

Рис. 6. Мікроструктура зразків чавунів ADI, отриманих при температурі аустенізації T_{γ} (°C), відповідно, 900, 840, 820, 800, 780, останні 4 фото з загартуванням з міжкритичного інтервалу і з ізотермічною витримкою при 400 °C протягом години [10] (фазовий склад показаний на рис. 4; буквенні позначення під фото як на рис. 2): а – $T_{\gamma} = 900$ °C; 89,1%AF+10,9%Gr; б – $T_{\gamma} = 840$ °C; 18,4%FF+71,2%AF+10,4%Gr; в – $T_{\gamma} = 820$ °C; 20,4%F 67,6%AF+12%Gr; г – $T_{\gamma} = 800$ °C; 39,2%FF+50,8%AF+10%Gr; д – $T_{\gamma} = 780$ °C; 78,8FF+9,2%AF+12%Gr

ADI з можливістю регульованого введення вільного фериту в металеву матрицю є прикладом досягнення підвищеної оброблюваності виливків, що дає підстави для відпрацювання технології ТО з його отримання та включення її складу ЛТО-процесу поряд з раніше відомими методами ТО.

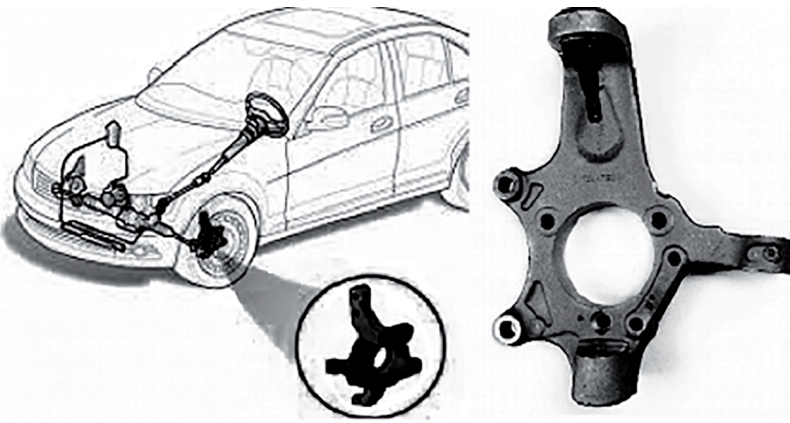


Рис. 7. Приклад виготовлення з двофазного DP-ADI деталі рульового управління автомобіля [10, 13]

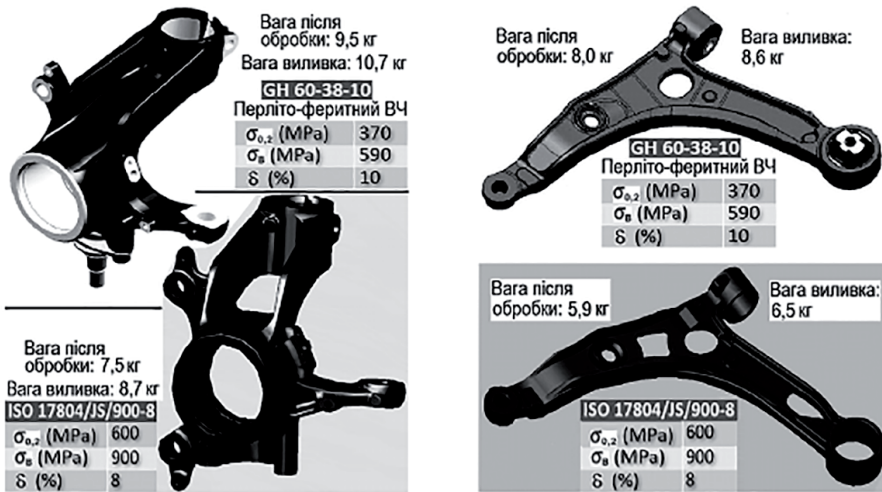


Рис. 8. Деталі виливків рульового пристрою автомобіля з чавунів в литому стані (верхній ряд) і двофазного DP-ADI (нижній ряд) із зазначенням ваги і механічних властивостей [10, 13]

Список літератури

1. Найдек В. Л., Гаврилюк В. П., Неижко И. Г. Бейнитный высокопрочный чугун. – К.: 2008. – 140 с.
2. Gabrisova Z., Brusilova A. Tepelne spracovanie: navody na cvicenia. – Bratislava: SPEKTRUM STU, 2019. – 134 s.
3. Жарский И. М. и др. Материаловедение: учебное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 557 с.
4. Дорошенко В. С., Калужний П. Б. Концепции охлаждения отливок с помощью криотехнологии, новых сыпучих материалов и способов литья // Металл и литье Украины. – 2019. – № 5–6. – С. 33–39.
5. Global Casting Production Expands // Global Casting Magazine. – 2019. – Vol. 9. – № 1. – pp. 28–30.
6. Dibrov I. Tendencies of development in the Russian foundry industry. 30.05.2019. URL: <https://www.foundry-planet.com/news/corporate-news/detail-view/tendencies-of-development-in-the-russian-foundry-industry-2019/>.

7. *Дорошенко В. С.* Возможности литья чугуна с шаровидным графитом по газифицируемым моделям с изотермической закалкой отливок // Литейное производство. – 2017. – № 11. – С. 7–14.
8. *Atzori B., Meneghetti G., Ricotta M.* A compatible method to summarise the Low- and High-Cycle fatigue test results of ductile irons and structural steels // Workshop IGF, Forni di Sopra (UD). – Italia, 1-3 marzo 2012. – pp. 153–166.
9. *Дудецкая Л. П.* и др. Термообработка на бейнитную структуру деталей из чугуна // Литье и металлургия. – 2002. – № 1. – С. 45–49.
10. *Cekic O. E., Rajnovic D., Sidjanin L.* et al. Dual Phase Austempered Ductile Iron – The Material Revolution and Its Engineering Applications // Computational and Experimental Approaches in Materials Science and Engineering, Proceedings of the Int. Conf. of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech. September. – 2019. – pp. 22–38.
11. *Малинов Л. С.* Технологии обработки, реализующие концепцию получения в сталях и чугунах многофазной микро- и макронеоднородной структуры с метастабильным аустенитом для повышения их свойств. Университетская наука - 2019: Междунар. научно-техн. конф.: тез. докл. ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь: ПГТУ, 2019. – С. 99–101.
12. *Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г.* Материаловедение. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.
13. *Harding R. A.* The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron. Kovove Mater. 45. – 2007. – pp. 1–16.

Поступила 06.11.2019

References

1. *Najdek, V. L., Gavrilyuk, V. P., Neizhko, I. G.* (2008). Bainitic ductile iron. K., 140 p. [in Russian].
2. *Gabrisova, Z., Brusilova, A.* (2019) Heat treatment: tutorials. Bratislava: SPEKTRUM STU, 134 p. [in Slovak].
3. *Zharskij, I. M.* et al. (2015) Material Science: a training manual. Minsk: Vyshejshaya shkola, 557 p. [in Russian].
4. *Doroshenko, V. S., Kalyuzhnyj, P. B.* (2019) The concept of cooling castings using cryotechnology, new bulk materials and casting methods. Metall i lite Ukrainy, no. 5-6, pp. 33-39 [in Russian].
5. Global Casting Production Expands (2019). Global Casting Magazine, Vol. 9, no. 1, pp. 28-30 [in English].
6. *Dibrov, I.* Tendencies of development in the Russian foundry industry. 30.05.2019. URL: <https://www.foundry-planet.com/news/corporate-news/detail-view/tendencies-of-development-in-the-russian-foundry-industry-2019/>. [in English].
7. *Doroshenko, V. S.* (2017) Possibilities of casting of nodular cast iron by gasifying models with isothermal hardening of castings. Litejnoe proizvodstvo, no. 11, pp. 7-14 [in Russian].
8. *Atzori, B., Meneghetti, G., Ricotta, M.* (2012) A compatible method to summarise the Low- and High-Cycle fatigue test results of ductile irons and structural steel. Workshop IGF, Forni di Sopra (UD), Italia, 1-3 marzo, pp. 153-166 [in English].
9. *Dudeckaya, L. P.* et al. (2002) Heat treatment on the bainitic structure of cast iron parts. Lite i metallurgiya. no. 1, pp. 45-49 [in English].
10. *Cekic, O. E., Rajnovic, D., Sidjanin, L.* et al. (2019) Dual Phase Austempered Ductile Iron - The Material Revolution and Its Engineering Applications. Computational and Experimental Approaches in Materials Science and Engineering, Proceedings of the Int. Conf. of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies, CNNTech. September. pp. 22-38 [in English].
11. *Malinov, L. S.* (2019) Processing technologies that implement the concept of producing in steels and cast irons a multiphase micro- and macro-heterogeneous structure with metastable austenite to increase their properties. Universitetskaya nauka - 2019: Mezhdunar. nauchno-tehn. konf.: tez. dokl. GVUZ «PGTU». Mariupol: PGTU, pp. 99-101 [in Russian].
12. *Geller, Yu. A., Rahshadt, A. G.* (1989) Material science. Moscow.: Metallurgiya, 456 p. [in English].
13. *Harding, R. A.* (2007) The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron. Kovove Mater. 45, pp. 1-16 [in English].

Received 06.11.2019

В. С. Дорошенко, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: doro55v@gmail.com
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ОТЛИВОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛТО-ПРОЦЕССА, СОСТОЯЩЕГО ВО ВЗАИМОДОПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ И ТЕРМООБРАБОТКИ

В литейном производстве в развитие способов регулируемого охлаждения отливок после затвердевания их в песчаной форме предложено сочетание литья с термообработкой (ТО), которое можно назвать ЛТО-процессом. Рассмотрены условия применения ЛТО-процесса для отливок из железоуглеродистых сплавов со средним и высоким содержанием углерода. ФТИМС НАН Украины за 2018–2019 годы получен ряд патентов Украины на способы взаимодополнения литья и ТО как разновидностей ЛТО-процесса, в которых в качестве ТО использована изотермическая закалка отливок. Наиболее удобный для ЛТО процесс литья в песчаных вакуумированных формах, песок из которых легко высыпается после прекращения вакуумирования, не препятствуя удалению горячей отливки из формы. Для случаев прилипания литейной краски к поверхности отливки, песчаных остатков или местных зон пригара, особенно для крупных отливок, предложен способ закалки путем подачи на горячую отливку воздушно-песчаной смеси, как при пескоструйной обработке. Выполнен краткий обзор ряда работ, опубликованных за последние годы, о влиянии переменных технологических характеристик, механических свойств, микроструктуры на процесс изготовления двухфазного высокопрочного чугуна (ВЧ) типа ADI. В настоящее время отмечен существенный рост исследований и разработок во всем мире, посвященных получению двухфазных и многофазных микро- и макронеоднородных структур, содержащих феррит, аусферит, бейнит, мартенсит, карбиды, карбонитриды, интерметаллиды и их сочетания. Благодаря этому улучшают свойства известных железоуглеродистых сплавов, подвергаемых изотермической закалке по традиционным схемам. Изотермически закаленный чугун ADI с возможностью регулируемого введения свободного (проэвтектоидного) феррита в металлическую матрицу позволяет повысить обрабатываемость отливок, что дает основания для включения технологии ТО такого ADI в состав ЛТО-процесса наряду с другими известными методами ТО.

Ключевые слова: охлаждение отливок, термообработка, железоуглеродистые сплавы, изотермическая закалка, высокопрочный чугун, ADI, ЛТО-процесс, феррит, аусферрит.

V. S. Doroshenko, Dr Sci. (Engin.), Senior Researcher, e-mail: doro55v@gmail.com
Physico-technological Institute of Metal and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

METHODS OF COOLING CASTINGS IN THE DESIGN OF THE LTO PROCESS, COMPLEMENTING THE TECHNOLOGY OF CASTING AND HEAT TREATMENT

In foundry, in the development of methods for controlled cooling of castings after their solidification in sand mold, a combination of casting with heat treatment (HT), which can be called the LTO process, is proposed. The conditions for the development of the LTO process for castings from iron-carbon alloys with medium and high carbon content are considered. PTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine for 2018–2019 obtained a number of patents of Ukraine for methods of complementing casting and HT as varieties of the LTO process, in which Austempering of castings was used. The most convenient for LTO it is casting process in vacuum evacuated sand molds, the sand of which is easily poured out after the end of evacuation, without hindering the removal of the hot casting from the mold. For cases of adhesion of foundry paint to the surface of the casting, sand residues or local areas of the burn, especially for large castings, a method of hardening by supplying an air-sand mixture to a hot casting is proposed, as in sandblasting. A brief review of a number of works published in recent years on the influence of variable technological characteristics, mechanical properties, and microstructure on the manufacturing process of two-phase ductile cast iron (DI) type ADI is performed. Currently, there has been a significant increase in research and development around the world devoted to the production of biphasic and multiphase micro- and macroinhomogeneous structures containing ferrite, ausferite, bainite, martensite, carbides, carbonitrides, intermetallic compounds, and combinations thereof. Due to this, the properties of known iron-carbon alloys subjected to isothermal quenching according to traditional schemes

are improved. Isothermally hardened ADI cast iron with the possibility of controlled introduction of free (proeutectoid) ferrite into the metal matrix improves the machinability of castings, which gives grounds for including the technology of such ADI in the LTO process along with other well-known methods.

Keywords: cooling of castings, heat treatment, iron-carbon alloys, isothermal hardening, ductile iron, ADI, LTO process, ferrite, ausferrite.

ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Підписка журналу

"Процеси лиття"

проводиться через редакцію.

Журнал виходить 4 рази на рік.

Для отримання журналу з будь-якого номера

необхідно направити лист-запит

за адресою: 03142, р. Київ- 142

б-р Вернадського, 34/1,

ФТИМС НАН України з позначкою

"журнал "Процеси лиття" або

факсом: (044) 424-35-15; e-mail: proclit@ptima.kiev.ua.

Рахунок-фактуру згідно із запитом редакція висилає

листом, факсом або по e-mail.

Вартість одного журналу - 100 грн

Річна підписка з урахуванням поштових витрат - 480 грн

(для України).