

марки 12X18H10T, армко-залізо, феросплави (феромарганець, феробор), а також метали промислової чистоти (нікель, хром, титан та алюміній).

Встановлено, що основною особливістю технології плавлення хромонікелевих сталей є послідовність введення добавок через високу хімічну активність бору. Щоб запобігти його окисленню та вигоранню, спочатку проводили повне розплавлення основної шихти та її перегрів до 1550–1600 °С. Потім додавали слабкий розкислювач – феромарганець (0,10–0,15 % маси). Наступним кроком було введення більш активних розкислювачів – алюмінію та титану (по 0,075–0,15 %), які зв'язують кисень і азот, захищаючи таким чином бор. І лише на останньому етапі вводили подрібнений феробор, що був упакованим у металеві капсули для додаткового захисту від вологи та окислення.

Така ретельна методика дозволила досягти високого рівня засвоєння бору металом – від 80,1 % до 82,8 %. Після введення всіх добавок метал витримували протягом 5–7 хвилин для вирівнювання температури та хімічного складу, після чого розливали в ливарні форми.

Мікроструктурний аналіз зразків хромонікелевої сталі показав, що виплавлений метал має характерну дендритну структуру з включеннями боридів і карбідів, розташованими вздовж меж зерен. При досягненні вмісту бору більше 2,0 % спостерігалася поява численних стрижнеподібних виділень боридів і карбідів, які утворювали розгалужену взаємопроникну мережу всередині металевої матриці. Об'ємна частка та розміри цих включень зростали пропорційно до збільшення концентрації бору у сталі.

Іванова Л. Х., Колотило Є. В.

(УДУНТ, м. Дніпро)

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В ВАЛКОВИХ ЧАВУНАХ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ

Проблема і її зв'язок з науковими й практичними задачами. На прокатних валках різних виконань досліджено вплив хімічного складу, типу модифікатора, температури заливання розплавів у форми, штучного старіння на залишкові

напруження. ступінь релаксації їх при відпалюванні і фізико-механічні властивості валкових чавунів. В литому стані з кулястим графітом має неоднорідність по структурі та хімічному складу. При нагріванні до температур вище критичних замість неоднорідної матриці з фериту і перліту утворюється аустеніт. Високотемпературна витримка аустеніту призводить до його гомогенізації. Охолодження з певною швидкістю призводить до одержання необхідної структури і властивостей. Термокінетичні діаграми сприяють вибору правильного режиму охолодження [1].

Вивченню перетворень аустеніту при нагріванні та охолодженні присвячено велика кількість як дослідних та і теоретичних робіт, однак характер впливу легувальних елементів і структури, що виникають при охолодженні аустеніту у валкових чавунах з кулястим графітом, вивчені недостатньо і вимагають ретельного аналізу в кожному конкретному випадку.

Метою досліджень було визначення раціональної швидкості охолодження в критичному інтервалі температур валкових чавунів з кулястим графітом різної легованості та виконань.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження впливу швидкості охолодження проводили на зразках із робочого шару прокатних валків у процесі їх механічного оброблення. Хімічний склад досліджених чавунів наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних чавунів

Тип чавуну	Вміст хімічних елементів, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Mg	Fe
ЛК	3,12	0,75	0,69	0,32	<0,02	0,09	0,48	–	0,05	решта
ЛКН	3,10	1,87	0,53	0,16	<0,02	0,17	1,69	–	0,05	решта
ЛКНМ	3,30	1,49	0,77	0,18	<0,02	0,18	1,76	0,44	0,05	решта

Дослідження здійснювали методом диференціального термічного аналізу на установці моделі ВДТА-8М. Зразки чавуну діаметром 5 мм і довжиною 7 мм разом з вольфрамовим еталоном в алундових тиглях розміщували у вольфрамовому

термостаті, нагрівали до 950 °С, витримували протягом 15 хв і охолоджували в автоматичному лінійному режимі. Швидкість нагрівання була 80 °С/хв, охолодження – від 2,5 до 300 °С/хв. Температуру зразків контролювали вольфрам-ренієвими термопарами за допомогою програмного пристрою, що включав високоточний регулятор температури моделі ВРТ-3. Чутливість метода за координатою Т складала 6 град/мм, за координатою ΔT – 0,5 град/мм. Точність виміру по координаті Т дорівнювала ± 5 °С. Металографічний аналіз проводили на оптичному мікроскопі моделі Neophot 21 при збільшенні 500. Шліфи досліджували після травлення 2 %-ним розчином азотної кислоти в етиловому спирті (ніталь).

Характеристика структури чавунів вихідного складу, в тому числі кількості структурних складників та мікротвердості перліту, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристика мікроструктури чавунів у вихідному стані

Тип чавуну	Кількість структурних складників, %				Характеристика перліту		
	графіт	ферит	цементит	перліт	дисперсність	анормальність	мікротвердість, МПа
ЛК	0,1	10,6	38,1	51,2	ПД1.0	Па3	3400
ЛКН	2,3	36,9	24,4	36,4	ПД1.0	Па4	3490
ЛКНМ	3,1	18,2	18,9	59,8	ПД1.0	Па4	3530

Структура чавуну типу ЛК в литому стані являла собою білий чавун з перліто-цементитною матрицею та дрібними компактними включеннями графіту, кількість якого не перевищувала 0,1 % (див. табл. 2).

При кристалізації нелегованого чавуну ЛК утворювався грубий конгломерат цементиту та аустеніту (див. рис. 1, а). У процесі подальшого охолодження чавуну в евтектоїдному інтервалі температур аустеніт зазнавав перлітного розпаду. Дисперсність перліту відповідала балу ПД1,0 шкали 7 ГОСТ 3443-87, у його будові спостерігалася анормальність [1]: на кордоні з цементитом розташовувалась феритна облямівка. Ширина цієї облямівки характеризувалася балом Па3. Кількість фериту у чавуні було 10,6 %.

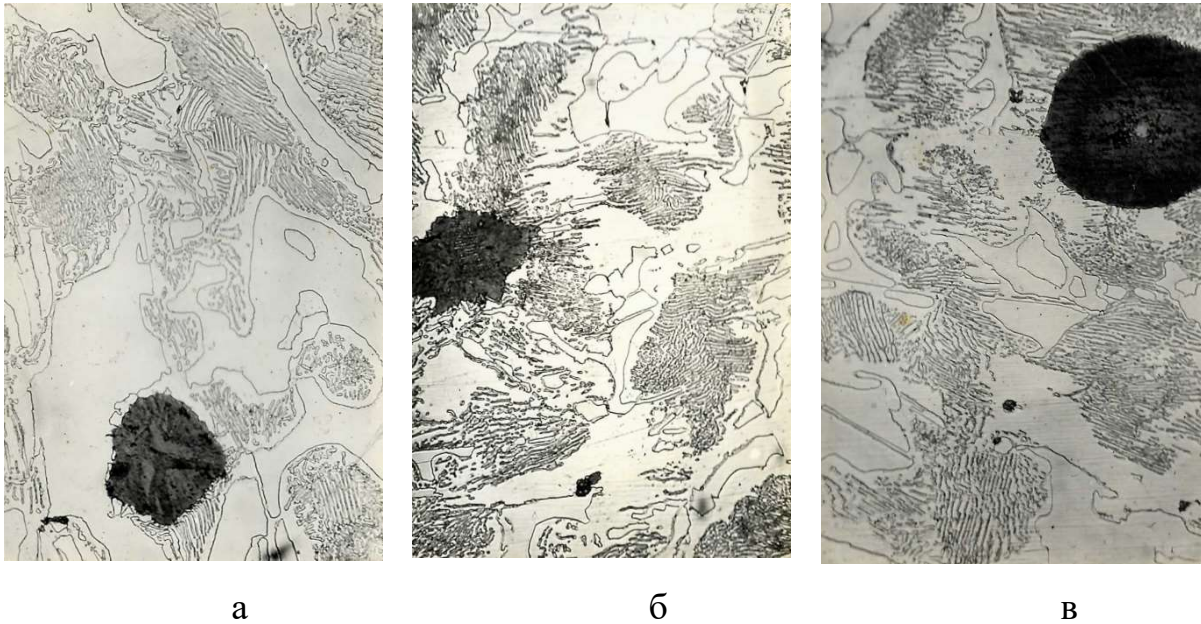


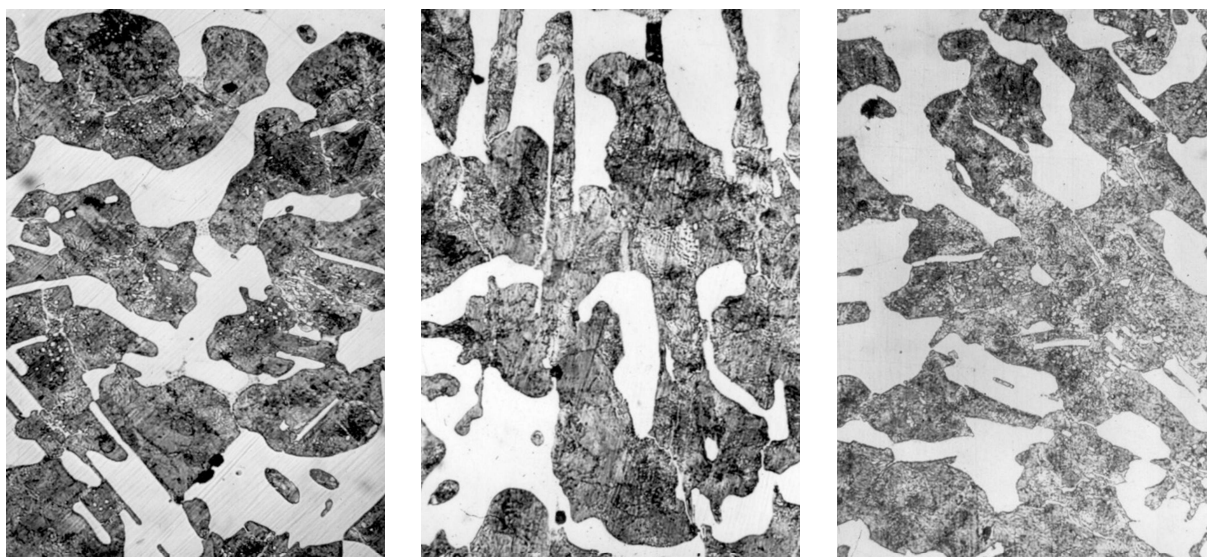
Рис. 1. Мікроструктура чавунів ЛК (а), ЛКН (б) і ЛКНМ (в) у вихідному литому стані: 500^x, травлено ніталем

Робочий шар валків із чавуну, легованого нікелем, ЛКН мав структуру половинчастого чавуну (рис. 1, б). Завдяки високому вмісту кремнію та наявності 1,69 % нікелю евтектична кристалізація відбувалася як за реакцією – $P \rightarrow A + G$, так і за реакцією – $P \rightarrow A + C$. За евтектичного розпаду формувалася конгломератна структура, що характеризувалася незалежним зростанням аустеніту та цементиту, і наявністю ледебуритних колоній, що утворювалися при спільному зростанні кристалів аустеніту та цементиту (див. рис. 1, б). На вже наявних включеннях відбувався евтектоїдний розпад аустеніту за двома реакціями, поряд з графітом виділявся також евтектоїдний ферит. Крім цього зі збільшенням переохолодження розвивалася реакція $A \rightarrow F + C$, а морфологія продуктів розпаду аустеніту за цією реакцією була різною. Евтектоїдний цементит, що виділявся, нашаровувався на наявному, а ферит, що зародився на поверхні цементиту, ріс вглиб гілок первинного і ледебуритного аустеніту; одержувалася так звана аномальна структура. У центральних ділянках дендритних гілок аустеніт перетворювався на перліт (див. рис. 1, б), який відповідав балу Пд1,0. Аномальність перліту відповідала балу Па4.

Вихідна структура робочого шару валка з чавуну, легованого нікелем та молібденом, ЛКНМ була схожа зі структурою чавуну типу ЛКН. Відмінність полягала лише в тому, що в структурі чавуну типу ЛКНМ було менше фериту і більше перліту (рис. 1, в), що зумовлювало більш високу твердість.

У процесі нагрівання дослідних чавунів до 950 °С відбувалася аустенітизація матриці, насичення аустеніту, що утворювався, вуглецем шляхом розчинення перлітного і надлишкового цементиту. Після охолодження структура чавунів у порівнянні з вихідним станом змінювалася залежно від швидкості.

Охолодження чавуну ЛК зі швидкістю від 300 до 80 град/хв сприяло перетворенню аустеніту в тонко диференційований перліт (рис. 2, а, б, в). При зменшенні швидкості охолодження до 40 град/хв у структурі зустрічалися ділянки тонко пластинчастого перліту. При швидкості охолодження 20 град/хв біля графітних включень виявлялися невеликі ділянки фериту. В основному аустеніт перетворювався на тонко диференційований та тонкопластинчастий перліт. Зниження швидкості охолодження до 10 град/хв призводило до помітніших змін структури. З'являлися дрібні включення графіту вермикулярної та пластинчастої форми (рис. 3, а). Перліт частіше мав тонко пластинчасту будову, рідше тонко диференційовану. Подальше зниження швидкості охолодження до 5 град/хв та 2,5 град/хв сприяло протіканню реакції $A \rightarrow \Gamma + \Phi$ у більшому обсязі. Найчастіше зустрічалися включення графіту вермикулярної та пластинчастої форм, біля них розташовувалися більші ділянки фериту (рис. 3, б). Перліт був переважно тонко пластинчастий, рідко тонко диференційований. У структурі зразка, охолодженого зі швидкістю 2,5 град/хв перліт був грубішим, часто він мав розріджену будову (рис. 3, в).

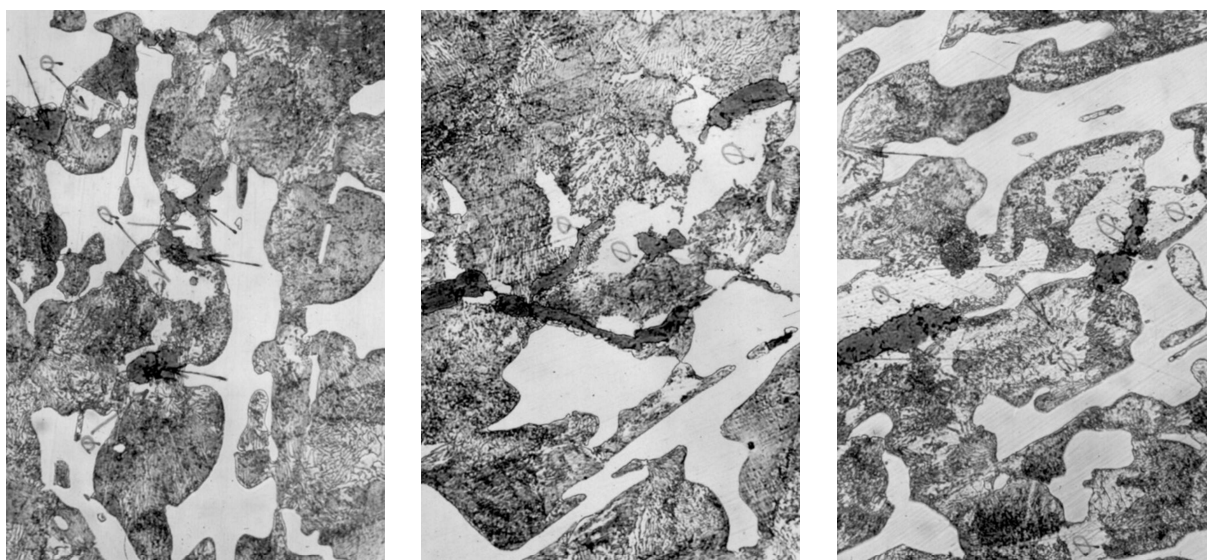


а

б

в

Рис. 2. Мікроструктура чавуну ЛК після охолодження від 950 °С зі швидкостями 300 град/хв (а), 160 град/хв (б) та 80, 40 і 20 град/хв (в)



а

б

в

Рис. 3. Мікроструктура чавуну ЛК після охолодження від 950 °С зі швидкостями 10 град/хв (а), 5 град/хв (б) та 2,5 град/хв (в)

Охолодження чавуну ЛКН зі швидкістю 300 град/хв призводило до того, що основна маса аустеніту перетворювалася на тонко диференційований перліт, лише біля деяких включень графіту спостерігалися невеликі ділянки фериту. Крім цього, зустрічалися ділянки аустеніту, які переохолоджувалися до температури

мартенситної області і переходили у мартенсит. Очевидно, підвищена стійкість аустеніту на цих ділянках при охолодженні пояснюється нерівномірним розподілом нікелю в дендритних гілках аустеніту.

Зменшення швидкості охолодження до 160 град/хв призводило до деякого збільшення розмірів феритних ділянок навколо графіту, крім того різко скорочувалася кількість ділянок мартенситу. Аустеніт, переважно, перетворювався на тонко диференційований перліт. При зниженні швидкості охолодження до 80 град/хв основна частина аустеніту перетворювалася на тонко диференційований перліт, невелика частина аустеніту розпадалася на ферит та графіт, причому графіт нашаровувався на наявних графітних включеннях, а ферит оточував ці включення.

Подальше зменшення швидкості охолодження до 40 і 20 град/хв сприяло протіканню реакції $A \rightarrow \Gamma + \Phi$ більшою мірою, тому феритні оболонки навколо графіту мали великі розміри, крім того, ферит з'являвся в багатьох тонких гілках дендритів. Основна ж частина аустеніту перетворювалася у перліт, будова якого відповідала балу ПД0,3, а також у тонко диференційований перліт. При охолодженні зі швидкістю 10 град/хв перетворення аустеніту відрізнялося лише збільшенням частки реакції $A \rightarrow \Gamma + \Phi$. Зменшення швидкості охолодження до 5 град/хв призводило до подальшого скорочення кількості цементиту та збільшення кількості фериту та графіту, дисперсність перліту за цього відповідала балу ПД0,3.

Охолодження зразків із чавуну ЛКНМ зі швидкостями 300 град/хв і 160 град/хв дозволило аустеніту переохолоджуватися до температури мартенситної області (рис. 4, а). Зменшення швидкості охолодження до 80 град/хв не призводило до значних змін характеру перетворення аустеніту. Лише незначна частина аустеніту зазнавала евтектоїдного розпаду. Очевидно, в тонко диференційований перліт перетворилися найбільш збіднені на нікель ділянки аустеніту. Крім перліту біля деяких включень графіту зустрічалися зерна чи голки верхнього бейніту. Основна ж маса аустеніту перетворювалася в мартенсит.

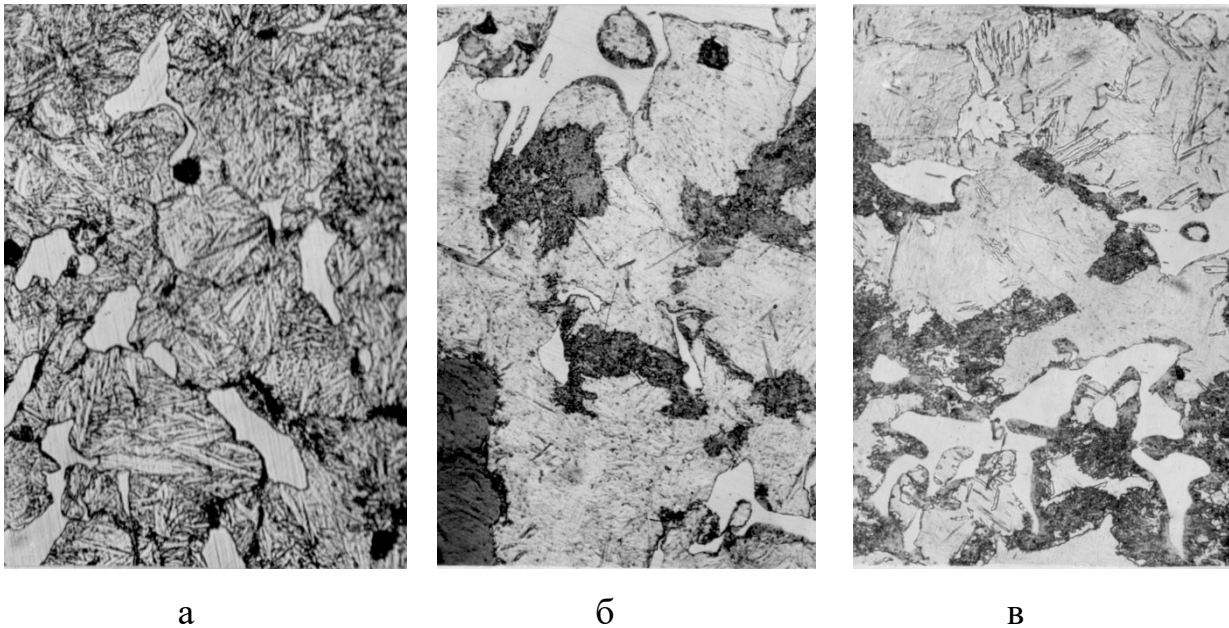


Рис. 4. Мікроструктура чавуну типу ЛКНМ після охолодження від 950 °С зі швидкостями 300 град/хв та 160 град/хв (а), 40 град/хв (б) та 20 град/ хв (в)

Зі зниженням швидкості охолодження до 40 град/хв збільшувалася кількість аустеніту, що зазнавав евтектоїдний розпад з утворенням тонко диференційованого перліту (рис. 4, б), хоча основна частина аустеніту переохолоджувалася до нижчих температур і переходила в мартенсит.

Подальше зниження швидкості охолодження до 20 град/хв сприяло збільшенню кількості тонко диференційованого перліту та утворенню повністю перлітних дендритних гілок. Біля деяких графітних включень з'являлася феритна облямівка, від якої росли голки верхнього бейніту (рис. 4, в). Пачки, голки та зерна верхнього бейніту з'являлися і далеко від графіту. Приблизно половина аустеніту перетворювалася на мартенсит.

При швидкості охолодження 10 град/хв утворювалася вся гама структур, що виникають при перетворенні аустеніту. По-перше, $A \rightarrow \Phi + \Gamma$: графіт нашаровується на наявних включеннях, а ферит утворював облямівку навколо графіту (рис. 5). По-друге, були ділянки тонко диференційованого перліту, що розташовувався як біля феритної облямівки, так і у вигляді облямівки на кордоні з цементитом. Часто тонкі дендритні гілки повністю мали перлітну будову. По-третє, зустрічалися невеликі

ділянки верхнього бейніту (див. рис. 5, б). По-четверте, мартенсит за даної швидкості охолодження переходило вже менше половини аустеніту.

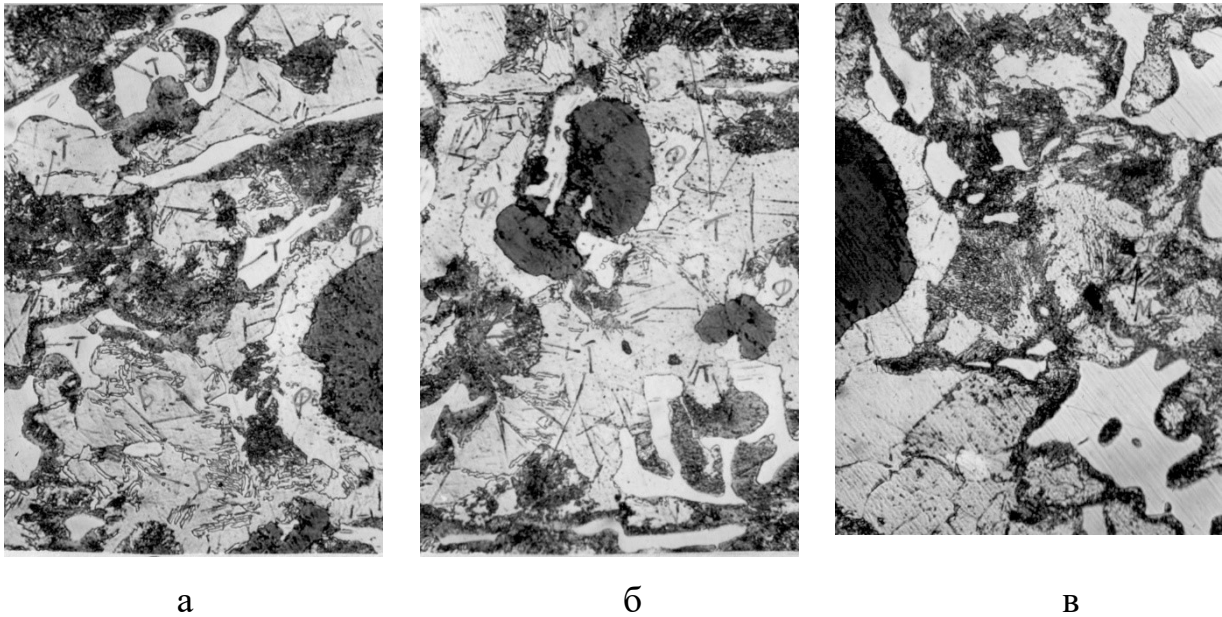


Рис. 5. Мікроструктура чавуну типу ЛКНМ після охолодження від 950 °С зі швидкістю 10 град/хв (а, б) та 2,5 град/хв (в)

Зниження швидкості охолодження до 5 град/хв значно зменшувало стійкість аустеніту, незважаючи на його легованість. Перетворення аустеніту в основному проходило в евтектоїдному інтервалі температур, причому значна частина аустеніту розпадалася на ферит і графіт, крім цього проходило і перетворення аустеніту на тонкий перліт (рис. 5, а). Лише невеликі ділянки зберігали стійкість до температур мартенситної області та перетворювалися на мартенсит. Охолодження чавуну із ще нижчою швидкістю – 2,5 град/хв сприяло збільшенню обсягу реакції $A \rightarrow \Phi + \Gamma$ та зменшенню кількості мартенситу (рис. 5, в). В результаті проведених досліджень встановлено, що охолодження зразків із чавуну ЛКНМ зі швидкістю 240 і 150 град/хв дозволяло аустеніту переохолоджуватися до температури мартенситної області, а також що зі збільшенням швидкості охолодження від 2,5 град/хв до 80 град/хв інтервал евтектоїдного перетворення у чавуні типу ЛКНМ розширювався.

У роботі за допомогою диференціального термічного аналізу досліджували температури перетворення початку та кінця A_{r1P} та A_{r1K} , що відбувалися в чавунах робочого шару валків при охолодженні з аустеніто-цементито-графітного стану в діапазоні швидкостей 300...2,5 град/хв.

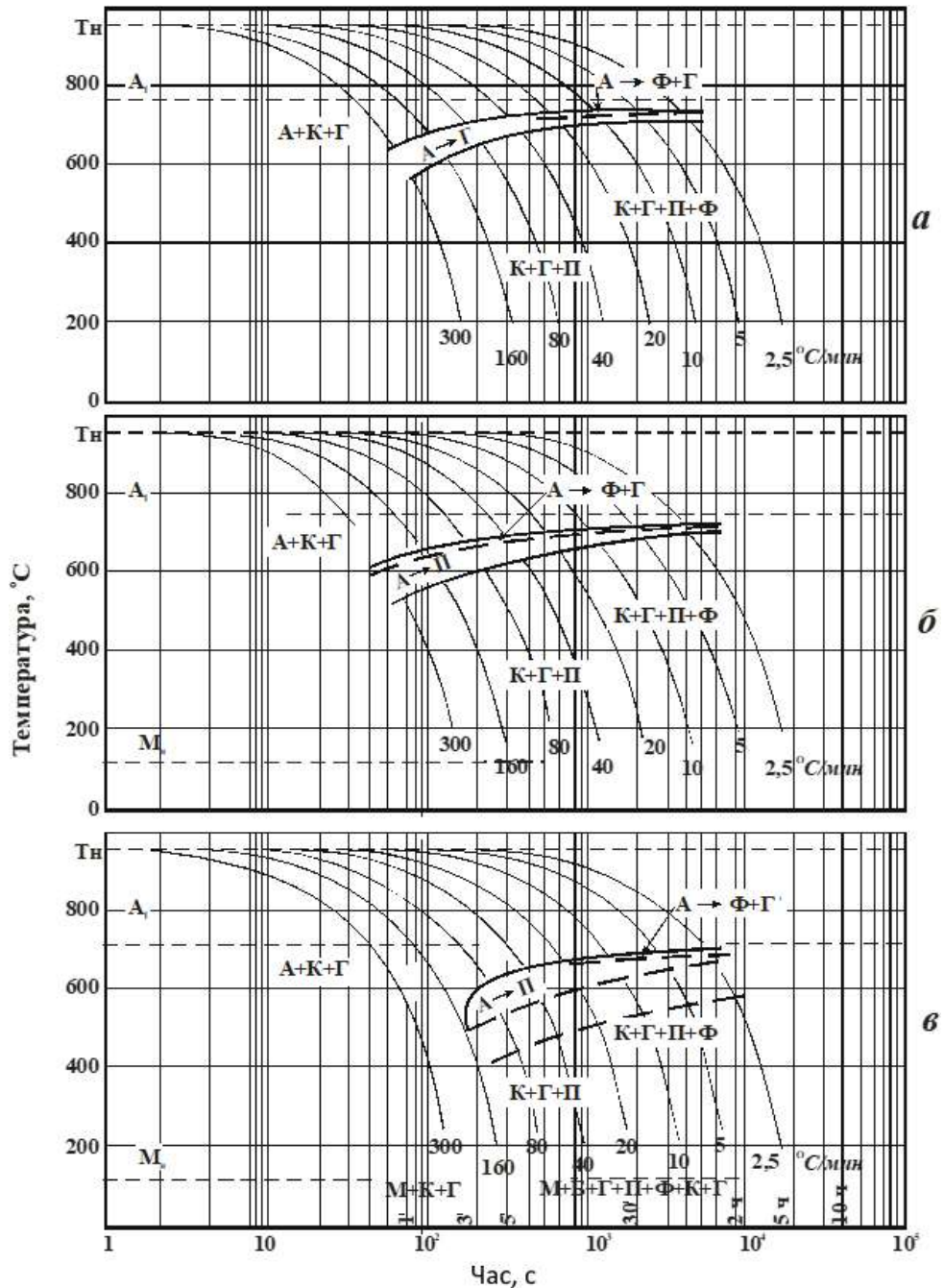


Рис. 6. Термокінетичні діаграми чавунів: а – ЛК, б – ЛКН, в – ЛКНМ [2]

В результаті проведених досліджень були побудовані термокінетичні діаграми для досліджуваних чавунів (рис. 6) в діапазоні швидкостей охолодження

300...2,5 град/хв, а також встановлено, що швидкість охолодження в критичному інтервалі температур за термічного оброблення повинна бути не менше за 10...20 град/хв.

В результаті проведених досліджень було встановлено, що валкові високоміцні чавуни різної легованості при охолодженні з аустенітно-цементитно-графітного стану утворювали різну матрицю: від перлітної – в чавуні ЛК до мартенситної – в чавуні ЛКНМ, тобто зі збільшенням ступеня легованості усталеність аустеніту підвищувалася.

Встановлено, що мінімальні швидкості охолодження в критичному інтервалі температур за термічного оброблення повинні бути у чавунних валках виконання ЛК 20 град/хв, а у валках виконань ЛКН та ЛКНМ – не менше 10 град/хв, які сприяють підвищенню твердості на 8...12 %.

Література

1. Попов А. А., Попова Л. Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М.: Металлургия, 1965. – 495 с.
2. Иванова Л. Х. Разработка технологических способов снижения напряжений в чугуновых валках и повышения их прочности. – Дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1984. – 250 с.

Іванченко Д. В.
(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)
ЖАРОМІЦНІ АЛЮМІНІЄВО-МІДНІ СПЛАВИ А02950 ТА АМ5
З ЦИРКОНІЄМ
E-mail: cortdm77@gmail.com

Як відомо [1] у сплавах системи Al-Cu необхідно обмежувати вміст міді інтервалом введення від 1,0-1,5 % (для забезпечення достатнього розчинного зміцнення) до 6,0-8,0 % задля уникнення крихкості через утворення значної кількості хімічної сполуки CuAl_2 (θ -фаза). Невисока температура плавлення евтектики, яка складає 548 °С та велике значення величини граничної розчинності