

М. А. Ковзель, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5720-1186

О. І. Бабаченко, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2869-3478

Е. В. Парусов, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043

І. М. Чуйко, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4753-614X

Е. В. Олійник, аспірант, ORCID 0000-0002-3366-3746

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ПРО ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОЇ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ ХРОМОМАНГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ У ЛИТОМУ СТАНІ

Анотація. Метою роботи є дослідження особливостей впливу хімічного складу на формування первинної структури та властивостей хромомарганцевих сплавів. Прошивні оправки належать до змінного інструменту гарячого деформування, експлуатаційні характеристики якого впливають на продуктивність трубопрокатних станів і якість готових виробів. Витрати інструменту гарячого деформування є складовою частиною собівартості металопродукції, тому інтерес до підвищення їхньої експлуатаційної стійкості постійно зростає. Розроблення раціонального компонентного складу сплавів ґрунтується на уявленнях про особливості перебігу структурно-фазових перетворень при кристалізації, термічному обробленні, а також під впливом високих температур й навантажень під час експлуатації. Для розроблення ефективного режиму остаточного термічного оброблення зносостійких виробів слід мати уявлення стосовно якості литого матеріалу та його первинної структури, зокрема за рахунок визначення динаміки зміни показників, формування яких обумовлено ліквідаційними явищами. Мета роботи – дослідження особливостей впливу хімічного складу на формування первинної структури та властивостей хромомарганцевих сплавів. Досліджено особливості формування литої структури, фазового складу та властивостей економнолегованих хромомарганцевих сплавів, що призначені для виготовлення прошивних оправок. За результатами випробувань на зношування тертям встановлено, що хромомарганцеві сплави володіють більш високою зносостійкістю у порівнянні з чавуном марки 300Х32НЗФЛ і сплавом «нікорин» (36,0–38,0 % Cr; 57,0–59,0 % Ni). За результатами рентгеноспектрального аналізу встановлено, що в структурі дослідних сплавів найбільші значення коефіцієнтів ліквідації є характерними для Ni, V та Cu. Із підвищенням вмісту С, Mn, Cr і Ni ступінь легованості матриці й карбідів зростає, що обумовлює зростання зносостійкості хромомарганцевих сплавів. Одержані результати із високою ймовірністю дозволяють стверджувати, що подальше розроблення ефективних режимів остаточного термічного оброблення запропонованих хромомарганцевих сплавів забезпечить підвищення експлуатаційної стійкості прошивних оправок трубопрокатних станів при одночасному зменшенні матеріальних витрат на їхнє виготовлення.

Ключові слова: хромомарганцеві сплави, лита структура, хімічна неоднорідність, зносостійкість.

Посилання для цитування: Ковзель М. А., Бабаченко О. І., Парусов Е. В.,

Чуйко І. М., Олійник Е. В. Про формування первинної структури та властивостей економнолегованих хромомарганцевих сплавів у литому стані. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 379-396. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-379-396.

Актуальність проблеми. До однієї з головних задач машинобудівної галузі слід віднести забезпечення надійності та довговічності роботи металургійного устаткування і його основних вузлів, що працюють у складних, а іноді у змінних умовах експлуатації. Зазначені характеристики мають безпосередній зв'язок із комплексом властивостей готових виробів, тому виникає потреба у постійному пошуку шляхів вдосконалення хімічного складу, технології виготовлення й оброблення різноманітних сталей та сплавів. Змінний інструмент гарячого деформування (валки, лінійки, прошивні оправки тощо) належить до зносостійких виробів, експлуатаційні характеристики якого впливають на продуктивність виробничого процесу та якість готової металопродукції. Витрати змінного інструменту є складовою частиною собівартості товарної продукції, тому інтерес до проблеми підвищення його експлуатаційної стійкості постійно зростає.

Оправки прокатних станів, що експлуатуються при високих температурах, виготовляють з високохромистого чавуну 300Х32Н3ФЛ або жароміцного хромонікелевого сплаву «нікорин» (36,0 – 38,0 % Cr; 57,0 – 59,0 % Ni). Однак прокатний інструмент характеризується достатньо високою собівартістю й, незважаючи на різноманітні способи оброблення, має низьку експлуатаційну стійкість, яка складає лише десятки годин відпрацювання. Сучасні тенденції отримання нових зносостійких матеріалів свідчать про перспективність застосування хромомарганцевих сплавів, які додатково містять мідь, титан і алюміній. За результатами попередніх досліджень авторами цієї роботи встановлено перспективні композиції економнолегованих хромомарганцевих сплавів, які повинні забезпечити більш високу експлуатаційну стійкість у порівнянні з чавуном марки 300Х32Н3ФЛ і хромонікелевим сплавом [1, 2].

Для виготовлення змінного інструменту використовують відливки, які на відміну від безперервнолитих заготовок (БЛЗ) не піддають класичній схемі гарячого деформування на прокатних станах, що істотно звужує способи впливу на пригнічення хімічної неоднорідності, яка формується під час кристалізації сплавів. Однак застосування високотемпературного нагрівання БЛЗ із подальшим гарячим прокатуванням також не дозволяє досягти повного вирівнювання хімічного складу, що у подальшому може проковувати у окремих ділянках структури перебіг фазових перетворень за проміжним або зсумним механізмом навіть при уповільнених швидкостях охолодження [3]. Така особливість є характерною для сталей, що додатково містять хром, ванадій, нікель, а також підвищений вміст марганцю та кремнію [4]. Спадковий вплив литої структури на формування

властивостей готових виробів є загальновідомим [5–12], проте на практиці в литих матеріалах спостерігаються дефекти, які не можуть бути повністю усунені навіть при раціональному суміщенні сталеливарного та прокатного переробів, що пов'язано з процесами кристалізації й, відповідно, ліквідаційними явищами в сталях і сплавах [7, 8, 12–15].

Очевидно, що остаточний комплекс властивостей виробів, які виготовлені із виливків, формується після термічного оброблення. Крім того, важливою складовою є наявність уявлень щодо спадкового впливу литої структури на перебіг фазово-структурних перетворень під час остаточного термічного оброблення. Таким чином, для визначення ефективних параметрів режиму остаточного термічного оброблення зносостійких виробів слід мати достовірну інформацію щодо якості литого матеріалу, параметрів його первинної структури та можливого прояву спадкового впливу, зокрема за рахунок визначення динаміки зміни показників, формування яких обумовлено ліквідаційними явищами.

Мета роботи – дослідження особливостей впливу хімічного складу на формування первинної структури та властивостей хромомарганцевих сплавів.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення досліджень виплавлено експериментальні хромомарганцеві сплави № 1–3, а в якості порівняльних сплавів-аналогів використано промислові партії відливок із чавуну марки 300X32H3ФЛ і хромонікелевого сплаву «нікорин» (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад сплавів для проведення досліджень.

Вміст елементів, % ваг.	Чавун 300X32H3ФЛ	Сплав «нікорин»	Дослідний матеріал		
			сплав № 1	сплав № 2	сплав № 3
C	3,20	1,30	2,20	2,70	3,10
Cr	32,50	36,50	12,63	15,91	13,10
Ni	3,20	58,30	0,83	0,95	1,15
Al	–	1,60	–	–	–
Ti	–	0,60	–	–	–
V	0,30	–	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,25
Mn	0,60	0,20	5,70	10,50	15,75
Si	1,10	0,70	1,00	0,90	0,90
Cu	0,30	–	0,10	0,09	0,15

Металографічний контроль мікрошліфів проводили на оптичному мікроскопі «АХІОВЕРТ 200М МАТ». Ідентифікацію фаз у дослідних сплавах здійснювали методом рентгеноструктурного аналізу на дифрактометрі «ДРОН-3М». Мікротвердість визначали за ГОСТ 9450-76 на приборі «ПМТ-3». Твердість сплавів визначали за ДСТУ ISO 6508-1:2013 (метод Роквелла) на приборах «ТК 14-250» і «ТР 5006». Випробування на зношуванням тертям проводили за підвищеної

температури (до 950 °С) та навантажені до 500 Н на установці «2070 СМТ-1». В якості еталону використовували сталь 45. Різницю між зношуванням за шість і одну хвилину відносили до шляху тертя і отримували середнє значення інтенсивності зношування (i). Коефіцієнт зносостійкості (n) визначали, як модуль десяткового логарифму інтенсивності зношування. Випробування дослідних зразків (пластина 30 мм × 20 мм і товщиною 6 мм) на абразивне зношування проводили при навантаженні 44,1 Н. В якості абразивного середовища використовували кварцовий пісок (SiO₂, фракція 500 мкм), карбід бору (B₄C, фракція 70 мкм) і карбід кремнію (SiC, фракція 180 мкм). Розподіл легувальних елементів між структурними складовими дослідних сплавів вивчали на електронному мікроскопі «JSM-840» із системою мікроаналізу «Link-860/500» («Link Analytical», Великобританія). Визначення ливарних властивостей (температури плавлення та кристалізації) дослідних сплавів проводили за допомогою термічного аналізу на установці «Netzsch-Gerätebau GmbH – STA 409 CD» в інтервалі температур 20 – 1450 °С.

Результати та їх обговорення. При проведенні досліджень виконано порівняльний аналіз структури та фазового складу легованих сплавів, які використовують (чавун марки 300X32НЗФЛ, сплав «нікорин») і плануються до використання (дослідні хромомарганцеві сплави) для виготовлення прошивних оправок прокатних станів. На рис. 1 наведено структуру зразків відливок Ø 350 мм, що отримані з чавуну марки 300X32НЗФЛ і сплаву «нікорин». За перерізом відливки із чавуну 300X32НЗФЛ формується неоднорідна структура: від поверхні до центру спостерігається укрупнення та збільшення кількості карбідів. За перерізом відливки зі сплаву «нікорин» утворюється практично однорідна структура, в якій розташовуються два типи карбідів. Структура хромомарганцевих сплавів із різним вмістом вуглецю, хрому, марганцю та нікелю наведена на рис. 2.

За даними рентгеноструктурного аналізу у чавуні 300X32НЗФЛ виявлено карбіди типу Me₇C₃ і встановлено, що матриця складається із аустеніту (~ 52 %) і фериту (~ 48 %). Ферит є небажаною структурною складовою, яка разом із макродефектами може обумовлювати зниження зносостійкості чавуну. У хромонікелевому сплаві виявлено надлишкові карбіди Me₇C₃ (Cr₇C₃) і TiC, високонікелевий аустеніт, інтерметалідні з'єднання Ni₃Al та σ-фази (FeCr), яка знижує стійкість сплавів у процесі експлуатації в умовах напружень розтягу. Це пов'язано з тим, що σ-фаза має високу твердість, проте є дуже крихкою [16, 17]. У хромомарганцевих сплавах виявлено карбіди типу Me₇C₃–(Cr, Mn, Fe)₇C₃ [18], цементит, аустеніт і α-фази. Кількісні дані рентгеноструктурного аналізу дослідних сплавів наведено в табл. 2, а результати вимірювання мікротвердості металевої матриці та карбідів типу Me₇C₃ в табл. 3.

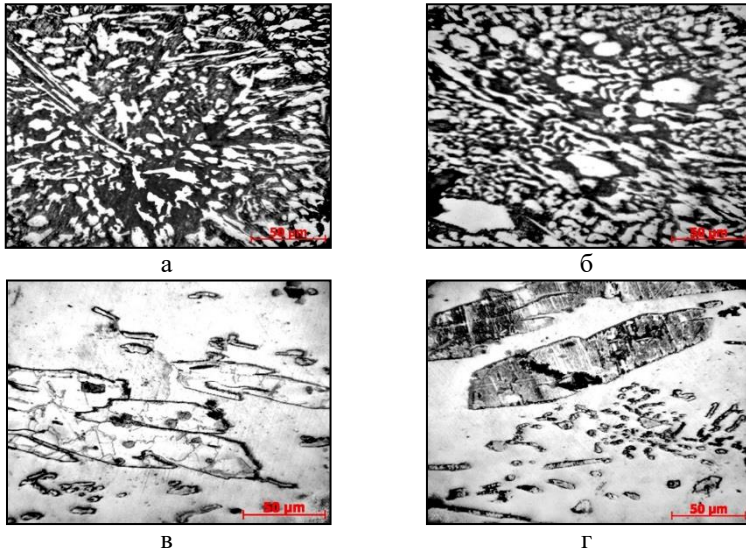


Рисунок 1 – Структура чавуну та хромонікелевого сплаву у литому стані:
 а, б – поверхня і осьова зона відливки з чавуну 300X32НЗФЛ відповідно;
 в, г – поверхня і осьова зона відливки зі сплаву «нікорин» відповідно.

Мікротвердість матриці хромомарганцевих сплавів № 1–3 зростає зі збільшенням вмісту вуглецю, хрому, марганцю та нікелю і перевищує відповідні значення для чавуну марки 300X32НЗФЛ та сплаву «нікорин». При цьому мікротвердість евтектичних карбідів виявляється у ~ 2,4–2,1 рази меншою, ніж для чавуну 300X32НЗФЛ і сплаву «нікорин».

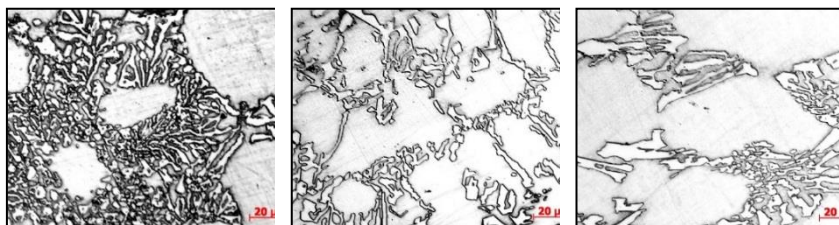
Разом зі збільшенням кількості аустеніту зростає й мікротвердість дослідних сплавів. Такі зміни можуть бути додатково обумовлені процесами ліквідації, які відбуваються під час кристалізації дослідних сплавів.

Розподілення легувальних елементів у литій структурі хромомарганцевих сплавів вивчали за допомогою локального рентгеноспектрального аналізу [19]. Аналіз зразків проводили за точками, в яких визначили вміст основних і легувальних елементів матриці та карбідів типу Me₇C₃ (рис. 3–5, табл. 4–6). За результатами рентгеноспектрального аналізу встановлено наступний вміст хімічних елементів:

сплав № 1: а) матриця: Cr = 8,63–9,59 %; Mn = 4,59–5,54 %; Si = 0,72–0,86 %; Ni = 0,71–1,09 %; V = 0,03–0,12 %; Cu = 0,06–0,12 %; б) карбіди: Cr = 29,62–47,41 %; Mn = 5,72–6,75 %; Si = 0,27–0,49 %; Ni = 0,11–0,50 %; V = 0,51–0,95 %; Cu = 0,07–0,13 %;

сплав № 2: а) матриця: Cr = 7,99–11,90 %; Mn = 9,69–13,53 %; Si = 1,15–1,37 %; Ni = 0,74–1,00 %; V = 0,02–0,09 %; Cu = 0,05–0,20 %; б) карбіди: Cr = 41,71–50,29 %; Mn = 10,60–14,02 %; Si = 0,47–0,61 %; Ni = 0,04–0,55 %; V = 0,56–0,90 %; Cu = 0,09–0,25 %;

сплав № 3: а) матриця: Cr = 5,23–10,05 %; Mn = 14,37–19,59 %; Si = 0,67–1,32 %; Ni = 1,08–1,35 %; V = 0,01–0,13 %; Cu = 0,09–0,28 %; б) карбіди: Cr = 32,59–43,05 %, Mn = 15,52–23,12 %; Si = 0,32–0,45 %; Ni = 0,05–0,22 %; V = 0,56–0,80 %; Cu = 0,15–0,28 %.



сплав № 1

сплав № 2

сплав № 3

Рисунок 2 – Структура хромомарганцевих сплавів у литому стані.

Таблиця 2 – Дані рентгеноструктурного аналізу дослідних сплавів.

Дослідні сплави	aa по (011) α , Å	$a\gamma$ по (022) γ , Å	Ступінь недосконалості α -фази ($\beta 0,5$), °	% А, в матриці	HRC
300X32H3ФЛ	2,88	3,48	0,43	52	49
«нікорин»	–	3,58	–	≤ 100	47
сплав № 1	2,87	3,60	0,59	87	35
сплав № 2	2,88	3,62	0,59	92	42
сплав № 3	2,87	3,62	0,57	94	42

Таблиця 3 – Результати вимірювання мікротвердості дослідних сплавів.

Дослідні сплави	Мікротвердість матриці, МПа	Мікротвердість карбідів, МПа
300X32H3ФЛ	3285	18920
«нікорин»	2769	18921
сплав № 1	4137	7920
сплав № 2	4228	8934
сплав № 3	4663	9195

Значення мінімальних (k_{min}) і максимальних (k_{max}) коефіцієнтів ліквіації (відношення мінімального та максимального вмісту елемента до його середнього значення у відповідній структурній складовій) наведено в табл. 7.

Таблиця 4 – Кількісні дані за розподілом хімічних елементів у сплаві № 1.

Структурна складова	Вміст легувальних елементів, % ваг.							
	Cr	Mn	Si	Ni	V	Cu	Fe	Σ легувальних елементів
Матриця	9,04	5,01	0,81	0,85	0,13	0,09	84,12	15,88
Карбіди	41,19	6,28	0,36	0,24	0,75	0,12	51,06	48,94

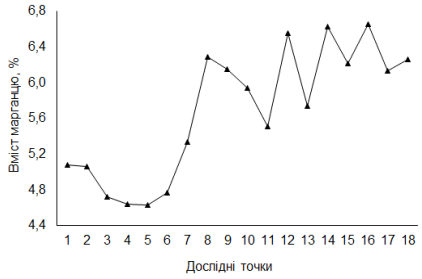
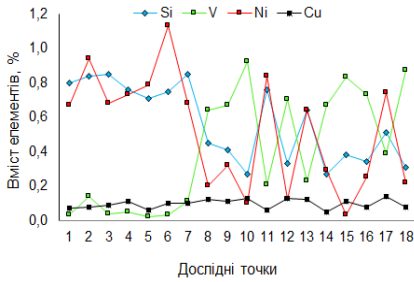
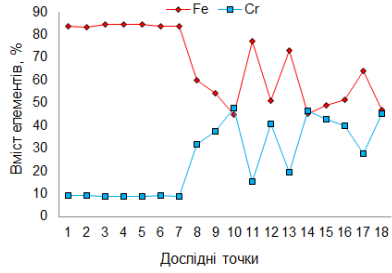
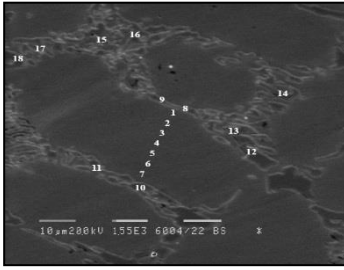


Рисунок 3 – Розподілення хімічних елементів за структурою дослідного сплаву № 1 в литому стані.

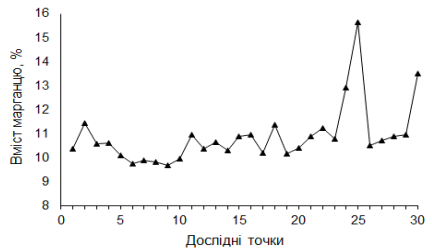
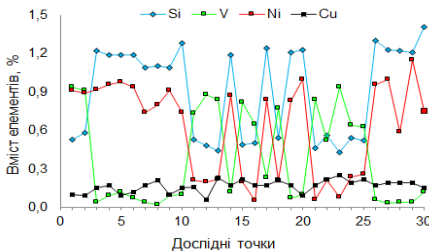
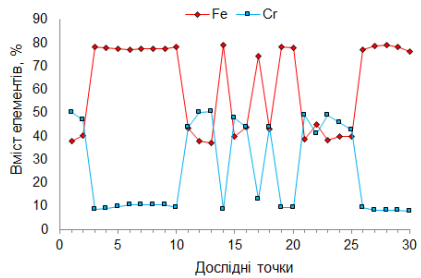
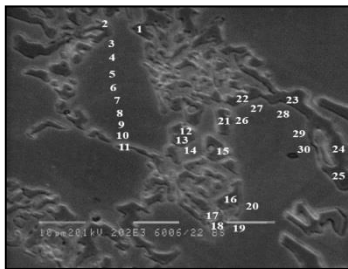


Рисунок 4 – Розподілення хімічних елементів за структурою дослідного сплаву № 2 в литому стані.

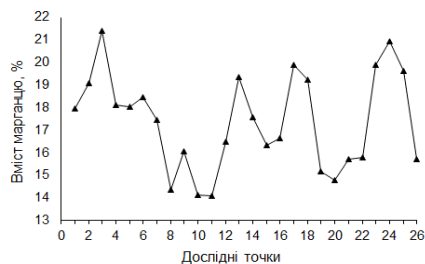
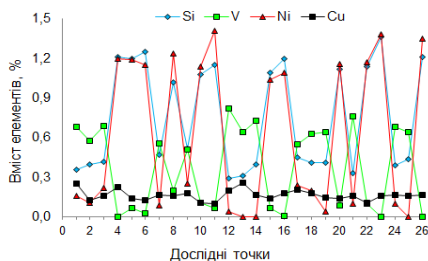
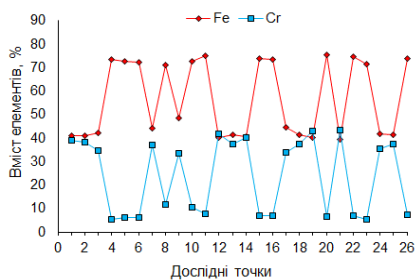
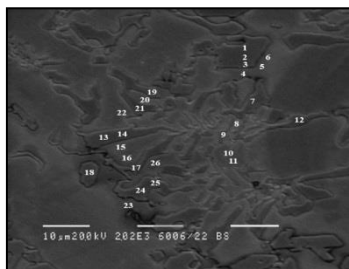


Рисунок 5 – Розподілення хімічних елементів за структурою дослідного сплаву № 3 в литому стані.

Таблиця 5 – Кількісні дані за розподілом хімічних елементів у сплаві № 2.

Структурна складова	Вміст легувальних елементів, % ваг.							Σ легувальних елементів
	Cr	Mn	Si	Ni	V	Cu	Fe	
Матриця	9,44	10,58	1,23	0,91	0,11	0,11	77,67	22,33
Карбіди	47,28	11,20	0,53	0,20	0,77	0,18	39,84	60,16

Таблиця 6 – Кількісні дані за розподілом хімічних елементів у сплаві № 3.

Структурна складова	Вміст легувальних елементів, % ваг.							Σ легувальних елементів
	Cr	Mn	Si	Ni	V	Cu	Fe	
Матриця	7,27	16,42	1,13	1,19	0,12	0,17	73,74	26,26
Карбіди	38,58	18,76	0,40	0,13	0,66	0,22	41,25	58,75

У структурі дослідних сплавів спостерігаються ділянки як з від'ємною, так і позитивною ліквациєю хімічних елементів. При цьому найбільші значення коефіцієнтів позитивної ліквациї зафіксовані за вмістом нікелю, ванадію та міді. Результати аналізу розподілення хімічних елементів між структурними складовими хромомарганцевих сплавів у литому стані свідчать про те, що з підвищенням вмісту вуглецю, хрому, марганцю та

нікелю ступінь легованості металевої матриці та евтектичних карбідів типу Me_7C_3 зростає, що забезпечує підвищення мікротвердості, загальної твердості матеріалу та, відповідно, його зносостійкості. Останнє твердження добре узгоджується із результатами випробувань на зношування тертям і абразивне зношування (табл. 8, 9).

Таблиця 7 – Розрахункові значення коефіцієнтів ліквіації хімічних елементів у структурі дослідних хромомарганцевих сплавів.

Структурна складова	Коефіцієнти ліквіації					
	$k_{min} Cr / k_{max} Cr$	$k_{min} Mn / k_{max} Mn$	$k_{min} Si / k_{max} Si$	$k_{min} Ni / k_{max} Ni$	$k_{min} V / k_{max} V$	$k_{min} Cu / k_{max} Cu$
сплав № 1						
Матриця	0,95/1,06	0,92/1,10	0,89/1,07	0,84/1,29	0,39/1,84	0,71/1,35
Карбіди	0,72/1,15	0,91/1,08	0,74/1,35	0,45/2,08	0,68/1,27	0,57/1,13
сплав № 2						
Матриця	0,85/1,26	0,92/1,28	0,94/1,11	0,81/1,11	0,37/1,55	0,46/1,82
Карбіди	0,88/1,06	0,95/1,25	0,89/1,15	0,21/2,80	0,73/1,18	0,50/1,36
сплав № 3						
Матриця	0,72/1,38	0,88/1,19	0,58/1,17	0,90/1,13	0,13/1,67	0,50/1,61
Карбіди	0,85/1,12	0,83/1,23	0,79/1,14	0,35/1,69	0,85/1,21	0,67/1,28

Таблиця 8 – Результати випробувань на зношування тертям.

Дослідні сплави	Навантаження, Н	Швидкість, м/с	Інтенсивність зношування (i)	Коефіцієнт зносостійкості (n)
300X32НЗФЛ	500	≤ 2	1,19×10 ⁻⁷	6,92
«нікорин»			9,30×10 ⁻⁷	6,03
сплав № 1			1,10×10 ⁻⁷	6,95
сплав № 2			7,52×10 ⁻⁸	7,12
сплав № 3			5,70×10 ⁻⁸	7,24

Таблиця 9 – Результати випробувань на абразивне зношування.

Абразивне середовище	Час, хв.	Зношування сплавів, мг		
		сплав № 1	сплав № 2	сплав № 3
SiO ₂	15	2,7	3,5	1,0
	20	2,9	4,5	2,4
	25	3,4	6,7	3,0
B ₄ C	15	20,1	25,9	28,8
	20	31,5	32,6	29,5
	25	49,0	47,1	34,8
SiC	15	33,0	35,4	30,5
	20	42,6	39,3	46,3
	25	51,0	53,2	50,0

Аналіз табличних даних дозволив встановити, що дослідні сплави № 1 – 3 у литому стані демонструють більш високу зносостійкість під час зношування тертям при температурі до 950 °С та навантаженні до 500 Н у порівнянні з чавуном 300Х32Н3ФЛ і сплавом «нікорин».

Підвищена стійкість сплаву № 3 до зношування тертям та абразивного зношування зумовлена більш високими значеннями мікротвердості матриці та евтектичних карбідів, що, очевидно, пов'язано зі збільшенням ступеня легування та формою евтектичних карбідів [20], а також деформаційно-фазовими перетвореннями, які можуть відбуватися під час випробувань. Зокрема останнє твердження потребує проведення додаткових досліджень.

Відомо, що на розвиток процесів ліквідації додатково впливає ступінь перегрівання розплаву під час його розливання. Отже, актуальними є дослідження, які дозволяють встановити вплив фактичного хімічного складу на температурні інтервали плавлення та кристалізації сплавів.

На рис. 6 наведено термограми нагрівання й охолодження дослідних сплавів, які були отримані за допомогою установки «Netzsch-Gerätebau GmbH – STA 409 CD». Диференціальні криві мають приблизно схожий зовнішній вигляд і відрізняються деякими зсувами температурних інтервалів, що, очевидно, пов'язано із різним вмістом вуглецю, хрому, марганцю, нікелю, а також ступеня легуваності матриці й евтектичних карбідів.

У табл. 10 наведено температурні інтервали початку та завершення плавлення/кристалізації хромомарганцевих сплавів, які визначені способом диференціально-термічного аналізу. Наведені дані не суперечать загальноприйнятим теоретичним положенням: із збільшенням вмісту вуглецю знижується температура ліквідус дослідних сплавів. У якості порівняння (табл. 11) наведено аналогічні інтервали температур плавлення/кристалізації сплавів-аналогів, які наразі використовують для виготовлення прошивних оправок прокатних станів.

Отримані дані надали важливу інформацію та будуть враховані під час розроблення технологічної інструкції на промислове виготовлення відливок із запропонованого дослідного сплаву. Результати порівняльного аналізу температурних інтервалів початку та завершення плавлення/кристалізації хромомарганцевих сплавів із чавуном марки 300Х32Н3ФЛ і сплавом «нікорин» дозволяють стверджувати, що запропонований матеріал характеризується меншою енергоємністю виробничого процесу, а, отже, є більш технологічним з точки зору температури перегрівання, досягнення якої необхідно для розливання розплаву у форми та подальшої його кристалізації.

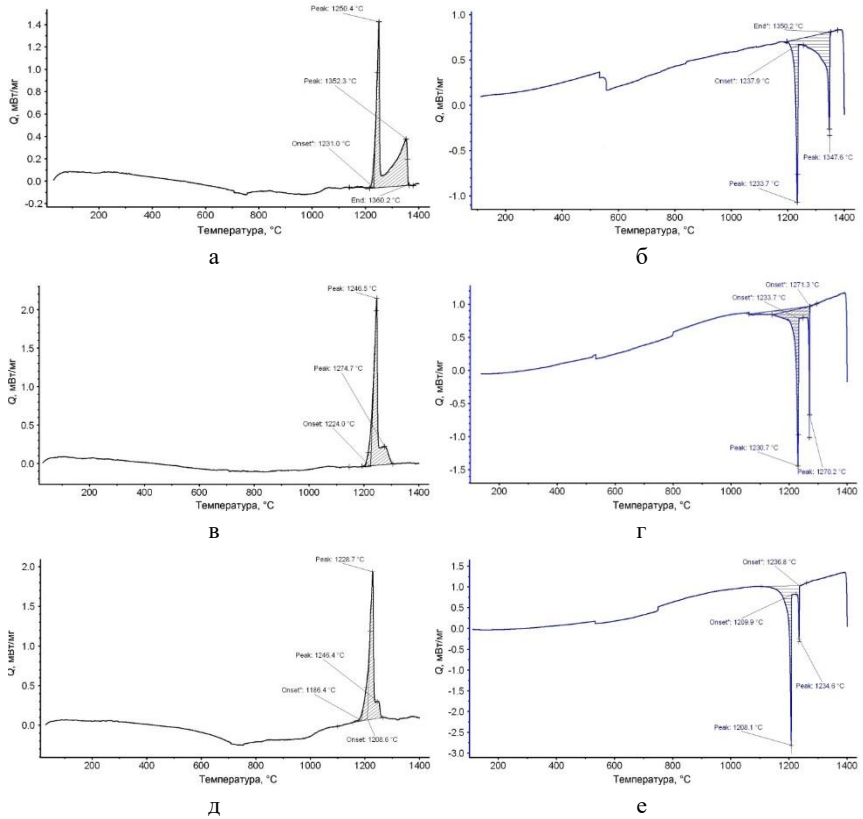


Рисунок 6 – Термограми нагрівання й охолодження дослідних сплавів:
а, в, д – нагрівання сплавів № 1, № 2 і № 3 відповідно;
б, г, е – охолодження сплавів № 1, № 2 і № 3 відповідно.

Таблиця 10 – Ливарні властивості дослідних хромомарганцевих сплавів.

Матеріал	Температура солідус, °С		Температура ліквідус, °С	
	нагрівання	охолодження	нагрівання	охолодження
сплав № 1	1216	1207	1361	1350
сплав № 2	1195	1175	1308	1271
сплав № 3	1167	1107	1264	1236

Таблиця 11 – Ливарні властивості сплавів-аналогів.

Матеріал	Температура солідус, °С		Температура ліквідус, °С	
	нагрівання	охолодження	нагрівання	охолодження
300X32H3ФЛ	1243	1248	1353	1338
«нікорин»	1288	1279	1390	1373

Висновки

1. Досліджено особливості формування первинної структури, фазового складу та властивостей економнолегованих хромомарганцевих сплавів. У структурі дослідних сплавів виявлено аустеніто-карбідні евтектичні колонії на основі карбіду Me_7C_3 . За даними рентгеноструктурного аналізу встановлена наявність комплекснолегованих карбідів типу Me_7C_3 –(Cr, Mn, Fe) $_7C_3$, цементиту, аустеніту та α -фази. Кількість аустеніту в металевій матриці дослідних сплавів зростає від 87 % до 94 % із збільшенням вмісту вуглецю, марганцю, хрому та нікелю.

2. Визначено, що під час зношування тертям за температур до 950 °C і навантаженні до 500 Н хромомарганцеві сплави у литому стані володіють більш високою зносостійкістю у порівнянні із чавуном марки 300X32H3ФЛ і сплавом «нікорин». За результатами випробувань на зношування тертям та абразивне зношування встановлено, що найбільшою зносостійкістю володіє сплав, який містить 3,10 % C; 13,10 % Cr; 15,75 % Mn; 1,15 % Ni; 0,90 % Si; 0,25 % V і 0,15 % Cu.

3. Досліджено розподілення хімічних елементів між структурними складовими хромомарганцевих сплавів у литому стані та визначено мінімальні та максимальні значення коефіцієнтів ліквідації. Показано, що в структурі дослідних сплавів спостерігаються ділянки як з від'ємною, так і з позитивною ліквідацією хімічних елементів. При цьому найбільші значення коефіцієнтів позитивної ліквідації є характерними для нікелю, ванадію та міді. Аналіз розподілення хімічних елементів між структурними складовими хромомарганцевих сплавів свідчить про те, що з підвищенням вмісту вуглецю, хрому, марганцю та нікелю ступінь легованості металевої матриці й евтектичних карбідів типу Me_7C_3 зростає, що обумовлює підвищення зносостійкості.

4. Досліджено вплив фактичного хімічного складу на зміну температурних інтервалів початку та завершення плавлення/кристалізації хромомарганцевих сплавів. Результати порівняльного аналізу температурних інтервалів початку та завершення плавлення/кристалізації хромомарганцевих сплавів із чавуном марки 300X32H3ФЛ і сплавом «нікорин» дозволяють стверджувати, що розроблений матеріал володіє меншою енергоємністю виробничого процесу, а, отже, є більш технологічним з точки зору температури перегрівання у рідкому стані.

5. Для обґрунтованого визначення та можливого розширення галузі застосування нових економнолегованих хромомарганцевих сплавів необхідно мати достовірні уявлення щодо унормованих показників якості, зокрема результатів випробувань на ударно-абразивне й абразивне зношування, а також зношування тертям після проведення термічного оброблення.

6. Результати досліджень дозволяють зробити попередній висновок, що застосування запропонованих хромомарганцевих сплавів разом із

подальшим розробленням режимів остаточного термічного оброблення обумовлять підвищення експлуатаційної стійкості інструменту гарячого деформування (прощивних оправок) у порівнянні з існуючими матеріалами-аналогами при одночасному зменшенні матеріальних витрат на його виготовлення. При цьому, під час визначення ефективних параметрів режиму термічного оброблення хромомарганцевих сплавів, слід передбачити можливість отримання у готових виробах структур, що належать до метастабільних станів та здатних до реалізації ефекту самозміцнення із одночасним підвищенням загального комплексу властивостей за рахунок перебігу деформаційних фазових перетворень при експлуатації.

Перелік посилань

1. Ковзель М. А., Парусов Е. В. Про стійкість до абразивного зношування хромомарганцевих сплавів у різних середовищах. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ІТММ'2022*: матер. міжнар. наук.-техн. конф., м. Дніпро, 18 травня 2022 р. Дніпро: Український державний університет науки і технологій, 2022. С. 35–39. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2022.01.006.
2. Ковзель М. А., Парусов Е. В., Снігура І. Р., Кукса О. В. Визначення раціональних композицій хімічного складу економнолегованих зносостійких сплавів на основі заліза. *Наука і металургія*: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Дніпро, 22–24 листопада 2022 р. Дніпро: ІЧМ НАНУ, 2022. С. 53–54. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-conferens.
3. Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки: монография. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.
4. Sychkov A. B., Parusov E. V., Zavalishin A. N., and Kozlov A. V. Inherent Effect of the Crystal Structure of Continuous Cast Steel Billets On the Formation of Structure of High Carbon Wire Rod In Coils. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. 2018. Vol. 53. Iss. 5. P. 977–985.
5. Ершов Г. С., Позняк Л. А. Микронеоднородность металлов и сплавов: монография. Москва: Металлургия, 1985. 214 с.
6. Голиков И. Н., Масленков С. Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах: монография. Москва: Металлургия, 1977. 224 с.
7. Смирнов А. Н., Глазков А. Я., Пилюшенко В. Л. Теория и практика непрерывного литья заготовок: монография. Донецк: ООО «Лебедь», 2000. 371 с.
8. Евтеев Д. П., Колыбалов И. Н. Непрерывное литье стали: монография. Москва: Металлургия, 1984. 200 с.
9. Бабаченко О. І., Дьоміна К. Г., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Аналіз впливу деформаційного пророблення безперервнолитих заготовок на макро- і мікроструктуру конструкційних сталей (огляд). *Металознавство та термічна обробка металів*. 2020. № 4 (91). С. 17–29. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.241120.17.687
10. Сухомлин В. И., Борисенко А. Ю., Кононенко А. А., Бабаченко А. И., Яценко А. И., Чухлеб В. Л., Ткач В. Н., Тараненко А. А., Кузьмичев Е. М. Схемы и механизмы формирования феррито-перлитной структуры колесных

- сталей после кристаллизации, термической обработки и горячей пластической деформации. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2010. № 2. С. 62–75.
11. Бабаченко А. И., Кныш А. В., Кононенко А. А., Дементьева Ж. А., Шпак Е. А., Клиновая О. Ф. Анализ макро- и микроструктур железнодорожных колес, изготовленных из доступных способов производства. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: сб. научн. труд. Днепропетровск: ПГАСА. 2015. Вып. 80. С. 27–32.
 12. Борисенко А. Ю. Формирование структурных зон в стальных отливках. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 2 (65). С. 39–50.
 13. Левченко Г. В., Балаханова Т. В., Борисенко А. Ю., Мосьпан В. В., Антонов Ю. Г., Мединский Г. А. Наследственное влияние дендритной структуры на размер зерна непрерывнолитых заготовок из среднеуглеродистой стали. *Металл и литье Украины*. 2017. № 11–12. С. 25–33.
 14. Бабаченко О. І., Дьоміна К. Г., Кононенко Г. А., Дементьева Ж. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Вплив швидкості охолодження безперервнолитої заготовки, що твердне, на параметри дендритної структури вуглецевої сталі з 0,54 % С. *Металофізика та новітні технології*. 2021. № 11 (43). С. 1537–1551. DOI: 10.15407/mfint.43.11.1537.
 15. Бабаченко О. І., Дьоміна К. Г., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Сафронова О. А. Вплив швидкості охолодження при затвердінні безперервнолитої заготовки на характеристики дендритної структури вуглецевої сталі марки ОС. *Металознавство та обробка металів*. 2021. № 27. С. 9–19. DOI: 10.15407/mom2021.01.009.
 16. Куцова В. З., Животович А. В., Ковзель М. А., Кравченко А. В. Структура и фазовый состав жаропрочного хромоникелевого сплава «никорим». *Металлофизика и новейшие технологии*. 2008. Вып. 30. С. 235–243.
 17. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V., and Myrgorodskaya A. S. Structure, Phases and Alloying Elements Distribution of Nikorim (High-Temperature Strength Ni-Cr Alloy) In Its Cast Form. *Metallurgical and Mining Industry*. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 40–44.
 18. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны: монография. Москва : Металлургия, 1976. 287 с.
 19. Ковзель М. А., Бабаченко О. І., Парусов Е. В., Парусов О. В. Особливості розподілу легувальних елементів за структурними складовими нових хромомарганцевих сплавів у литому стані. *Наука і металургія* : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції, м. Дніпро, 22–24 листопада 2022 р. Дніпро : ІЧМ НАНУ, 2022. С. 51–52. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-conferens.
 20. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V., Shvets P. Yu., Zyska A., and Koczurkiewicz B. Structure and Mechanical Properties of Chrome-Manganese Cast Irons in the Cast State. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering*. A collective monograph. Czestochowa. 2016. No. 56. P. 147–153.

References

1. Kovzel M. A., Parusov E. V. *Pro stiiikist' do abrazyvnoho znoshuvannia khromomarthantsevykh splaviv u riznykh seredovyschakh* [About resistance to

- abrasive wear of chromium-manganese alloys in various environments]. Information Technologies In Metallurgy And Mechanical Engineering – *ITMM'2022: mater. int. science and technology conference*, Dnipro, May 18, 2022. Dnipro: Ukrainian State University of Science and Technologies, 2022. P. 35–39 (in Ukrainian). DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2022.01.006.
2. Kovzel M. A., Parusov E. V., Snihura I. R., Kuksa O. V. *Vyznachennia ratsional'nykh kompozytsii khimichnogo skladu ekonomnolehovanykh znosostiikykh splaviv na osnovi zaliza* [Determination of rational compositions of the chemical composition of economically alloyed wear-resistant iron-based alloys]. Science and metallurgy: mater. of the All-Ukrainian scientific and technical conference, Dnipro, November 22–24, 2022. Dnipro: Iron & Steel Institute NASU, 2022. P. 53–54 (in Ukrainian). DOI: 10.52150/2522-9117-2022-conferens.
 3. Parusov V. V., Sychkov A. B., Parusov E. V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoeffektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological foundations for the production of highly efficient types of wire rod]. Dnipropetrovsk : ART-PRESS, 2012. 376 p. (in Russian).
 4. Sychkov A. B., Parusov E. V., Zavalishin A. N., Kozlov A. V. Inherent Effect of the Crystal Structure of Continuous Cast Steel Billets On the Formation of Structure of High Carbon Wire Rod in Coils. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. 2018. Vol. 53. Iss. 5. P. 977–985.
 5. Ershov H. S., Pozniak L. A. *Mikroneodnorodnost' metallov i splavov* [Microinhomogeneity of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1985. 214 p. (in Russian).
 6. Holikov I. N. and Maslenkov S. B. *Dendritnaia likvatsiia v staliakh i splavakh* [Dendritic segregation in steels and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1977. 224 p. (in Russian).
 7. Smirnov A. N., Hlazkov A. Ia., Piliushenko V. L. *Teoriia i praktika nepreryvnoho lit'ia zahotovok* [Theory and practice of continuous casting]. Donetsk: Lebed' LTD, 2000. 371 p. (in Russian).
 8. Evteev D. P., Kolybalov I. N. *Nepreryvnoe lit'e stali* [Continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgy, 1984. 200 p. (in Russian).
 9. Babachenko O. I., D'omina K. H., Kononenko H. A., Podolskiy R. V. *Analiz vplyvu deformatsiinoho proroblennia bezperervnolytykh zahotovok na makro- i mikrostrukturu konstruksiiynykh stalei (ohliad)* [Analysis of the impact of deformation processing of continuously cast billets on the macro- and microstructure of structural steels (review)]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal science and heat treatment of metals]. 2020. No 4 (91). P. 17–29 (in Ukrainian). DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.241120.17.687
 10. Sukhomlin V. I., Borisenko A. Yu., Kononenko A. A., Babachenko A. I., Iatsenko A. I., Chukhleb V. L., Tkach V. N., Taranenko A. A., Kuzmichev E. M. *Skhemy i mekhanizmy formirovaniia ferrite-perlitnoi struktury kolesnykh stalei posle kristallizatsii, termicheskoi obrabotki i horiachei plasticheskoi deformatsii* [Schemes and mechanisms of formation of the ferrite-pearlite structure of wheel steels after crystallization, heat treatment and hot plastic deformation]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal science and heat treatment of metals]. 2010. No. 2. P. 62–75 (in Russian).
 11. Babachenko A. I., Knysh A. V., Kononenko A. A., Dement'eva Zh. A., Shpak E. A., Klinovaia O. F. *Analiz makro- i mikrostruktur zheleznodorozhnykh koles*,

- izhotovlennykh iz dostupnykh sposobov proizvodstva* [Analysis of macro- and microstructures of railway wheels made from available production methods]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, materials science, mechanical engineering: a collection of scientific papers]. Dnipropetrovsk: PGASA. 2015. Vol. 80. P. 27–32 (in Russian).
12. Borisenko A. Yu. *Formirovanie strukturnykh zon v stal'nykh otlivkakh* [Formation of structural zones in steel castings]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal science and heat treatment of metals]. 2014. No. 2 (65). P. 39–50 (in Russian).
 13. Levchenko G. V., Balakhanova T. V., Borisenko A. Yu., Mos'pan V. V., Antonov Yu. G., Medinskii G. A. *Nasledstvennoe vliianie dendritnoi struktury na razmer zerna nepreryvnykh zahotovok iz sredneuhlerodistoi stali* [Hereditary influence of the dendritic structure on the grain size of continuously cast billets from medium carbon steel]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and casting of Ukraine]. 2017. No. 11–12. P. 25–33 (in Russian).
 14. Babachenko A. I., D'omina K. G., Kononenko A. A., Dement'eva Zh. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. *Vplyv shvydkosti okholodzhennia bezperervnykh zahotovky, scho tverdne, na parametry dendrynoi struktury vuhletsevoi stali z 0,54 % C* [The influence of the cooling rate of a continuously cast billet solidifying workpiece on the parameters of the dendritic structure of carbon steel with 0.54 % C]. *Metalofizyka ta novitni tekhnologii* [Metal physics and latest technologies]. 2021. No. 11 (43). P. 1537–1551 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.43.11.1537.
 15. Babachenko O. I., D'omina K. G., Kononenko A. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. *Vplyv shvydkosti okholodzhennia pry zatverdinni bezperervnykh zahotovky na kharakterystyky dendrynoi struktury vuhletsevoi stali marki OS* [The influence of the cooling rate during solidification of a continuously cast billet on the characteristics of the dendritic structure of OS grade carbon steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal science and heat treatment of metals]. 2021. No. 27. P. 9–19 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mom2021.01.009.
 16. Kutsova V. Z., Zhivotovich A. V., Kovzel M. A., Kravchenko A. V. *Struktura i fazovyi sostav zharoprochnoho khromonikelevoho splava «nikorim»* [Structure and phase composition of heat-resistant chromium-nickel alloy «nikorim»]. *Metalofizyka i noveishie tekhnologii* [Metal physics and latest technologies]. 2008. Vol. 30. P. 235–243 (in Russian).
 17. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V., Myrgorodskaya A. S. *Structure, Phases and Alloying Elements Distribution of Nikorim (High-Temperature Strength Ni-Cr Alloy) In Its Cast Form*. Metallurgical and Mining Industry. 2012. Vol. 4. No. 1. P. 40–44.
 18. Bobro Yu. G. *Lehrovannyye chuhuny* [Alloy cast irons]. Moscow: Metallurgy, 1976. 287 p. (in Russian).
 19. Kovzel M. A., Babachenko O. I., Parusov E. V., Parusov O. V. *Osoblyvosti rozpodilu lehuval'nykh elementiv za strukturnymy skladovymy novykh khromomarhantsevykh splaviv u lytomu stani* [Peculiarities of the distribution of alloying elements according to the structural components of new chromium-manganese alloys in the cast state]. Science and Metallurgy: materials of the All-Ukrainian scientific and technical conference, Dnipro, November 22–24, 2022. Dnipro: Iron and Steel Institute of NASU, 2022. P. 51–52 (in Ukrainian). DOI:

10.52150/2522-9117-2022-conferens.

20. Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Grebeneva A. V., Shvets P. Yu., Zyska A., Koczurkiewicz B. Structure and Mechanical Properties of Chrome-Manganese Cast Irons in the Cast State. New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering. A collective monograph. Czestochowa. 2016. No. 56. P. 147–153.

M. A. Kovzel, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5720-1186

O. I. Babachenko, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7501-4173

E. V. Parusov, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4560-2043

I. M. Chuiko, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4753-614X

E. V. Oliinyk, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-3366-3746

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ON THE FORMATION OF THE PRIMARY STRUCTURE AND PROPERTIES OF ECONOMIC-ALLOYED CHROMO-MANGANESE ALLOYS IN A CAST STATE

Summary. The purpose of the work is to study the peculiarities of the influence of the chemical composition on the formation of the primary structure and properties of chromium-manganese alloys. Piercing mandrels belong to the replaceable tool of hot deformation, the operational characteristics of which affect the productivity of pipe rolling mills and the quality of finished products. The costs of the hot deformation tool are a component of the cost price of metal products, so the interest in increasing their operational stability is constantly growing. The development of a rational component composition of alloys is based on ideas about the peculiarities of the course of structural and phase transformations during crystallization, heat treatment, as well as under the influence of high temperatures and loads during operation. To develop an effective mode of final heat treatment of wear-resistant products, one should have an idea about the quality of the cast material and its primary structure, in particular by determining the dynamics of changes in indicators, the formation of which is due to liquidation phenomena. The purpose of the work is to study the peculiarities of the influence of the chemical composition on the formation of the primary structure and properties of chromium-manganese alloys. The peculiarities of the formation of the cast structure, phase composition, and properties of economically alloyed chromium-manganese alloys intended for the manufacture of piercing mandrels have been studied. According to the results of tests on frictional wear, it was established that chromium-manganese alloys have higher wear resistance compared to cast iron of the 300Cr32Ni3V and the «nikorin» alloy (36.0–38.0 % Cr; 57.0–59.0 % Ni). According to the results of the X-ray spectral analysis, it was established that in the structure of the experimental alloys, the highest values of the liquidation coefficients are characteristic of Ni, V and Cu. With an increase in the content of C, Mn, Cr, and Ni, the degree of doping of the matrix and carbides increases, which leads to an increase in the wear resistance of the chromium-manganese alloys. The obtained results with a high probability allow us to state that the further development of effective modes of final heat treatment of the proposed chromium-manganese alloys will ensure an increase in the operational stability of the piercing mandrels of pipe rolling mills while simultaneously reducing the material costs for their manufacture.

Key words: chromium-manganese alloys, cast structure, chemical heterogeneity, wear resistance.

Reference for citation: Kovzel M. A., Babachenko O. I., Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V. Pro formuvannya pervynnoyi struktury ta vlastyvostry ekonomnolehovanykh khromomarhantsevykh splaviv u lytomu stani [On the formation of the primary structure and properties of economically alloyed chromium-manganese alloys in the cast state]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 379-396. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-379-396.

*Стаття надійшла до редакції збірника 17.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*