

УДК 669.018.28:536.75

А.М. Верховлюк, д-р техн. наук, проф., зав. відділу;

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

Р.А. Сергієнко, канд. техн. наук, старший дослідник;

e-mail: rsruslan17@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3613-9330>

О.А. Щерецький, д-р техн. наук, пров. наук. співроб;

e-mail: 07shch@i.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9030-876X>

Р.С. Сергійко, аспірант, e-mail: romanse@me.com;

<https://orcid.org/0009-0003-8327-7637>

О.Г. Потрух, головний технолог

Д.С. Каніболоцький, канд. хім. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: kanibolotsky@univ.kiev.ua; <https://orcid.org/0009-0001-2489-9167>

Є.Г. Биба*, канд. техн. наук, доцент; e-mail: byba.evgen@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

О.В. Железняк, головний технолог; e-mail: alekszel43@gmail.com

В.В. Железняк, головний технолог

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

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

ЛИВАРНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМ FeNiCrCuAl та FeNiCrCuMn

У роботі представлено дослідження щодо ливарних властивостей високоентропійних сплавів (BEC) систем FeNiCrCuAl та FeNiCrCuMn. BEC виплавляли методом індукційної плавки на повітрі. Для приготування сплавів як шихтові матеріали використовували різні компоненти: хром вводили у вигляді низьковуглецевого ферохрому марки ФХ010А, залізо за допомогою чавуну марки ЧН17ДЗХ2, нікель у вигляді первинного нікелю (Н-1, 99,93 % мас. част.), мідь у вигляді прутків та дроту (М1, 99,90 % мас. част.), алюміній технічної чистоти (А85, 99,85 % мас. част.), марганець у вигляді лігатури Cu–Mn (Cu – 61,50 % мас. част., Mn – 37,70 % мас. част., Si – 0,30 % мас. част., Fe – 0,50 % мас. част.) та феромарганцю марки Мн965. Було проведено серію експериментів для дослідження рідкоплинності та лінійної усадки високоентропійних сплавів, а для порівняння визначено ливарні властивості сталей 25Л, 10Х18Н9Л. Вивчення рідкоплинності проводили за методиками, які використовували прутковий пінополістиролові проби, розроблену піщано-глинясту пробу з кільцевим каналом постійного перетину та комплексну U-подібну пробу Нехендзі-Купцова, яка є вдосконаленою формою Нехендзі-Самаріна. Температуру розплаву контролювали в печі, у ливарній чаші, та безпосередньо в пробі. Встановлено, що рідкоплинність BEC системи FeNiCrCuMn нижча, ніж у стандартних сталей 25Л, 10Х18Н9Л і значно нижча, ніж у сірого чавуну. Визначено, що лінійна усадка виливків із високоентропійних сплавів знаходиться в діапазоні від 2,22 % до 2,63 % і наближається до лінійної усадки високолегованих сталей. Схильності до формування гарячих тріщин у високоентропійних сплавах, що досліджувалися, не виявлено. Представлено дані по

швидкостях охолодження ВЕС, які визначалися шляхом запису і подальшої обробки кривих охолодження на температурних ділянках між точками ліквідус і солідус.

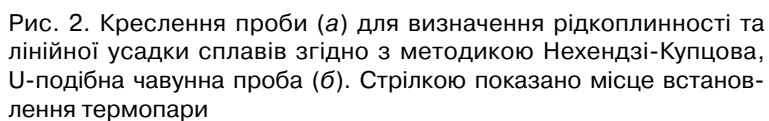
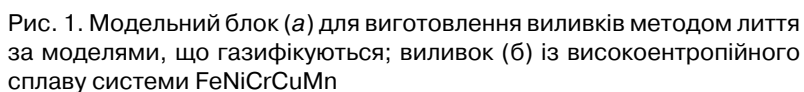
Ключові слова: високоентропійні сплави, рідкоплинність, лінійна усадка, швидкість охолодження, індукційний нагрів.

Вступ

Дослідження та виробнича практика показали, що неможливо повністю оцінити поведінку металевого розплаву, маючи тільки фізичні та фізико-хімічні властивості металів і сплавів. Тому для оцінки сплавів як ливарних матеріалів вивчають їх технологічні властивості, що їх називають ливарними властивостями. Для визначення ливарних властивостей розроблені спеціальні проби, які дозволяють отримати кількісні дані. Наприклад, вивчення рідкоплинності проводиться за методикою, що передбачає використання пруткової проби з прямими каналами (проба Руффа), спіральної пруткової проби постійного перетину (проба Кюрі) та комплексної U-подібної проби Нехендзі-Купцова, яка є вдосконаленою формою Нехендзі-Самаріна [1–2]. До числа ливарних властивостей відносять рідкоплинність, лінійну та об'ємну усадку, тріщиностійкість. Макро- і мікроструктура, схильність сплаву до газонасичення і до забруднення окисними плівками при плавці, прояв ліквідаційної неоднорідності складу також розглядається як ливарні властивості. На рідкоплинність впливає багато різних теплофізичних параметрів, як-от в'язкість і поверхневий натяг розплаву, теплота й інтервал кристалізації сплаву [3]. Чисті метали та евтектичні сплави мають більшу рідкоплинність, ніж сплави тієї ж системи, що кристалізуються в інтервалі температур. У сплавах, що кристалізуються в інтервалі температур, утворюється розгалужений дендритний каркас, який затримує течію розплаву. Переважна більшість одержаних на сьогоднішній день високоентропійних сплавів (ВЕС) — це однофазні (ОЦК, ГЦК) або двофазні (ОЦК+ГЦК) неупорядковані тверді розчини; у деяких ВЕС еквіатомного складу можливе утворення інтерметалічних фаз (фази Лавеса, σ -, μ -, R -фази). Такі ВЕС мають широкий інтервал кристалізації ($\geq 150^\circ\text{C}$), а тому повинні мати незадовільну рідкоплинність та значну ливарну усадку. Робота присвячена дослідженню ливарних властивостей високоентропійних сплавів, відносно нового класу металевих сплавів, що наразі інтенсивно досліджуються [4–7]. У даний час немає досліджень ливарних властивостей високоентропійних сплавів, тому представлена робота має актуальне значення.

Матеріали, методи та результати дослідження. Для дослідження рідкоплинності використовували пруткові проби, які відливали за моделями, що газифікуються (рис. 1), U-подібну чавунну пробу з вертикальним розташуванням каналу (рис. 2) та піщано-глинясту пробу з кільцевим каналом (рис. 3). Для виготовлення піщано-глинястих проб як наповнювач використовували кварцовий пісок, як зв'язувальні матеріали було використано рідке скло (4–5 % мас. част.), технічні лігносульфонати й каолін (2–3 % мас. част.), а також поверхнево-активну речовину ДС-РАС, мазут (1–1,5 % мас. част.) і технічну мочевино. Щоб не допустити утворення пригару на поверхні виливків при заливанні, робочу поверхню піщано-глинястої проби покривали протипригарною фарбою, до складу якої входять: маршаліт (кварц молотий пилоподібний), полівінілбутираль, спирт технічний, ацетон, нітроемаль.

На прямих пруткових пробах досліджували, на яку довжину проливається рідкий метал. Проби заливали за технологіями лиття за моделями, що газифікуються у вакуумні форми з дисперсним вогнетривким наповнювачем. До ливарного стояка із пінополістиролу приклеювали чотири стрижні з того самого матеріалу довжиною від 65 мм до 70 мм, від 90 мм до 95 мм, від 150 мм до 153 мм, від 185 до 190 мм, круглого з діаметром 6,5 мм або прямокутного перетину $6,5 \times 6,5 \text{ мм}^2$ (рис. 1, а). Після заливки проб порівнювали ливарні властивості високоентропійних сплавів та чавунів різного складу з певною температурою перегріву ($t_{\text{пер}}$)



розплавів в печі: сірого чавуну (СЧ) (Si — 1,95 %, мас. част., Mn 0,87 %, мас. част., Ni — 0,36 %, мас. част., Cr — 0,56 %, мас. част., Cu — 0,27 %, мас. част., C — 2,48 %, мас. част.) $t_{\text{пер.}} = 1380\text{--}1480\text{ }^{\circ}\text{C}$; чавуну спеціального складу, який застосовується для обладнання атомних станцій (ЧН17Д3Х2) (Si — 1,86 %, мас. част., Mn — 0,76 %, мас. част., Ni — 13,90 %, мас. част., Cr — 2,63 %, мас. част., Cu — 2,85 %, мас. част., C — 2,57 %, мас. част.), $t_{\text{пер.}} = 1380\text{--}1480\text{ }^{\circ}\text{C}$; високолегованого чавуну (ЧХ22Н2) (Cr — 18,80 %, мас. част., Ni — 2,90 %, мас. част., Si — 1,36 %, мас. част., Mn — 1,55 %, мас. част., C — 3,35 %, мас. част.), $t_{\text{пер.}} = 1380\text{--}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Склади високоентропійних сплавів систем FeNiCrCuAl, FeNiCrCuMn представлено в табл. 1, сплави перегрівали до температур $t_{\text{пер.}} = 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{пер.}} = 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно.

Методика пруткових проб із прямими каналами показала, що високоентропійні сплави систем FeNiCrCuAl, FeNiCrCuMn мають вищу рідкоплинність, ніж у сірого чавуну і ЧН17Д3Х2. Вимірювали довжини чотирьох прутків, які пролилися і визначали середню довжину кожної групи прутків (рис. 4). Наприклад, довжина найдовших прутків із високоентропійних сплавів BEC3 (FeNiCrCuAl), BEC4 (FeNiCrCuMn) становила 176 мм, 138 мм та 146 мм, 153 мм, відповідно, а в сірого та спеціального чавунів була 86, 77 мм та 120 мм, 132 мм, відповідно. Вочевидь методика заливки прутків у модельні форми, що газифікуються, не відображає дійсної рідкоплинності сплаву, оскільки рідкий метал заповнює порожнину ливарної форми примусово під дією розрідження, яке створюється форвакуумним насосом. Для визначення рідкоплинності краще використовувати методику, де розплав протікає у формі натурально, тільки під дією гравітаційної сили.

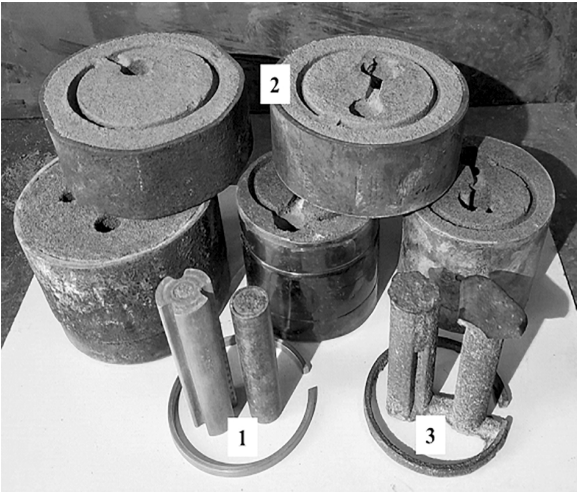


Рис. 3. Фотографія модельного оснащення перед заливкою: 1 — моделі, 2 — заформовані комплексні піщано-глинясті проби для визначення рідкоплинності та механічних властивостей, 3 — виливок

Таблиця 1
Хімічний склад високоентропійних сплавів, які були виплавлені на повітрі

№ сплаву	Система	Масова частка елементів, %									
		[Fe]	[Ni]	[Cr]	[Mn]	[Al]	[Cu]	[C]	[Si]	[P]	[S]
BEC1	FeNiCrCuAl	24,5	23,3	17,4	0,04	10,7	23,1	0,64	0,24	0,007	0,005
BEC2	FeNiCrCuMn	24,5	19,8	18,8	15,7	—	20,0	0,81	0,37	0,012	0,015
BEC3	FeNiCrCuAl	26,5	22,3	18,4	0,13	6,2	25,4	0,74	0,44	0,010	0,007
BEC4	FeNiCrCuMn	20,9	20,7	15,7	18,7	—	23,1	0,51	0,34	0,011	0,016
BEC5		24,9	20,4	17,2	13,3	—	22,9	0,79	0,38	0,012	0,015
BEC6		26,4	20,5	17,0	13,3	—	21,4	0,85	0,45	0,013	0,013

У роботі [3] запропоновано вдосконалену методику з відповідною модернізацією U-подібної проби Нехендзі-Купцова (рис. 2), що дозволяє проводити порівняльні дослідження рідкоплинності сплавів із різними теплофізичними характеристиками. У даній роботі для забезпечення підживлення форми рідким металом аж до повного затвердіння в U-подібному каналі використовували піщано-глинясту ливарну чашу,

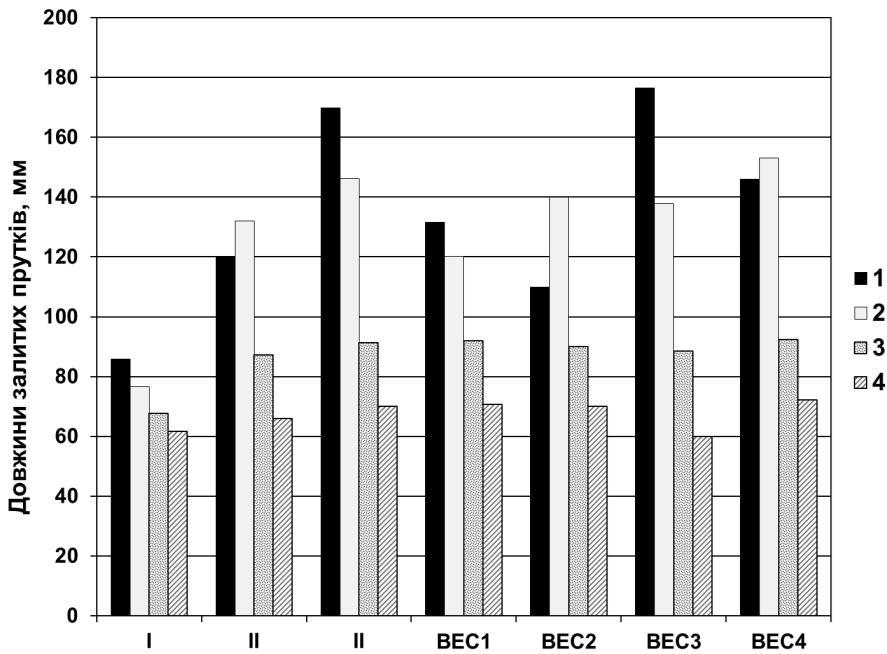


Рис. 4. Довжини залитих прутків із різних сплавів (1 — група 185-190 мм; 2 — група 150-153 мм; 3 — група 90-95 мм; 4 — група 65-70 мм). I — сірий чавун, II — ЧН17Д3Х2, III — ЧХ22Н2. Склади високоентропійних сплавів наведено в табл. 1

яка забезпечувала більш ефективну теплоізоляцію розплаву (рис. 5, а (1)). Розмір ливарної чаші: зовнішні габарити — діаметр 90 мм, висота 90 мм, розміри порожнини — діаметр 50 мм, висота 65 мм. Метал витікав із чаші в чавунну U-подібну пробу через перехідний канал довжиною від 30 до 35 мм, діаметром 13 мм, який забезпечував рівномірність витікання металу з воронки, що є первинною стабілізацією швидкості заповнення чавунної проби, а остаточна стабілізація забезпечувалася центральним стояком самої U-подібної проби.

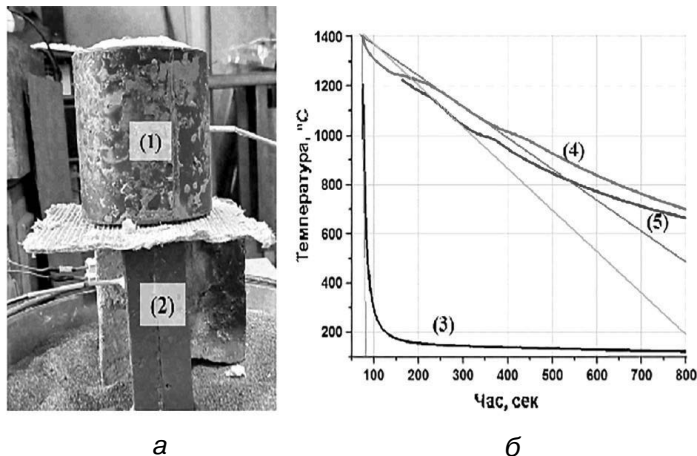


Рис. 5. (а) Фотографія зібраної проби Нехендзі-Купцова для визначення рідкоплинності сплавів та швидкостей охолодження в різних частинах виливка — в ливарній чаші (1) та в U-подібній чавунній пробі (2). (б) Криві охолодження високоентропійного сплаву BEC5 системи FeNiCrCuMn, залитого у форми з різного матеріалу: 3 — чавунна U-подібна проба, 4 — піщано-глиняста ливарна чаша, 5 — піщано-глиняста комплексна проба

Контроль температури металу в чавунній пробі здійснювали за допомогою вольфрам-ренієвої термопари BP5/20 А-1, встановленої в центральному стояку біля місця його сполучення з U-подібним каналом (рис. 2, б). Визначення швидкості охолодження сплавів здійснювали шляхом запису і подальшої обробки кривих охолодження. Швидкості охолодження визначали в різних частинах одного виливка в місцях із різним перетином, а також у формах, виготовлених із різних матеріалів. На рис. 5, б наведено характерні криві охолодження, записані за допомогою пристрою WAD AIK BUS при частоті фіксації показників термопари 8 Гц. Оскільки ми розглядаємо швидкість охолодження як чинник впливу на структуру сплаву, а значить, і на його механічні властивості, то найбільш важливим є визначення швидкості охолодження сплаву в період формування його структури, тобто при його кристалізації, а саме в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом. На рисунку 5, б проведені дотичні прямі до кривих охолодження (3), (4), (5) на ділянках максимального їх нахилу між точками ліквідус та солідус. За нахилом цих прямих визначали швидкості охолодження. У табл. 2 представлено результати визначення швидкостей охолодження на температурних ділянках t_1-t_2 розташованих між температурами ліквідуса та солідуса виливків із високоентропійного сплаву BEC5 системи FeNiCrCuMn та високолегованої нержавіючої сталі 10X18H9Л в чавунній U-подібній пробі і піщано-глинястій ливарній чаші. Найбільшу швидкість охолодження мали виливки круглого перерізу діаметром 10 мм в U-подібній чавунній пробі (від 92 °С/с до 174 °С/с), а з найменшою швидкістю сплави кристалізувалися у піщано-глинястій пробі і чаші (від 1,3 °С/с до 2,5 °С/с).

Таблиця 2
Швидкості охолодження виливків в чавунній U-подібній та піщано-глинястій пробах

Сплав	Форма (діаметр вилив-ка)	Температура заливки, °С	Діапазон температур (t_1-t_2), °С		Швидкість охолодження, °С/с
BEC5	U-подібна чавунна проба	1206	1206	1019	174
	Піщано-глиняста ливарна чаша (Ø 47 мм)	1406	1163	1090	1,3
	Піщано-глиняста проба (Ø 28 мм)	1226	1132	1068	1,7
10X18H9Л	U-подібна чавунна проба	1398	1333	1148	92,3
	Піщано-глиняста ливарна чаша (Ø 47 мм)	1459	1332	1267	2,5

Було проведено контрольну серію експериментів із дослідження рідкоплинності та лінійної усадки високоентропійних сплавів системи FeNiCrCuMn, а для порівняння визначали ливарні властивості сталей 25Л, 10X18H9Л та сірого чавуну. Робочу поверхню чавунної проби фарбували спеціальною вогнетривкою фарбою на основі води (дистенсиліманіт — 70 %, мас. част., перліт — 25%, мас. част., бентоніт 2,5%, мас. част., декстрин — 2,5 %, мас. част.). Обидві половинки проби після збирання фіксувалися напрямними стрижнями та струбчиною. Температура U-подібної форми становила 16 °С. Ливарну чашу і піщано-глинясту форму з кільцевим каналом, яку використовували як пробу на рідкоплинність, сушили при температурі 600 °С від 3 год до 4 год. Рідкоплинність дослідного сплаву визначалась за довжиною залитого каналу у вигляді кільця з перетином 5 на 6 мм і довжиною 280 мм (рис. 3). Модель кільцевого каналу заформовували у нижній частині форми. Після вказаної підготовки заливали рідкий сплав. Одну порцію розплавленого металу, масою

близько 600 г, заливали у ливарну чашу U-подібної чавунної проби, а другу — такої самої ваги — у піщано-глинясту пробу. Температуру розплаву перед розливкою контролювали в печі, потім у чаші та в обох пробах під час заливання металу (табл. 3). Високоентропійні сплави перед заливкою перегрівали від 150 °С до 200 °С над температурою ліквідус. Із рис. 6 (а, б, в), 7 (а, б, в) і табл. 3 видно, що рідкоплинність ВЕС системи FeNiCrCuMn нижча, ніж у стандартних сталей 25Л, 10Х18Н9Л. Відомо, що на рідкоплинність сплавів відчутно впливає хімічний склад та інші технологічні властивості [8]. Для того щоб остаточно зробити висновок про рідкоплинність ВЕС сплавів, необхідно провести додаткові експерименти: стабілізувати напір металу в ливарній чаші (Н, рис. 6) та її геометричні розміри й конфігуцію, температуру перегріву розплаву над температурою ліквідус і проводити контроль температури в заливальній воронці. Також треба брати до уваги той факт, що при використанні масивної металевої U-подібної проби вплив фактора теплофізичних властивостей досліджуваного сплаву на результат має бути дуже суттєвим. Вплив чинника теплофізичних властивостей проявляється тим більше, чим більша інтенсивність теплопередачі від металу до форми. У цьому випадку теплофізичні параметри сплаву можуть стати вирішальним фактором впливу на рідкоплинність, на тлі якого роль інших властивостей розплаву може нівелюватися. Щодо схильності до формування гарячих тріщин у дослідних високоентропійних сплавах систем FeNiCrCuMn, FeNiCrCuAl, то їх не виявлено.

Таблиця 3
Температурні параметри заливки, рідкоплинність та лінійна усадка високоентропійних сплавів системи FeNiCrCuMn і сталей

Сплав	$t_{п\dot{ч}}, ^\circ\text{C}$	$t_{лив.чаша}, ^\circ\text{C}$	$t_{U-проба}, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{мм}$	$\varepsilon_{л}, \%$
ВЕС5	1430	1370	1116,5	82	2,53
	1450-1500	1406	1206	147 (105)*	2,63
ВЕС6	1460-1480	1407	1178,6	142 (65)*	2,22
25Л	1550	1503,5	1505	230	2,02±0,20
	1570	1514	1446	277 (114)*	1,95±0,15
	1600	1545	1449	396	2,91±0,11
10Х18Н9Л	1520	1467	1101	381	2,73±0,092
	1550	1459	1398	262	2,66±0,058
	1580	1464	1112	284 (179)*	2,79±0,16

*Рідкоплинність, яка була визначена за допомогою U-подібної пруткової проби. У дужках — довжина залитого кільцевого каналу піщано-глинястої проби. $t_{п\dot{ч}}$ — температура металу в тиглі індукційної печі перед заливкою, $t_{лив.чаша}$ — температура металу в ливарній чаші над U-подібною пробою, $t_{U-проба}$ — температура металу на вході в U-подібний канал

Лінійна усадка визначалась як різниця між лінійними розмірами порожнини ливарної форми ($L_{п.ф.}$), заповненої рідким металом, і розмірами виливка ($L_{вил.}$) після охолодження ($(t_{п.ф.} - L_{вил.} / L_{вил.} \cdot 100\%)$). Лінійна усадка виливків із високоентропійних сплавів системи FeNiCrCuMn має значення, близькі до лінійної усадки високолегованих сталей і складає від 2,22 % до 2,63 % (табл. 2).

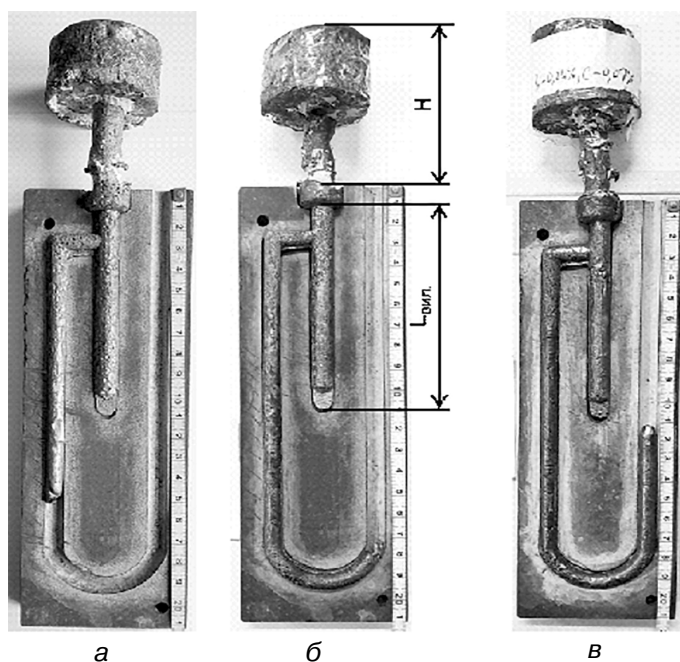


Рис. 6. Залиті U-подібні канали в пробі Нехендзі-Купцова з надливом для визначення рідкоплинності різних сплавів (а — виливок із високоентропійного сплаву системи FeNiCrCuMn ($\lambda = 142$ мм); б — виливок із сталі 25Л ($\lambda = 230$ мм); в — виливок із нержавіючої сталі 10Х18Н9Л ($\lambda = 262$ мм)). Склад високоентропійного сплаву ВЕС6 наведено в табл. 1

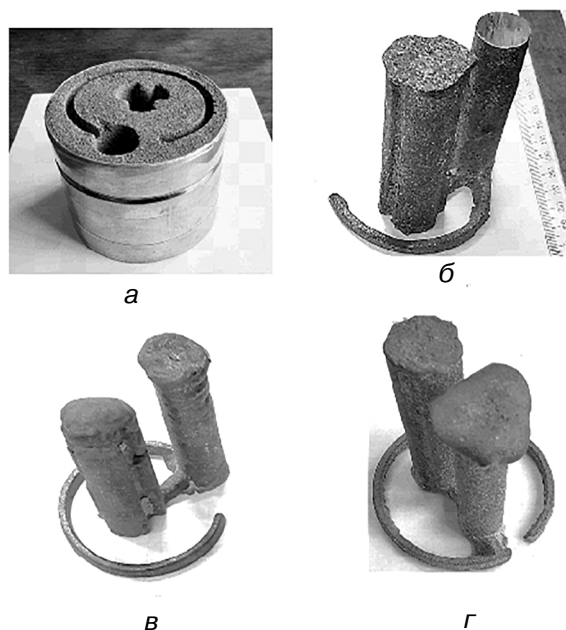


Рис. 7. Заформована комплексна піщано-глиняста проба та виливки із різних сплавів для визначення рідкоплинності та механічних властивостей (а — комплексна проба; б — виливок із високоентропійного сплаву системи FeNiCrCuMn ($\lambda = 105$ мм); в — виливок із нержавіючої сталі 10Х18Н9Л ($\lambda = 179$ мм); г — виливок із сірого чавуну ($\lambda = 265$ мм)). Склад високоентропійного сплаву ВЕС5 наведено в табл. 1

Висновки

Встановлено, що рідкоплинність високоентропійних сплавів системи FeNiCrCuMn нижча, ніж у стандартних сталей (25Л, 10Х18Н9Л) й сірого чавуну. Схильності до формування гарячих тріщин у високоентропійних сплавах, що досліджувалися, не виявлено. Лінійна усадка виливків із високоентропійних сплавів системи FeNiCrCuMn наближається до лінійної усадки високолегованих сталей і перебуває в діапазоні від 2 % до 3 %. Розробка методики визначення та контролю швидкості охолодження дозволить в майбутньому впливати на структуру сплаву, а значить, і на його фізико-механічні властивості.

Список літератури

- 1 Нехендзи Ю.А., Купцов И.В. Комплексная проба для определения литейных свойств сплавов. Ленинград: Знание, ЛДНТП, 1967, 42 с.
- 2 Нехендзи Ю.А., Самарин А.М. Жидкотекучесть металлов и новая проба для стали. Труды ЦНИИ Мин-ва транспортного машиностроения. 1946. № 5. С. 62–67.
- 3 Лахненко В.Л., Щерецкий А.А., Апухтин В.В., Гаврилюк К.В. Методологические аспекты определения жидкотекучести сплавов с существенно отличающимися теплофизическими характеристиками. *Процессы литья*. 2005. № 3. С. 28–34.
- 4 Zhang, Y., High-Entropy Materials: A Brief Introduction, Singapore: Springer-Verlag, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
- 5 Zhang, Y., High-Entropy Materials: A Brief Introduction, Singapore: Springer-Verlag, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
- 6 Zhang, Y., High-Entropy Materials: A Brief Introduction, Singapore: Springer-Verlag, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
- 7 Myslyvchenko O., Lytvyn R., Grinkevich K., Zgalat-Lozynskyy O., Bondar A., Shyrokov O., Ivanchenko S., Bloschanevich O. and Stegnyy A. Laser treatment of electrospark-deposited $Ti_{0.8}W_{0.25}Cr_{0.5}FeCo_{1.75}Ni_3AlB_{0.6}$ high-entropy coatings. JOM. 2024. Published 17 April, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06552-z>
- 8 Беспалый А.А. Литейные свойства химически активных сплавов на основе циркония и алюминия, склонных к объемной аморфизации. *Процессы литья*. 2012. № 5(95). С. 73–76.

Надійшла 24.10.2024

References

- 1 Nekhendzi Yu.A., Kuptsov I.V. Complex test specimen for determining the casting properties of alloys. Leningrad: "Znanye", LDNTP, 1967, 42 p. [in Russian].
- 2 Nekhendzi Yu.A., Samaryn A.M., Castability of metals and a new test for steel. Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Transport Engineering. 1946. № 5. P. 62–67 [in Russian].
- 3 Lakhnenko V.L., Shcheretskiy O.A., Apukhtyn V.V., Havryliuk K.V. Methodological aspects of determining the fluidity of alloys with significantly different thermophysical characteristics. *Casting processes*. 2005. № 3. P. 28–34 [in Russian].
- 4 Zhang, Y., High-Entropy Materials: A Brief Introduction, Singapore: Springer-Verlag, 2019 [in English]. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
- 5 Shcheretskiy O. A. The high entropy alloys, features of structure formation and crystallization process. Metal Science and Treatment of Metals (Metaloznavstvo ta obrobka metaliv). 2013. № 1. P. 15–20 [in Ukrainian].
- 6 Shcheretskiy O.A., Sergiienko R.A., Verkovliuk A.M. Development and Smelting of Casting High-Entropy Alloys Based on the FeCoNiMnCr System. *Casting processes*. 2022. № 2 (148). P. 50–59 [in Ukrainian].

- 7 Myslyvchenko O., Lytvyn R., Grinkevich K., Zgalat-Lozynskyy O., Bondar A., Shyrokov O., Ivanchenko S., Bloschanevich O., Stegnyy A. Laser treatment of electrospark-deposited $\text{Ti}_{0.8}\text{W}_{0.25}\text{Cr}_{0.5}\text{FeCo}_{1.75}\text{Ni}_3\text{AlB}_{0.6}$ high-entropy coatings. JOM. 2024. Published 17 April, 2024. [in English]. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06552-z>
- 8 Bespalyi A. A. Foundry properties of chemically active liquid alloys based on Zirconium and Aluminum which bulk amorphization-prone. *Casting processes*. 2012. No. 5 (95). P. 73–76 [in Russian].

Received 24.10.2024

A.M. Verkhovliuk, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair;

e-mail: anatoliiverkhovliuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2670-4052>

R.A. Sergiienko, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: rsruslan17@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0003-3613-9330>

O.A. Shcheretskyi, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist;

e-mail: 07shch@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-9030-876X>

R.S. Serhiiko, PhD student; e-mail: romanse@me.com;

<https://orcid.org/0009-0003-8327-7637>

O.G. Potrukh, senior technologist

D.S. Kanibolotsky, PhD (Engin.), Senior Research Scientist;

e-mail: marnestorius@ukr.net; <https://orcid.org/0009-0001-2489-9167>

I.G. Byba*, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: byba.evgen@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

O.V. Zhelezniak, Senior Technologist; e-mail: alekszel43@gmail.com;

V.V. Zhelezniak, senior technologist

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

CASTING PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS OF THE FeNiCrCuAl and FeNiCrCuMn SYSTEMS

The article presents research on the casting properties of high-entropy alloys (HEAs) of the FeNiCrCuAl and FeNiCrCuMn systems. The HEAs were prepared by induction melting in air. The HEAs were smelted from different charge materials. At the beginning high-alloyed cast iron (content, wt. %: C = 2.60, Si = 1.80, Mn = 1.30, Ni = 17.00, Cr = 2.30, Cu = 3.60, S = 0.05, P = 0.07) and low-carbon ferrochrome of grade FeCr70C1 were loaded into the alumina crucible and then primary nickel with purity of 99.93 wt. %, copper wire of grade of Cu-ETP (purity 99.90 wt. %), technical grade aluminum ENAW-1085, Cu-Mn alloy (content, wt. %: Cu = 61.50, Mn = 37.70, and the balance Fe, Si,) and low-carbon ferromanganese (content, wt. %: Mn = 96.50, and the balance C, Si, S, P) were introduced into the melt. Experiments were carried out to study the castability and linear shrinkage of high-entropy alloys. For comparison, the casting properties of steels grades of C25E, GX10CrNiMn-18-9-1 and grey cast iron were determined. Various casting samples were used to study castability: an evaporative casting rod model, a cast iron U-shaped test sample of Nehendzi-Kuptsov with a vertical channel, and a sand-clay mold with an annular channel. The temperature of the melt was monitored in the furnace, in the pouring basins, and directly in the castings. The cooling rates were determined in the temperature ranges between the liquidus and solidus on the cooling curves of the castings. It was established that the castability of the HEA of the FeNiCrCuMn system is lower than that of standard steels C25E, GX10CrNiMn-18-9-1 and significantly lower than that of gray cast iron. It was determined that the linear shrinkage of high-entropy alloys of the FeNiCrCuMn system is in the range from 2.22% to 2.63% and is close to the linear shrinkage of high-alloyed steels. Propensity to the formation of hot cracks was not found in the studied high-entropy alloys.

Keywords: high-entropy alloys, castability, linear shrinkage, cooling rate, induction heating.