

Вплив швидкості охолодження при кристалізації на структуру сплавів В95 та Д16

Нурадінов А. С., доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, nla_73@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

Школяренко В. П., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, hvp@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5393-1077>

Чистяков О. В., аспірант, chistyakov1971@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-3562>

Нурадінов І. А., аспірант, inuradinov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

Зубеніна Н. Ф., головний технолог

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Сплави систем $Al - Zn - Mg - Cu$ та $Al - Mg - Cu$ мають широкий інтервал кристалізації (понад $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) і тому технології валкового розливання-прокатки листових заготовок з таких сплавів досі не розроблено. У зв'язку з цим розробка наукових та технологічних основ валкового розливання для такого спектру алюмінієвих сплавів є важливим науково-практичним завданням. Метою даної роботи є визначення можливості алюмінієвих сплавів В95 і Д16 (інтервали кристалізації становлять $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $132\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно) до лиття-прокатки на основі аналізу впливу інтенсивності охолодження на їх структуру та механічні властивості. Дослідження проведено на зразках сплавів В95 і Д16. Визначення температурних параметрів фазових перетворень у досліджуваних сплавах проводили з використанням приладу Derivatograph Q-1500-D. У результаті випробувань отримано криві диференціально-термічного аналізу та частки рідкої фази залежно від температури. За результатами проведених досліджень обґрунтовано придатність алюмінієвих сплавів В95 і Д16 до лиття-прокатки. Виявлено, що розмір зерен α -фази для сплавів В95 та Д16 у міру зростання швидкості охолодження зменшується до $120\ldots 200\text{ мкм}$ (для швидкостей охолодження $2,5\ldots 8,8\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), і до $40\ldots 70\text{ мкм}$ (для швидкості охолодження $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$). Встановлено, що твердість алюмінієвих сплавів В95 та Д16 головним чином залежить від дисперсності α -фази тому, при розробці режимів валкового розливання доцільно враховувати особливості твердіння саме цієї структурної складової (α -фази). Слід зазначити, що при інтенсивностях тепловідведення, які характерні для валкових кристалізаторів, одержувані листові заготовки з досліджуваних сплавів матимуть дисперсні кристалічні структури з рівномірним розподілом фазових складових за їх перерізами. Природним наслідком таких первинних кристалічних структур литих заготовок буде гарантовано високий рівень характеристик міцності листового металопрокату з них.

Ключові слова: швидкість охолодження, сплав, кристалізація, структура, фазовий склад, металопрокат.

Відомо, що у літако- і ракетобудуванні широко застосовується листовий металопрокат з алюмінієвих сплавів, як основний матеріал для обшивки корпусів. В умовах війни і жорсткої конкуренції особливу актуальність набуває оптимальне співвідношення показників якості – собівартості. За традиційної технології отримання листового металопрокату, коли лита заготівка в подальшому прокатується на відповідному устаткуванні, резерви для підвищення ефективності такого виробництва практично вичерпані [1]. Потенційними можливостями підвищення ефективності виробництва листового металопрокату має схема валкового безперервного розливання листових заготовок безпосередньо з рідкого металу. При валковому розливанні має місце дуже висока швидкість охолодження металу, що твердне, яка знаходиться в межах $1000-1700\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ [2, 3]. На сьогодні методом валкового розливання отримують листові заготовки з алюмінієвих сплавів середньої міцності системи $\text{Al} - \text{Mg} - \text{Si}$, але в даному контексті найбільший інтерес становлять алюмінієві сплави систем $\text{Al} - \text{Zn} - \text{Mg} - \text{Cu}$ та $\text{Al} - \text{Mg} - \text{Cu}$, що зміцнюються термічною обробкою [4]. Але сплави цих систем мають дуже широкий інтервал кристалізації (понад $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) і тому технології валкового розливання-прокатки листових заготовок з таких сплавів досі не розроблено. У зв'язку з цим, розробка наукових та технологічних основ валкового розливання для такого спектру алюмінієвих сплавів є важливим практичним завданням.

Аналіз останніх публікацій за даною тематикою показав, що робіт з вивчення впливу швидкості охолодження на структуроутворення високоміцних алюмінієвих сплавів з широким інтервалом кристалізації небагато. В роботі [5] проведено дослідження щодо встановлення впливу інтенсивності охолодження розплаву на формування макроструктури високоміцного алюмінієвого сплаву ВАЛ10 (АМ4,5Кд). Але з точки зору встановлення спадкового взаємозв'язку первинної структури та якості кінцевої металопродукції є залежність мікроструктури таких сплавів від швидкості охолодження. Тому у цій роботі на основі алюмінієвих сплавів В95 і Д16 з широким інтервалом кристалізації (інтервали кристалізації становлять $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $132\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно) досліджено вплив інтенсивності охолодження на їх структуру. Для цього спочатку було експериментально перевірено відповідності теплофізичних характеристик сплавів В95 і Д16 реальних і стандартних значень температур «солідуса» ($t_{\text{сол.}}$) та «ліквідусу» ($t_{\text{лік.}}$). Визначення температурних параметрів фазових перетворень у досліджуваних сплавах проводили на приладі Derivatograph Q-1500-D. Результати випробувань отримували у вигляді кривих диференціально-термічного аналізу (ДТА) та частки рідкої фази (ЧРФ) залежно від температури, що виводились на монітор ноутбука (рис. 1). Криві ДТА знімали для зразків масою 140 мг при однаковій середній швидкості їх нагрівання та охолодження $268\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ у діапазоні температур $27-727\text{ }^{\circ}\text{C}$ на повітрі. Як зразок використаний прожарений оксид алюмінію ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Середні значення параметрів плавлення та кристалізації визначали графічно, довірчі інтервали значень температури становили $\pm 272\text{ }^{\circ}\text{C}$.

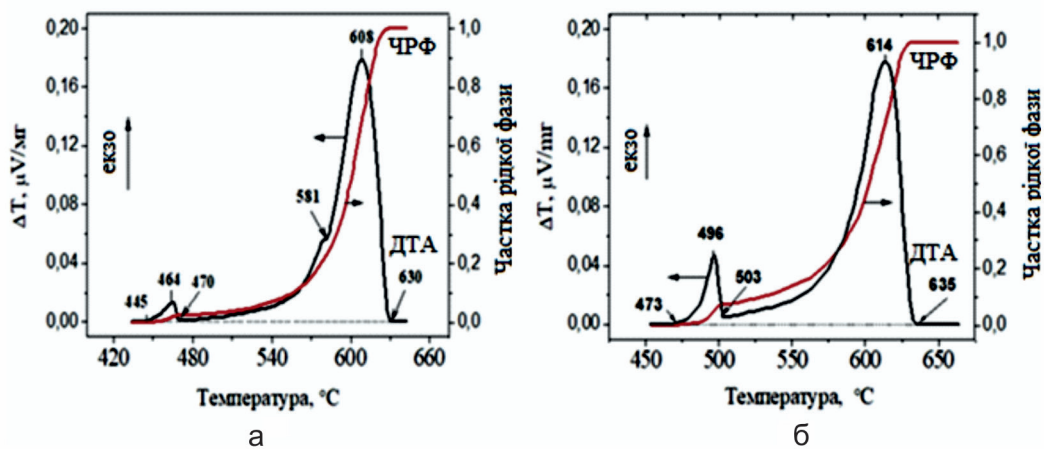


Рис. 1. Криві ДТА та ЧРФ для сплавів B95 (а) та D16 (б).

Fig. 1. DTA and ChRF curves for alloys B95 (a) and D16 (б).

У результаті аналізу цих кривих визначено реальні значення температур «солідуса» ($t_{сол.}$) та «ліквідусу» ($t_{лік.}$) досліджуваних алюмінієвих сплавів (табл. 1). Визначені таким чином значення температур фазових перетворень досліджуваних сплавів (у знаменнику) показали хорошу кореляцію зі стандартними значеннями (у чисельнику).

Таблиця 1
Температури ліквідусу та солідусу досліджуваних алюмінієвих сплавів

Table 1
Temperatures of liquidus and solidus of studied aluminum alloys

Марка сплавів	Температура, °C		
	Ліквідус	Солідус	Інтервал кристалізації
B95	635/630	477/470	158/160
D16	638/635	502/503	136/132

З метою встановлення впливу швидкості охолодження на формування структури алюмінієвих сплавів, кристалізацію проводили при різній інтенсивності тепловідведення від литих заготовок. Різну швидкість охолодження отримували заливкою сплавів у ливарні форми, у яких коефіцієнти теплопровідності на порядки відрізняються один від одного. Форми виготовлено з різних матеріалів: фторфлогопіт, кварцове скло, графіт та мідна водоохолоджувана форма. В інтервалі температур проведення експериментів (660 ± 20 °C) коефіцієнти теплопровідності матеріалів форм (λ) мали такі значення: кварц – 8 кВт/м · К; фторфлогопіт – 0,8 кВт/м · К; графіт – 80 кВт/м · К та мідь – 377 кВт/м · К.

Враховуючи невеликий розмір зразків ($\varnothing$ 5 мм, h = 30 мм), заливання усіх форм металом здійснювали з однієї плавки при температурі 650 ± 2 °C. При твердненні зразків сигнали від хромель-алюмелевих термопар за допомогою цифрового перетворювача виводилися на монітор комп'ютера у

Плавлення і кристалізація

вигляді кривих охолодження (криві зміни температури у часі). Швидкості охолодження розплаву ($V_{\text{ох.}}$) в інтервалі між температурою його перегріву і температурою «ліквідус», для конкретного сплаву, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Середні швидкості охолодження досліджуваних зразків алюмінієвих сплавів

Table 2

Mean cooling rates of the investigated samples of aluminum alloys

Марка сплаву	Матеріал форми			
	Мідь (водоохолоджувана)	Графіт	Фторфлогопіт	Кварц
	$V_{\text{ох.}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{\text{ох.}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{\text{ох.}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$	$V_{\text{ох.}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$
B95	1000	154	8,8	5,9
Д16	1000	133	6,4	2,5

З наведених у табл. 2 даних видно, що у формах з кварцу, фторфлогопіту і графіту вдалося охопити відносно невеликий діапазон швидкостей охолодження розплавів ($2,5\div 154\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$). Швидкість охолодження у мідній водоохолоджуваній формі визначити не вдалося, тому що внаслідок невеликих розмірів зразків вони твердіють миттєво. Швидкість охолодження металу, що твердне при валковому розливі, згідно літературних даних, знаходиться в межах $1000\div 1700\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$ і залежить від теплофізичних характеристик металу [6]. Враховуючи відносно низьку температуру плавлення алюмінієвих сплавів взагалі, у даних експериментах швидкість охолодження досліджуваних зразків у мідній водоохолоджуваній формі приймали рівною $1000\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$.

Металографічні дослідження показали що, незалежно від типу сплаву, основу структур становлять первинні кристали α -фази різної дисперсності [7]. Розмір зерна та твердість α -фази сплавів B95 та Д16 в литому вигляді наведено в табл. 3, а мікроструктури цих сплавів – на рис. 2.

Таблиця 3

Розмір зерна та твердість α -фази дослідних сплавів в литому вигляді

Table 3

Grain size and hardness of the α -phase of experimental alloys in cast form

Марка сплаву	Середня швидкість охолодження, $V_{\text{ох.}}, ^\circ\text{C}/\text{c}$	Розмір зерна α -фази Z, мкм	Твердість, НВ
B95	5,9	60-120	80,4
	8,8	15-80	83,0
	154	20-60	95,2
	1000	15-70	102,5
Д16	2,5	50-200	68,8
	6,4	25-120	70,6
	133	15-110	80,4
	1000	12-50	88,1

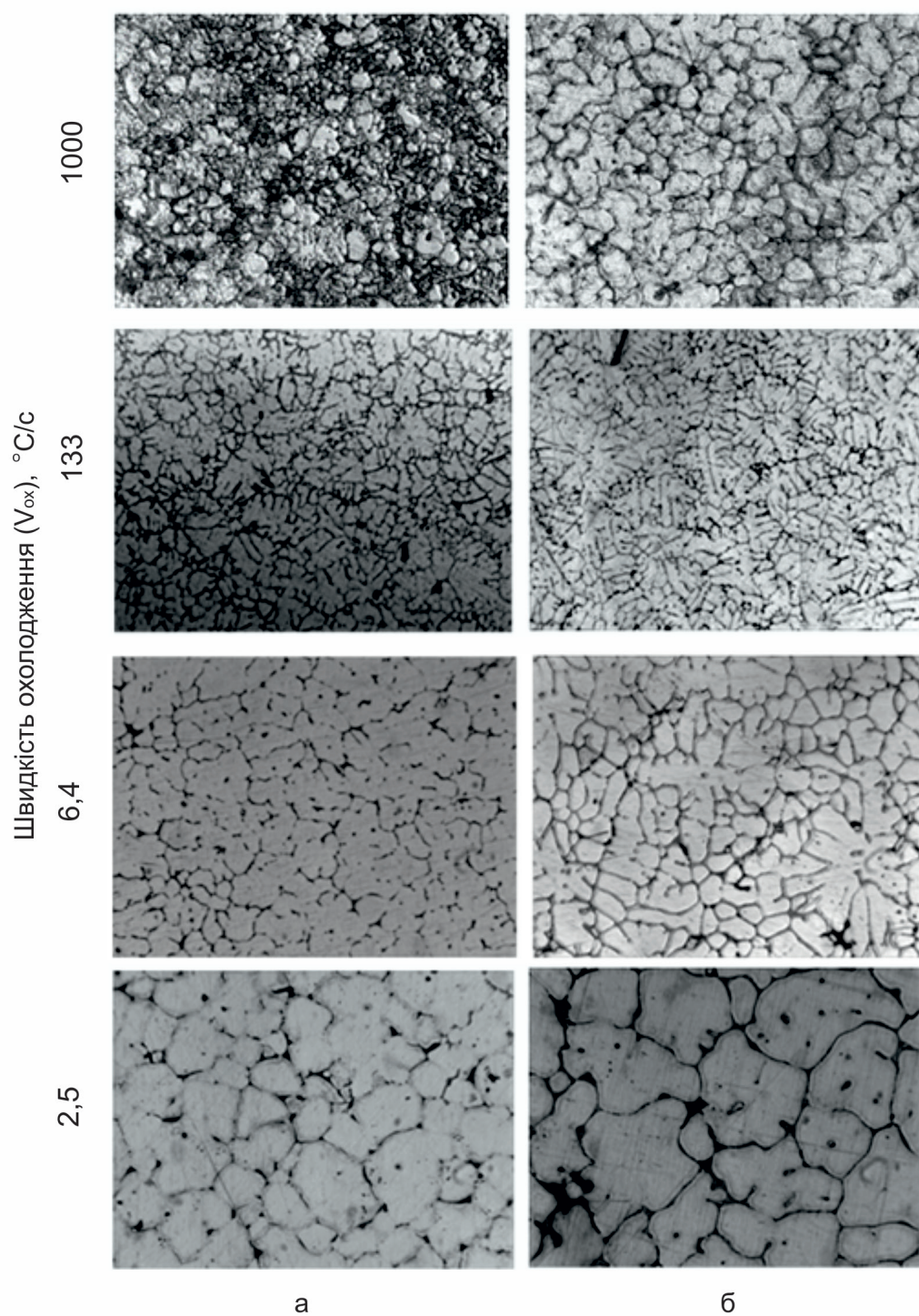


Рис. 2. Мікроструктури зразків з досліджуваних сплавів В95 (а) та Д16 (б), $\times 200$.

Fig. 2. Microstructures of samples from the studied alloys B95 (a) and D16 (б), $\times 200$.

Таким чином встановлено, що розмір зерен α -фази для даних сплавів із зростанням швидкості охолодження зменшується з 120-200 мкм (для швидкостей охолодження 2,5-8,8 °C/с) до 40-70 мкм (для швидкості охолодження ~1000 °C/с).

З рис. 2 видно, що з підвищенням швидкості охолодження зразки набувають однорідної структури з рівномірним розподілом фазових складових за їх перерізами. Як відомо, між дисперсністю первинної структури литих заготовок та якістю кінцевої металопродукції існує спадковий взаємозв'язок [8, 9]. Слід зазначити, що, крім первинних кристалів α -фази, у структурах зразків присутні дисперсні інтерметалідні та евтектичні фази, які розташовані між гілками первинних кристалів.

Висновки

1. Встановлено, що розмір зерен α -фази для сплавів В95 та Д16 у міру зростання швидкості охолодження зменшується до 120...200 мкм (для швидкостей охолодження 2,5...8,8 °C/с), і до 40...70 мкм (для швидкості охолодження ~1000 °C/с).

2. Показано, що твердість алюмінієвих сплавів В95 та Д16 головним чином залежить від дисперсності α -фази тому, при розробці режимів валкового розливання доцільно враховувати особливості формування саме цієї структурної складової (α -фази). Слід зазначити, що при інтенсивності тепловідведення, характерної для валкових кристалізаторів, одержувані листові заготовки з досліджуваних сплавів матимуть відповідно більш дисперсну структуру з рівномірним розподілом фазових складових і гарантовано високий рівень характеристик міцності листового металопрокату з них.

3. Обґрунтовано придатність алюмінієвих сплавів В95 і Д16 до валкового лиття-прокатки.

Література

1. Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки. – Днепропетровск: РВА Днипро-VAL, 2010. – 500 с.
2. Бровман М.Я., Николаев В.А., Полухин В.П. Протяженность зоны пластической деформации и допустимая скорость при бесслитковой прокатке стальных полос // Металлы. – 2007. – № 1. – С. 44-49. <https://doi.org/10.1134/S0036029507010089>
3. Гридин А.Ю., Шапер М., Данченко В.Н. Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой // Обработка металлов давлением. – 2011. – № 3 (28). – С. 184-194.
4. Шур И.А. Перспективы развития бесслитковой прокатки алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. – 2001. – № 5-6. – С. 38-41.
5. Пригунова А.Г., Жидков Є.А., Борисов А.Г., Шеневідько Л.К. Вплив швидкості охолодження на структуроутворення сплаву АМ4,5Кд (ВАЛ10) // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2022. – № 1. – С. 29-37. <https://doi.org/10.15407/mom2022.01.029>

6. Нурадинов А.С., Ноговіцин О.В., Школяренко В.П., Нурадінов І.А. Формування структури листових заготовок при валковій розливці металів // Процеси лиття. – 2022. – № 4 (150). – С. 13-21. <https://doi.org/10.15407/plit2022.04.013>
7. Nuradinov A.S., Eldarkhanov A.S., Kondratyev Yu.I., Nuradinov I.A. Development of Production Regimes for Twin-Roll Casting of Metal Alloys // Steel in Translation. – 2021. – №10. – P. 723-727. <https://doi.org/10.3103/S0967091221100119>
8. Никитин В.И. Наследственность в литых сплавах. – Самара: СамГТУ, 1995. – 248с.
9. Кондратюк С.Є. Структуроутворення, спадковість і властивості литої сталі. – Київ: Наукова Думка, 2010. – 176 с.

References

1. Mazur V.L., Nogovitsyn A.V. Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoy prokatki (Theory and technology of thin sheet rolling), Dnipropetrovsk: RVA Dni pro-VAL, 2010, 500 p. [in Russian].
2. Brovman M.Ya., Nikolaev V.A., Polukhin V.P., Metally, 2007, No.1, pp. 44-49. [in Russian]. <https://doi.org/10.1134/S0036029507010089>
3. Hrydyn A.Yu., Shaper M., Danchenko V.N. Obrabotka metallov davleniyem, 2011, No. 3 (28), pp. 184-194. [in Russian].
4. Shur I.A. Tekhnologiya legkikh splavov, 2001, No. 5-6, pp. 38-41. [in Russian].
5. Prygunova A.G., Zhidkov E.A., Borisov A.G., Metalozn. obrobka met., 2022, vol. 28 (101), pp. 29-37. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2022.01.029>
6. Nuradinov A.S., Nogovitsyn O.V., Shkolyarenko V.P., Nuradinov I.A., Protsey lyttya, 2022, No. 4 (150), pp. 13-21. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/plit2022.04.013>
7. Nuradinov A.S., Eldarkhanov A.S., Kondratyev Yu.I., Nuradinov I.A. Steel, 2021, No.10, pp. 723-727. [in Russian]. <https://doi.org/10.3103/S0967091221100119>
8. Nikitin V.I. Nasledstvennost' v litykh splavakh (Heritability in cast alloys), Samara: SamSTU, 1995, 248 p. [in Russian].
9. Kondratiuk S.Ye. Strukturoutvorenniya, spadkovist' i vlastyvosti lytoyi stali (Structure formation, heredity and properties of cast steel), Kyiv: Naukova Dumka, 2010, 176 p. [in Ukrainian].

Одержано 10.05.23

A. S. Nuradinov, V. P. Shkolyarenko, O. V. Chistyakov, I. A. Nuradinov,
N. F. Zubenina

Effect of cooling rate during crystallization on the structure of B95 and D16 alloys

Summary

It is known that the alloys of the Al-Zn-Mg-Cu and Al-Mg-Cu systems have a very wide crystallization interval (over 100 °C) and therefore the technology of roll pouring-rolling of sheet blanks from such alloys has not yet been developed. In this regard, the development of scientific and technological foundations of roll casting for

such a range of aluminum alloys is an important scientific and practical task. The purpose of this work is to determine the possibility of aluminum alloys B95 and D16 (crystallization intervals are 160 °C and 132 °C, respectively) for casting-rolling based on the analysis of the effect of cooling intensity on their structure and mechanical properties. The research was carried out on full-scale samples of B95 and D16 alloys by comparing the obtained experimental values. Determination of the temperature parameters of phase transformations in the studied alloys was carried out using the Derivatograph Q-1500-D device. As a result of the tests, the curves of the differential thermal analysis and the fraction of the liquid phase depending on the temperature were obtained. Based on the results of the research, the suitability of B95 and D16 aluminum alloys for casting and rolling has been substantiated. It was found that the size of α -phase grains for B95 and D16 alloys as the cooling rate increases decreases to 120...200 μm (for cooling rates of 2.5...8.8 °C/s), and to 40...70 μm (for cooling rates cooling ~1000 °C/s). It has been proven that the hardness of B95 and D16 aluminum alloys mainly depends on the α -phase, therefore, when developing roll casting modes, it is advisable to take into account the hardening features of this structural component (α -phase). At the same time, it should be noted that at the intensity of heat removal, which is typical for roll crystallizers, the obtained sheet blanks from the studied alloys will have dispersed crystal structures with a uniform distribution of phase components along their cross sections. A natural consequence of such primary crystalline structures of cast blanks will be a guaranteed high level of strength characteristics of sheet metal rolled from them.

Keywords: cooling rate, alloy, crystallization, structure, phase composition, metal rolling.

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Вартість одного номера журналу - 150 грн.

Перед оплатою необхідно узгодити потрібну кількість номерів з редакцією.

Оплата здійснюється на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Доступні архівні номери журналу з 1995 р. по 2022 р. включно.

**Розрахунковий рахунок для замовників,
спонсорів і рекламодавців:**
р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа оплати та відомості про отримувача
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.