

Вплив параметрів кристалізації і гарячої деформації на характеристики структури сталей при валковому прокатуванні

С. Е. Кондратюк, доктор технічних наук

О. В. Ноговіцин, доктор технічних наук

О. М. Стоянова, кандидат фізико-математичних наук

І. Р. Баранов, Ж. В. Пархомчук

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

На прикладі сталей 20ХН2, Э21 і 20Х22Н13 встановлено закономірності формування їх структури при суміщенні процесів регламентованого швидкісного тепловідбору при кристалізації та наступній гарячій деформації при валковому прокатуванні сталеві стрічки, що відкриває додаткові можливості підвищення якості і властивостей виробів.

Структура металу сталеві стрічки, поряд із станом поверхні і геометрією, є визначальним фактором якості готового виробу при використанні технології двовалкового лиття-прокатування. Основною технологічною особливістю цього процесу є суміщення процесів кристалізації і прокатування [1, 2]. При цьому розплав надходячи у міжвалковий зазор втрачає тепло на границі метал-валок і кристалізується у напрямку, перпендикулярному прокатуванню – від поверхні до центра литої заготовки (рис. 1). В наступній зоні вторинного охолодження відбувається гаряча деформація сталеві стрічки, що супроводжується збільшенням тепловідбору і зменшенням товщини стрічки до заданої. Швидкість кристалізації при цьому у кілька разів перевищує швидкість кристалізації порівняно з традиційною технологією виробництва слябів. Залежно від швидкості просування стрічки через валки і її товщини (1,5 – 5,0 мм) швидкість охолодження металу може змінюватись від 500 до 2000 °С/с. За такої високої динаміки технологічного процесу прогнозоване підвищення властивостей може бути забезпечено оптимальним поєднанням двох визначальних параметрів – температурно-часовими умовами кристалізації і технологічними характеристиками гарячої деформації. На кожному з етапів такого технологічного процесу відкриваються можливості ефективного керування кристалізацією, структуроутворенням і наступною трансформацією литої структури на стадії деформаційно-теплової обробки сталеві стрічки.

Виходячи з цього досліджено вплив умов кристалізації на формування литої структури сталей на першому етапі виробництва заготовки та зв'язок особливостей її будови з кінцевою структурою після гарячої деформації

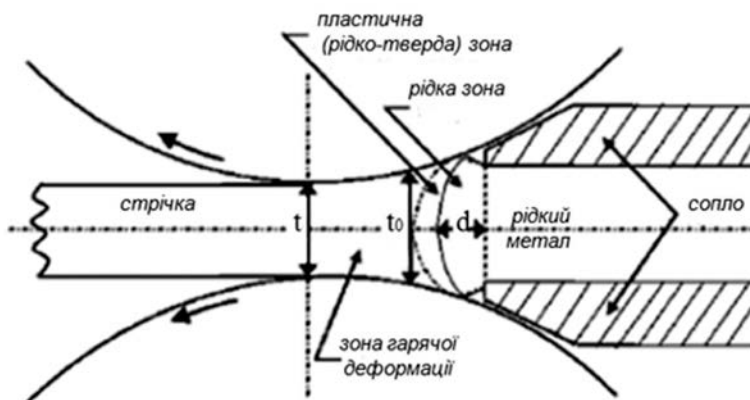


Рис. 1. Схема валкового лиття сталеві стрічки.

прокатуванням. Дослідження проведено на сталях – низьковуглецевій 20ХН2, електротехнічній Э21, неіржавіючій 20Х22Н13 (табл. 1).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Сталь	Вміст елементів, % по масі				
	С	Si	Mn	Cr	Ni
20ХН2	0,23	0,47	0,61	1,26	1,66
Э21	0,09	2,22	0,24	0,22	0,34
20Х22Н13	0,11	0,45	1,20	22,20	13,50

Параметрами можливого керування процесами кристалізації і структуроутворення на першому етапі виробництва сталеві стрічки є градієнт температур твердої і рідкої фаз, протяжність двофазної зони, кінетика виділення твердої фази [3 – 5].

Найбільший вплив на формування литої структури мають фактори, які визначають інтенсивність тепловідбору від розплаву, що кристалізується [6, 7].

У зв'язку з цим досліджено вплив швидкості охолодження (V_{ox}) розплаву сталей на формування литої структури на першому етапі виробництва стрічки. Забезпечення різних швидкостей охолодження досягали використанням ливарних форм з різною тепловідбірною здатністю – піщаної ($V_{ox} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$), мідної водоохолоджуваної ($V_{ox} = 350 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$), та при вакуумному всмоктуванні розплаву у кварцові трубки діаметром 6 мм ($V_{ox} = 650 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{c}$).

Металографічно показано, що підвищення інтенсивності тепловідбору при кристалізації досліджуваних сталей у вказаному інтервалі змін швидкості охолодження супроводжується закономірним подрібненням литої структури та зміною її морфології (рис. 2).

Розмір зерна при цьому (табл. 2) відповідно підвищенню значень V_{ox} зменшується згідно ГОСТ 5639-82 від номера 2 до 3 (сталь 20ХН2), від номера – 3 до 1 (сталь Э21), від номера – 1 до 2 (сталь 20Х22Н13).

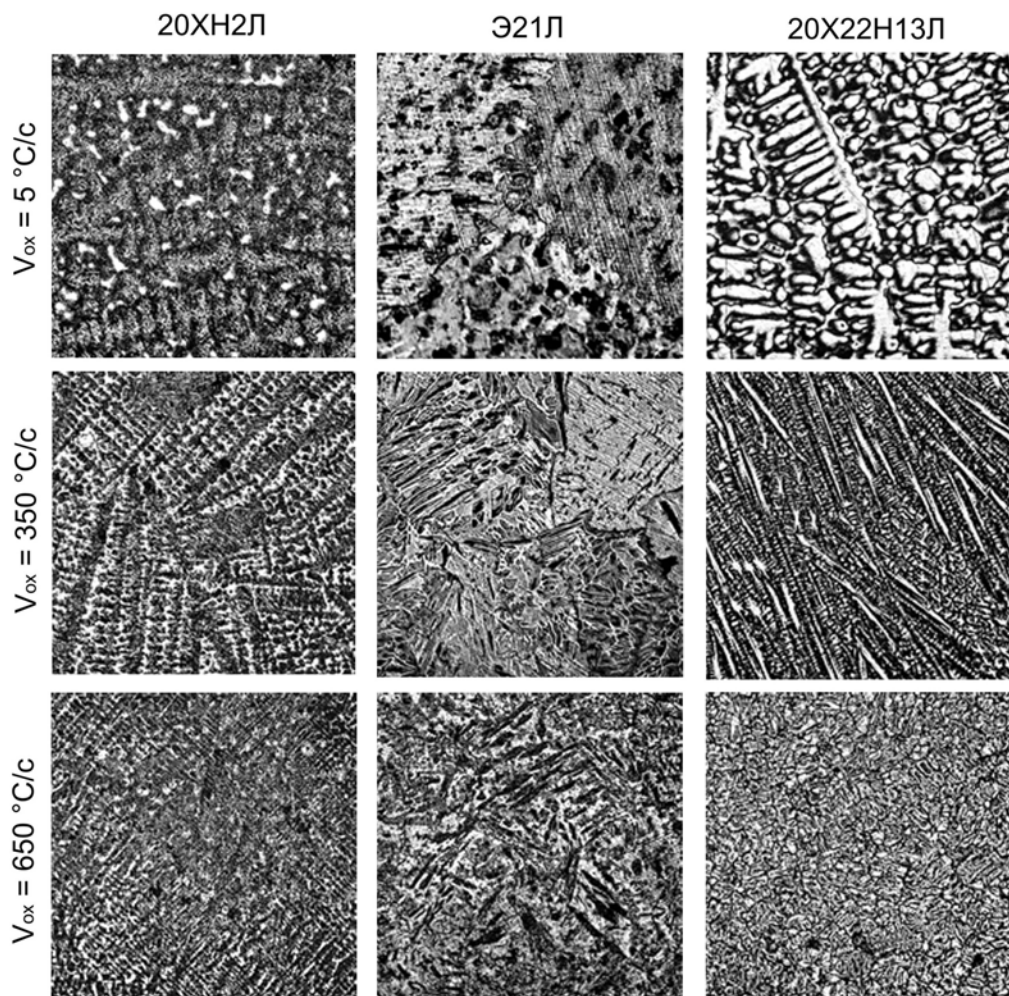


Рис. 2. Лита структура сталей залежно від швидкості охолодження (V_{ox}) при кристалізації. $\times 100$.

Таблиця 2

Розмір зерна залежно від швидкості охолодження (V_{ox}) при кристалізації сталей

Сталь	$V_{ox} = 5 \text{ } ^\circ\text{C/c}$	$V_{ox} = 350 \text{ } ^\circ\text{C/c}$	$V_{ox} = 650 \text{ } ^\circ\text{C/c}$
20XН2Л	-2	1	3
Э21Л	-3	0	1
20X22Н13Л	-1	1	2

Суттєво підвищується також і значення кількісних характеристик дендритної будови сталей – дисперсності дендритної структури (ДДС) і щільності дендритної структури (ЩДС). Дисперсність дендритної структури визначається як сума кількості осей дендритів і міжосьових ділянок на одиницю довжини (1,00 мм) при мікроскопічному збільшенні $\times 100$. Щільність дендритної структури оцінюється безрозмірною величиною – співвідношенням площ, зайнятих осями дендритів, до міжосьових ділянок структури [8].

Структура і фізико-механічні властивості

Встановлено, що відповідно підвищенню швидкості охолодження розплаву сталей, що кристалізуються, закономірно підвищуються показники ДДС сталі 20ХН2 у 3,0 рази, сталі Э21 у 3,5 рази, сталі 20Х22Н13 у 5,0 разів (рис. 3 а).

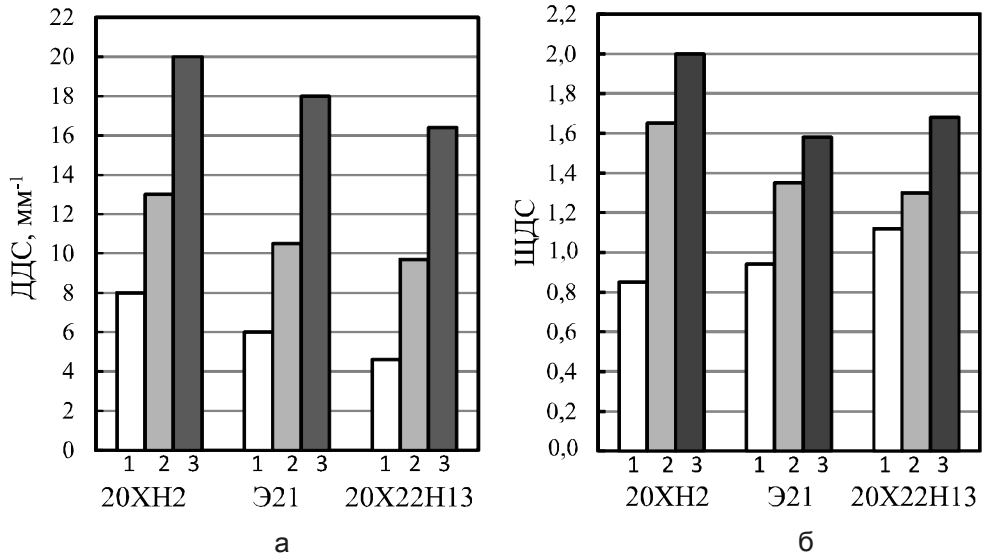


Рис. 3. Характеристики дендритної структури залежно від швидкості охолодження (V_{ox}) при кристалізації сталей. а – ДДС, б – ЩДС. 1 – $V_{ox} = 5$ °C/c; 2 – $V_{ox} = 350$ °C/c; 3 – $V_{ox} = 650$ °C/c.

Подібним чином змінюється також і характеристики ЩДС (рис. 3 б) при підвищенні швидкості охолодження від $V_{ox} = 5$ °C/c до $V_{ox} = 650$ °C/c. Так ЩДС досліджуваних сталей при цьому підвищується від 0,75 до 1,5 (сталь 20ХН2), від 0,83 до 1,42 (сталь Э21), від 0,92 до 1,50 (сталь 20Х22Н13).

Одержанні результати свідчать про домінуючий вплив інтенсивності тепловідбору при кристалізації сталей і відкривають можливості ефективного керування литою структурою на першому етапі виробництва сталевих стрічки.

Оскільки при формуванні структури і властивостей безперервнолитої сталевих стрічки суттєва роль відводиться характеристикам вихідної литої структури сталі, досліджено її вплив на кінцеву структуру виробу. Характеристики литих структур сталей 20ХН2, Э21, і 20Х22Н13, що сформувались за умов різної інтенсивності охолодження при кристалізації ($V_{ox} = 5, 350, 650$ °C/c) розглянуті вище (рис. 2, 3; табл. 2).

Металографічно встановлено, що після гарячої деформації від 950 °C з різним ступенем обтискування ($\varepsilon = 34$ і 55 %) закономірно підвищується дисперсність структурних складових у прокаті досліджуваних сталей, найбільш суттєво при використанні литих швидкоохолоджених при кристалізації заготовок і ступеня обтискування $\varepsilon = 55$ %.

На відміну від заготовок нормального охолодження (рис. 4) в останніх спостерігається значна однорідність структури за всіх ступенів обтискування.

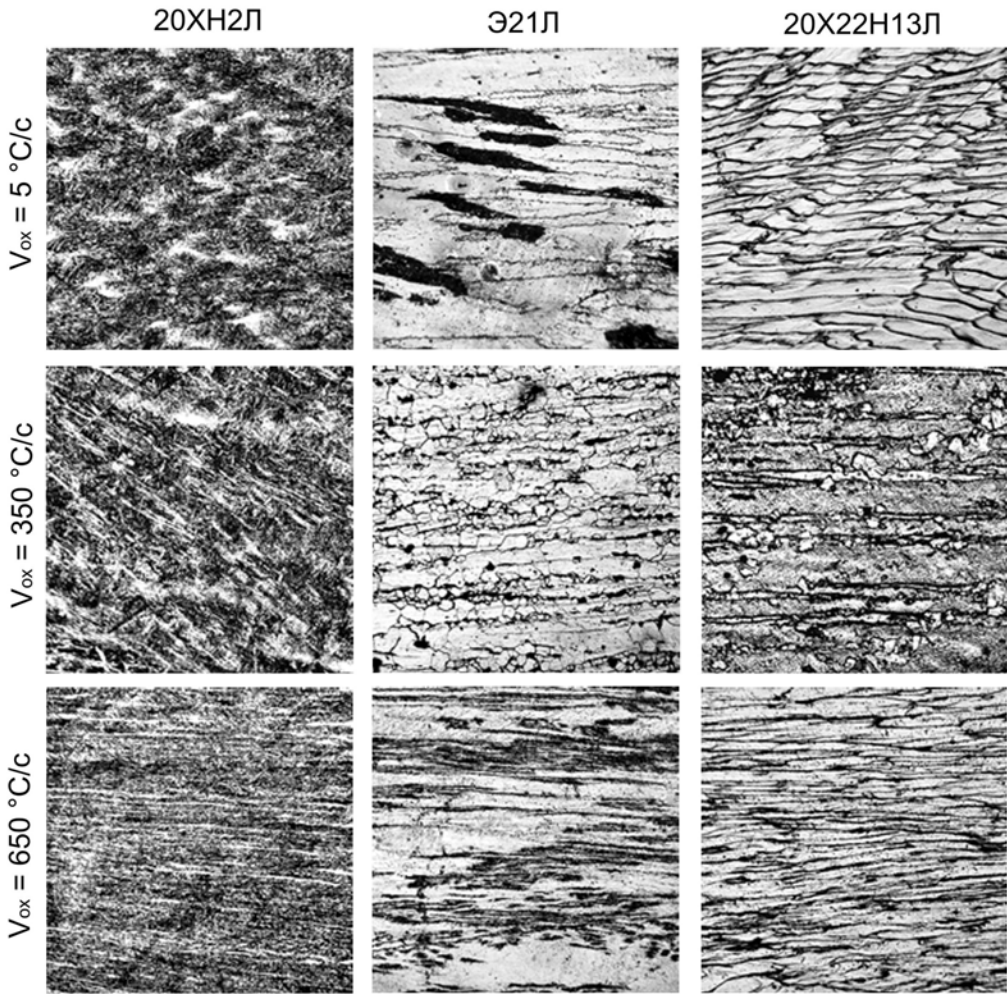


Рис. 4. Структура сталей після гарячої деформації ($\xi = 55 \%$) залежно від умов кристалізації (V_{ox}) литої заготовки. $\times 400$.

Лінійні розміри структурних складових сталей після деформації, що відповідають осям дендритів і міжосьовим об'ємам у структурі литих заготовок (відповідно світлі і темні складові структури), закономірно зменшуються при підвищенні V_{ox} при кристалізації і ступеня деформації ϵ сталей. Швидкісний тепловідбір при кристалізації супроводжується суттєвим подрібненням і підвищенням рівномірності розподілу структурних складових у 1,5 – 2,0 рази ($V_{ox} = 650 \text{ } ^\circ\text{C/c}$) після гарячої деформаційної обробки.

Вплив вихідної литої структури і деформаційно-температурної обробки на трансформацію дендритної будови литої заготовки і структури прокату оцінювали також за показником «пророблюваності», який характеризує подрібнення структури литого металу внаслідок деформації [9, 10]. Залежно від умов кристалізації і величини обтискування показник пророблюваності визначається як щільність лінійних елементів в структурі металу (світлих і темних складових) після гарячої деформації. За коефіцієнт

Структура і фізико-механічні властивості

пророблюваності K_{np} приймається щільність системи лінійних елементів структури, яка дорівнює їх кількості на одиницю площі січної поверхні, перпендикулярної до осі орієнтування. Більш високі значення коефіцієнта K_{np} свідчать про формування більш щільної і однорідної структури прокату. У табл. 3 наведено значення K_{np} досліджуваних сталей залежно від вихідної структури заготовок і ступеня їх обтискування при деформації.

Таблиця 3

Коефіцієнт пророблюваності (K_{np}) залежно від ступеня обтискування (ξ) і умов кристалізації (V_{ox}) заготовок (п/мм²)

V_{ox} , °C/c	Сталь 20ХН2	Сталь Э21	Сталь 20Х22Н13
5	<u>38</u>	<u>32</u>	<u>49</u>
	41	36	56
350	<u>44</u>	<u>36</u>	<u>51</u>
	49	42	59
650	<u>52</u>	<u>45</u>	<u>57</u>
	58	54	63
Примітка: над ризкою – $\xi = 35\%$, під ризкою – $\xi = 55\%$			

Встановлено, що більш дисперсні литі вихідні структури сталей інтенсивного охолодження при кристалізації характеризуються також більш високими значеннями K_{np} після деформаційної обробки. Так, при підвищенні швидкості охолодження (V_{ox}) розплаву сталі, що кристалізується, від $V_{ox} = 5$ °C/c до $V_{ox} = 350$ °C/c і $V_{ox} = 650$ °C/c значення коефіцієнта пророблюваності збільшується для сталі 20ХН2 на 13 і 27 % та на 19 і 34 % при обтискуванні відповідно 35 і 55 %. Для сталі Э21 цей показник зростає на 12 і 29 % та 16 і 40 %; для сталі 20Х22Н13 на 11 і 17 % та 15 і 22 % відповідно вказаному підвищенню ступеня обтискування. Це свідчить про те, що закладені на стадії кристалізації особливості первинної литої структури (спадкові ознаки) зберігаються і після деформаційно-теплової обробки сталей.

Це стосується також і встановлених закономірностей подрібнення зерна залежно від інтенсивності тепловідбору при кристалізації заготовки і наступної гарячої деформації при прокатуванні сталевий стрічки (табл. 4).

Таблиця 4

Розмір зерна сталей після гарячої деформації ($\xi = 55\%$) залежно від швидкості охолодження (V_{ox}) при кристалізації вихідної литої заготовки

Сталь	$V_{ox} = 5$ °C/c	$V_{ox} = 350$ °C/c	$V_{ox} = 650$ °C/c
20ХН2	2	4	6
Э21	1	2	4
20Х22Н13	2	3	5

В результаті проведених досліджень встановлено, що формування дисперсної литої структури за рахунок регульованого інтенсивного

тепловідбору на стадії кристалізації литої заготовки забезпечує закономірне подрібнення структурних складових досліджуваних сталей і після гарячої деформації за вказаними режимами.

Показано, що виготовлення сталевої стрічки за суміщеною технологією лиття і гарячої деформації основні структурні характеристики виробу визначаються умовами формування литої структури. Наступні операції деформаційно-теплової обробки не усувають закладених позитивних (спадкових) особливостей швидкоохолодженої при кристалізації вихідної литої структури. Це відкриває додаткові можливості підвищення якості і властивостей безперервнолитої сталевої стрічки за рахунок оптимізації суміщеного процесу на стадії кристалізації і використання ефекту структурної спадковості.

Література

1. Минаев А.А. Совмещенные металлургические процессы. Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
2. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. и др. Процессы непрерывной разливки. Донецк ДонНТУ, 2002. – 536 с.
3. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976. – 556 с.
4. Флемингс М. Процессы затвердевания. М.: Металлургия, 1977. – 424 с.
5. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. – М.: Мир, 1967. – 216 с.
6. Вейник А.И. Тепловые основы теории литья. М.: Машгиз, 1948. – 163 с.
7. Куманин И.Б. Вопросы теории литейных процессов. М.: Металлургия, 1976. – 216 с.
8. Бялік О.М., Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Черненко В.С. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія. Київ: Політехніка, 2006. – 328 с.
9. Лебедев В.Н., Троицкий В.П., Антощенко Ю.М. и др. Определение степени прорабатываемости металла при деформировании // Известия вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 3. – С. 109 – 111.
10. Левченко Г.В., Демина Е.Г., Мединский Г.А. и др. Трансформация дендритной структуры при производстве железнодорожных осей // Металлургия и горнолыжная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 74 – 76.

References

1. Minaev, A.A. (2008). *Sovmeshhennyye metallurgicheskie processy*. [Combined metallurgical processes]. Donetsk: Tehnopark DonGTU UNITEH [in Russian].
2. Smirnov, A.N., Piljushenko, V.L., Minaev, A.A. & dr. (2002). *Processy nepreryvnoy razlivki* [Continuous casting process]. Donetsk: DonNTU [in Russian].
3. Efimov, V.A. (1976). *Razlivka i kristallizatsia stali* [Casting of steel and crystallization]. Moskva: Metallurgiiia [in Russian].
4. Flemings, M. (1977). *Processy zatverdevaniia* [Solidification process]. Moskva: Metallurgiiia [in Russian].
5. Vajngard, U. (1967). *Vvedenie v fiziku kristallizatsii metallov* [Introduction to the physics of crystallization of metals]. Moskva: Mir [in Russian].
6. Veinik, A.I. (1948). *Teplovye osnovy teorii lit'ia* [Heat molding theory basics].

- Moskva: Mashgiz [in Russian].
7. Kumanin, I.B. (1976). *Voprosy teorii litejnyh processov [Problems in the theory of foundry processes]*. Moskva: Metallurgija [in Russian].
 8. Bialik, O.M., Kondratiuk, S.Ye., Kindrachuk, M.V. & Chernenko, V.S. (2006). *Strukturnyi analiz metaliv. Metalohrafiia. Fraktohrafiia [Structurally analiz metaliv. Metalografiya. Fraktografiya]*. Kyiv: Politekhnikha [in Ukrainian].
 9. Lebedev, V.N., Troickij, V.P., Antoshhenkov, Ju.M. & dr. (1977). *Opredelenie stepeni prorabatyvaemosti metalla pri deformirovanii [Determination of workability of the metal during deformation]*. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija – Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy*, 3, 109 – 111 [in Russian].
 10. Levchenko, G.V., Demina, E.G., Medinskii, G.A. & dr. (2008). *Transformaciia dendritnoi struktury pri proizvodstve zheleznodorozhnyh osei [The transformation of dendritic structure in the production of railway axles]*. *Metallurgija i gornolyzhnaia promyshlennost' – Metallurgy and ski industry*, 2, 74 – 76 [in Russian].

Одержано 31.08.16

**С. Е. Кондратюк, А. В. Ноговицын, Е. Н. Стоянова,
И. Р. Баранов, Ж. В. Пархомчук**

Влияние параметров кристаллизации и горячей деформации на характеристики структуры сталей при валковой прокатке

Резюме

На примере сталей 20ХН2, Э21, 20Х22Н13 установлены закономерности формирования их структуры при совмещении процессов регламентированного ускоренного охлаждения при кристаллизации и последующей горячей деформации при валковой прокатке стальной ленты, что открывает дополнительные возможности повышения качества и свойств изделий.

**S. Ye. Kondratiuk, A. V. Nogovitsin, E. N. Stoianova,
I. R. Baranov, Z. V. Parkhomchuk**

Influence of crystallization parameters and the hot deformation on characteristics of steel structure of with roll rolling

Summary

For steels 20ХН2, Э21, 20Х22Н13 the regularities formation of their structure when combining the processes of controlled accelerated cooling during crystallization and subsequent hot deformation of the steel strip of roller rolling are revealed. This opens up additional opportunities to improve the quality and properties of products.