

УДК 669.18.046.518:621.746

**Е. В. Парусов, к. т. н.; О. Б. Сичков, д. т. н., проф.; І. М. Чуйко, к. т. н;
Л. В. Сагура, к. т. н.; А. І. Сівак**

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗЛИВАННЯ І КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛІ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ

Із метою підвищення швидкості розливання рідкої сталі високовуглецевих марок у ході виконання досліджень опробувані дослідні технологічні режими розливання і кристалізації безперервнолитої заготовки.

Порівняно із заготовками, які розлиті із застосуванням чинного режиму охолодження, досягнуто зниження враженості заготовок тріщинами й центральною пористістю.

На підставі проведених досліджень встановлено, що під час виробництва безперервнолитої заготовки з високовуглецевих марок сталі C80D і C86D можливо підвищити швидкість витягування (розливання) до 3,2 м/хв, що дозволить знизити технологічний час виробництва однієї плавки за збереження задовільних якісних показників заготовки.

***Ключові слова:** безперервнолита заготовка, швидкість розливання, високовуглецева сталь, якісні показники заготовки.*

Вступ і стан проблеми. Спадковий вплив якісних показників безперервнолитої заготовки на властивості гарячокатаного прокату є загальновідомим і викладений у роботах [1 – 5], проте розливання рідкої сталі на машинах безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) має низку особливостей, які зумовлюють якісні показники литої заготовки й залежать, насамперед, від параметрів технологічного процесу виробництва й конструктивних особливостей обладнання, яке застосовують. У макроструктурі заготовки завжди спостерігають дефекти, які не можна повністю усунути навіть за раціонального вибору технологічних параметрів виробництва і які безпосередньо пов'язані з ліквацийними процесами, що протікають під час кристалізації.

Порівняно зі злитками, відлитими у виливниці, кристалічна будова литої заготовки має деякі особливості. Це пов'язано з її інтенсивним охолодженням у кристалізаторі й зоні вторинного охолодження (ЗВО), що в кінцевому підсумку сприяє формуванню більш однорідної кристалічної структури. Безперервнолита заготовка, на відміну від злитка, характеризується дуже незначними коливаннями хімічного складу (повне виключення зональної і зниження мікрофізичної (дендритної) ліквация) і більш однорідними властивостями як у поздовжньому, так і в поперечному в напрямках [6].

Формування якісних показників безперервнолитої заготовки (розмір структурних зон, центральна осьова пористість, осьова ліквация, тріщини та ін.) визначають переважно технологічними параметрами процесу розливання рідкої сталі. Істотний вплив при цьому мають температура металу в проміжному ковші й подальша швидкість витяжки заготовки [1]. Підвищення перегріву металу над температурою ліквідус під час розливання металу збільшує протяжність зони стовпчастих кристалів, величина якої також залежить і від умісту вуглецю в сталі [2, 7, 8].

Відповідно до останніх світових тенденцій провідні компанії-виробники металургійного устаткування (Danieli, Concast Standard, Siemens VAI та ін.) упроваджують прогресивні технологічні режими безперервного розливання високовуглецевих марок сталі, які характеризуються підвищенням інтенсивності водяного охолодження заготовки на перших

двох секціях ЗВО, що сприяє підвищенню швидкості кристалізації металу.

Компанія Danieli рекомендує під час виробництва заготовок із високовуглецевих марок сталі вести охолодження у ЗВО з інтенсивністю витрати води близько 1,6 л/кг, а компанія Concast Standard є прихильником інтенсивнішого водяного охолодження ~ 2,0 л/кг. При цьому рекомендують застосування високошвидкісних форсунок у кристалізаторі, наприклад фірми Lechner. Згідно із твердженнями перших двох компаній, за поєднання таких режимів охолодження з технологією електромагнітного перемішування (ЕМП) металу в кристалізаторі стає можливим підвищити швидкість розливання сталі, знизити розвиток ліквацийних процесів і зменшити бал центральної пористості в литій заготовці.

Зважаючи на викладене, **метою роботи** було дослідження впливу технологічних параметрів розливання й інтенсивності охолодження високовуглецевої сталі марок С80D і С86D (за EN ISO 16120-1:2011) у ЗВО на формування якісних показників безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм.

Матеріалами для досліджень слугували промислові партії безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марок С80D і С86D, виготовлені в умовах ВАТ «Молдавський металургійний завод» (м. Рибниця, Молдова) із застосуванням різних швидкостей кристалізації рідкої сталі й інтенсивністю водяного охолодження у ЗВО. Дослідження ступеня розвитку дефектів у макроструктурі безперервнолитої заготовки, призначеної для виготовлення бунтового прокату, проводили відповідно до вимог ОСТ 14-1-235-91 «Сталь. Метод контролю макроструктури безперервнолитої заготовки для виробництва сортового прокату і трубних заготовок». Макроструктуру литої заготовки виявляли методом глибокого травлення темплетів у гарячому 50-відсотковому водному розчині соляної кислоти відповідно до вимог ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методи випробувань і оцінки макроструктури». Оцінка характерних дефектів макроструктури безперервнолитої заготовки (центральна осьова пористість, осьова ліквация і тощо) виконана методом порівняння натурних протравлених темплетів з еталонними шкалами ОСТ 14-1-235-91.

Проведення експериментів та обговорення отриманих результатів. Перед поглибленим проведенням досліджень була випробувана дослідна технологія розливання високовуглецевої сталі марки С80D за підвищення середньої швидкості витяжки литої заготовки з 2,4 м/хв до 3,4 м/хв і збереженні чинного режиму у ЗВО. Установлено, що порівняно з діючою технологією розливання рідкої сталі (2,4 м/хв) на дослідному режимі (3,4 м/хв) підвищилася враженість макроструктури заготовки тріщинами на 1,0 бал, а центральна пористість зросла в середньому на 1,4 бала (рис. 1). Крім зазначених відхилень за якісними показниками для заготовок, вироблених за дослідним режимом, зафіксована підвищена опуклість граней до 2,8 мм на сторону.

Хімічний склад сталі марки С80D двох контрольних плавок і параметри експериментальних режимів у ЗВО під час розливання заготовок представлені в табл. 1 і 2 відповідно.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі марки С80D

Номер плавки	Хімічний склад сталі, % за масою							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,79	0,64	0,16	0,010	0,002	0,05	0,04	0,12
2	0,81	0,59	0,15	0,009	0,003	0,04	0,03	0,14

Таблиця 2

Параметри охолодження безперервнолитої заготовки зі сталі марки С80D перетином 125×125 мм у ЗВО

Номер режиму	Середня швидкість розливання, м/хв	Питома витрата води у ЗВО, л/кг	Частка від загальної витрати води в секції			
			1 секція	2 секція	3 секція	4 секція
1	2,4	1,35	0,36	0,36	0,17	0,11
2	3,2	1,70	0,30	0,39	0,18	0,13
3	2,6	1,60	0,30	0,40	0,18	0,12
4	2,8	1,85	0,29	0,39	0,19	0,13

У процесі розливання сталі здійснювали фіксацію основних параметрів і відхилень технологічного процесу, візуально оцінювали зміну температури (переохолодження) заготовки, виконували заміри геометричних параметрів (кривизна, ромбічність, опуклість граней). Від заготовок, виготовлених за базовим і експериментальними технологічними режимами, проводили відбір темплетів для дослідження якісних показників макроструктури.



Рис. 1. Макроструктура поздовжнього темплету безперервнолитої заготовки зі сталі С80D (швидкість витяжки 3,4 м/хв; питома витрата води в ЗВО 1,30 л/кг)

Результати досліджень макроструктури безперервнолитих заготовок перетином 125×125 мм відповідно до вимог ОСТ 14-1-235-91, виготовлених за базовим і експериментальними технологічними режимами, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Якісні показники безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марки С80D за ОСТ 14-1-235-91

Номер режиму	Середня швидкість розливання, м/хв	t _{ск} ¹ , °C	Якісні показники заготовки, бал					
			ЦП ²	ОЛ ³	Тріщини			КТЗ ⁴
					по перетину	кутові	осьові	
1	2,4	1502	2,1	2,5	1,1	0,2	0,4	0,3
2	3,2	1499	1,6	2,2	0,4	0,2	0,4	0,4
3	2,6	1498	1,9	2,3	1,2	0,1	0,4	0,5
4	2,8	1502	1,7	2,4	0,3	0,3	0,5	0,6

Примітка: 1 – температура металу в сталерозливному ковші; 2 – центральна осьова пористість; 3 – осьова ліквация (хімічна неоднорідність); 4 – крайове точкове забруднення

виготовленої як за чинним, так і за дослідним технологічним режимам, слідує:

- за використання режиму № 2 досягнуто зниження середнього балу по центральній осьовій пористості на 0,5 бала, зменшення враженості тріщинами по перетину на 0,7 бала;
- за використання режиму № 3 істотного поліпшення якісних показників заготовки не виявлено;

- за використання режиму № 4 досягнуто зниження середнього балу по центральній осьовій пористості на 0,4 бала, зменшення ураженості тріщинами по перетину на 0,8 бала.

Під час випробування найінтенсивнішого режиму охолодження (№ 4) зафіксовано значне переохолодження поверхні заготовок у ЗВО, що зумовило підвищену їхню викривленість. Загалом геометричні розміри безперервнолитих заготовок, виготовлених із використанням дослідних технологічних режимів водяного охолодження (№ 2...4), у 95 % випадків відповідали вимогам ЗТУ 14-518-2012-0001-2009 «Заготовка безперервнолита квадратного перетину для виготовлення сортового прокату і катанки».

У ході проведення досліджень було встановлено, що за підвищення інтенсивності охолодження у ЗВО можна збільшити середню швидкість розливання високовуглецевої сталі до 3,2 м/хв без погіршення якісних показників литої заготовки.

Суттєвого зниження розвитку осьової ліквації в заготовках за рахунок застосування інтенсивніших режимів водяного охолодження у ЗВО не досягнуто. Однак відсутність належного ефекту може бути пов'язана з недостатньо високим тиском води, що охолоджує на поверхні литої заготовки у ЗВО. Максимальний тиск води в перших двох секціях ЗВО в ході проведення досліджень становив ~ 0,7 МПа. Відповідно до рекомендацій компаній Danieli і Concast Standard за використання технології високоінтенсивного водяного охолодження заготовки з високовуглецевих марок сталі для зменшення розвитку рівня осьової ліквації тиск охолоджувальної води у ЗВО має становити не менше 1,2 МПа.

Подальші дослідження проводили на двох контрольних плавках високовуглецевої сталі марки С86D, хімічний склад яких наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Хімічний склад сталі марки С86D

Номер плавки	Хімічний склад сталі, % за масою							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,84	0,59	0,18	0,011	0,001	0,04	0,06	0,14
2	0,83	0,61	0,17	0,010	0,002	0,03	0,05	0,13

У ході проведення досліджень поздовжні темплети відбирали від заготовок обох контрольних плавок зі струмків № 1 і 6 МБЛЗ, швидкість витяжки заготовок на яких становила 2,43 і 3,28 м/хв відповідно.

Розливання рідкої сталі виконували за аналогією зі сталлю марки С80D через проміжний ківш із магnezіальною футеровкою, із повним захистом струменя металу від вторинного окислення й використанням системи ЕМП металу в кристалізаторі.

Середня швидкість витягування заготовки по шести струмкам МБЛЗ становила: струмок № 1 – 2,41...2,43 м/хв, струмки № 2...5 – 2,38...2,70 м/хв, струмок № 6 – 3,21...3,28 м/хв (рис. 2).

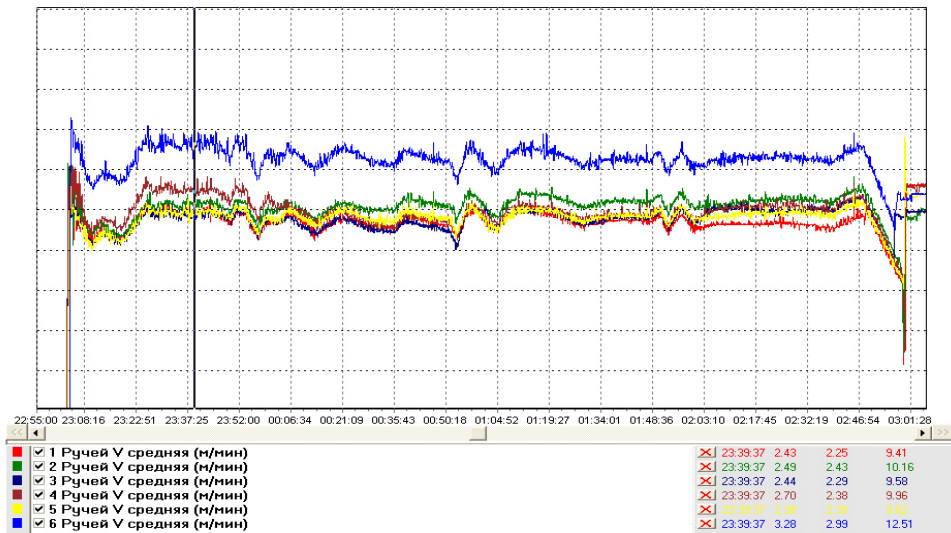


Рис. 2. Середня швидкість витягування безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марки С86D на шестиструмковій МБЛЗ згідно з даними АСУТП ВАТ «ММЗ»

Параметри експериментальних режимів охолодження заготовок у ЗВО представлені в табл. 5.

Таблиця 5

Параметри охолодження безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марки С86D у ЗВО

Номер струмка МБЛЗ	Питома витрата води у ЗВО, л/кг ²	Частка від загальної витрати води в секції			
		1 секція	2 секція	3 секція	4 секція
1	1,60	0,31	0,38	0,18	0,13
2...5	1,65	0,29	0,39	0,17	0,15
6	1,75	0,30	0,40	0,18	0,12

Результати досліджень макроструктури і кристалічної структури безперервнолитих заготовок контрольних плавків зі сталі марки С86D представлені в табл. 6 і 7 відповідно.

Таблиця 6

Якісні показники безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марки С86D

Номер плавки/ Номер струмка МБЛЗ	Оцінка макроструктури заготовки за ОСТ 14-1-235-91, бал					
	ЦП*	ОЛ*	Тріщини			КТЗ*
			по перерізу	кутові	осьові	
1 / 1	2,0	2,4	0	0,3	0,5	0,3
1 / 6	1,8	2,2	0	0,3	0,4	0,4
2 / 1	1,9	2,5	0	0,2	0,5	0,5
2 / 6	1,7	2,3	0	0,3	0,5	0,5

Примітка: * – див. примітку до табл. 3

Таблиця 7

Результати дослідження кристалічної структури безперервнолитої заготовки перерізом 125×125 мм зі сталі марки С86D

Номер струмка МБЛЗ	Розміри структурних зон досліджуваних заготовок ¹ , мм		
	коркова зона	стовпчасті кристали	рівноосні кристали
1	<u>3...11</u> 7,5	<u>11...17</u> 13,4	<u>30...35</u> 32,8
6	<u>4...10</u> 7,1	<u>13...18</u> 14,8	<u>31...36</u> 33,1

Примітка: 1 – у чисельнику усереднені максимальне і мінімальне значення, у знаменнику – середнє

Аналіз даних табл. 6...7 свідчить про те, що істотних відмінностей за показниками макроструктури і кристалічної структури литих заготовок контрольних плавок, відлитих із середньою швидкістю 2,43 і 3,28 м/хв, не виявлено.

Для оцінки розвитку дефектів у осьовій зоні заготовок, відлитих із різними швидкостями витягування, були відібрані темплети довжиною близько 1 м, порізані вздовж центральної лінії й відшліфовані. Результати оцінки ураженості центральної зони заготовок дефектами (центральна пористість) представлені в табл. 8.

Таблиця 8

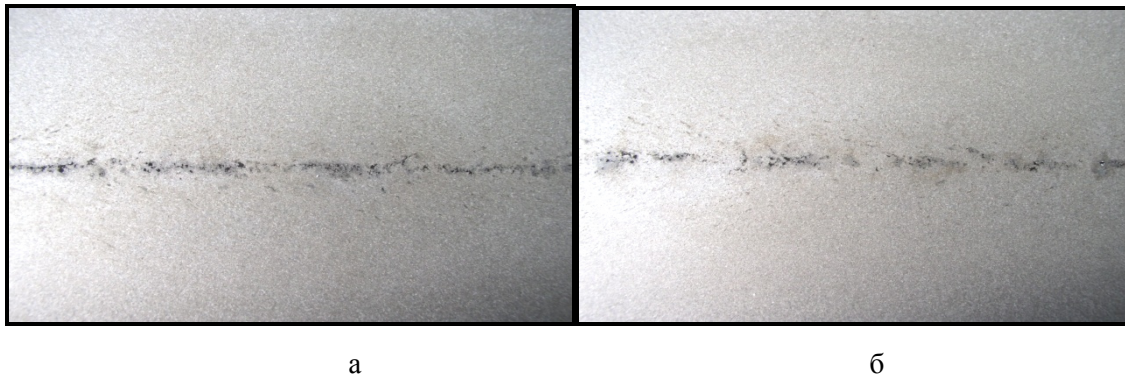
Результати оцінки центральної пористості в безперервнолитої заготовках перетином 125×125 мм зі сталі марки С86D

Номер плавки	Номер струмка МБЛЗ	Середня швидкість розливання сталі, м/хв.	Кількість пор по довжині темплету, шт.	Розмір пор, мм	Зона розташування пор
1	1	2,43	80	0,5...1,0 (макс. – 2,1)	Ділянка шириною ~ 5,0 мм
	6	3,28	127	0,5...1,0 (макс. – 2,8)	Ділянка шириною ~ 5,0 мм
2	1	2,41	78	0,5...1,0 (макс. – 2,2)	Ділянка шириною ~ 5,0 мм
	6	3,21	114	0,5...1,0 (макс. – 3,0)	Ділянка шириною ~ 5,0 мм

Безперервнолитої заготовки обох плавок, відлиті з більш високою швидкістю витягування 3,21...3,28 м/хв, характеризуються підвищеною кількістю й максимальним розміром пор в осьовій зоні порівняно із заготовками, відлитими зі швидкістю витягування 2,41...2,43 м/хв.

Заготовки обох контрольних плавок, виготовлені із застосуванням різних режимів розливання і кристалізації сталі, були прокатані на дротовому стані в бунтовий прокат діаметром 11,0 мм. Порушення суцільності й відхилень за якістю поверхні бунтового прокату контрольних плавок не виявлено. Отже, дефекти центральної зони литої заготовки контрольних плавок, розлитих із середньою швидкістю в діапазоні швидкостей 2,41...3,28 м/хв, закаталися в процесі гарячої деформації.

На рис. 3 представлена макроструктура поздовжніх темплетів досліджуваних контрольних плавок.



а – середня швидкість витягування заготовки 2,43 м/хв;
б – середня швидкість витягування 3,28 м/хв

Рис. 3. Макроструктура поздовжніх темплетів безперервнолитої заготовки зі сталі С86D, відлитої з різними швидкостями

Центральна пористість має значний розвиток у заготовках малого перетину, зростання ступеня ураженості таким типом дефекту фіксують за підвищення швидкості розливання сталі.

Використання ЕМП металу на МБЛЗ позбавило змоги суттєво вплинути на рівень центральної пористості в литій заготовці через протяжну лунку рідкого металу в кристалізаторах. Ефективнішим методом зниження бала центральної пористості є застосування комплексного ЕМП металу не тільки в кристалізаторі, а й в ЗВО за одночасного підвищення інтенсивності водяного охолодження.

Уплив розглянутого дефекту литої заготовки на якість готового прокату все ж варто вважати обмеженим. Найважливішим є обмеження розвитку цього дефекту безперервнолитої заготовки під час виробництва високовуглецевої сталі кордового призначення, зважаючи на небезпеку можливого розшарування високоміцного дроту під час волочіння до діаметру менше 0,50 мм за рахунок можливості виникнення дефекту типу «лунка-конус».

Обмеження розвитку центральної осьової пористості в безперервнолитої заготовці може бути досягнуто за рахунок сталості швидкості розливання, а також більш інтенсивного й рівномірного охолодження у ЗВО.

Висновки

1. Із метою підвищення швидкості розливання рідкої сталі високовуглецевих марок у ході виконання досліджень опробувані дослідні технологічні режими розливання і кристалізації безперервнолитої заготовки. Найоптимальніші результати з якості заготовки були досягнуті за питомої витрати води у ЗВО 1,55...1,75 л/кг сталі.

2. Порівняно із заготовками, розлитими із застосуванням чинного режиму охолодження, досягнуто зниження враженості заготовок тріщинами й центральною пористістю. Геометричні параметри заготовок, вироблених із застосуванням інтенсивніших режимів водяного охолодження, показали повну відповідність вимогам ЗТУ 14-518-2012-0001-2009. Під час випробування дослідного режиму з максимальною питомою витратою води 1,85 л/кг металу відзначено значне переохолодження поверхні заготовок і підвищення їх викривленості.

3. На підставі проведених досліджень встановлено, що під час виробництва безперервнолитої заготовки з високовуглецевих марок сталі С80D і С86D можна підвищити швидкість витягування (розливання) до 3,2 м/хв, що дозволить знизити технологічний час виробництва однієї плавки за умови збереження задовільних якісних показників заготовки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ершов Г. С. Микронеоднородность металлов и сплавов / Г. С. Ершов, Л. А. Позняк. – М. : Металлургия, 1985. – 214 с.
2. Голиков И. Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / И. Н. Голиков, С. Б. Масленков. – М. : Металлургия, 1977. – 224 с.
3. Теория и практика непрерывного литья заготовок / [Смирнов А. Н., Гладков А. Я., Пилюшенко В. Л. и др.]. – Донецк : ООО «Лебедь», 2000. – 371 с.
4. Трансформация дефектов непрерывно-литой заготовки в поверхностные дефекты проката / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. В. Перчаткин [и др.] // Металлург. – 2006. – № 2. – С. 60 – 64.
5. The transformation of defects in continuous-cast semifinished products into surface defects on rolled products / A. B. Sychkov, M. A. Zhigarev, A. V. Perchatkin [and etc.] // Metallurgist. – Januar 2006. – Vol. 50. – Issue 1 – 2. – P. 83 – 90.
6. Гольдштейн Я. Е. Использование железуголеродистых сплавов // Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1993. – 416 с.
7. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки // В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
8. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / [Сычков А. Б., Жигарев М. А., Столяров А. Ю. и др.]. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2014. – 257 с.

Парусов Едуард Володимирович – к. т. н., с. н. с., в. о. завідувача відділу термічної обробки металу для машинобудування, tometal@ukr.net.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України (ІЧМ НАНУ).

Сичков Олександр Борисович – д. т. н., проф., професор кафедри ливарного виробництва і матеріалознавства, absychkov@mail.ru.

Магнітогорський державний технічний університет ім. Г. І. Носова (МДТУ).

Чуйко Ігор Миколайович – к. т. н., науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, ichuuko@mail.ru.

Сагура Людмила Володимирівна – к. т. н., старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, slv_metal@mail.ru.

Сівак Алла Іванівна – старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, slv_metal@mail.ru

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України (ІЧМ НАНУ).