



УДК 669.187.58

## ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОДУКТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОСОБО НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

А. Н. Савьюк, И. В. Деревянченко, О. Л. Кучеренко,  
Ю. С. Пройдак, А. П. Стовпченко,  
Л. В. Камкина, Ю. Н. Грищенко

Рассмотрены особенности производства стали в условиях Молдавского металлургического завода. Показана возможность получения ультранизких количеств углерода при работе по схеме дуговая сталеплавильная печь–вакууматор–ковш–печь.

Specifics of steel production in the conditions of Moldavian Metallurgical Works are considered. The feasibility of producing ultra-low amounts of carbon using scheme : arc-steel making furnace- evacuator-ladle-furnace is shown.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь; полупродукт; ковш-печь; вакууматор; фурма; окисленность; раскисление; IF-сталь; проволока

**Введение.** В настоящее время в мире широко развито производство сталей с особо низким содержанием углерода и других примесей, отличающихся высокими значениями пластических свойств (IF-стали), использование которых распространено в производстве тонкого листа для последующей глубокой (сверхглубокой) вытяжки и нанесения покрытий горячим способом. В то же время благодаря низкому значению временного сопротивления (менее 300...340 Н/мм<sup>2</sup>) стали, близкие по составу к IF-сталям, представляют интерес в качестве сверхпластичной катанки для тонких проволок. Вследствие низкого содержания углерода, легирующих элементов и примесей возможен передел такой катанки путем волочения без промежуточных отжигов, что позволяет существенно сократить затраты в метизном производстве.

Все IF-стали выплавляют в конвертерах с комбинированной продувкой кислородом и аргоном [1]. Тенденциями развития современного сталеварения является сближение возможностей основных сталеплавильных агрегатов черной металлургии — кислородных конвертеров и дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и даже создание своеобразного дугового сталеплавильного конвертера [2]. В современных ДСП, работающих со вдуванием значительного количества кислорода, в технологической цепочке агрегатов ковш-печь и вакууматор выплавляют стали всего сортамента, производимые ранее

только в кислородных конвертерах, в том числе и с низким содержанием углерода.

Сортамент сортового проката, выпускаемого совместным закрытым обществом «Молдавский металлургический завод» (СЗАО ММЗ) чрезвычайно широк и включает как высокоуглеродистые марки стали для металлокорда, так и низкоуглеродистые для изготовления проволок и арматуры. Широкие технологические возможности и высокая культура производства СЗАО ММЗ позволили поставить задачу выплавки особо низкоуглеродистой стали для получения высокопластичной катанки из электропечного полупродукта.

**Технологические возможности СЗАО ММЗ получения низкоуглеродистых сталей.** Электродуговая печь Молдавского металлургического завода ДСП-2 имеет номинальную емкость 120 т и мощность 95 МВ·А (в резерве 80 + 12 %). Технология производства предусматривает подачу в печь для нагрева металла довольно большого количества углеродсодержащих материалов (кокс, природный газ) и вдувание кислорода для сжигания и окисления примесей металлошихты при помощи нескольких видов горелок и фурм. Так, на печи ДСП-2 используют следующее оборудование:

систему стеновых газокислородных горелок (4...6 однотипных струйных горелок мощностью 3,6 МВт с расходом кислорода до 4800 м<sup>3</sup>/ч), обеспечивающих получение большого пламени, позволяющего эффективно нагревать и разрезать метал-

© А. Н. САВЬЮК, И. В. ДЕРЕВЯНЧЕНКО, О. Л. КУЧЕРЕНКО, Ю. С. ПРОЙДАК, А. П. СТОВПЧЕНКО,  
Л. В. КАМКИНА, Ю. Н. ГРИЩЕНКО, 2006



Основные технологические параметры плавки в ДСП-2					
Удельный расход электроэнергии, (кВт·ч)/т	Расход кислорода, м <sup>3</sup> /т				
	Манипулятор «Палмур»	Боковые фурмы	Манипулятор ММЗ	Горелка-копье «Steinlange»	Кислородная труба
430	13,35	1,4	5,9	4,20	1,27
344	1,90	0,7	2,7	2,05	0,10
639	23,10	4,2	12,0	6,95	3,50

Примечание. Приведены средние, минимальные и максимальные данные 200 плавков.

лошихту, а также дожигать СО до СО<sub>2</sub> в рабочем пространстве печи);

манипулятор «Палмур» для вдувания кислорода и порошкообразного кокса с целью ускорения расплавления металлошихты в холодной зоне печи, перемешивания расплавленного металла за счет высокой скорости нагнетания кислорода (расход кислорода — до 3000 м<sup>3</sup>/ч, порошкообразного кокса — до 40 кг/мин), обезуглероживания стальной ванны кислородом, дожигания СО путем внесения газообразного кислорода, образования и поддержания вспененного шлака;

манипулятор ММЗ для ускорения процесса плавки и повышения качества металла за счет расплавления металлошихты в районе рабочего окна ДСП с помощью газокислородной горелки и контролируемого обезуглероживания расплава мощной и компактной струей кислорода (расход кислорода в кислородной фурме — до 3000 м<sup>3</sup>/ч, газокислородной горелке мощностью 7,3 или 10 МВт — до 2200 м<sup>3</sup>/ч, природного газа — до 1100 м<sup>3</sup>/ч), а также экономии электроэнергии путем дополнительного внесения альтернативного источника энергии и сокращения длительности работы печи под током;

горелку-копье фирмы «Steinlange» для получения дополнительной тепловой энергии путем введения в печь природного газа и кислорода (мощность 3,2 МВт, расход природного газа — до 350 м<sup>3</sup>/ч, кислорода на копье — до 2000 м<sup>3</sup>/ч и на горелку —

до 700 м<sup>3</sup>/ч), что позволяет увеличить производительность сталеплавильного агрегата, снизить расход электроэнергии и графитированных электродов, увеличить общую мощность;

систему боковых кислородных фурм для обеспечения подачи газообразного кислорода в ванну через две фурмы в районе пятой и седьмой водоохлаждаемых панелей печи, что способствует интенсификации процесса расплавления металлошихты в зонах, на которые не распространяется прямое действие электрических дуг или газокислородных горелок, перемешивание расплава в процессе выплавки стали, окисление углерода и дожигание СО в рабочем пространстве печи.

При необходимости допускается использование в технологии производства стали кислородной трубки.

Футеровка рабочего слоя печи выполнена из высококачественных периклазоуглеродистых огнеупорных материалов (более 700 плавков).

Указанные возможности позволяют выплавлять в электродуговой печи полупродукт с различным содержанием углерода, в том числе и низким (менее 0,03 %), что при дальнейшей внепечной обработке значительно упрощает получение особо низкоуглеродистой стали.

Технологические возможности производства позволяют вести дальнейшую внепечную обработку полупродукта на вакууматоре и установке ковш-печь по схемам ДСП-ковш-печь-вакууматор-МНЛЗ (прямая) и ДСП-вакууматор-ковш-печь-МНЛЗ (обратная).

Цель настоящего исследования состояла в разработке технологии получения низкоуглеродистого полупродукта в электродуговой печи ДСП-2 Молдавского металлургического завода для производства особо низкоуглеродистой стали для пластичной катанки. Максимально допустимое содержание в стали углерода составляло до 0,01, кремния и марганца до — 0,01 и 0,12 %.

**Статистический анализ технологии получения низкоуглеродистого полупродукта в электродуговой печи.** С целью обоснования рациональных параметров технологии получения особо низкоуглеродис-

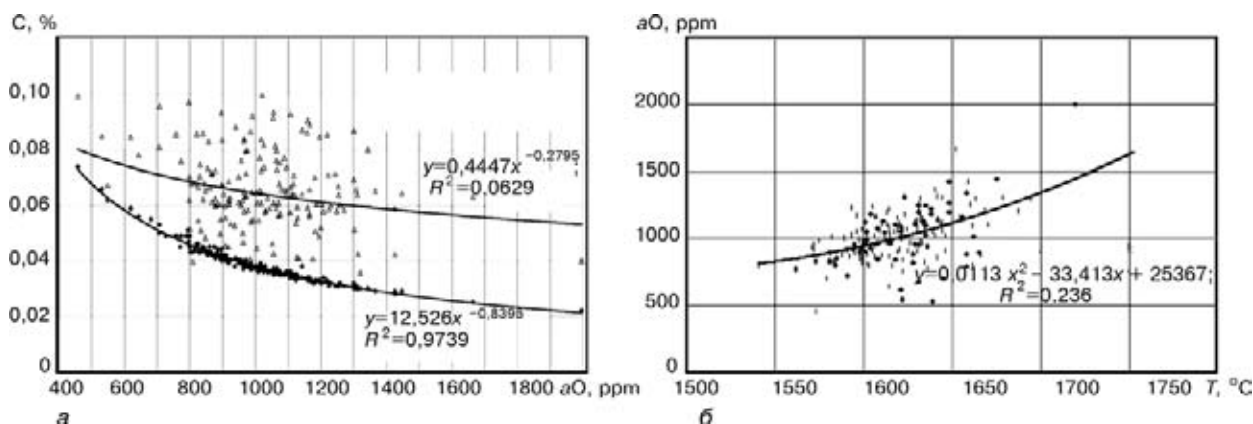


Рис. 1. Зависимость содержания углерода и окисленности aO стали на выпуске (а), а также влияние температуры на окисленность (б); ◆ — по окисленности; Δ — по химическому анализу

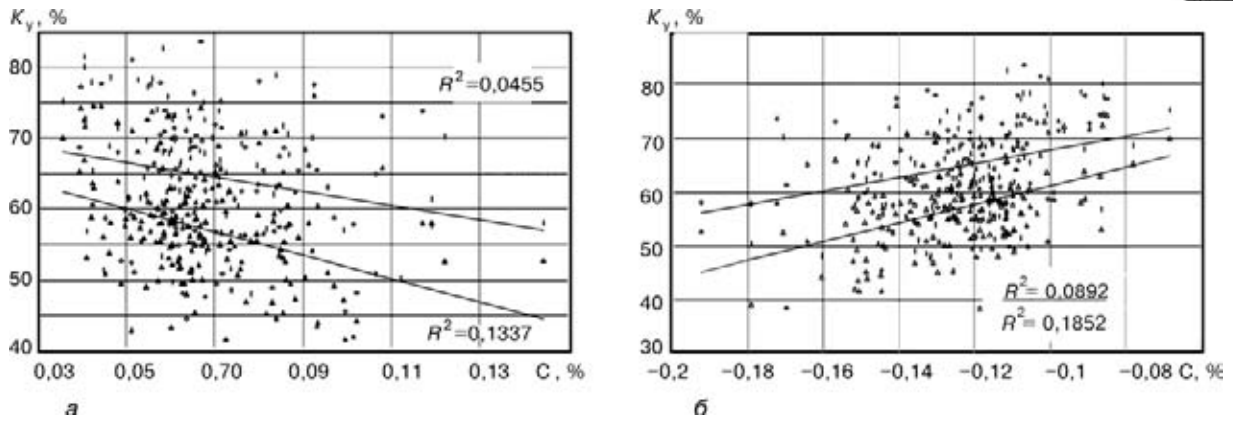


Рис. 2. Влияние массовой доли углерода на выпуске  $C_{\text{вып}}$  (а) и изменения его содержания в ковше-печи (б) на количество угара  $K_y$  раскислителей;  $\blacklozenge$  — кремний;  $\Delta$  — марганец

тых сталей выполнили статистический анализ параметров более 200 плавов текущего производства.

Для определения эффективности окисления углерода в ванне ДСП-2 различными дутьевыми устройствами установлены зависимости его конечного содержания в полупродукте от удельного расхода кислорода на этих устройствах (таблица).

Установлено, что расход кислорода на топливных устройствах («Палмур» и горелка-копье «Stein lange») слабо влияет на содержание углерода в металле на выпуске; ощутимо на «нетопливных» устройствах — подача его на донные фурмы и кислородную трубу, применяемые не на всех плавках (40,43 и 30,85 % общего количества выборки), что является резервом получения низкого содержания углерода на выпуске.

Получению низкого содержания углерода в металле на выпуске может способствовать шлаковый режим нагрева ванны в последний период плавки, что исключает переход углерода в металл из электродов электродуговой печи.

Окисленность металла (измеренная датчиками SELOX) на выпуске определяется массовой долей углерода в металле (рис. 1, а) и зависит от температуры металла (рис. 1, б).

Следует отметить существенный разброс значений окисленности металла в зависимости от содержания углерода, определяемого химическим анализом, причем превышение в большинстве случаев фактических над определенными по замеру окисленности. Указанные различия могут быть обусловлены временем отбора пробы и выполнения замера окисленности.

В целом статистически достоверно установлена возможность получения низкого содержания углерода на выпуске. Массовая доля углерода в полупродукте по данным химического анализа колеблется в пределах 0,025... 0,095 %, а замера окисленности — 0,025... 0,038 %. Окисленность и температура металла на выпуске (1100... 2100 ppm, 1653... 1741 °C) значительно превышают обычные значения в конвертерных процессах производства стали.

Количество углерода и активного кислорода в исходном металле перед ковшем-печью оказывает существенное влияние на угар элементов-раскисли-

телей (обратно и прямо пропорционально). Зависимости угара кремния и марганца от содержания углерода на выпуске из печи (рис. 2, а) и изменения количества углерода на ковше-печи (рис. 2, б) показывают, что чем полнее происходит обезуглероживание металла на ковше-печи, тем меньше угар раскислителей.

Анализ данных о содержании серы в полупродукте на выпуске из ДСП-2 показал, что оно существенно выше среднего в металлошихте, даже если принять последнее на уровне верхнего предела для рядовых марок стали (0,04 % S). В печи зафиксировано увеличение массовой доли серы за счет вдвигания углеродсодержащих материалов.

В то же время в сталеплавильных процессах при продувке кислородом, высоких значениях температуры и окисленности металла сера частично удаляется в газовую фазу. Так, в работе [3] приводятся данные о том, что в окислительный период плавки

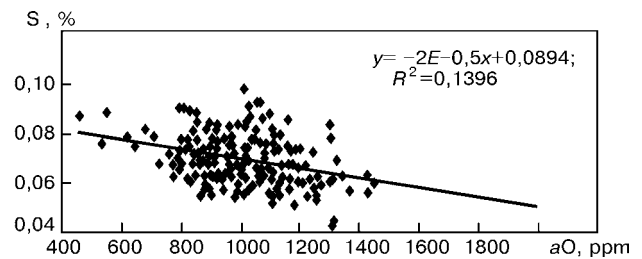


Рис. 3. Окисленность металла на выпуске и содержание серы в полупродукте

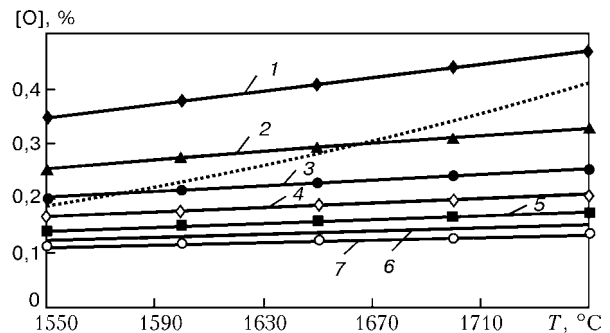


Рис. 4. Зависимость равновесного содержания кислорода в железе от температуры при различном количестве углерода, %; 1 — 0,004; 2 — 0,006; 3 — 0,008; 4 — 0,010; 5 — 0,012; 6 — 0,014; 7 — 0,016; штриховой линией показана растворимость кислорода в железе

в электродуговой печи от 36 до 50 % серы, внесенной всеми шихтовыми материалами, удаляется из печи с печными газами. Связь между концентрацией серы в полупродукте на выпуске и окисленностью металла прослеживается и для рассмотренных плавок (рис. 3).

Существенной зависимости между содержанием серы в полупродукте и температурой металла на выпуске не установлено, что свидетельствует о преобладающем влиянии вдувания кислорода в печь и окисленности металла на удаление серы в газовую фазу.

Поскольку на выпуске из печи содержание серы существенно выше, чем требуется стандартами, очевидно, что десульфурация металла осуществляется в ходе внепечной обработки. Естественно, более низкое содержание серы в металле на выпуске способствует лучшему протеканию последующего процесса десульфурации, снижению расхода шлакообразующих и десульфураторов.

**Обоснование и опытная проверка технологических особенностей производства низкоуглеродистого полупродукта.** Основные термодинамические параметры реакции обезуглероживания стали, приводимые в литературных источниках, рассчитаны для температуры 1600 °С. Реальная же температура металла на выпуске из ДСП существенно выше. Поэтому представляло интерес оценить равновесные значения содержаний кислорода в металле при 0,002... 0,016 % углерода для интервала температур 1550... 1750 °С (рис. 4).

Результаты расчета показали, что при уменьшении массовой доли углерода в металле равновесное содержание кислорода в железе увеличивается и при массовой доле менее 0,004 % углерода и температуре 1750 °С превышает предел растворимости кислорода в железе.

При понижении температуры до уровня вакуумирования и начала доводки в ковше-печи создаются условия для удаления углерода за счет сверхравновесного (при этих температурах) количества кислорода в металле (наличие FeO в виде отдельной фазы).

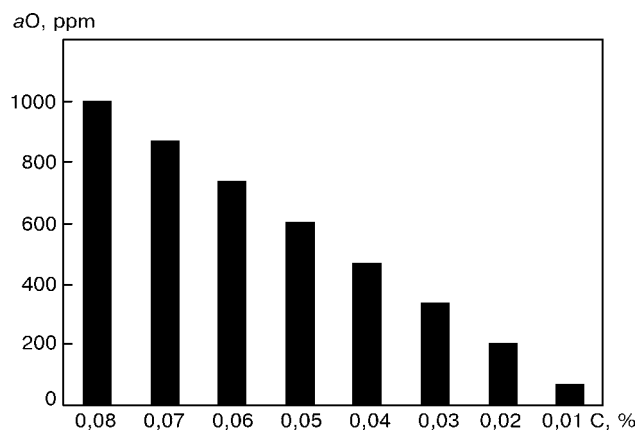


Рис. 5. Необходимый уровень окисленности для обезуглероживания стали до 0,005 % при различном исходном содержании углерода

Следовательно, окисленность полупродукта при получении особо низкоуглеродистой стали должна быть достаточной для обеспечения удаления углерода из исходного полупродукта до заданного предела, углерода, поступающего из ферросплавов (при раскислении стали) и электродов (при нагреве стали в ковше-печи), а также из периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша (количество углерода в районе шлакового пояса 10... 12, в футеровке стен и днища — 6 %).

Путем расчета определено минимально необходимое количество активного кислорода для получения в стали 0,005 % углерода при его исходном различном содержании в полупродукте (рис. 5).

Сравнение расчетных и данных статистического анализа показывает, что реальная окисленность полупродукта при выпуске из ДСП-2 колеблется в диапазоне 458... 1997 ppm (среднее значение по 200 плавкам — 1015 ppm).

Экспериментально установлено, что при внепечной обработке полученного полупродукта (вакуумирование и доводка на ковше-печи) достигается конечное количество углерода в металле менее 0,01 % даже при его исходном содержании (по данным химического анализа) 0,07... 0,08 % и окисленности металла на выпуске из печи выше 1100 ppm. Такая окисленность металла на выпуске обеспечивает окисление и дополнительного количества углерода, поступающего в металл.

Таким образом, окисленность на выпуске является достаточной (а зачастую избыточной) для удаления углерода при дальнейшей внепечной обработке металла.

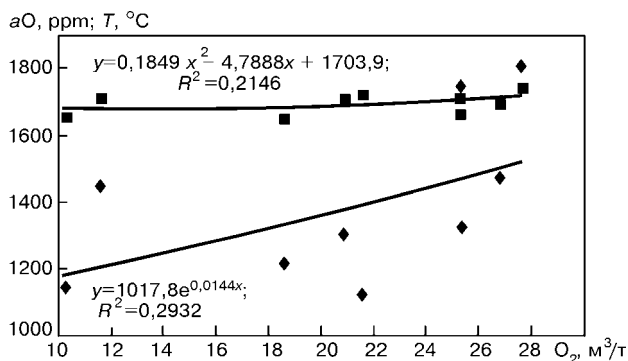


Рис. 6. Зависимость температуры и окисленности металла на выпуске от расчетного количества кислорода, идущего на окисление примесей; ■ — температура, °С; ◆ — aO, ppm

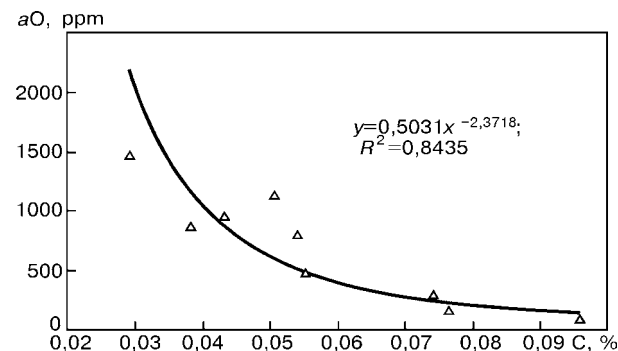


Рис. 7. Уровень переокисленности стали на опытных плавках



В этой связи проведены экспериментальные плавки, для которых рассчитано количество кислорода, идущего на окисление примесей, составляющего разницу между общим расходом кислорода в печь и затрачиваемым на горение кокса (содержание углерода принято равным 95 %) и метана.

Экспериментальные данные показывают, что между расходом кислорода сверх стехиометрии реакций горения топлива и получаемой на выпуске окисленности, а также температурой металла существует тесная взаимосвязь (рис. 6). Очевидно, что для получения высокого уровня окисленности металла на выпуске следует увеличивать расход кислорода, вдуваемого в ДСП, на окисление примесей стали (сверх кислорода на горение топлива).

Высокая степень окисленности металла на выпуске зафиксирована в тех случаях, когда расход кислорода, вдуваемого в ДСП, превышает необходимый по стехиометрии реакций горения топлива.

За счет количества кислорода сверх стехиометрического происходит окисление углерода и других примесей металлошихты. В то же время получение очень высокой окисленности нежелательно из-за уменьшения выхода годного (угар железа) и снижения стойкости футеровки.

Тем самым результаты опытного опробования подтверждают зависимости, полученные статистической обработкой параметров плавки текущего производства.

Оценили уровень переокисленности металла (рис. 7), определенный как разность между измеренной окисленностью полупродукта и содержанием кислорода, минимально необходимым для обезуглероживания.

Снятие переокисленности металла рационально производить путем введения алюминия (предусмотрено технической инструкцией) или углеродсодержащих материалов. При этом уровень присадки материалов на снятие окисленности должен определяться степенью переокисленности металла. Так, в случае перерасхода алюминия снижается потенциальная возможность удаления углерода при вакуумировании (необходимо дополнительно введение кислорода в том или ином виде), а в случае недотатка алюминия возникает чрезмерный угар силикомарганца.

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что возможности электродуговой печи СЗАО ММЗ позволяют получать полупродукт, пригодный для выплавки особо низкоуглеродистой стали. Установлено, что для получения стали целевого состава окисленность полупродукта должна обеспечивать полноту вакуум-углеродного раскисления металла и приближаться к минимальной. Следует учитывать возможные поступления углерода в металл на ковш-печь с ферросплавами и в результате его перехода из графитированных электродов и огнеупорной футеровки сталеразливочного ковша.

Полученные результаты использованы авторами при разработке технологии дальнейшей внепечной обработки (вакуумирование, раскисление и нагрев на ковше-печи) полупродукта для получения особо низкоуглеродистой стали.

### Выводы

1. Показано, что для получения особо низкого содержания углерода в готовой стали полупродукт на выпуске плавки из ДСП-2 должен иметь довольно высокие значения окисленности и температур.

2. Установлено, что для достижения низкого содержания углерода в металле на выпуске можно рекомендовать шлаковый режим нагрева ванны в последний период плавки и повышенный расход кислорода на нетопливные дутьевые устройства.

3. Результатами опытно-промышленного опробования доказана возможность производства особо низкоуглеродистой стали (массовая доля углерода в металле менее 0,01%) в условиях комплекса ДСП-вакууматор-ковш-печь без использования кислорода при внепечной обработке полупродукта.

1. *Петрущев А. А.* Металлургия и применение IF-сталей // Сталь. — 1990. — № 9. — С.102-103.
2. *Berry B., Ritt A., Grayssel M.* Retrospectives of twentieth century steel // News steel. — 1999. — November. — P. 131-133.
3. *Меджибожский М. Я.* Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. — Киев; Донецк: Вышш. шк., 1986. — 280 с.

СЗАО «Молдавский металлургический завод», Рыбница  
Нац. металлург. акад. Украины, Днепропетровск

Поступила 16.03.2006