



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

N2, ТОМ 16 (2010) 105-112

УДК 669.02/09: 669.18: 620.22

(10)-0212-1

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ШЛЕЙФОВОЇ ПРОДУВКИ РОЗПЛАВУ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ НА ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛІЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ

В. С. Живченко, С. О. Фролова, В. Д. Александров

Донбаська національна академія будівництва і архітектури,

вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Україна, 86123.

E-mail: primetw@mail.ru

Отримана 9 квітня 2010; прийнята 23 квітня 2010

Анотація. У даній статті наведені результати практичних досліджень процесів при продувці рідкого металу газом. При моделюванні процесів встановлено, що зменшення відстані між пухирцями газу приводить до роздвоєння траєкторій руху завдяки впливу кільватерного сліду попереднього пухирця, а збільшення розмірів пухирців приводить до їхньої пульсації у вертикальній площині аж до дроблення на більш дрібні. Крім того, виявлено, що максимальний ефект видалення неметалічних включень отримується при шлейфовій продувці розплаву через пористі шви днища ковша або строкочілинові секції в дрібнопухирцевому режимі. За результатами моделювання побудовані залежності ступеня рафінування, кількості пухирців і їх поведінки від інтенсивності продувки розплаву. Наведені результати, отримані при здійсненні технології шлейфової продувки металу в дрібнопухирцевому режимі на підприємствах чорної металургії.

Ключові слова: продувка інертним газом, інтенсивність продувки, ступінь рафінування, дрібнопухирцевий режим, шлейфова продувка, строкочілинові секції.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ШЛЕЙФОВОЙ ПРОДУВКИ РАСПЛАВА КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ НА УДАЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В. С. Живченко, С. А. Фролова, В. Д. Александров

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,

ул. Державина, 2, г. Макеевка, Украина, 86123.

E-mail: primetw@mail.ru

Получена 9 апреля 2010; принята 23 апреля 2010

Аннотация. В данной статье приведены результаты теоретических и практических исследований процессов при продувке жидкого металла газом. При моделировании процессов установлено, что уменьшение расстояния между пузырьками газа приводит к раздвоению траекторий движения благодаря воздействию кильватерного следа предыдущего пузырька, а увеличение размеров пузырьков приводит к их пульсации в вертикальной плоскости вплоть до дробления на более мелкие. Кроме того, выявлено, что максимальный эффект удаления неметаллических включений получается при шлейфовой продувке расплава через пористые швы днища ковша или строкочнощелевые секции в мелкопузырьковом режиме. По результатам моделирования построены зависимости степени рафинирования, количества пузырьков и их поведения от интенсивности продувки расплава. Приведены результаты, полученные при осуществлении технологии шлейфовой продувки металла в мелкопузырьковом режиме на предприятиях черной металлургии.

Ключевые слова: продувка инертным газом, интенсивность продувки, степень рафинирования, мелкопузырьковый режим, шлейфовая продувка, строчечнощелевые секции.

INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY OF A DAISY-CHAIN BLOWDOWN OF A STRUCTURAL STEEL MELT TO REMOVE NON-METALLIC INCLUSIONS

V. S. Zhivchenko, S. A. Frolova, V. D. Alexandrov

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

Derzavin str. 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.

E-mail: primew@mail.ru

Received 9 April 2010; accepted 23 April 2010

Abstract. There are given the results of theoretical and practical investigations of the processes of blowing down a liquid metal with a gas. When simulating the processes there was fixed that a decrease of the distance among gas bubbles results in the bifurcation of paths of motion due to the affect of a swirl of a previous bubble, and an increase of bubbles dimensions leads to their pulsation in the vertical plane up to their breaking into smaller ones. Besides, there was found out that the most maximum effect of nonmetallic inclusions removal is observed at a daisy-chain blow-down of a melt through porous seams of a bucket floor or through line-slot sections in a small-bubble regime. On the base of the simulation results there were plotted dependences of the refinement degree, numbers of bubbles and their behavior and the melt blow-down intensity. There are given the results obtained when implementing the technology of the daisy-chain blow-down of a metal in the small-bubble regime at the ferrous metallurgy enterprises.

Keywords: blow-down with an inert gas, blow-down intensity, refinement degree, small-bubble regime, daisy-chain blow-down, line-slot sections.

Введение

К настоящему времени в черной металлургии достаточно полно разработано понятие "чистой" стали в зависимости от требований, предъявляемых потребителями к качеству металлоконструкций.

В отношении ряда марок стали для удовлетворения требований потребителя не обязательно стремиться к значительному снижению количества неметаллических включений, а достаточно обеспечить их регламентированное остаточное содержание определенного состава и морфологии. В металлургии на современном этапе эта задача успешно решается при внепечной обработке стали порошковыми проволоками с наполнителями из химически активных элементов [1].

Наряду с этим, возрастает интерес к производству конструкционных сталей, особо чистых по неметаллическим включениям. Решающую роль при этом оказывает гидродинами-

ка системы металл-шлак при продувке стали инертным газом. В настоящее время используют продувочные устройства, которые можно условно разделить на два типа: устройства с небольшой рабочей поверхностью и концентрированным вводом газа в расплав и устройства с развитой рабочей поверхностью и рассредоточенным вводом газа.

Основная часть

Удаление неметаллических включений из стали и ассимиляция их шлаком при перемешивании расплава инертным газом происходит по следующей схеме: всплывание крупных включений; коагуляция их в потоке расплава за счет образующегося градиента скоростей; флотация мелких включений всплывающими пузырьками газа. В процессе удаления неметаллических включений степень влияния этих факторов изменяется, и для получения особо

чистой стали превалирующее значение приобретают два последних.

При коагуляции мелких включений главным фактором в процессе их удаления является время коагуляции τ_{zp} , которое в спокойном металле достаточно велико [2]. С появлением гетерогенных скоростных потоков время градиентной коагуляции τ_{zp} включений резко уменьшается и оценивается по формуле [3]:

$$\tau_{zp} = \frac{a}{n_o \cdot r^3} \cdot \frac{R}{q[1 - (\sqrt[3]{1 + u \cdot b/q})^{-1}]}, \quad (1)$$

где a, b — эмпирические постоянные; n_o — начальное количество частиц; R — радиус пузырька; q — расход газа; u — скорость подъема пузырька; τ_{zp} — время коагуляции, r — размер неметаллического включения.

Из уравнения (1) видно, что эффективность удаления неметаллических включений зависит не только от времени их коагуляции, но и от времени их удаления из расплава. При прохождении газовых пузырьков происходит осаждение включений на их поверхность и дальнейшее флотационное удаление. Тем не менее, первичной является коагуляция, зависящая от размера пузырьков R , их количества N , которое, в свою очередь, зависит от расхода газа q и скорости их подъема u .

При флотации неметаллических включений ее скорость определяется коэффициентом осаждения E :

$$E = \frac{n_i}{n'_o}, \quad (2)$$

где n_i — количество частиц, соприкасающихся с пузырьком; n'_o — количество частиц в столбе расплава с диаметром, равным диаметру пузырька.

Число частиц, флотируемых в каждом столбе расплава, определяется по формуле:

$$\sum_{i=1}^N n_i = n'_o [1 - (1 - E)^N]. \quad (3)$$

Соответственно, количество пузырей газа N , необходимых для уменьшения неметаллических включений в k раз, находится из равенства:

$$N = \frac{\lg k}{\lg(1 - E)}. \quad (4)$$

Перечисленные уравнения (1-4) были использованы при моделировании траектории прохождения газовых пузырей в жидкости и определении флотационной способности газовых пузырей.

Физическое моделирование широко применяется для разработки и совершенствования конструкции продувочных узлов, исследования распределения и усвоения вдуваемых реагентов в струе инертного газа, оценки времени смешения и необходимого времени гомогенизации. Количественное описание процесса перемешивания дано во многих работах [4], однако наиболее разработанными следует признать модели, основанные на решении уравнений Навье-Стокса и оценке работы изотермического расширения пузырей. Решение уравнений Навье-Стокса является достаточно сложной математической задачей, требующей значительных расходов на программирование, отладку программ и отработку результатов. Кроме того, для описания турбулентности используются полуэмпирические модели, основанные на ряде допущений [5]. Поэтому основным способом

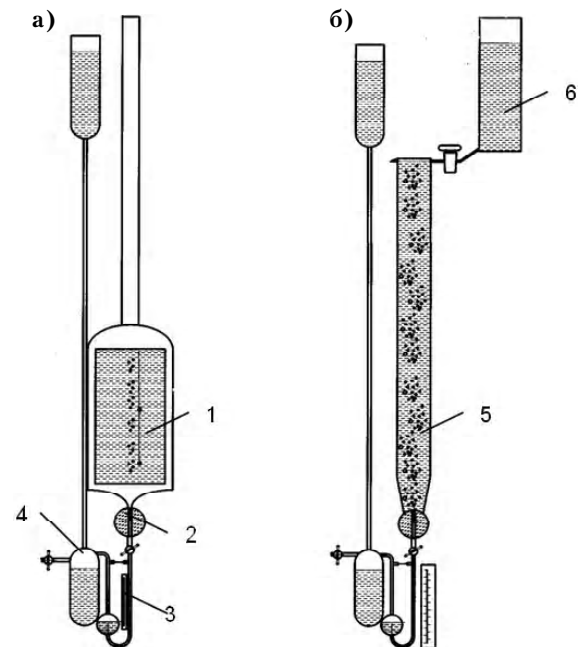


Рис. 1. Схема установок для физического моделирования: а) траектория прохождения газовых пузырей в жидкости; б) определение флотационной способности газовых пузырей.

исследования гидродинамики прохождения пузырьков через расплав является моделирование на водяных моделях, которое основано на подобию процессов и явлений, протекающих в моделируемом агрегате и на модели (рис. 1).

Нами разработаны установка (а) для определения траектории прохождения газовых пузырей, состоящая из смотровой камеры 1, капилляра 2, реометра 3 и напорного устройства 4 и установка (б) для определения флотационной способности газовых пузырей, в которой смотровая камера 1 заменена флотационной колонной 5 и смывающей емкостью 6 [6].

При определении траектории и количества пузырьков воздух через капилляр 2 подавался в смотровую камеру 1. Траекторию движения газовых пузырьков фиксировали фотосъемкой. Расход воздуха устанавливался по реометру 3. Стабилизация давления воздуха перед капил-

ляром осуществляется устройством 4. В установке (б) флотационная колонна 5 служит для определения флотационной способности газовых пузырьков, а емкость 6 служит для удаления отфлотированного графита. Флотационную способность определяли взвешиванием отфлотированного графита и отношением его к исходному.

По результатам наших исследований [6] на прозрачной модели построены зависимости влияния интенсивности подачи газа в жидкость через один капилляр на удельное количество пузырьков, траектории их движения, а также степени рафинирования от твердых не коагулирующих частиц (рис. 2).

Эти исследования показали, что уменьшение расстояния между пузырьками до 20 калибров приводит к раздвоению траекторий движения благодаря воздействию кильватерного

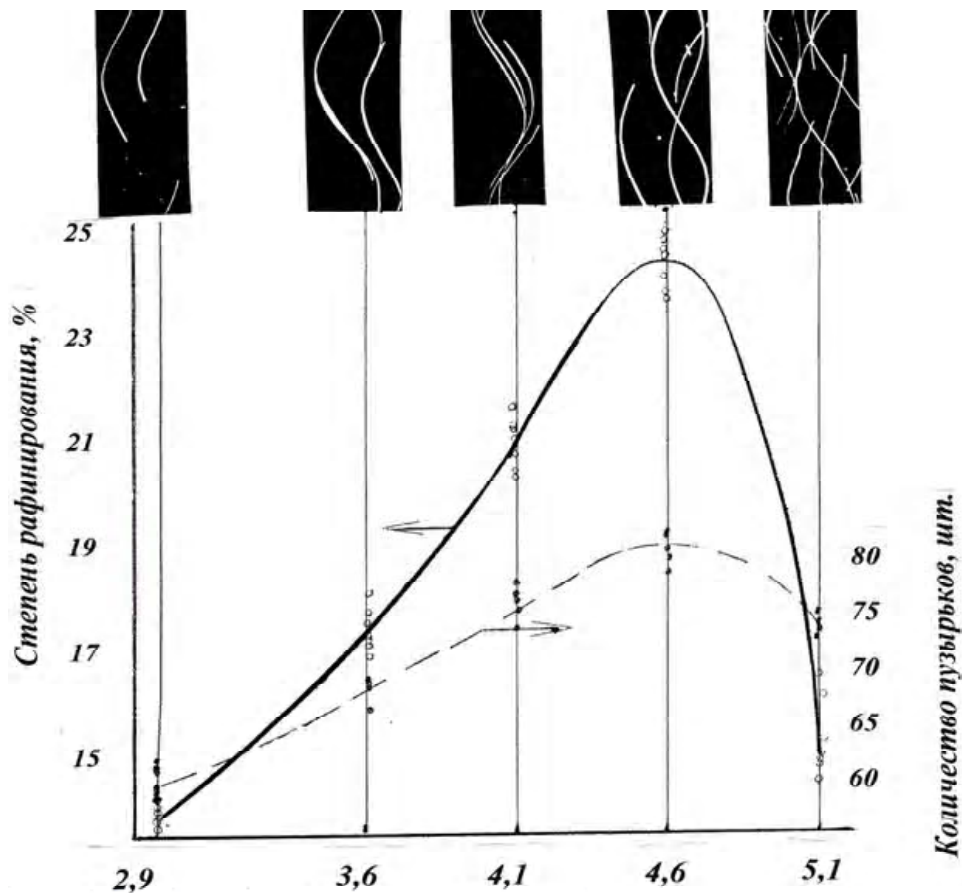


Рис. 2. Влияние интенсивности продувки на степень рафинирования, количество пузырьков и траекторию их движения.

следа предыдущего пузырька. Увеличение размера пузырьков приводит к их пульсации в вертикальной плоскости вплоть до дробления на более мелкие. По результатам моделирования построены зависимости степени рафинирования, количества пузырьков и их поведения от интенсивности продувки.

Сопоставляя величины степени рафинирования с соответствующими фотографиями траекторий движения пузырьков газа, можно установить следующие закономерности: начало вибрации приводит к резкому снижению степени рафинирования; кроме того, на степень рафинирования существенно влияют количество и размер пузырьков докритического расхода газа (рис. 3, а). Таким образом, с целью более эффективного рафинирования стали от неметаллических включений продувка должна производиться на максимальной площади с максимальным количеством пузырьков и интенсивностью продувки, не допускающей их вибрацию.

Моделирование процесса продувки расплава металла аргоном через газопроницаемую пробку (с учетом краевого угла смачивания на границе жидкость-подложка, скорости выхода газа из пор, теплового расширения) показало, что в момент выхода газа из капилляров, пузырьки сливаются при закритическом расходе газа, образуя крупно пузырьковый газовый поток (рис. 3, б).

Наиболее полно реализуется выполнение условий удаления неметаллических включений при продувке расплава через пористые швы днища ковша или строчечнощелевые секции, из которых монтируется блок [6-8, 10].

Проведенные нами исследования на прозрачных моделях процесса истечения газа в жидкость из газопроницаемых швов (с площадью на образце равной 390 см^2) показало, что газовый поток имеет вид отдельных шлейфов, состоящих из пузырьков диаметром $0,5-1,0 \text{ см}$. Образование грибообразных пузырей во всем интервале расхода газа не происходило (рис. 4).

Из приведенных фотографий видно, что в зависимости от интенсивности продувки можно реализовать два режима потоков газа — ламинарный, при максимально развитом процессе флотации; турбулентный — при котором успешно протекает процесс турбулентных пуль-

саций, способствующих коагуляции мелких включений.

Кроме того, из рисунка 4, б четко видны сплошные, без затенений, газо-металлические потоки. Слияния пузырьков на фотографиях не обнаружено.

При этом увеличивается не только суммарная продуваемая площадь в 3-8 раз, но и самое главное — газ проходит через тонкие ($0,8-1,0 \text{ мм}$) швы между капиллярами или щелевые капилляры ($0,18-0,20 \text{ мм}$), обеспечивающие мелкопузырьковый режим выходящего газа.

Это обстоятельство коренным образом влияет на условия получения газового потока, распределенного по объему жидкого металла в виде отдельных шлейфов с мелкопузырьковой структурой.

Подача газа через пористые швы позволяет производить продувку в мелкопузырьковом режиме с удельной интенсивностью более $3,5 \text{ л/мин/см}^2$.

При продувке расплава через пробку удельная интенсивность продувки из расчета на 1 см^2 поверхности пористой пробки не должна превышать $0,7 \text{ л/мин}$. Согласно данным работы [9] продувка металла через пробку в 180-т ковше производится с интенсивностью менее 100 л/мин . При таком расходе обеспечивается пузырьковое истечение газа в расплав. Увеличение интенсивности до 150 л/мин приводит к резкому снижению степени удаления неметаллических включений. Для сохранения пузырькового режима необходимо увеличение числа пробок.

Заключение

Анализ продувки нержавеющей стали (100 плавок) аргоном через пористые швы в 60-т ковшах показал следующее [10]. Обработка стали с расходом $0,07 \text{ м}^3/\text{т}$ в течение 5 мин привела к существенному увеличению количества крупных глобулей. Сокращение времени продувки приводит к некоторому снижению крупных глобулей. Продувка металла свыше 9 мин позволила снизить отбраковку по этому показателю более чем в 8 раз.

Таким образом, для эффективного удаления неметаллических включений продувку жидкого металла предпочтительней производить через газопроницаемые швы в днище ковша или

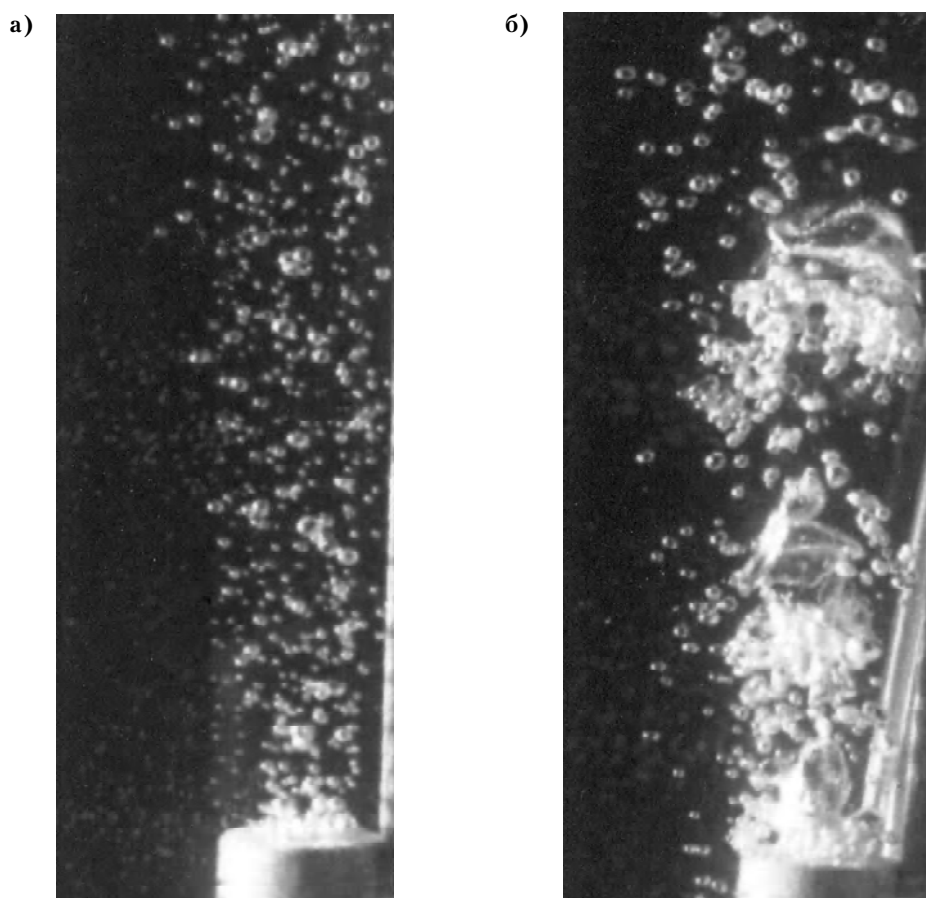


Рис. 3. Влияние интенсивности продувки через пористую пробку на вид газового потока в жидкости: а) докритический расход газа; б) закритический расход газа.

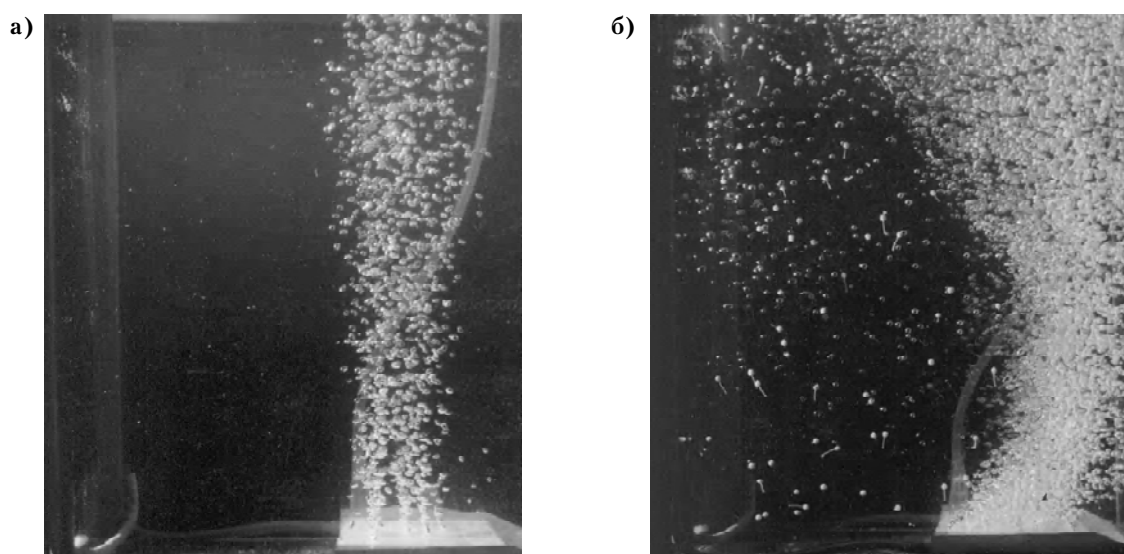


Рис. 4. Влияние интенсивности продувки на поведение газовых потоков в жидкости: а) ламинарное движение; б) турбулентное движение.

строчечноцелевые секции, из которых монтируется блок [11]. При этом продувка должна производиться в два этапа: с интенсивностью, обеспечивающей турбулентность режима движения газов для коагуляции неметаллических включений, и с интенсивностью, обеспечивающей ламинарный режим движения газового потока для флотации остаточных мелких включений.

Литература

1. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Кисиленко В.В., Онищук В. П. // Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками. — Донецк: Юго-Восток, 2002. — С. 296.
2. Попель С.И. Физико-химические основы производства стали. — М.: Наука, 1964. — С. 15.
3. Попель С.И., Немченко В.П. // Процессы раскисления и образования неметаллических включений в стали. — М.: Наука, 1977. — С. 22-33.
4. Suvankar Ganguly, Suman Chakraborty. Numerical Investigation on Role of Bottom Gas Stirring in Controlling Thermal Stratification in Steel Ladles // ISIJ International.— 2004. — Vol. 44. — N 3. P. 537-546.
5. Madan M, Satish D., Mazumdar D. Modeling of Mixing in Ladles Fitted with Dual Plugs // ISIJ International. — 2005. — Vol. 45. N 5. P. 677-685.
6. Живченко В.С., Фролова С.А., Троцан А.И. Гомогенизация и рафинирование стали продувкой аргоном в шлейфовом мелкопузырьковом режиме // Черная металлургия. — Бюл. научно-технич. и эконом. информации. — Москва. — 2008. — Вып. 2(1298). — С. 70-75.
7. Живченко В.С., Парахин Н.Ф. // Сталь. — Москва. — 1979. — № 4. — С. 45-47.
8. Блащук Н.М., Живченко В. С., Дадонов М.К. // Сталь. — Москва. — № 9. — С. 30-31.
9. Свяжин А.Г., Романович Д.А., Шахпазов Е.Х. // Труды шестого конгресса сталеплавильщиков. — М.: Черметинформация, 2001. — С.333-336.
10. Живченко В.С., Олейник Ю. В., Дырул О.М. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2002. — № 7. — С. 163-166.
11. Живченко В.С. Зубков М.И., Кондратенко С.В. Блок для обробки жидкого металла газами. Декларационный патент на полезную модель №24045 11.06.07. Бюл. №8.

Живченко Володимир Семенович — старший науковий співробітник, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Фізика і фізичне матеріалознавство" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: термодинаміка і кінетика кристалізації металів і сплавів.

Фролова Світлана Олександрівна — кандидат хімічних наук, доцент кафедри "Фізика і фізичне матеріалознавство" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: термодинаміка і кінетика кристалізації металів і сплавів.

Александров Валерій Дмитрович — професор, доктор хімічних наук, завідувач кафедри "Фізика і фізичне матеріалознавство" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: термодинаміка і кінетика кристалізації металів і сплавів.

Живченко Владимир Семенович — старший научный сотрудник, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры "Физика и физическое материаловедение" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: термодинамика и кинетика кристаллизации металлов и сплавов.

Фролова Светлана Александровна — кандидат химических наук, доцент кафедры "Физика и физическое материаловедение" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: термодинамика и кинетика кристаллизации металлов и сплавов.

Александров Валерий Дмитриевич — профессор, доктор химических наук, заведующий кафедрой "Физика и физическое материаловедение" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры". Научные интересы: термодинамика и кинетика кристаллизации металлов и сплавов.

Zhivchenko Vladimir Semenovich – a senior researcher, an associate professor of the Department "Physics and Physical Materials Science" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamics and kinetics of metal and alloy crystallization.

Frolova Svetlana Alexandrovna – Ph.D. (Eng.), an associate professor of the Department "Physics and Physical Materials Science" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamics and kinetics of metal and alloy crystallization.

Alexandrov Valery Dmitrievich – professor, Dr. Sc. (Chem.), Head of of the Department "Physics and Physical Materials Science" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermodynamics and kinetics of metal and alloy crystallization.