

УДК 669.117.56

ПРОБЛЕМЫ РАЗЛИВКИ ЖИДКОЙ СТАЛИ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ

**А. К. Цыкуленко, Б. Б. Федоровский, В. Б. Смолярко,
П. И. Загоровский, Л. Б. Медовар, В. А. Рябинин,
В. М. Журавель, В. М. Ярош**

Рассмотрены проблемы, возникающие при разливке жидкого металла с малой скоростью в некоторых технологических процессах металлургии. Показано, что эти проблемы можно решить с помощью специального устройства, позволяющего нагревать разливочный стакан током высокой частоты, генерируемым малогабаритным транзисторным преобразователем электроэнергии.

Problems, occurring during pouring of molten metal at a low speed in some technological processes of metallurgy, are considered. It is shown that these problems can be solved by using a special device allowing heating a pouring nozzle by high-frequency current generated by a small-sized transistor converter of electric power.

Ключевые слова: разливка металла с малой скоростью; обогреваемый ковш; донный выпуск индукционный нагрев; разливочный стакан; транзисторный преобразователь

В литейном и металлургическом производстве в некоторых случаях требуется разливать металл малыми порциями (несколько килограммов и даже меньше) из ковшей (или промежуточных ковшей) сравнительно большой вместимости. И если для металлов с низкой температурой плавления это можно успешно осуществить разными способами, то, например, для разливки малыми порциями стали необходимо решить ряд проблем.

Одна из основных проблем вызвана снижением температуры жидкого металла в разливочном ковше при транспортировке и выполнении технологических операций. Среднее уменьшение температуры металла в ковше зависит от его вместимости, температуры предварительного подогрева, толщины шлакового покрова и многих других факторов. Поэтому сведения по этому вопросу довольно противоречивы. Согласно данным работы [1], среднее снижение температуры жидкой стали в ковше во время разливки при нормальных условиях (подогретый ковш, наличие довольно толстого шлакового покрова) составляет для ковшей вместимостью 30... 50 т 0,7... 0,9 град/мин, а для ковшей вместимостью свыше 250 т — 0,3 град/мин. Общее уменьшение температуры металла во время разливки дос-

тигает 20... 40 °С, продолжительность разливки — 30... 90 мин. Оптимальным превышением температуры жидкой стали, поступающей, например в кристаллизатор МНЛЗ, над температурой ликвидуса считается 10... 20 °С. При этом для компенсации тепловых потерь в процессе непрерывной разливки температура металла в ковше должна быть выше ликвидуса на 30... 60 °С.

Несколько большую скорость снижения температуры стали в ковше дает источник [2], в котором для 200-тонного ковша падение температуры металла равняется приблизительно 1 град/мин. В работе [3] скорость снижения температуры металла в ковше вместимостью 10 т оценена в 3 град/мин. Интерполируя литературные данные, можно приблизительно установить скорость охлаждения жидкого металла в разливочных ковшах разной вместимости. Принимая общее снижение температуры металла в ходе разливки 20... 40 °С, получим допустимое время разливки из ковшей разной вместимости (рис. 1). Для разливочных ковшей указанного диапазона вместимости (10... 250 т) это время составляет ориентировочно 10... 100 мин, т. е. диапазон скоростей разливки из разливочных ковшей достигает 1,0... 2,5 т/мин.

Вместе с тем с развитием металлургии, в частности появлением процессов порошковой метал-

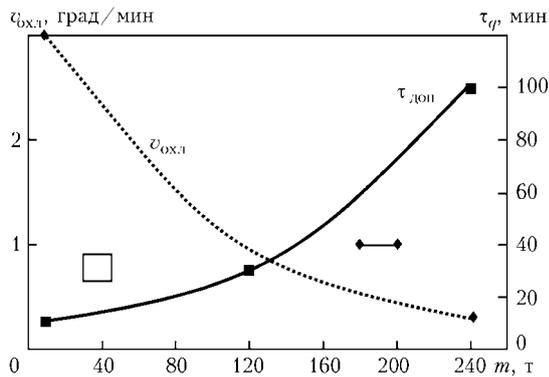


Рис. 1. Ориентировочные значения скорости охлаждения v_{oxl} и допустимого времени τ_d разливки жидкой стали в зависимости от вместимости разливочного ковша; m — масса жидкого металла

лургии, потребовалось существенное снижение скоростей разливки жидкой стали, что связано с необходимостью распыления струи жидкого металла газом под давлением. Сейчас оптимальные условия для распыления жидкого металла создаются при скорости подачи 1,5... 2,0 т/ч через выпускное отверстие диаметром 6,5... 7,0 мм. Такое уменьшение скорости (на порядок по сравнению с обычной) делает невозможной разливку сколько-нибудь значительного объема жидкого металла без подогрева в разливочном ковше из-за недопустимого охлаждения жидкого металла и зарастания выпускного отверстия.

В последние годы интенсивно развиваются способы специальной электрометаллургии с использованием жидкого металла. По сути, переплавные процессы можно рассматривать как разливку жидкого металла на малой скорости, когда жидкий металл приготавливается и разливается с одинаковой скоростью. Использование больших объемов жидкого металла, полученных в высокопроизводительных и экономичных сталеплавильных печах, по сравнению с плавлением расходуемых электродов в водоохлаждаемых кристаллизаторах, обеспечивает технологические и экономические преимущества. Однако здесь требуется решение проблем, связанных с созданием условий для продолжительного хранения жидкого металла и обеспечением малых скоростей разливки. Установлено, что оптимальная производительность выплавки слитков связана с их диаметром простым соотношением: производительность (кг/ч) равняется диаметру (мм). Таким образом, основная часть сортамента электрошлаковых слитков (диаметром до 1000 мм) изготавливается при производительности (скорости разливки) до 1 т/ч, что на два порядка меньше, чем при обычной разливке.

Скорость разливки жидкой стали регулируют путем изменения диаметра отверстия в стакане разливочного ковша. Более точного регулирования достигают соответствующим подъемом стопора или раскрытием шиберов. Диаметр отверстия в стакане разливочного ковша или шиберного затвора зависит от вместимости ковша и составляет, как правило, 30... 80 мм.

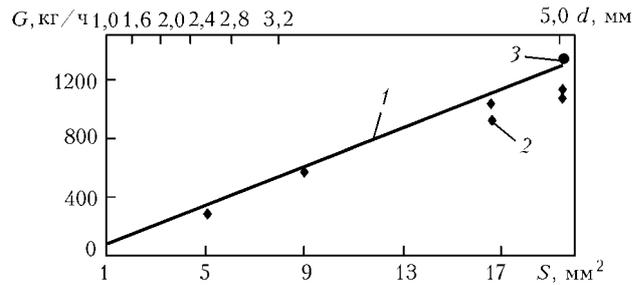


Рис. 2. Зависимость расхода G жидкой стали от площади сечения S (диаметра) разливочного отверстия: 1 — расчетная зависимость; 2 — литературные экспериментальные данные; 3 — данные моделирования

Производительность заливки жидкого металла может быть вычислена по формуле [1]

$$G = \mu \gamma S \sqrt{2gH},$$

где μ — коэффициент расхода струи, зависящий от формы сливного отверстия и степени сжатия струи, характеризуемой отношением площади сечения струи к площади отверстия, обычно $\mu = 0,96... 0,99$; γ — плотность жидкости; S — площадь поперечного сечения сливного отверстия; g — ускорение свободного падения; H — высота уровня жидкого металла над уровнем сливного отверстия.

Рассчитанная по этой формуле скорость разливки жидкой стали через сливные отверстия диаметром 30... 80 мм составляет от 630... 4484 кг/мин (в расчетах приняты следующие параметры: $\mu = 0,96$; $\gamma = 7,0 \text{ г/см}^3$; $H = 250$ мм). Для выполнения технологических операций (распыление струи металла для получения порошка, электрошлаковая выплавка слитков и/или отливок с малой линейной скоростью и пр.) необходимая скорость разливки должна быть на порядок или два меньше. Зачастую это обеспечивается с применением порционной разливки. Однако этот способ далеко не всегда приемлем с учетом условий непрерывности технологического процесса.

На рис. 2 приведены расчетные диаметры сливного отверстия для обеспечения непрерывной разливки с малой скоростью. Здесь нанесены литературные экспериментальные данные по скорости разливки суперсплавов [4], а также результаты собственного физического моделирования путем заливки воды через отверстия разного диаметра с учетом плотности жидкой стали.

Приведенные данные показали, что для выплавки слитков диаметром 500... 1000 мм с линейной скоростью 2 мм/мин необходимую скорость непрерывной разливки жидкого металла можно получить при диаметре выпускного отверстия 2,0... 3,5 мм, а для распыления струи металла с производительностью 1500 кг/ч он должен составлять около 6 мм.

Предполагается, что температура заливаемого жидкого металла неизменна, причем она должна быть довольно высокой для обеспечения жидкотекучести металла. В действительности процесс разливки жидкого металла сопровождается снижением температуры металла и ухудшением вследствие этого его

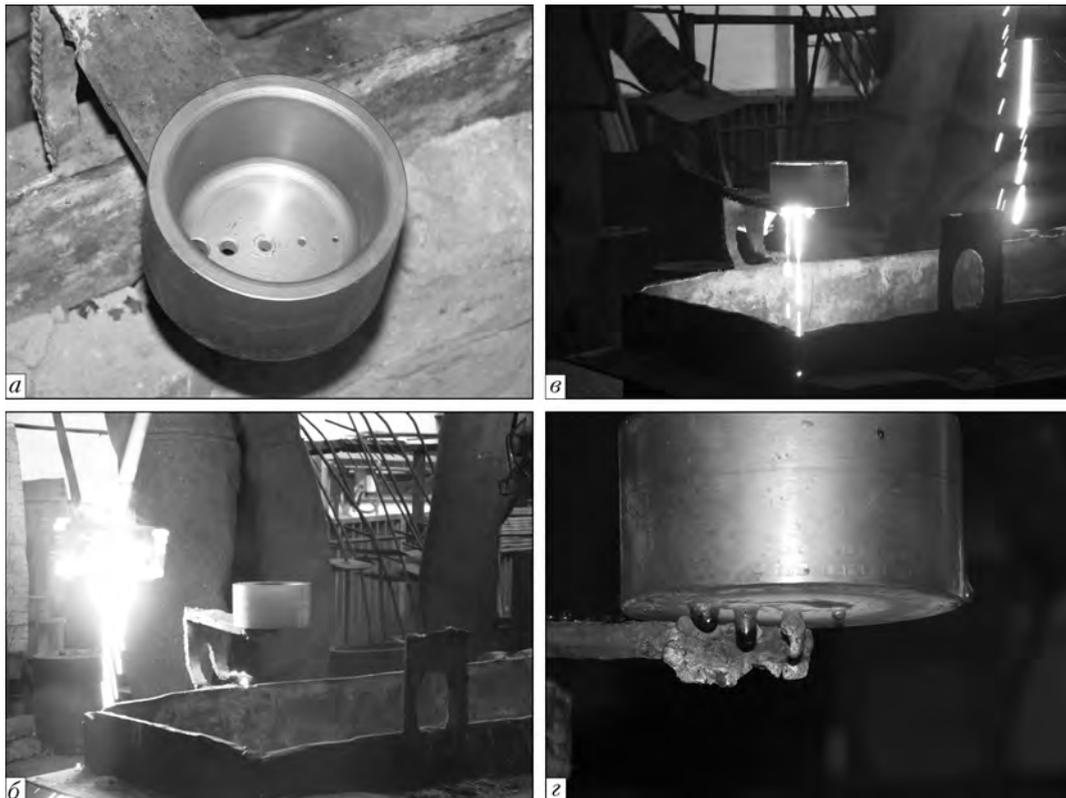


Рис. 3. Разливка стали через сливные отверстия разного диаметра: *а* — нагретая воронка; *б* — рабочий момент заливки с помощью разливной ложки; *в* — истечение струй жидкого металла через сливные отверстия; *г* — внешний вид донной поверхности воронки после заливки

жидкотекучести. Кроме того, этот процесс сопровождается постепенным зарастанием сливного отверстия.

Мы провели эксперименты по разливке жидкого металла через отверстия разного диаметра и получили следующие результаты. Стальную воронку вместимостью 250 см³ (по стали примерно 2 кг) с отверстиями диаметром 2, 3, 5, 7 и 10 мм нагревали до температуры светлокрасного свечения (около 800 °С) (рис. 3, *а*) и заполняли с помощью двух четырехкилограммовых разливных ложек (рис. 3, *б*) жидким металлом (углеродистая сталь), приготовленным в электрошлаковой тигельной печи. В процессе заполнения воронки и разливки жидкий металл естественно охлаждался. При этом фиксировалось время зарастания выпускного отверстия и прекращение разливки из воронки (рис. 3, *в*). Эксперименты показали, что через отверстие диаметром 2 мм жидкий металл не потек (рис. 3, *в*); через отверстие диаметром 3 мм разливка прекратилась уже через 10 с; через отверстие диаметром 5 мм — через 40 с. Остаток металла вытек из отверстия диаметром 7 и 10 мм.

Непрерывное истечение жидкого металла через отверстие малого диаметра возможно лишь при хорошей жидкотекучести стали, что обеспечивается поддержанием соответствующей температуры металлической струи. Поэтому разливка металла через выпускные отверстия указанных диаметров возможна лишь из обогреваемого ковша. Но и в этом случае нужно обеспечить обогрев сливного стакана,

чтобы предотвратить постепенное зарастание выпускного отверстия. К тому же, регулирование скорости даже непрерывной разливки металла через малые отверстия представляет довольно сложную техническую проблему.

С учетом специфики применения устройства для обогрева разливочного стакана и регулирования скорости разливки (высокая температура окружающей среды, необходимость размещения ковша с устройством непосредственно над объектом, стесненность в габаритном пространстве) наиболее целесообразным представляется устройство с индукционным высокочастотным нагревом стакана с выпускным отверстием.

Подобное устройство, названное холодным пальцем, разработано фирмой «Дженерал электрик» для разливки и распыления суперсплавов [4]. В этом устройстве разливочный стакан является разрезным по вертикали медным водоохлаждаемым кристаллизатором, помещенным в индуктор высокочастотного генератора.

Разделенные через изоляционные прокладки секции кристаллизатора пронизаемы для высокочастотного электромагнитного поля, с помощью которого осуществляется нагревание струи жидкого металла и предотвращается зарастание выпускного отверстия. При необходимости струю металла можно прервать, выключив высокочастотный нагрев. Для возобновления разливки металла достаточно включить высокочастотный генератор.

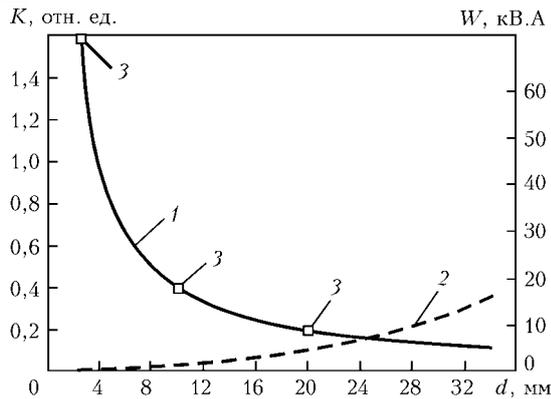


Рис. 4. Зависимости относительной поверхности K охлаждения и необходимой мощности W от диаметра стержня: 1 – относительная поверхность охлаждения и необходимая мощность для расплавления стержня, нагреваемого в водоохлаждаемом кристаллизаторе; 2 – вычисленная мощность, необходимая для нагрева и расплавления стержня заданного диаметра; 3 – экспериментальные данные

Судя по представленным в работе [4] данным, диаметр сливного отверстия варьировали от 4,5 до 7,0 мм. Спецификой конструкции разливочного стакана для использования его в электрошлаковых технологиях является уменьшение диаметра сливного отверстия до 2,0... 3,5 мм и необходимость установки стакана в подине обогреваемого ковша. Проницаемость стакана для переменного магнитного поля высокой частоты тем выше, чем больше количество вертикальных секций, изолированных друг от друга.

Кроме того, необходимо обеспечить водяное охлаждение этих секций таким образом, чтобы подвод и отвод воды осуществлялся с одной стороны с учетом необходимости введения этого стакана в подину ковша. Указанные требования вступают в противоречия, еще больше усиливаемые с уменьшением диаметра кристаллизатора.

Для оптимизации конструкции стакана и определения необходимой мощности источника индукционного нагрева проведены эксперименты по нагреву и плавлению стальных стержней в разрезных медных водоохлаждаемых кристаллизаторах разного диаметра.

Нагревание и расплавление стержней в водоохлаждаемых кристаллизаторах сопровождается их одновременным охлаждением в результате теплоот-



Рис. 5. Секционный кристаллизатор ($d = 3$ мм) в индукторе



Рис. 6 Внешний вид двухсекционного кристаллизатора ($d = 10$ мм) в индукторе

вода в стенку кристаллизатора и потери тепла на излучение. При этом основными в кристаллизаторах малого диаметра следует, очевидно, считать потери, связанные с теплоотводом в стенки кристаллизатора, потерями на излучение в атмосферу можно пренебречь.

Относительная поверхность охлаждения кристаллизатора K (т. е. отношение периметра к площади его поперечного сечения) существенно возрастает с уменьшением диаметра кристаллизатора. Соответственно увеличиваются и относительные потери тепла. Поэтому несмотря на то, что для нагревания и расплавления стержня меньшего диаметра нужно затратить меньшее количество тепла Q (без учета потерь), необходимая мощность источника питания W может быть больше, чем для стержня большего диаметра.

На рис. 4 представлены зависимости W и K от диаметра стержня, причем ординаты W и K совмещены с учетом экспериментальных данных. Из рис. 4 видно, что экспериментальные значения мощности источника питания при индукционном нагреве стержня, расположенного в водоохлаждаемом кристаллизаторе, довольно точно ложатся на кривую $K = f(d)$, а оптимальным диаметром стержня с точки зрения минимизации необходимой мощности для его расплавления есть диаметр 25 мм (точка пересечения кривых $W = f(d)$ и $K = f(d)$). Полученные данные, не являющиеся очень точными, позволяют ориентироваться при конструировании разливочного стакана с малым диаметром выпускного отверстия.

Простейшей конструкцией является разрезной кристаллизатор, составленный из медных изолированных и тесно прижатых друг к другу трубок (рис. 5). В этом случае получается четырехсекционный кристаллизатор. Зазор между трубками образует сквозное проходное отверстие, сечение которого определяется внешним диаметром трубки. Для трубок с внешним диаметром 6 мм сечение сквозного отверстия эквивалентно сечению круглого отверстия диаметром 3 мм.

Увеличение внутреннего диаметра кристаллизатора до 10 мм позволило изготовить двухсекционный кристаллизатор со сверленными панелями (рис. 6). Стержни диаметром 3 мм расплавились с помощью лампового генератора частотой 66 кГц и



Рис. 7. Шестисекционный ступенчатый кристаллизатор ($d = 20/2$ мм) в индукторе

мощностью 70 кВ·А. Для этого потребовалась вся его мощность. Для расплавления стержня диаметром 10 мм с помощью генератора частотой 66 кГц и мощностью 20 кВ·А оказалось достаточно 18 кВ·А.

С учетом определенного графически (рис. 4) оптимального диаметра кристаллизатора для индукционного нагрева стержня изготовлен ступенчатый шестисекционный кристаллизатор с внутренним диаметром 20 мм, донная часть которого высотой 3 мм имела сливное отверстие диаметром 2 мм (рис. 7). Для расплавления стержня диаметром 20 мм в указанном кристаллизаторе требовалась мощность 10 кВ·А, что близко к расчетному значению (рис. 4).

Однако расплавленный металл стержня после соприкосновения со стенкой кристаллизатора быстро терял температуру и не вытекал из отверстия. При этом даже увеличение мощности генератора до 20 кВ·А не позволяло повысить температуру металла в кристаллизаторе. Указанное явление, очевидно, связано с шунтированием вихревых токов слоем жидкого металла, соприкасающегося со стенкой кристаллизатора.

Были испытаны покрытия, состоящие из тонких (10... 30 мкм) слоев электроизоляционного материала, нанесенных на внутреннюю стенку кристаллизатора. В качестве таких материалов служили различные оксиды, наносимые на стенку кристаллизатора с помощью плазменного напыления. Все испы-



Рис. 8. Затвердевший металл на выходе из сливного отверстия



Рис. 9. Внешний вид керамического вкладыша со сливным отверстием диаметром 2 мм

танные материалы улучшали ситуацию, однако стойкость напыленного слоя, независимо от материала, оказалась недостаточной: после одно- и двукратного расплавления стержня потребовалось повторное напыление.

Испытание ступенчатого кристаллизатора с исходным отверстием диаметром 2 мм показало, что расплавленный в расширенной части кристаллизатора (диаметром 20 мм) металл кристаллизуется в выпускном отверстии, несмотря на то, что полку от стенки кристаллизатора к отверстию не охлаждали (рис. 8). Это свидетельствует о довольно интенсивном теплоотводе от сливного отверстия через полку в стенку водоохлаждаемого кристаллизатора. В то же время расплавление стержня в подобном стакане, но керамическом, позволило слить весь жидкий металл через отверстие диаметром 2 мм. Однако стойкость такого стакана оказалась довольно низкой — вышел из строя после первого же расплавления в нем стержня.

Намного большей оказалась стойкость керамического вкладыша с отверстием диаметром 2 мм (рис. 9), установленного в донной части водоохлаждаемого кристаллизатора. Хотя и в этом случае струя металла затвердевала в выпускном канале, образуя пробку длиной около 5 мм. Поэтому необходимо ограничивать высоту вкладыша значением 3 мм. В этом случае удается слить всю порцию жидкого металла, расплавленного в расширенной части кристаллизатора (рис. 10).

Индуктор, охлаждаемый водой, может рассматриваться в качестве кристаллизатора. Устройство в этом случае представляет собой своеобразную миниатюрную индукционную печь с донным выпуском жидкого металла через выпускное отверстие малого диаметра (рис. 11). Плавильная зона может быть цилиндрической ступенчатой или конической формы. В последнем случае индуктор также был коническим. Предполагали, что отключение питания такой печи должно приводить к быстрому зарастанию выпускного отверстия и прекращению разливки



Рис. 10. Вытекание струи жидкого металла через сливное отверстие диаметром 2 мм

жидкого металла, а повторное включение — к расплавлению «пробки» и восстановлению разливки.

Эксперименты по расплавлению стержней конической формы в печи с конической плавильной зоной проводили с применением генератора частотой 2,5 кГц. Эксперименты показали, что для расплавления такого стержня нужна мощность 45...48 кВт·А, причем стержень расплавлялся только в верхней части печи. Положительные результаты получены при расплавлении стержней в печи с цилиндрической плавильной зоной.

Таким образом, с целью дальнейших экспериментов с применением жидкого металла, получаемого в обогреваемом ковше, можно рекомендовать два типа устройства для разливки металла с малой скоростью: секционный водоохлаждаемый ступенчатый кристаллизатор с внутренним диаметром 20...25 мм с керамическим вкладышем и индукционную мини-печь с донным выпуском жидкого металла.

Представляют интерес испытания указанных конструкций разливочного стакана для использования в обогреваемом электрошлаковом разливочном ковше. Обычные ламповые высокочастотные генераторы непригодны в данном случае в качестве источника питания индуктора из-за специфических условий их эксплуатации. Поэтому для экспериментальных работ решили воспользоваться разработкой Института электродинамики НАНУ по конструированию малогабаритных транзисторных высокочастотных генераторов для индукционного нагрева.



Рис. 11. Внешний вид индукционной мини-печи

Эксперименты по нагреву стержней в секционных кристаллизаторах дали возможность сформулировать технические условия на разработку малогабаритного транзисторного высокочастотного генератора для индукционного нагрева струи жидкого металла, вытекающей из ковша с электрошлаковым обогревом через разливочный стакан с малым сливным отверстием. В соответствии с этим заданием в Институте электродинамики разработали и изготовили пилотный образец малогабаритного транзисторного преобразователя мощностью 20 кВт, частотой 66 кГц (рис. 11). Этот преобразователь испытан в лабораторных условиях и показал достаточно стабильную работу.

Следующим этапом в разработке разливочного устройства малой производительности с функцией также и порционной разливки жидкого металла будет создание электрошлакового тигля со встроенным устройством для разливки.

1. *Разливка стали* / Под ред. В. И. Баптизманского. — Киев; Донецк: Виц. шк., 1977. — 200 с.
2. *Общая металлургия* / Б. В. Челищев, П. П. Арсентьев, В. В. Яковлев, Д. И. Рыжонков. — М.: Металлургия, 1971. — 480 с.
3. *Europäische Patentanmeldung 0 275 349 A1, Int. Cl. C21C 7/00, C21C 5/52. Verfahren zum sekundär-metallurgischen Behandeln von Metallschmelzen, insbesondere Stahischmelzen* / Gerhard F. et al. — Publ. 27.07.88.
4. *Пат. 5160532 США, МКИ С 21 С 1/00. Распыление электрошлакового рафинированного металла.* — Оpubл. 03.11.92.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 08.04.2009