

СМИРНОВ А.Н., ШТЕПАН Е.В., ЕРОНЬКО С.П. (ДОННТУ), ЦУПРУН А.Ю.
(НПО «ДОНИКС»)

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ РАЗЛИВКИ НА ХАРАКТЕР ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СОРТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Рассмотрены наиболее важные аспекты, влияющие на формирование сортовой непрерывнолитой заготовки. Особое внимание уделено на идентификацию наиболее важных параметров, определяющих движение стали в кристаллизаторе. На физической модели изучено влияние характера распространения струи в кристаллизаторе и определены наиболее важные параметры.

Непрерывная разливка на сортовую заготовку является одним из наиболее быстро прогрессирующих технологических процессов в области производства стали. Это, прежде всего, определяется тем фактом, что в последнее десятилетие ведущим фирмам, создающим оборудование для МНЛЗ, удалось в несколько раз повысить скорость разливки (до 5–7 м/мин) и полностью оформить концепцию многоручьевых высокопроизводительных сортовых МНЛЗ. Достаточно отметить, что годовая производительность одного ручья таких МНЛЗ уже сегодня составляет 200–250 тыс. т стали [1], что в 3–5 раз превосходит средние показатели производительности сортовых МНЛЗ в мире [2].

Повышение производительности сортовых МНЛЗ в основном достигается за счет двух параметров: увеличение скорости и серийности разливки. Как показывает практика, для обеспечения реализации этих двух условий необходимо обеспечить определенную совокупность параметров и условий разливки стали, влияющих как на процессы ее затвердевания, так и на технологические аспекты функционирования МНЛЗ [3–5].

Повышение скорости разливки сортовой заготовки, как известно, сопровождается увеличением диаметра стакана-дозатора промковша. Это обуславливает увеличение сечения струи металла, попадающего в кристаллизатор, и соответственно изменяет гидродинамическую картину течения металла в жидкой ванне заготовки. Это оказывает негативное влияние перемешивания металла на условия затвердевания твердой корочки в кристаллизаторе и формирование сортовой заготовки в целом. В случае нарушения условий равномерного формирования твердой корочки наблюдается изменение скорости ее роста в локальных зонах, что обуславливает возникновение высокого уровня внутренних напряжений, способствующих изменению геометрии профиля заготовки (ромбичность для квадратной и овальность для круглой). Примеры такой деформации профиля непрерывнолитой заготовки даны на рис.1.

Целью настоящего исследования является изучение особенностей движения потоков металла в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ и качественная оценка влияния этих потоков на условия формирования твердой корочки.

Взаимодействие истекающей из промковша струи с жидкой ванной кристаллизатора для случаев разливки открытой и закрытой струей изучалось с использованием метода физического моделирования, позволяющего получать гидродинамическую картину в жидкой сердцевине формирующейся заготовки с минимальными материальными и временными затратами. Эксперименты проводились на лабораторной установке, схематично представленной на рис.2.

При выборе геометрического масштаба физической модели исходили из условий $Fr = \text{item}$ (критерий Фруда) и $We = \text{item}$ (критерий Вебера) [6]. С учетом необходимости исследования турбулентных течений модель кристаллизатора была изготовлена из оптически прозрачного материала (оргстекла) в масштабе 1:1 относительно натурального объекта. В качестве моделирующей жидкости использовали воду при температуре 35–38°C. Для имитации твердой корочки, формирующейся на стенках кристаллизатора,

использовали предварительно намораживаемый на стенки кристаллизатора слой тиосульфата натрия, который в процессе взаимодействия с водой постепенно растворяется. При этом в зонах интенсивного перемешивания процесс растворения идет в несколько раз быстрее. Предварительно выполненные исследования показали, что в зависимости от скорости движения потоков, омывающих слой тиосульфата натрия, скорость его растворения может изменяться в 8–10 раз.

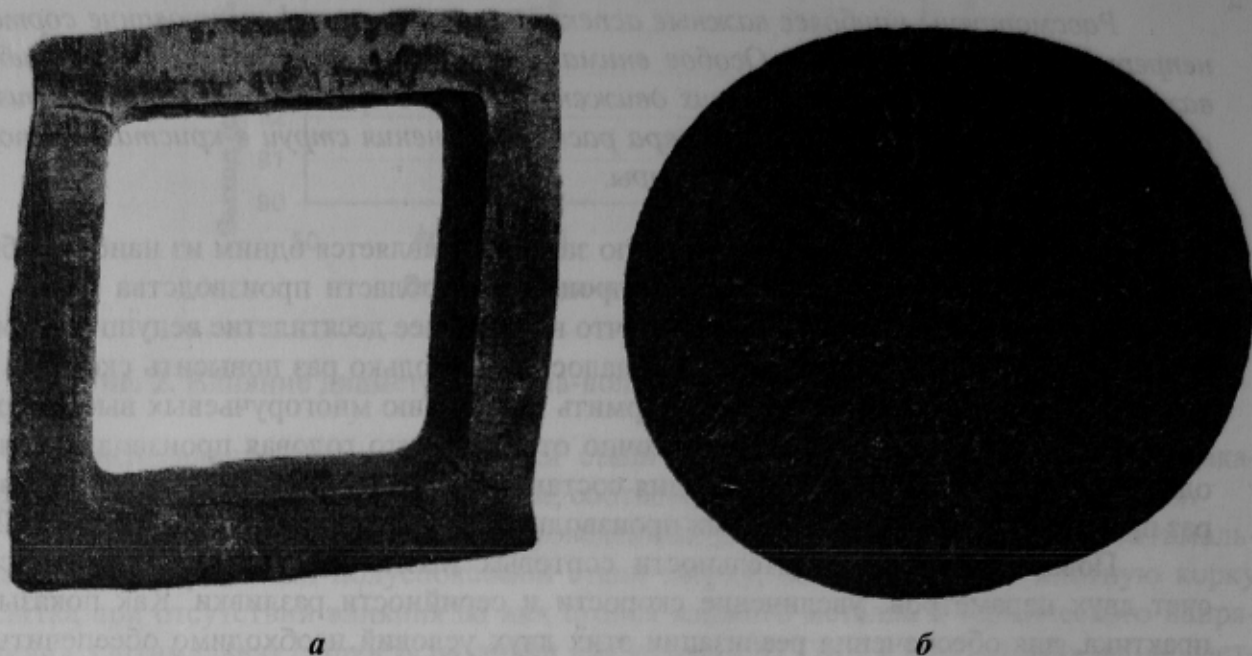


Рис.1. Примеры деформации геометрической формы квадратной и круглой заготовки при нарушении условий разливки стали открытой струей (*a* — сечение заготовки 125x125 мм; *б* — Ø125 мм)

В ходе экспериментов исследовали влияние на характер формирования твердой корочки следующих параметров:

- смещение струи, попадающей из промковша в кристаллизатор, относительно оси вертикальной симметрии;
- изменение угла наклона струи, попадающей из промковша в кристаллизатор, относительно вертикали;
- изменение скорости движения и сечения струи;
- сравнение условий перемешивания металла в кристаллизаторе при разливке открытой струей и с погружным стаканом.

Смещение струи металла в кристаллизаторе относительно вертикальной оси симметрии достаточно часто встречается на практике и связано обычно с недостаточно точным позиционированием стаканов-дозаторов в промковше или же самого промковша относительно кристаллизаторов МНЛЗ. На рис.3 представлены характерные диаграммы уменьшения толщины твердой корочки в зависимости от диаметра струи при смещении струи на 10 мм относительно оси кристаллизатора. Причиной уменьшения толщины твердой корочки при смещении струи относительно вертикальной оси является формирование зоны вихревого движения между стенкой кристаллизатора и струей металла в жидкой ванне. При этом по мере смещения положения струи металла относительно вертикальной оси симметрии в сторону одной из граней происходит как бы «прижатие» этого вихря, что обуславливает интенсивное размывание твердой корочки. По данным физического моделирования интенсивное размывание твердой корочки наблюдается в том случае, когда величина смещения струи составляет 10–12% и более от величины линейного размера сечения заготовки.

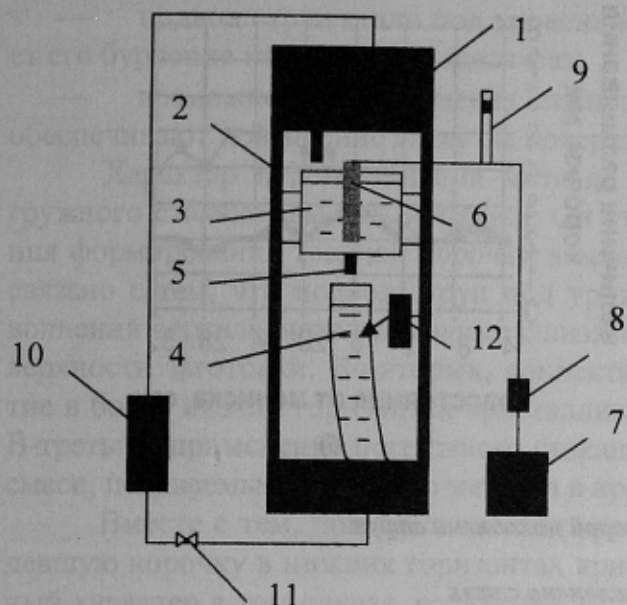


Рис.2. Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики потоков расплава в полости кристаллизатора криволинейной МНЛЗ: 1 — резервуар; 2 — опорные колонны; 3 — прозрачная модель промежуточного ковша; 4 — прозрачная модель кристаллизатора; 5 — стакан-дозатор; 6 — стопор-моноблок; 7 — компрессор; 8 — ресивер; 9 — ротаметр; 10 — насос; 11 — устройство синхронизации напоров жидкости; 12 — устройство визуализации и измерения скоростей потоков

струей формируется циркуляционный вихрь, который собственно и размывает твердую корочку. Полученные данные свидетельствуют о том, что уже при отклонении струи от вертикальной оси более $3-4^\circ$, происходит заметное размывание твердой корочки, что может привести к прорыву металла под кристаллизатором.

Отклонение струи металла, попадающей в кристаллизатор МНЛЗ, на практике связывают с неточной установкой стакана-дозатора или погружного стакана. Кроме того, в процессе эксплуатации проковшей происходит некоторая деформация (коробление) их стального кожуха, что также является причиной отклонения струи металла от номинального положения. Представленные на рис.4 результаты исследований на физической модели показывают, что уменьшение толщины твердой корочки при отклонении струи от вертикали происходит, прежде всего, в направлении распространения турбулентных потоков. При этом уже при угле отклонения $3-4^\circ$ наблюдаются эффекты, которые аналогичны рассмотренным ранее при смещении струи относительно вертикальной оси симметрии. При дальнейшем увеличении угла отклонения струи происходит более интенсивное размывание твердой корочки, характерное для зоны прямого распространения струи. В этом случае между стенкой кристаллизатора и

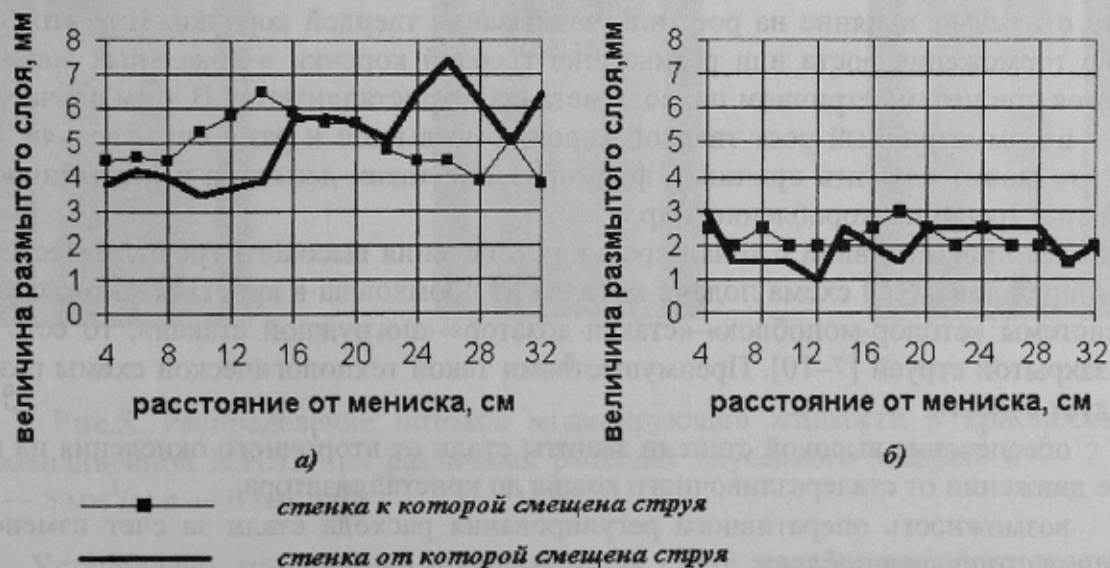


Рис.3. Графическая зависимость величины размывания корочки от расстояния от мениска при диаметре струи 18 мм (а) и 9 мм (б) и смещении струи относительно оси кристаллизатора на 10 мм

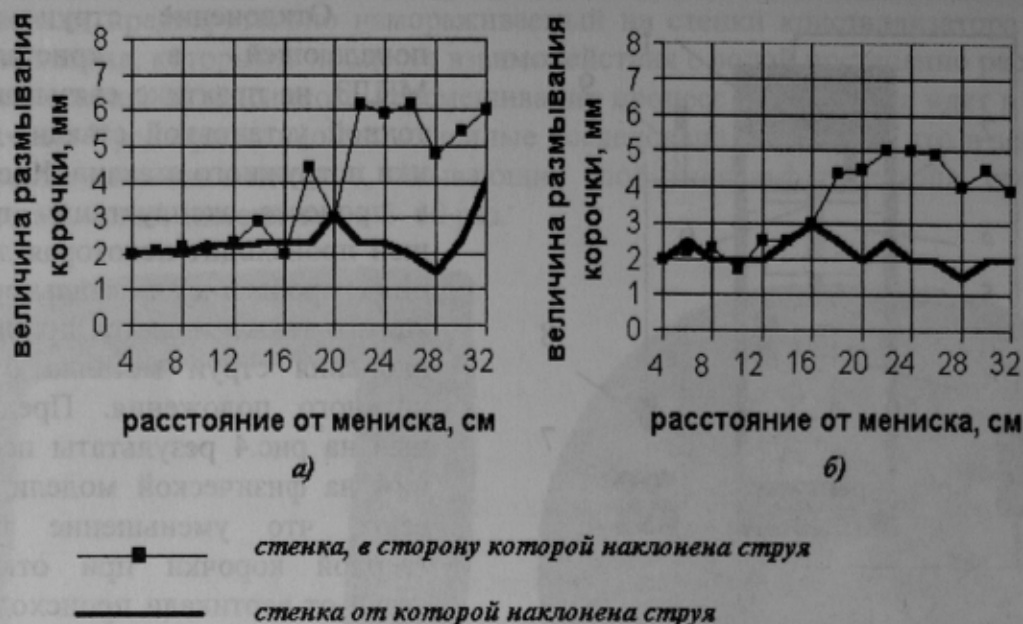


Рис.4. Графическая зависимость величины размыывания корочки от расстояния от мениска при диаметре струи 18 мм (а) и 9 мм (б) и наклоне струи относительно оси кристаллизатора на 6°

Визуальные наблюдения влияния увеличения диаметра струи и скорости ее движения в кристаллизаторе позволили установить следующее:

- повышение скорости движения струи повышает бурление на зеркале металла в кристаллизаторе и увеличение зоны интенсивного перемешивания металла в жидкой ванне кристаллизаторе, смещая ее в более низкие горизонты (практически на всю длину кристаллизатора);
- увеличение диаметра струи интенсифицирует бурление и волновые процессы на зеркале металла в кристаллизаторе, а также вовлекает в перемешивание периферийные зоны жидкого металла в кристаллизаторе, что способствует неравномерному размыыванию твердой корочки.

Таким образом, выполненные на физической модели исследования показывают, что при увеличении скорости разливки сортовой заготовки открытой струей в жидкой ванне кристаллизатора интенсифицируются процессы перемешивания периферийных зон, что оказывает влияние на рост или размыывание твердой корочки. При этом наибольшее торможение роста или размыывание твердой корочки в локальных зонах наблюдается при несимметричном подводе металла в кристаллизатор. В этом случае происходит несимметричный рост твердой корочки по высоте и различным граням заготовки, что может служить причиной формирования таких дефектов как ромбичность, продольные трещины, коробление и пр.

Более прогрессивной с точки зрения обеспечения высокого уровня качества заготовки представляется схема подачи металла из промковша в кристаллизатор с помощью системы «стопор-моноблок»-«стакан-дозатор»-«погружной стакан», то есть разливка закрытой струей [7–10]. Преимуществами такой технологической схемы разливки следует считать:

- обеспечение высокой степени защиты стали от вторичного окисления на всем пути ее движения от сталеразливочного ковша до кристаллизатора;
- возможность оперативного регулирования расхода стали за счет изменения положения стопора-моноблока;
- возможность существенного увеличения диаметра стакана-дозатора и увеличение времени зарастания его внутренней полости до предельно допустимой величины;
- возможность вдувания аргона непосредственно в струю стали, которая движется в кристаллизатор;

— подвод струи стали под уровень металла в кристаллизаторе, что предотвращает его бурление на границе раздела фаз;

— возможность применения специальных шлакообразующих смесей, которые обеспечивают повышение качества поверхности заготовки, и т.п.

Характер перемешивания металла в кристаллизаторе при использовании погружного стакана заметно меняется. Он становится более благоприятным с точки зрения формирования твердой корочки в верхней части кристаллизатора. Это, во-первых, связано с тем, что подвод струи под уровень позволяет сохранить без существенных волнений зеркало металла в кристаллизаторе, что, безусловно, повышает качество поверхности заготовки. Во-вторых, конвективные потоки металла получают свое развитие в более низких горизонтах кристаллизатора и носят менее турбулентный характер. В-третьих, применение погружного стакана позволяет использовать шлакообразующие смеси, подаваемые на зеркало металла в кристаллизаторе.

Вместе с тем, при разливке под уровень воздействие струи жидкости на затвердевшую корочку в нижних горизонтах кристаллизатора имеет более заметный негативный характер в том случае, если струя (погружной стакан) смещена относительно вертикальной оси симметрии. В этом случае жидкой ванне заготовки наблюдаются зоны нестабильной турбулентности, которые обуславливают развитие локального интенсивного перемешивания у фронта затвердевания. Как показали исследования интенсивность перемешивания металла в отдельных зонах кристаллизатора (прилегающих к затвердевшей корочке) возрастает в 5–10 раз, что, видимо, служит одной из основных причин неравномерного или замедленного роста корочки по отдельным граням и прорывов металла под кристаллизатором.

Эффект торможения струи металла в кристаллизаторе изучался на физической модели для разливки открытой и закрытой струей. В качестве имитатора вдуваемого аргона использовали воздух, подаваемый под давлением. На рис.5 представлены характерные примеры проникновения пузырьков в расплав в зависимости от расхода вдуваемого газа.

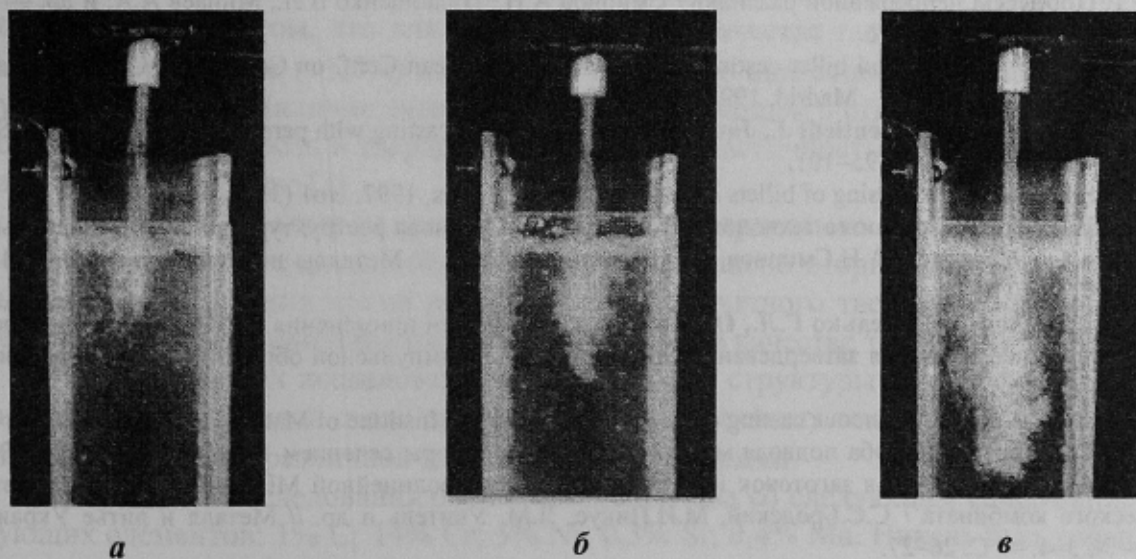


Рис.5. Распределение потоков моделирующей жидкости в кристаллизаторе криволинейной МНЛЗ при различных расходах вдуваемого воздуха: *а* — 2 мм³/с; *б* — 5 мм³/с; *в* — 0 мм³/с

Установлено, что глубина проникновения струи моделирующей жидкости в 2–4 раза снижается при вдувании в нее газа. При этом оптимальный объем вдуваемого газа зависит от скорости разливки и сечения струи. На практике, большое значение на величину объема вдуваемого газа, видимо, будет оказывать также фактор увеличения объема аргона в струе при его нагревании, а также бурление зеркала металла, обусловлен-

ное всплыванием пузырьков газа на поверхность. Как показывают исследования, выполненные на промышленных МНЛЗ для различных сечений заготовки оптимальный объем вдуваемого аргона может колебаться в пределах 1,5–5,0 л/мин [1,11].

В целом разливка сортовой заготовки с использованием погружного стакана имеет существенные технологические резервы и преимущества перед разливкой открытой струей. Видимо, поэтому на многих металлургических заводах доля сортовой заготовки, разливаемой с погружным стаканом, постоянно возрастает. Как показывает анализ известных данных, практически все ведущие производители качественной сортовой заготовки наращивают долю стали, разлитой с погружным стаканом. Эта доля в среднем колеблется в пределах 30–50%, а для некоторых (например, металлургический завод "Saarstahl", Германия) она уже составляет 70–80%.

Выводы

1. Прогресс в непрерывной разливке стали на сортовую заготовку характеризуется существенным повышением скорости литья, что значительно изменяет гидродинамическую картину движения потоков в кристаллизаторе. Нарушение условий подвода металла в кристаллизатор препятствует нормальному росту твердой корочки, что обеспечивает деформацию геометрии заготовки за счет развития внутренних напряжений.

2. Основными факторами, влияющими на неравномерный рост твердой корочки заготовки в кристаллизаторе, является отклонение струи от вертикальной оси симметрии, обусловленное смещением стакана-дозатора. В ходе физического моделирования установлены критические параметры смещения и наклона струи.

3. Показано, что более благоприятные условия с точки зрения гидродинамики жидкой ванны создаются при разливке закрытой струей с помощью погружного стакана. При этом эффект «торможения» струи металла в кристаллизаторе достигается при вдувании в нее некоторого количества газа.

Список литературы

1. **Процессы** непрерывной разливки / Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. и др. — Донецк: ДонНТУ, 2002. — 536 с.
2. **Wolf M.** Bloom and billet casting overview // 3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid-Spain, October 20–23, 1998. — Madrid, 1998. — P. 515–524.
3. **Horbach U., Kockentiedt J., Jung W.** High speed billet casting with parabolical mould taper // Stahl und Eisen, 1997. No.12. — P. 95–101.
4. **Stilli A.** Hot processing of billets // Concast Standard News, 1997. No1 (36). — P. 3–4.
5. **Высокоэффективные** технологические модули — основа реструктуризации сталеплавильных комплексов / А.А.Минаев, А.Н.Смирнов, В.Л.Пилюшенко и др. // Металлы и литье Украины, 2001. — № 5–6. — С. 7–10.
6. **Смирнов А.Н., Редько Г.Л., Орлов И.А.** Особенности применения физического моделирования в процессе исследования затвердевания слитков при виброимпульсной обработке / Процессы литья, 2000. — № 1. — С. 23–32.
7. **Irwing W.R.** Continuous casting of steel. — London: The Institute of Materials, 1993. — 207 p.
8. **Разработка** способа подвода металла в кристаллизаторы сечением 160x160 мм и 335x400 мм для комбинированного литья заготовок на шестиручьева криволинейной МНЛЗ Днепровского металлургического комбината / С.С.Бродский, М.И.Пикус, Л.М. Учитель и др. // Металл и литье Украины, 1999. — № 3–4. — С. 26–27.
9. **Исследование** процесса непрерывной разливки на сортовые заготовки с защитой стали от вторичного окисления / А.Н.Смирнов, С.С.Бродский, А.Я.Глазков, В.В.Несвет // Процессы литья, 2001. — № 2. — С. 10–17.
10. **Повышение** эффективности непрерывной разливки сортовой заготовки / А.А.Минаев, А.Н.Смирнов, В.Л.Пилюшенко и др. // Металл и литье Украины, 2001. — № 5–6. — С. 22–25.
11. **Metallurgie des Stranggießens** / Herausgeber prof. K.Schwerdtfeger // Dusseldorf: Verlag Stahleisen mbH, 1992. — 655 p.