

**METALO-PHYSICAL AND PHYSICO-CHEMICAL ASPECTS OF THE METALLURGY
OF THE CHROMIUM SUPERALLOYS
PART II. ESTIMATION OF METALLURGICAL PROCESSES THERMODYNAMICS
IN CHROMIUM-BASE MELTS**

Belyanchikov L.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor
(fermet.misis@mail.ru)

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)
(4, Leninskii pr., Moscow, 119049, Russia)

Abstract. The experimental data about the thermodynamics of elements behavior in the chromium-base alloys are absent, so it has been offered to estimate those ones by transferring from iron-base alloys. The heats of dissolution of elements, the activity coefficients of elements, the molar interaction parameters of elements, the free energy change (ΔG_r°) for reactions of deoxidation, nitride-, carbide-, sulphide- and borideforming in chromium-base melts have been calculated and are presented in tables. The recommendations about the rational select of the strengthening phases in chromium-base alloys are given.

Keywords: chromium, chromium-base alloys, strengthening phases, interaction parameters, thermodynamics calculations.

REFERENCES

1. Belyanchikov L.N. Universal method of recalculating the values of the interaction parameters of elements from one alloy base to another on the basis of the theory of quasi-regular solutions. Part I. Theoretical basis and adequacy of the recalculation model. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.).
2. Belyanchikov L.N. Theory of charge dependence of ion cores in metals and its practical application. *Elektrometallurgiya*. 2001, no. 8, pp. 22–34. (In Russ.).
3. Sigworth, G.K., Elliott, J.F. The Thermodynamics of Dilute Iron Solutions, *Materials Science*, Vol. 8, no. 1, 1974, pp. 298–310.
4. Balkovoi Yu.V., Aleev R.A., Bakanov V.K. *Parametry vzaimodeistviya pervogo poryadka v rasplavakh na osnove zheleza: Obzor. inform [Interaction parameters of the first order in iron-based melts: Review]*. Moscow: In-t “Chermetinformatsiya”. 1987. 42 p. (In Russ.).
5. Belyanchikov L.N. Nature and mechanism of enthalpy changes in reactions of chemical synthesis. *Elektrometallurgiya*. 2011, no. 11, pp. 22–28. (In Russ.).
6. Vasil’eva E.V., Prokoshkin D.A. The principle of heat-resistant alloying. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1967, no. 8, pp. 2–7. (In Russ.).
7. Kirsanov G.V., Khodkin V.I., Fridman A.G. etc. *Poluchenie malolegirovannykh khromovykh splavov metodom metallurgii granul [Production of low-alloyed chromium alloys with the method of metallurgy of granules]*. In: *Metallurgiya granul [Metallurgy of granules]*. Moscow: VILS, 1983, Issue 1, pp. 142–148. (In Russ.).
8. Samgina O.N., Kirsanov G.V., Fridman A.G. etc. *Razrabotka i osobennosti granuliruemykh splavov na osnove khroma [Design and features of granulated chromium-based alloys]*. In: *Metallurgiya granul [Metallurgy of granules]*. Moscow: VILS, 1993, Issue 6, pp. 355–358. (In Russ.).
9. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallurgicheskikh sistem: Spravochnik [Diagrams of binary metallurgical systems: Handbook]*. Vols. 1–3. Lyakishev N.P. ed. Moscow: Mashinostroenie. Vol. 1. 1996. 992 p., Vol. 2. 1997. 1024 p. (In Russ.).

Received March 21, 2014

УДК 621.746.588

**ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДА РАСПЛАВА
В КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Гущин В.Н., д.т.н., профессор кафедры теплофизики, автоматизации и экологии печей (guschinvn@ramler.ru)

Ульянов В.А., д.т.н., профессор кафедры теплофизики, автоматизации и экологии печей

Балан С.А., старший преподаватель кафедры теплофизики, автоматизации и экологии печей

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

(603022, Россия, Н.Новгород, ул. Минина, 24)

Аннотация. Приведены результаты исследования по влиянию способа подвода расплава с помощью безнапорных разливающих стаканов со смещенными выходными каналами на равномерность распределения скоростей потоков расплава, условий теплоотдачи, равномерность нарастания твердой корки и качественные показатели литого металла. Разработанную конструкцию стаканов овального сечения рекомендуется использовать для разливки сортовых заготовок прямоугольного сечения. Практические испытания показали, что равномерное распределение потоков расплава в кристаллизаторе сортовых заготовок возможно за счет использования разработанной конструкции стаканов овального сечения при отношении суммарной площади выходных каналов к поперечной площади металлопровода 1,7 – 2,0.

Ключевые слова: кристаллизатор, разливающий стакан, потоки расплава, фронт затвердевания, сортавые заготовки, качество металла.

Повышение производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и требований к качеству металла приводят к необходимости разработки рациональных способов его подвода в кристаллизаторы, где отводится порядка 25 % всей теплоты и происходит формирование структуры затвердевающих заготовок.

нальных способов его подвода в кристаллизаторы, где отводится порядка 25 % всей теплоты и происходит формирование структуры затвердевающих заготовок.

Качество непрерывнолитой заготовки, повышение стабильности работы МНЛЗ и ее производительность в значительной степени зависят от правильной организации тепловых процессов в кристаллизаторе, так как именно в нем появляется вероятность возникновения различных дефектов в нарастающей корочке.

Форма и размеры сечений заготовок оказывают определенное влияние на специфику образования дефектов. При получении сортовых заготовок основными дефектами литья являются осевая рыхлость, газовые пузыри, трещины, ромбичность для квадратных и овальность для круглых заготовок и ряд других, которые связаны с нарушением технологии выплавки и разливки стали, короблением кристаллизаторов, отклонением от технологической оси МНЛЗ [1 – 3].

Скорость разливки является важнейшим технологическим фактором, при неизменных физико-химических свойствах металла обеспечивающим главные технологические показатели – производительность и качество поверхности заготовки. Допустимая скорость вытягивания, которая определяется размерами заготовки и маркой стали, в значительной степени зависит от толщины корочки, ее способности выдержать ферростатическое давление и тянущие усилия.

Допустимая скорость ввода расплава в кристаллизатор в значительной степени зависит от способа подвода – равномерности распределения гидротоков по периметру и высоте кристаллизатора и глубины проникновения струи расплава в жидкую лунку.

На рис. 1 показано изменение толщины затвердевшей оболочки слитка из стали 45 в зависимости от разницы интенсивности тепловых потоков вдоль фронта затвердевания в результате нарушения симметричности подвода металла при разливке через глухондонные стаканы. Результаты, приведенные на рис. 1, получены путем исследования макроструктуры поперечных темплетов при фиксации фронта затвердевания

сернистым железом и использования расчета интенсивности теплоотдачи от расплава по данным термометрирования стенки кристаллизатора.

На рис. 2 приведены результаты расчета изменения коэффициента теплоотдачи к затвердевшей корочке в зависимости от скорости расплава и величины его перегрева, полученные на основе разработанной методики [3]. Из рис. 2 следует, что изменение однородности скоростных и температурных полей расплава приводит к значительным перепадам значений коэффициента теплоотдачи в рассматриваемом сечении $\Delta\alpha_{ж}$ [более 20 кВт/(м²·К)], что, в свою очередь, является причиной возникновения неравномерности фронта затвердевания.

Способ подвода металла и температура его перегрева в значительной степени определяют неравномерность нарастания корочки непрерывнолитых заготовок, которая, в свою очередь, существенно влияет на развитие дефектов усадочного характера [4 – 6]. Это подтверждается в работах [1 – 2], где отмечается, что ослабленные участки оболочки являются концентраторами напряжений, где, в конечном итоге, образуются горячие продольные наружные трещины. Исследование заготовок диаметром 200 – 600 мм показало, что неравномерность фронта затвердевания с увеличением сечения возрастает.

В сортовых заготовках прямоугольного и, особенно, квадратного сечений плохо организованный подвод металла и ряд других факторов приводят к аналогичным результатам. Исследование квадратных непрерывнолитых заготовок 150 – 300 мм показало, что для уменьшения величины неравномерности фронта затвердевания и сопровождающей ее ромбичности (разнодиагональности) необходимо снизить теплоотвод в нижней части углов кристаллизатора, начиная с горизонта 200 – 400 мм

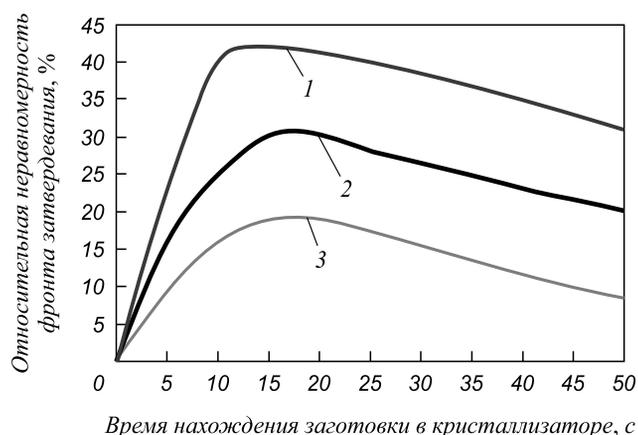


Рис. 1. Изменение толщины затвердевшей корочки по периметру непрерывнолитой заготовки сечением 220×220 мм под действием омывания ее перегретыми потоками расплава различной интенсивности при $\Delta\alpha_{ж}$, кВт/(м²·К): 1 – 22; 2 – 10; 3 – 4,5

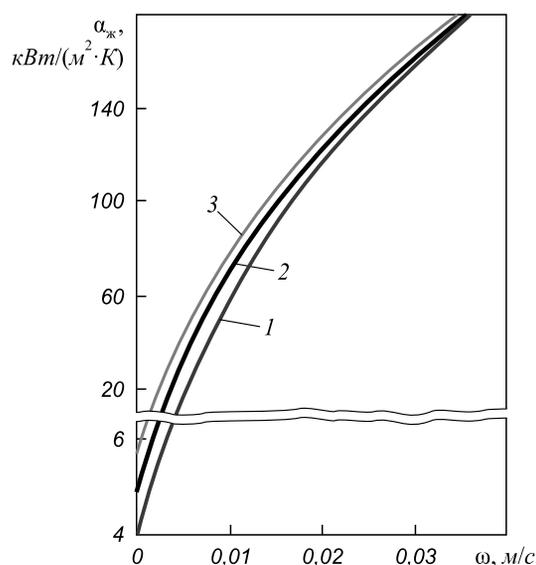


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ж}$ от расплава к затвердевшей корочке от скорости расплава ω при различных величинах его перегрева $\Delta t_{пер}$, °С: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30

ниже мениска. Это можно достичь помимо применения кристаллизаторов специальных конструкций также организацией подвода металла. Аналогией зарождения ромбичности является овалообразование круглой заготовки. Различие заключается в пространственном расположении главной оси дефекта.

Снижение разнодиагональности в сортовых заготовках, близких к квадратному (280×320 мм), при недостаточно отработанном подводе расплава в кристаллизатор все равно сопровождается дефектами усадочного и ликвационного характера в промежуточной и осевой зонах.

В ходе исследования взаимосвязи кинетики неравномерности фронта затвердевания по периметру непрерывнолитых слябовых и сортовых заготовок средне- и высокоуглеродистых марок стали установлена четкая зависимость ряда дефектов литого металла от величины разнотолщинности корки на выходе из кристаллизаторов (рис. 3).

Наиболее распространен способ подачи расплава затопленной струей через безнапорные стаканы, однако он не в полной мере удовлетворяет требованиям не-

равномерной подачи расплава по периметру и высоте кристаллизатора и, прежде всего, не обеспечивает стабильные гидродинамические режимы. Это объясняется недостатками конструкций металлопроводов и выходных боковых сопел, а также переходными процессами, обусловленными колебаниями уровня в промежуточном ковше, дросселированием струи и другими специфическими условиями.

Применение безнапорных погружных стаканов различных конструктивных исполнений позволяет:

- резко снижать глубину проникновения потоков расплава, поступающих в кристаллизатор из сталеразливочного стакана;
- получать однородное распределение скоростей потоков уже на малой глубине;
- способствовать более равномерному распределению тепла перегрева в верхней части кристаллизаторов;
- активизировать направленный массо- и теплоперенос.

В качестве мероприятий, приводящих к цели, предлагаются различные конструктивные решения, связанные с:

- изменением конфигурации проходного отверстия прямооточного разливочного стакана;
- расположением в них завихрителей или многолопастных насадок, вызывающих закручивание потока;
- выполнением погружного стакана с многоступенчатым каналом или кольцеобразным подводом металла;
- увеличением проходного сечения и боковых отверстий безнапорного стакана;
- изменением наклона боковых отверстий к горизонту и их количества;
- смещением боковых отверстий относительно центральных осей поперечного сечения разливочного стакана или снабжением боковых отверстий дефлекторами, изменяющими направление расплава;
- изменением конфигурации боковых отверстий, оборудованием кольцевой камеры, соединенной с боковыми отверстиями и др.

Большой интерес к созданию новых конструкций стаканов, в том числе с закручиванием потоков расплава, связан с неудовлетворительными технологическими и экономическими результатами, полученными при использовании ряда разработок, в том числе по механическому и электромагнитному перемешиванию в кристаллизаторах МНЛЗ [3 – 8].

Накопленный опыт показывает, что использование безнапорных стаканов без учета характера потоков жидкого металла, поведения попавших в жидкую лунку примесных образований может привести к ухудшению качества литого металла.

Оптимизация гидродинамики разливки с помощью конструктивных изменений сталеразливочных стаканов, изменения глубины их погружения позволяет организовать поля скоростей вблизи мениска таким образом, чтобы получить «горячий», умеренно активный мениск, максимально равномерное распределение

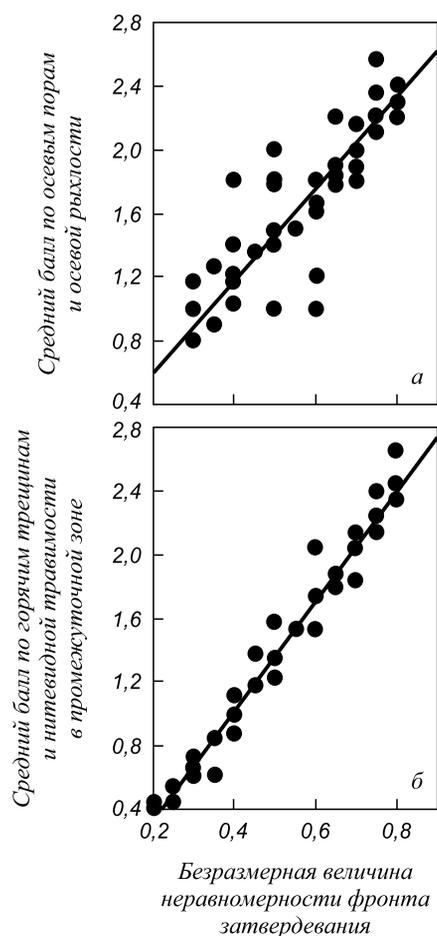


Рис. 3. Взаимосвязь относительной величины неравномерности $\Delta\xi/\bar{\xi}$ фронта затвердевания ($\Delta\xi$ – абсолютная величина разнотолщинности корки, $\bar{\xi}$ – средняя толщина корки) на качественные показатели литого металла по осевым порам (а) и среднего балла по трещинам и нитевидной травимости в промежуточной зоне (б)

интенсивных циркуляционных потоков вдоль фронта затвердевания в верхней части кристаллизатора при уменьшении вероятности затягивания примесных образований в жидкую лунку.

Применение безнапорных разливочных стаканов с эффектом закручивания истекающих струй в горизонтальной плоскости имеет ряд преимуществ по сравнению с прямоточными и безнапорными без эффекта закручивания:

- меньшая глубина проникновения струи поступающего в кристаллизатор расплава (по сравнению с прямоточной разливкой);
- меньшая глубина расположения и высота бифуркационной зоны;
- снижение (при ряде конструктивных параметров) степени затягивания примесных образований, попадающих в жидкую лунку из разливочного стакана;
- повышенная частота (по сравнению с прямоточной разливкой) и пониженная амплитуда колебаний гидротоков, что повышает интенсивность теплоотдачи в верхней части жидкой лунки и снижает удерживающее воздействие примесных образований бифуркационной зоной;
- более равномерное скоростное поле гидротоков по периметру жидкой лунки;
- более «горячий» мениск, что уменьшает вероятность образования заворотов и плен.

Из исследованных разливочных стаканов по большинству показателей наиболее рациональна конструкция безнапорного стакана со смещенными отверстиями (рис. 4).

Разработанная конструкция сталеразливочного стакана [8] позволяет разливать круглые и квадратные заготовки с помощью стаканов круглого поперечного сечения, а заготовки прямоугольного сечения с соотношением сторон до 1:1,5 с помощью стаканов овального сечения.

На рис. 5 показаны результаты гидромоделирования разливки непрерывной заготовки сечением 150×200 мм.

Применение безнапорных разливочных стаканов овального типа с соотношением осей 1:1,3, как видно из рисунка, позволили:

- зафиксировать глубину проникновения струй на уровне 250 – 280 мм;
- организовать вращающееся поле потоков до глубины 530 – 540 мм с небольшими колебаниями скоростей вдоль фронта затвердевания в углах до 15 % от среднего значения;
- получить однородное низкоскоростное поле гидротоков ниже глубины проникновения струй поступающего в кристаллизатор расплава;
- получить среднеподвижный мениск без стоячих волн;
- улучшить всплытие неметаллических включений к мениску за счет увеличения скоростей подъема гидротоков и снижения их опускания ниже глубины проникновения струй из сталеразливочного стакана.

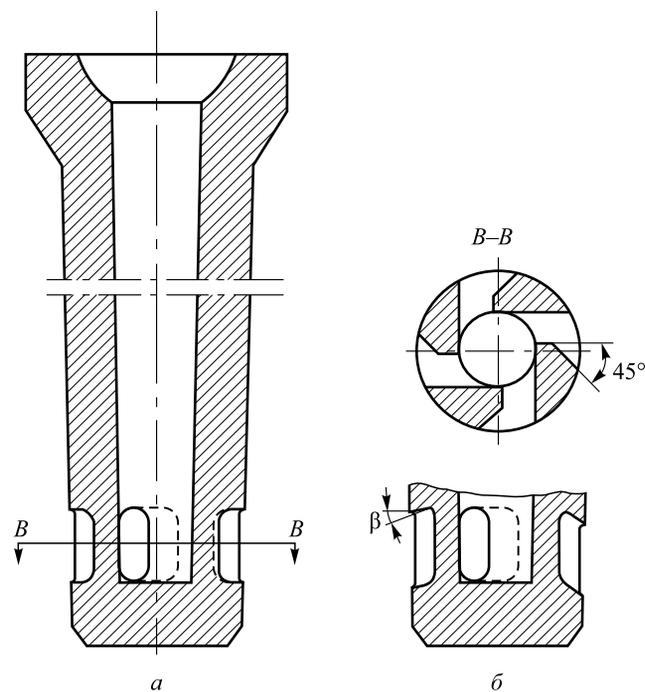


Рис. 4. Эскиз продольного (а) и поперечного (б) (нижней части) сечения погружного безнапорного сталеразливочного стакана с четырьмя смещенными отверстиями с углами скоса $\alpha = 45^\circ$ (смещение отверстий 18 – 20 мм) и наклона к горизонту $\beta = +10, 0, -10^\circ$

Анализ результатов моделирования показал, что при правильной центровке сталеразливочных овальных стаканов скоростные поля потоков заготовки сечением 150×200 мм в зоне кристаллизатора получаются такими же, как при разливке заготовки сечением 150×150 мм круглым сталеразливочным стаканом при прочих равных условиях.

Промышленные эксперименты с разработанными конструкциями сталеразливочных стаканов показали, что стойкость их, как и штатных стаканов, лимитируется отложениями на стенках стаканов и выходных отверстий, которые представляют скопления пластинчатого корунда в окружении гекса- и диалюминатов кальция и шпинели, оксидами кремния и алюминия. Для повышения срока эксплуатации стакана-дозатора и погружного стакана возможно использование специального антиклоггингового покрытия внутренней полости погружного стакана и применения изостатически прессуемых корундо-графитовых погружных стаканов, усиленных в зоне контакта со шлаком цирконовым поясом.

Практические испытания показали, что равномерное распределение потоков расплава в кристаллизаторе и увеличение срока службы погружного стакана возможно за счет увеличения отношения суммарной площади выходных отверстий стаканов к поперечной площади металлопровода до 1,7 – 2,0.

Выводы. Приведены результаты исследования по влиянию способа подвода расплава с помощью безнапорных разливочных стаканов со смещенными выходными каналами на равномерность распределения

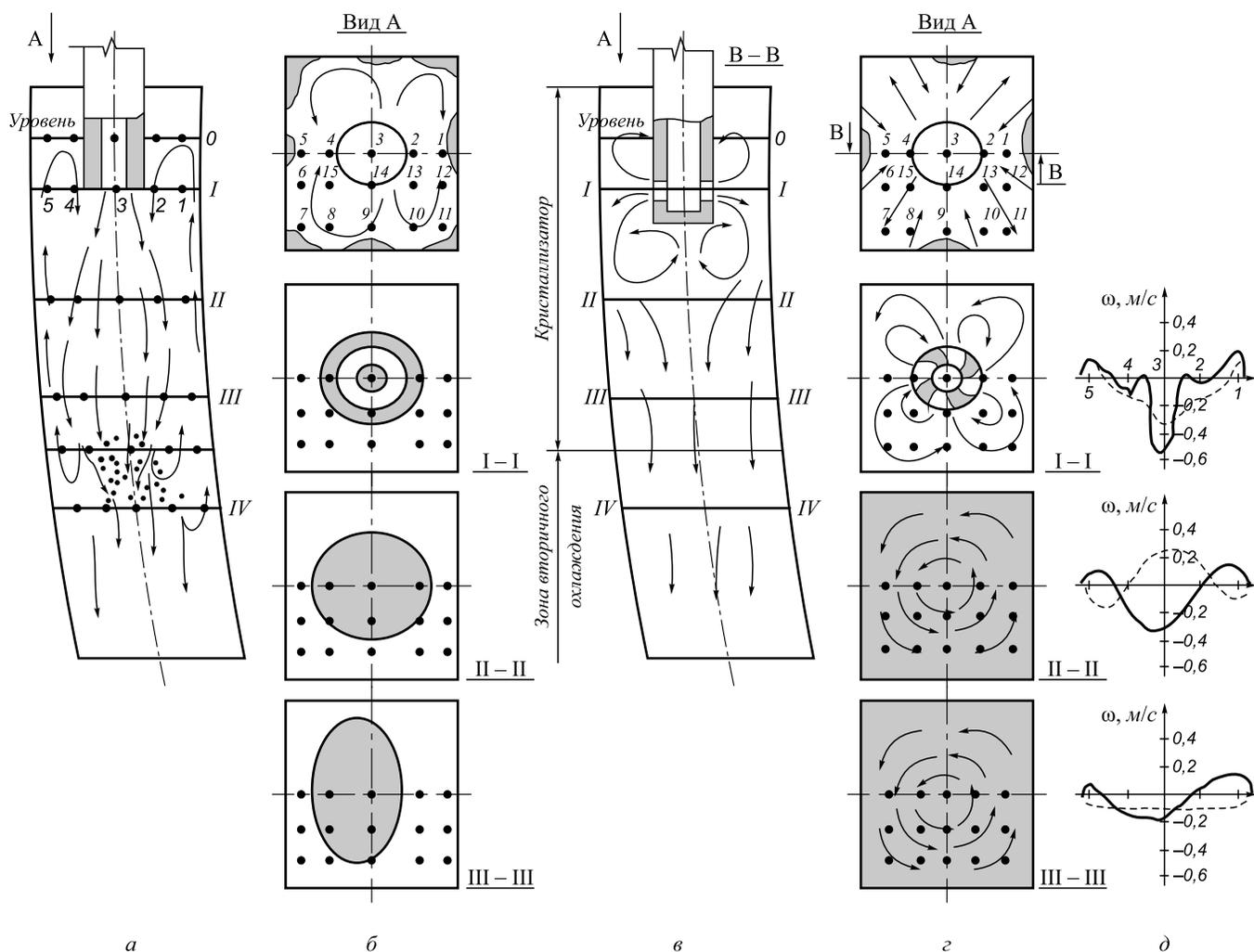


Рис. 5. Схемы распространения потоков в вертикальных (а, в) и горизонтальных (б, з) сечениях кристаллизатора, эпюры скоростей в них (д) при применении прямооточного и безнапорного (рис. 4) разливных стаканов при скорости разливки 3,0 м/мин; 1 – 15 – точки замера скоростей

скоростей потоков расплава, условий теплоотдачи, равномерность нарастания твердой корки и качественные показатели литого металла. Разработанную конструкцию стаканов овального сечения рекомендуется использовать для разливки сортовых заготовок прямоугольного сечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еланский Г.Н. Разливка и кристаллизация стали // – М.: МГВМИ, 2010. – 191 с.
2. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали / – М.: Мир, 2003. – 528 с.
3. Гушин, В.Н., Ульянов В.А. Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепло-массообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 141 с.
4. Внепечная обработка и разливка стали / В.А. Ульянов, В.Л. Сивков, В.Н. Гушин и др. – Н. Новгород: НГТУ, 2008. – 129 с.
5. Токаги С., Сайто Т., Ниппок К., Юкойа С. Влияние закрученного потока в погружном стакане на массовый расход в высокопроизводительном кристаллизаторе УНРС // Новости черной металлургии за рубежом. 2002. № 3. С. 66 – 67.
6. Ильин В.И., Коротков Б.А., Гушин В.Н., Ульянов В.А. Управление потоками стали в кристаллизаторах МНЛС с помощью разливных стаканов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. № 9. С. 19 – 23.
7. Гушин В.Н., Паршин В.М., Куклев А.В. Создание закручивающего эффекта расплава в кристаллизаторах МНЛЗ с помощью безнапорных разливных стаканов // Сталь. 2006. № 12. С. 21 – 23.
8. Пат. 2308353 РФ. МПК В22Д 41/50. Глухонный погружной стакан / В.М. Паршин, В.В. Павлов, М.Б. Оржех и др. Бюл. № 29. 2007.

© 2014 г. Гушин В.Н., Ульянов В.А., Балан С.А.
Поступила 10 июня 2014 г.

FEATURES OF SUPPLY OF THE MELT IN MOLDS OF THE BILLETS

Gushchin V.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermophysics, automation and ecology of the furnaces” (guschinvn@ramler.ru)

Ul’yanov V.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermophysics, automation and ecology of the furnaces”

Balan S.A., Senior Lecturer of the Chair “Thermophysics, automation and ecology of the furnaces”

Nizhny Novgorod State Technical University named after R. Alexeev (24, Minina str., Nizhny Novgorod, 603022, Russia)

Abstract. The results of studies on the influence of the method of supplying the melt by using gravity filling cups with offset output channels on the uniformity of the velocity distribution of the flow of the melt, heat transfer, the uniformity of growth of the solid crust are described with the qualitative indicators of cast metal. Engineered glasses of oval cross-section are recommended for casting of billets of rectangular cross-section. Practical tests have shown that a uniform distribution of the flow of the melt in the mold of billets is possible through the use of developed design of the glasses of oval cross-section with respect to the total area of all output channels to the cross-sectional area, i.e. metal wire of 1.7 to 2.0.

Keywords: mold, nozzle, flow of the melt, front solidification, billets, quality of the metal.

REFERENCES

1. Elanskii G.N. *Razlivka i kristallizatsiya stali* [Casting and crystallization of steel]. Moscow: MGVM, 2010. 191 p. (In Russ.).
2. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali* [Theory and technology of steel production]. Moscow: Mir, 2003. 528 p. (In Russ.).
3. Gushchin V.N., Ul’yanov V.A. *Metody issledovaniya i razrabotka gradientnykh promyshlennykh tekhnologii upravleniya teplomas-soobmennymi protsessami pri razlivke i formirovani nepreryvno-litykh i statsionarnykh zagotovok* [Methods of research and development of industrial technology of management gradient of heat mass exchange processes for casting and shaping of continuously and stationary workpiece]. Nizhny Novgorod: NGTU, 2006. 141 p. (In Russ.).
4. Ul’yanov V.A., Sivkov V.L., Gushchin V.N., Kitaev E.M., Larin M.A. *Vnepechnaya obrabotka i razlivka stali* [Off-furnace processing and casting of steel]. Nizhny Novgorod: NGTU, 2008. 129 p. (In Russ.).
5. Takagi S., Saito T., Nippok K., Yukoia S. Effect of swirling flow in a submerged nozzle on the mass flow rate in a high productive mold of CCM. *Novosti chernoi metallurgii za rubezhom*. Moscow: OAO “Chermetinformatsiya”, 2002, no. 3, pp. 66–67. (In Russ.).
6. Il’in V.I., Fedorov L.K., Korotkov B.A., Gushchin V.N., Ul’yanov V.A. Control of steel flows in mold of continuous caster by means of submerged entry nozzles. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 9, pp. 19–23. (In Russ.).
7. Gushchin V.N., Parshin V.M., Kuklev A.V. Creating a swirl effect in the melt in crystallizers of caster using non-pressure discharge nozzle. *Stal’*. 2006, no. 12, pp. 21–23. (In Russ.).
8. Parshin V.M., Pavlov V.V., Orzhekh M.B., Gushchin V.N., Aksel’rod L.M., Larin A.V., Sapaev N.M., Botnev K.E., Fedorov L.K. Patent RF no. 2308353. *Glukhodonnyi pogruzhnoi stakan* [Solid-bottom submerged nozzle]. *Byulleten’ izobretenii*. 2007, no. 29. (In Russ.).

Received June 10, 2014