

Изобретение относится к металлургии, в частности к литью металлов непрерывным способом и может быть использовано при отливке слитков на вертикальных и криволинейных установках.

Известен способ непрерывной разливки металлов, предусматривающий периодическое заполнение дополнительно введенной в кристаллизатор керамической трубы металлом и вытеснение его в объем кристаллизатора путем изменения давления инертного газа в трубе, пропорционально движению кристаллизатора (Авторское свидетельство СССР №1306635, кл. B22D11/00, 1987).

К недостаткам этого способа относятся низкая эффективность перемешивания металла, обусловленная необходимостью вытеснять металл из трубы и заполнять ее с относительно небольшой скоростью, определяемой частотой и характером движения кристаллизатора, несимметричное расположение пульсирующей струи относительно оси слитка, вызывающее односторонний подмыв оболочки слитка и, как следствие, повышение его структурной и химической неоднородности, а также дополнительный расход огнеупорных материалов для изготовления пульсационных труб.

Наиболее близким решением к предложенному по технической сущности и достигаемому результату является способ непрерывного литья слитков, включающий подачу жидкого металла из стакана-дозатора промежуточного ковша в кристаллизатор через погружную огнеупорную трубу и пульсационное перемещение металла в кристаллизаторе периодическим наполнением и вытеснением металла из огнеупорной трубы газом со скоростью  $(3-4)d/D$  скорости вытеснения металла из промежуточного ковша, а длительность заполнения составляет

$$(1,0 - 1,1)\Delta h/V,$$

где  $d$  - диаметр струи металла, вытекающего из промежуточного ковша, м;

$D$  - диаметр струи металла, вытесняемого из огнеупорной трубы, м;

$\Delta h$  - колебание уровня металла в кристаллизаторе в процессе пульсации, м;

$V$  - скорость литья, м/мин.

Формирование слитка и его вытягивание из кристаллизатора. (Авторское свидетельство СССР №1301552, кл. B22D11/00, 1987).

В известном способе непрерывного литья слитков, как показали лабораторные исследования и опытные разливки, истекающая из промежуточного ковша струя металла, поступая в огнеупорную трубу, инжектирует из нее газ, который увлекается струей в жидкий металл, находящийся в погруженной в него части трубы, и распределяется там в виде пузырей. При повышении давления в трубе металл вытесняется из нее, причем на выходе из трубы поток металла приобретает вращательно-поступательное движение в вертикальной плоскости, образуя кольцевой вихрь тороидальной формы, перемещающийся в жидкую фазу слитка.

По мере вытеснения металла из трубы вихрь перемещается вниз с одновременным увеличением наружного диаметра и поперечного сечения. Вращательное движение металла в

вихре обеспечивает снижение в нем статического давления. Это приводит к тому, что пузыри газа, вытесняемые вместе с потоком металла из огнеупорной трубы, вовлекаются в вихрь, образуя вокруг центра его вращения газовое кольцо тороидальной формы.

К моменту изменения направления движения жидкого металла в трубе вращательно-поступательное движение приобретает практически весь вытесняемый из нее поток металла. При этом на выходе из трубы скорость поступательного движения вихря равна скорости вытеснения металла. По мере опускания газового вихря в жидкой фазе слитка скорость его движения снижается, а диаметр незначительно возрастает. По достижении определенной глубины проникновения в жидкую лунку газосодержащий вихрь под действием выталкивающих сил газа и вязкости металла разрушается. Газовое кольцо теряет свою форму и также разрушается на отдельные пузыри, которые затем всплывают вверх к свободной поверхности металла в кристаллизаторе. Если разрушение кольцевого вихря произошло в зоне вторичного охлаждения, где на внутренней оболочке слитка растут столбчатые кристаллы, то некоторая часть всплывающих пузырей запутывается между кристаллами и остаются в теле слитка. В эти пузыри в процессе кристаллизации металла мигрируют неметаллические включения, газы, ликвирующие элементы, что приводит к возникновению различных дефектов макроструктуры: осевой пористости, внутренних трещин, пятнистой ликвиации, химической и структурной неоднородности. Как показали опытные разливки, такие условия имеют место, если реализация способа прототипа происходит при отливке слитка, например, сечением  $350 \times 400$  мм на вертикальной МНЛЗ со скоростью разливки  $0,0108$  м/с, начальном гидравлическом диаметре струи металла на выходе из стакана-дозатора  $0,04$  м, внутреннем диаметре огнеупорной трубы  $0,08$  м, глубине погружения ее в металл  $0,2$  м и скоростью вытекания из стакана промковша  $2,0$  м/с. Глубина проникновения кольцевого газосодержащего вихря в этом случае составляет  $2,51$  м. После разрушения вихрей на такой глубине вносимый ими газ не может полностью покинуть слиток в виде всплывающих пузырей, поскольку часть их, подобно сотовым пузырям в слитке кипящей стали, запутывается между кристаллами дендритной формы, вызывая указанные выше дефекты непрерывнолитой заготовки.

Использование прототипа при разливке металла на криволинейных машинах вообще невозможно, поскольку искривление слитка существенно ухудшает условия удаления из него газовых пузырей, вносимых кольцевыми вихрями. В этом случае задержка пузырей газа в зоне вторичного охлаждения происходит кристаллами, расположенными из фронте кристаллизации слитка со стороны меньшего радиуса, даже при небольших глубинах проникновения кольцевых газосодержащих вихрей о местах, где траектория всплывания пузырей начинает пересекаться с растущими столбчатыми кристаллами.

В основу изобретения поставлена задача усовершенствования способа непрерывного литья слитков на вертикальных и криволинейных установках путем получения безгазовых кольцевых

вихрей, которые, по сравнению с газосодержащими вихрями, благодаря отсутствию действия выталкивающих (архимедовых) сил, обладают большими импульсом и устойчивостью при движении в жидкой фазе слитка. Указанные обстоятельства позволяют использовать энергию вихрей для перемешивания жидкой сердцевинки слитка на достаточно больших ее глубинах. Получаемые в таких условиях непрерывнолитые слитки не содержат пузыри газа, вносимого вихрями, и обладают высокой степенью однородности по структуре и химсоставу.

Это достигается благодаря тому, что о способе непрерывного литья слитков на вертикальных и криволинейных установках, включающем подачу жидкого металла струей из стакана-дозатора из промежуточного ковша в кристаллизатор через погружную огнеупорную трубу, пульсационное перемешивание металла в кристаллизаторе периодическим наполнением и вытеснением металла газом из огнеупорной трубы, формирование слитка и его вытягивание из кристаллизатора, предусмотрены следующие приемы:

а) уровень металла в огнеупорной трубе изменяют в пределах от 0,5 ... 1,5 до 5 ... 7 начальных гидравлических диаметров струи от стакана дозатора;

б) по достижении металлом о трубе верхнего положения его выдерживают в течение времени  $\tau$ , определяемого из выражения:

$$111,4 \cdot \tau_b \left( \frac{F}{f} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{\tau_3}{\tau_b} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{h_b}{d} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{h_n}{d} \right)^{0,2}$$

в) металл вытесняют из огнеупорной трубы со скоростью, ( $\omega$ , м/с), определяемой из выражения:

$$4,55 \left( \mu_f \sqrt{H} + \sqrt{h_n} \right) \leq \omega \leq \frac{\sqrt{2(P_0 + \rho_{ж} g h_r - P_n)}}{\rho_{ж}}$$

при этом

$$L = \frac{0,015V(a - 2d_r)}{k^2} + 1 - \sqrt{\frac{0,015 \cdot V \cdot (a - 2d_r)}{k^2} + 0,00045}$$

где  $L$  - расстояние по оси слитка от огнеупорной трубы до точки соприкосновения кольцевого вихря с оболочкой слитка, м;

$\tau_b$  - время вытеснения металла из огнеупорной трубы, с;

$f, F$  - площадь живого сечения соответственно потока металла на входе в стакан-дозатор и струи на выходе из него, м<sup>2</sup>;

$\tau_3$  - время заполнения огнеупорной трубы металлом, с;

$h_b, h_n$  - расстояние от стакана-дозатора до уровня металла в огнеупорной трубе соответственно при верхнем и нижнем его положении в ней, м;

$d$  - начальный гидравлический диаметр струи металла, м;

$e$  - основание натурального логарифма;

$d_r$  - начальный гидравлический диаметр потока металла, вытесняемого из огнеупорной трубы, м;

$\mu$  - коэффициент скорости;

$H$  - высота налива металла в промежуточном ковше, м;

$P_0$  - атмосферное давление, Па;

$\rho_{ж}$  - плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/м<sup>2</sup>;

$h_r$  - глубина погружения огнеупорной трубы в металл, м;

$P_n$  - упругость насыщенного пара жидкого металла, Па;

$a$  - толщина слитка, м;

$K$  - коэффициент затвердевания металла, м/мин 0,5;

$V$  - скорость разливки металла, м/мин.

Экспериментально установлено, что если живое сечение струи металла на выходе из стакана-дозатора превышает живое сечение потока металла на входе в этот стакан в пределах 2,25 - 6,25 раза, то незатопленная часть струи на расстоянии от стакана-дозатора 1,5 ее начальных гидравлических диаметра и меньше имеет гладкую поверхность и поэтому струя не инжектирует газ. При расположении верхнего уровня металла в трубе от стакана-дозатора на расстоянии большем 1,5 начальных гидравлических диаметра поверхность струи становится волнистой и она начинает инжектировать газ, который вовлекается в кольцевые вихри и уносится ими в слиток, в результате чего он насыщается газом, что приводит к образованию указанных выше дефектов макроструктуры.

Движение металла в огнеупорной трубе, как было установлено экспериментально, сопровождается колебанием его поверхности, причем высота волн, при прочих равных других параметрах, возрастает с увеличением начального гидравлического диаметра струи металла. По этой причине, если верхний уровень металла в огнеупорной трубе выбрать нижезаявляемого, т.е. меньше 0,5 начальных гидравлических диаметра струи от стакана-дозатора, то в процессе колебаний поверхности металла о трубе он попадает в пространство между стаканом-дозатором и стенками огнеупорной трубы, что приведет к заметалливанию зазора между ними и тем самым затруднит или исключит поступление газа в полость огнеупорной трубы, в результате чего дальнейшее осуществление заявляемого способа окажется невозможным.

Экспериментально установлено, что продолжительность всплывания пузырей в жидком металле в огнеупорной трубе после достижения металлом верхнего заявляемого положения определяется из следующей зависимости:

$$\tau = 111,4 \cdot \tau_b \left( \frac{F}{f} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{\tau_3}{\tau_b} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{h_b}{d} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{h_n}{d} \right)^{0,2}$$

Если продолжительность выдержки металла в верхнем положении меньше или равна определяемой из этого выражения, т.е. нижнего заявляемого предела времени, то до начала следующего вытеснения пузыри газа, которые были инжектированы струей металла во время заполнения трубы, не успевают полностью покинуть трубу и вытесняются вместе с находящимся в ней металлом с образованием ниже среза трубы кольцевого газосодержащего вихря, перемещающегося в жидкую сердцевину слитка на достаточно большую глубину, внося в него газ.

Глубина проникновения безгазовых кольцевых вихрей в жидкую фазу слитка при совпадении траектории их движения с осью слитка, как было

установлено экспериментально, зависит в основном от его толщины и наружного диаметра кольцевого вихря, оцениваемого внутренним диаметром огнеупорной трубы. Эта глубина определяется из следующей зависимости:

$$L = \frac{0,015V(a - 2d_r)}{k^2} + 1 - \sqrt{\frac{0,015 \cdot V \cdot (a - 2d_r)}{k^2}} \cdot 111,4 \cdot \tau_0 \left(\frac{F}{f}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{\tau_3}{\tau_0}\right)^{-0,62} \cdot \left(\frac{h_a}{d}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{h_{II}}{d}\right)^{0,2}$$

По достижении данной глубины вихрь начинает соприкасаться с твердой оболочкой слитка и, в первую очередь, с растущими к его центру столбчатыми кристаллами, вследствие чего он разрушается на несколько мелких, но уже не кольцевых вихрей (с разомкнутой вихревой трубкой), которые продолжают еще некоторое время перемещаться в жидкой фазе слитка и перемешивать ее.

Соприкосновение вихря с кристаллами дендритной формы ведет не только к перемешиванию находящейся между ними жидкой фазы, но и к их частичному подплавлению и разрушению с образованием большого числа новых центров кристаллизации. Это обеспечивает снижение протяженности зоны столбчатых и расширение зоны равноосных кристаллов в непрерывнолитой заготовке при одновременном повышении ее химической однородности.

Кроме указанных параметров, на глубину проникновения безгазовых кольцевых вихрей в жидкую фазу слитка влияет также характер и скорость потоков в ней, вызванных предыдущими кольцевыми вихрями. При определенных скоростях такие потоки расплава могут отклонить кольцевой вихрь от заданного направления движения, что приведет к соприкосновению кольцевого вихря с фронтом кристаллизации слитка на меньших глубинах, чем  $L$ . Чтобы это не произошло, каждый последующий кольцевой вихрь должен быть образован о жидкой лунке слитка только после разрушения предыдущего и снижения вызванных им скоростей потоков до величины, исключающей изменение заданного направления движения нового кольцевого вихря.

Экспериментально установлено, что минимальная продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем его положении, обеспечивающая поддержание заданной траектории движения кольцевого вихря в жидкой фазе, т.е. указанных выше условий, определяется из следующей эмпирической зависимости:

$$\tau = 5,42 \tau_3^{-0,36} \cdot \omega^{-0,61} \cdot e^{0,012 V d_r}$$

Продолжительность выдержки металла в верхнем положении, найденная по этой зависимости, отвечает верхнему заявляемому пределу. Превышение его снижает эффективность обработки, поскольку при этом уменьшается частота пульсаций и кристаллизующийся металл перемешивается в меньшей степени, что сопровождается ухудшением структурной и химической его неоднородности. В частности, возрастают зона столбчатых кристаллов и осевая ликвация элементов, находящихся в жидкой фазе слитка. Оптимальная продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела

на 50 - 70% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \tau_3^{-0,36} \cdot \omega^{-0,61} \cdot e^{0,012 V d_r} \frac{50 - 70}{100} \left[ 5,42 \tau_3^{-0,36} \cdot \omega^{-0,61} \cdot e^{0,012 V d_r} \right]$$

При такой выдержке металла в верхнем положении в огнеупорной трубе глубина проникновения кольцевых вихрей в жидкую фазу слитка от изменения их траектории движения практически не уменьшается, а скорость движения потоков кристаллизующегося металла достаточна для усреднения его состава и снижения условий роста столбчатых кристаллов, что обеспечивает получение высокой структурной и химической однородности металла при его кристаллизации.

Экспериментально установлено, что если металл после выдержки его в огнеупорной трубе в верхнем положении вытеснять со скоростью ниже заявляемой, т.е.

$$\omega < 4,55(\mu f / F \sqrt{H} + \sqrt{h_{II}}),$$

то струя по мере движения металла вниз вносит в него инжектируемый газ, который попадает затем в кольцевой вихрь и вводится им в слиток.

При вытеснении металла из трубы со скоростью, соответствующей нижнему заявляемому пределу, струя глубоко не проникает в вытесняемый металл и вносимый ею газ не вовлекается в вихрь.

В условиях, когда металл вытесняют со скоростью, равной скорости движения струи или превышающей ее, вытесняемая порция не пополняется металлом и, следовательно, инжектируемым струей газом, в результате чего образующиеся кольцевые вихри тоже не содержат газ.

Если скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы превышает верхний заявляемый предел

$$\omega = \frac{\sqrt{2(P_0 + \rho_{жg} h_T - P_n)}}{\rho_{ж}},$$

то в центре вращения кольцевого вихря вследствие снижения в нем давления до величины упругости пара жидкого металла образуется кавитационная каверна, которая при попадании в зоны более высокого давления за счет конденсации паров металла быстро захлопывается, что приводит к сильной пульсации давления в кольцевом вихре и он разрушается. По этой причине перемешивание жидкой фазы слитка при таких скоростях вытеснения металла из огнеупорной трубы на больших глубинах не происходит.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе от стакана-дозатора составляет 5 - 7 начальных гидравлических диаметров струи. Установлено, что если металл вытеснять до уровня ниже заявляемого, то диапазон перемещения металла в трубе оказывается недостаточным для полного формирования кольцевых вихрей и они разрушаются в жидкой фазе слитка на небольших глубинах. Кроме того, с уменьшением диапазона колебания металла в огнеупорной трубе снижается вытесняемая из нее масса порции металла, что сопровождается уменьшением количества движения кольцевого вихря и, следовательно,

снижением устойчивости при движении. Такие вихри слабо перемешивают кристаллизующийся металл в непрерывнолитом слитке, в результате чего в нем развивается осевая ликвация и увеличивается протяженность зоны столбчатых кристаллов.

При пульсационной обработке в условиях, когда нижний уровень металла в огнеупорной трубе выше заявляемого, т.е. больше 7 начальных гидравлических диаметров струи металла от стакана-дозатора, существенно возрастает диапазон движения металла в огнеупорной трубе и для его обеспечения необходимо использовать достаточно длинные трубы с большой глубиной их погружения в металл, что сопряжено с одной стороны, с повышенным расходом огнеупорных материалов, а с другой - со снижением эффективности перемешивания металла в верхних его горизонтах в пределах кристаллизатора.

На чертеже (фиг.) показана схема устройства для осуществления заявляемого способа непрерывного литья слитков на вертикальных и криволинейных установках и потоков в жидкой фазе слитка.

Устройство состоит из кристаллизатора 1 с жидкой металлической фазой 2, в которую погружена огнеупорная труба 3, герметично соединенная стыковочным узлом 4 с промежуточным ковшом 5, стакана-дозатора 6, трубопровода 7 для подачи газа в огнеупорную трубу 3 и выпуска его из трубы. В результате вытеснения металла газом из огнеупорной трубы 3 в жидкой фазе 2 образуются кольцевые вихри 8.

Способ осуществляют следующим образом.

Металл истекает из промежуточного ковша 5 (фиг.) через стакан-дозатор 6 и огнеупорную трубу 3 в кристаллизатор 1 струей, живое сечение которой на выходе из стакана-дозатора превышает живое сечение потока на входе в стакан-дозатор в 2,25 - 6,25 раза. Это достигается за счет использования стакана-дозатора с соответствующим соотношением площадей отверстий на его выходе и входе или путем уменьшения площади отверстия на входе в стакан-дозатор стопорным устройством.

В огнеупорной трубе 3 путем отсоса из нее газа через трубопровод 7 создают разрежение, под действием которого металл поднимается в трубе в процессе разливки на уровне  $h_b = 0,5...1,5$  начальных гидравлических диаметра струи от стакана-дозатора. За счет поддержания в трубе постоянного разрежения металл выдерживают в таком положении в течение времени ( $\tau$ , с), определяемого из выражения:

$$111,4 \cdot \tau_b \left( \frac{F}{f} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{r_3}{r_b} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{h_b}{d} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{h_n}{d} \right)^{0,2} \leq \omega < \frac{\sqrt{2(P_0 + \rho_{ж} g h_T - P_n)}}{\rho_{ж}}$$

По истечение данного времени выдержки металл в огнеупорной трубе повышают давление нейтрального газа, обеспечивая вытеснение из нее металла на уровень  $h_n = 5...7$  начальных гидравлических диаметров струи от стакана-дозатора со скоростью ( $\omega$ , м/с)

$$4,55 (\mu f / F \cdot \sqrt{H} + \sqrt{h_n}) \leq$$

$$\leq \omega < \frac{\sqrt{2(P_0 + \rho_{ж} g h_T - P_n)}}{\rho_{ж}}$$

В таких условиях вытеснение металла из трубы сопровождается образованием безгазовых кольцевых вихрей 8, глубоко проникающих в жидкую фазу 2 слитка. Затем давление в трубе снижают, металл заполняет ее, поднимаясь до верхнего уровня, и указанные операции повторяют.

Примеры.

Предложенный способ иллюстрируется 17 примерами его осуществления (№1 - 17). Один пример №18 относится к способу-прототипу.

На МНЛЗ вертикального типа отливают непрерывнолитые заготовки поперечным, сечением 350 × 400 мм из стали 20 следующего химического состава, %: 0,19 (C); 0,55 (Mn); 0,3 (Si); 0,035 (S); 0,035 (P); 0,25 (Cu); 0,25 (Cr); 0,25 (Ni); 0,02 (Al). Во всех примерах температура стали в промежуточном ковше находится в пределах 1530 - 1550°C, высота налива в нем металла 0,67 м, стакан-дозатор в промковше имеет отверстие цилиндрической формы. Уменьшение площади сечения потока металла на входе в стакан-дозатор достигается стопорным устройством. Скорость разливки составляет 0,0108 м/с, что обеспечивается живым сечением потока металла на входе в стакан-дозатор, равным

$$f = \frac{0,35 \cdot 0,4 \cdot 0,0108 \cdot 7800}{7000 \cdot 0,72 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,67}} = 0,0006453 \text{ м}^2$$

где 0,35 и 0,4 - толщина и ширина слитка соответственно, м;

7800 и 7000 - плотность металла твердого и жидкого, кг/м<sup>3</sup>;

0,72 - коэффициент скорости;

9,81 - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Живое сечение струи металла на выходе из стакана-дозатора превышает живое сечение потока металла на входе в этот стакан в 3,046 раза и составляет

$$F = 3,046 \cdot 0,0006453 = 0,0019655 \text{ м}^2.$$

Такую площадь сечения струи металла обеспечивает отверстие на выходе из стакана-дозатора, равное

$$d = \frac{\sqrt{4 \cdot F}}{\pi} = \frac{\sqrt{4 \cdot 0,0019655}}{3,14} = 0,05 \text{ м}.$$

Стакан-дозатор расположен над уровнем металла в огнеупорной трубе в спокойном состоянии на расстоянии 0,25 м. Коэффициент затвердевания металла составляет 0,028 м/мин<sup>0,5</sup>. Огнеупорные трубы для пульсационного перемешивания имеют внутренний диаметр 0,08 м, толщину стен 0,03 м и длину 0,5 м. Защиту поверхности металла в кристаллизаторе от окислительной атмосферы обеспечивают за счет наведения в нем шлака, состоящего из 15% криолита, 8% борного ангидрида и 77% графита.

Вытеснение металла из огнеупорной трубы осуществляют аргонном. Подачу последнего к огнеупорной трубе и удаление отработанных газов из нее производят при помощи систем трубопроводов и запорной арматуры, состоящих из

металлических труб внутренним диаметром 20мм, регулирующих вентилей, впускного и выпускного клапанов, соединяющих полость огнеупорной трубы в ее верхней части соответственно с магистралями подачи аргона и отсоса газов. Давление аргона в магистрали составляет 0,6МПа, а разрежение в отсасывающей сети 0,05МПа. Текущее значение давления в полости огнеупорной трубы фиксируют быстродействующим датчиком. Скорость вытеснения металла из трубы регулируют путем изменения времени впуска аргона, т.е. его расхода, при помощи регулирующих вентилей.

Расстояние по оси слитка от среза огнеупорной трубы до точки соприкосновения кольцевого вихря с оболочкой слитка остается постоянным для всех примеров и составляет

$$L = \frac{0,015 \cdot 0,0108 \cdot 60(0,35 - 2 \cdot 0,08)}{0,028^2} + 1 - \sqrt{\frac{0,00045 \cdot 0,0108 \cdot 60}{0,028^2} + \left[ \sqrt{\frac{2/100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94}{7000}} - 4,55 (0,72 \sqrt{0,67} \cdot \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,3}) \right] \frac{50}{100}}$$

$$\dots \frac{0,0009 \cdot 0,0108 \cdot 60}{0,028^2} \left[ 0,0108 \cdot 60 \left( \frac{0,35 - 2 \cdot 0,08}{2 \cdot 0,08} \right) - \frac{0,00045 \cdot 0,0108 \cdot 60}{0,028^2} \right]$$

Упругость насыщенного пара жидкого металла в экспериментах принята равной в среднем 4,94Па.

Длительность заполнения металлом огнеупорной трубы для всех примеров конкретного выполнения заявляемого способа принята по прототипу, т.е. такой, чтобы скорость опускания улову металла в кристаллизаторе с целью предотвращения корочки от вторичного окисления была меньше, чем скорость разливки

$$\tau_3 = 1,05 \frac{\Delta h}{V} = 1,05 \frac{3,14 \cdot d_1^2 / 4 \cdot h}{a \cdot B - 3,14 (d_1 + 2 \cdot 0,03)^2 / 60}$$

где  $\Delta h$  - колебание уровня металла в кристаллизаторе в процессе пульсации, м;

$a, b$  - толщина и ширина непрерывнолитого слитка, м;

0,03 - толщина стенки погружной трубы, м;

$h$  - диапазон колебания уровня металла в огнеупорной трубе, м;

$\tau_b$  - продолжительность вытеснения металла из огнеупорной трубы,

1,05 - коэффициент.

Примеры. Все заявляемые параметры в этом примере имеют оптимальные значения.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе принят равным одному начальному гидравлическому диаметру струи от стакана-дозатора, т.е.

$$h_b = 1 \cdot 0,05 = 0,05 \text{ м,}$$

а нижний - шести. Он составляет

$$h_n = 6 \cdot 0,05 = 0,3 \text{ м.}$$

Диапазон изменения уровня металла в огнеупорной трубе ( $h$ ) равен

$$h = h_n - h_b = 0,3 - 0,05 = 0,25 \text{ м.}$$

При этом верхнее положение металла в трубе относительно исходного уровня составляет

$$0,25 - 0,05 = 0,2 \text{ м.}$$

а нижнее равно

$$0,25 - 0,3 = -0,05 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при верхнем положении металла в ней

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 = 86266 \text{ Па,}$$

при нижнем

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 (-0,05) = 103434 \text{ Па.}$$

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы, превышающая нижний заявляемый предел на 50% от разности между верхним и нижним ее пределами, равна

$$\omega = 4,55 (0,72 \sqrt{0,67} \cdot \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,3}) +$$

$$4,54 \text{ м/с.}$$

Время вытеснения металла из трубы

$$\tau_b = \frac{0,25}{4,54} = 0,055 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы составляет

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,25}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 / 0,08 + 2 \cdot 0,03^2 / 4} - 0,0108 \cdot 0,055$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении, которое ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, составляет

$$\tau = 5,42 \cdot 0,88^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08} - \frac{60}{100} [5,42 \cdot 0,88^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08} - 111,4^{0,055} \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,88}{0,055} \right)^{-0,75}]$$

$$1,72 \text{ с.}$$

Период пульсации ( $T$ ) равен

$$T = 0,055 + 0,88 + 1,72 = 2,66 \text{ с.}$$

Частота пульсации ( $n$ ) составляет

$$n = \frac{60}{T} = \frac{60}{2,66} = 22,6 \text{ мин}^{-1}$$

Пример 2.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе отвечает нижнему заявляемому пределу, составляющему 0,5 начальных гидравлических диаметра струи от стакана-дозатора, т.е.

$$h_b = 0,5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ м.}$$

Все остальные заявляемые параметры соответствуют оптимальным их значениям.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе относительно стакана-дозатора и исходного положения металла в ней, скорость вытеснения металла из трубы и абсолютное давление аргона в этой трубе при нижнем положении металла отвечают приведенным в примере.

Диапазон колебания металла в огнеупорной

трубе составляет

$$h = 0,3 - 0,025 = 0,275 \text{ м.}$$

Верхнее положение металла в трубе относительно исходного уровня равно

$$0,25 - 0,025 = 0,225 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при верхнем положении металла в ней составляет

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,225 = 84549 \text{ Па.}$$

Время вытеснения металла из трубы равно

$$\tau_0 = \frac{0,275}{4,54} = 0,061 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы составляет

$$\tau_3 = \frac{\frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,275}{0,0108} - 0,0108 \cdot 0,063}{0,0108} = 0,063 + 1,01 + 1,41 = 2,48 \text{ с.}$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении, принятая ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, равна

$$\tau = 5,42 \cdot 0,965^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} [5,42 \cdot 1,01^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,063 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{1,01}{0,063}\right)^{-0,75}]$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,061 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{1,01}{0,063}\right)^{-0,75}]$$

Период пульсаций составляет  
 $T = 0,061 + 0,965 + 1,52 = 2,56 \text{ с.}$

Частота пульсаций равна

$$n = \frac{60}{2,56} = 23,4 \text{ мин}^{-1}$$

Пример 3.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе ниже заявляемого предела и составляет 0,25 начальных гидравлических диаметра струи металла от стакана-дозатора, т.е.

$$h_B = 0,25 \cdot 0,05 = 0,0125 \text{ м.}$$

Все остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе относительно стакана-дозатора и исходного положения, скорость вытеснения металла из трубы и абсолютное давление в ней аргона при нижнем положении в трубе металла соответствуют приведенным в примере 1.

Диапазон колебания металла в огнеупорной трубе равен

$$h = 0,3 - 0,0125 = 0,288 \text{ м.}$$

Верхнее положение металла в огнеупорной трубе относительно исходного уровня составляет

$$0,25 - 0,0125 = 0,238 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при верхнем положении металла в ней равно

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,238 = 83690 \text{ Па.}$$

Время вытеснения металла из трубы составляет

$$\tau_0 = \frac{0,288}{4,54} = 0,063 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{\frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,288}{0,0108} - 0,0108 \cdot 0,063}{0,0108} = 0,063 + 1,01 + 1,41 = 2,48 \text{ с.}$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении, принятая ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, составляет

$$\tau = 5,42 \cdot 1,01^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} [5,42 \cdot 1,01^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,063 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{1,01}{0,063}\right)^{-0,75}]$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,063 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{1,01}{0,063}\right)^{-0,75}]$$

Период пульсации равен  
 $T = 0,063 + 1,01 + 1,41 = 2,48 \text{ с.}$

Частота пульсаций составляет

$$n = 60/2,48 = 24,2 \text{ мин}^{-1}.$$

Пример 4.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе отвечает верхнему заявляемому пределу и составляет 1,5 начальных гидравлических диаметров струи металла от стакана-дозатора, т.е.

$$h_B = 1,5 \cdot 0,05 = 0,075 \text{ м.}$$

Остальные заявляемые параметры имеют оптимальные значения.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе, скорость вытеснения металла из трубы и абсолютное давление аргона в ней при нижнем положении металла отвечают приведенным в примере 1.

Диапазон колебания металла в огнеупорной трубе равен

$$h = 0,3 - 0,075 = 0,225 \text{ м.}$$

Верхнее положение металла в трубе относительно исходного уровня составляет

$$0,25 - 0,075 = 0,175 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при верхнем положении металла в ней равно

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,175 = 87983 \text{ Па.}$$

Время вытеснения металла из трубы составляет

$$\tau_0 = 0,225/4,54 = 0,050 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{\frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,225}{0,0108} - 0,0108 \cdot 0,05}{0,0108} = 0,05 + 0,79 + 1,74 = 2,58 \text{ с.}$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,79^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} [5,42 \cdot 0,79^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,05 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{0,79}{0,05}\right)^{-0,75}]$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,05 \cdot \left(\frac{0,0019655}{0,0006453}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{0,79}{0,05}\right)^{-0,75}]$$

Период пульсации составляет

$$T = 0,05 + 0,79 + 1,74 = 2,58 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60/2,58 = 23,3 \text{ мин}^{-1}.$$

Пример 5.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе превышает верхний заявляемый предел и расположен ниже стакана-дозатора на расстоянии

1,8 начальных гидравлических диаметров струи, т.е.

$$h_0 = 1,8 \cdot 0,05 = 0,09 \text{ м.}$$

Все остальные заявляемые параметры имеют оптимальные значения.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе, скорость вытеснения из нее металла и абсолютное давление аргона в трубе при нижнем положении металла в ней отвечают приведенным в примере 1.

Диапазон колебания металла в огнеупорной трубе равен

$$h = 0,3 - 0,09 = 0,21 \text{ м.}$$

Верхнее положение металла в огнеупорной трубе относительно исходного уровня составляет  $0,25 - 0,09 = 0,16 \text{ м.}$

Абсолютное давление аргона в трубе при верхнем положении металла в ней равно  $100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,16 = 89013 \text{ Па.}$

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_0 = 0,21 / 4,54 = 0,046 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,21}{0,0108} - 0,01$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,76^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08}$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08} - 1114 \cdot 0,046 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0}$$

Период пульсации составляет  $T = 0,046 + 0,76 + 1,76 = 2,57 \text{ с.}$

Частота пульсаций равна

$$n = 60 / 2,57 = 23,3 \text{ мин.}^{-1}.$$

Пример 6.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе отвечает нижнему заявляемому пределу, равному 5 начальных гидравлических диаметров струи от стакана-дозатора, т.е.

$$h_n = 5 \cdot 0,05 = 0,25 \text{ м.}$$

Остальные заявляемые параметры соответствуют оптимальным значениям.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе и абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этому уровню, равны приведенным в примере 1.

Диапазон колебания металла в огнеупорной трубе составляет

$$h = 0,25 - 0,05 = 0,2 \text{ м.}$$

Нижнее положение металла в трубе относительно исходного уровня равно  $0,25 - 0,25 = 0.$

Абсолютное давление аргона в трубе при нижнем положении металла в ней составляет

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 7 = 100000 \text{ Па.}$$

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы, превышающая нижний заявляемый предел на 50% от разности между верхним и нижним ее

пределами, равна

$$\omega = 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,25}) +$$

$$+ \left[ \frac{\sqrt{2(100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94)}}{7000} -$$

$$- 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,25}) \right] \frac{50}{100} -$$

$$= 4,43 \text{ м/с.}$$

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_0 = 0,2 / 4,43 = 0,045 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,2}{0,0108} - 0,0108 \cdot 0,045$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,7^{-0,36} \cdot 4,43^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08} - \frac{60}{100} [5,42$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51 / 0,08} - 1114 \cdot 0,045 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,7}{0,045} \right)$$

Период пульсации составляет

$$T = 0,045 + 0,7 + 1,69 = 2,44 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60 / 2,44 = 24,5 \text{ мин.}^{-1}.$$

Пример 7.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе расположен ниже стакана-дозатора на расстоянии 4 начальных гидравлических диаметров струи металла, т.е. ниже заявляемого предела. Это расстояние составляет

$$h_n = 4 \cdot 0,05 = 0,2 \text{ м.}$$

Остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе и абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этому уровню, отвечают приведенным в примере 1.

Диапазон изменения уровня металла в огнеупорной трубе составляет

$$h = 0,2 - 0,05 = 0,15 \text{ м.}$$

Нижнее положение металла в трубе относительно исходного уровня равно  $0,25 - 0,2 = 0,05 \text{ м.}$

Абсолютное давление аргона в трубе при нижнем положении металла в ней составляет  $100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 96567 \text{ Па.}$

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы, превышающая нижний заявляемый предел на 50% от разности между верхним и нижним ее пределами, равна

$$\omega = 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,2}) +$$

$$+ \left[ \frac{\sqrt{2(100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94)}}{7000} - \right.$$

$$\left. - 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,2}) \right] \frac{50}{100} =$$

$$= 3,71 \text{ м/с.}$$

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_b = \frac{0,15}{3,71} = 0,04 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,15}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,03^2 / 4} - 0,01$$

$$= 0,0108$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,52^{-0,36} \cdot 3,71^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08}$$

$$\cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,04 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{1,05}{0,065} \right)^{-0,75}$$

Период пульсации составляет

$$T = 0,04 + 0,52 + 2,01 = 2,57 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60/2,57 = 20,4 \text{ мин.}^{-1}$$

Пример 8.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе равен верхнему заявляемому пределу, т.е. он расположен ниже стакана-дозатора на расстоянии 7 начальных гидравлических диаметров или

$$h_n = 7 \cdot 0,05 = 0,35 \text{ м.}$$

Все остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе и абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этому уровню, равны приведенным в примере 1.

Диапазон изменения уровня металла в огнеупорной трубе составляет

$$h = 0,35 - 0,05 = 0,3 \text{ м.}$$

Нижнее положение металла в трубе относительно исходного уровня равно

$$0,25 - 0,35 = -0,1 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при нижнем положении металла в ней составляет

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot (-0,1) = 106867 \text{ Па.}$$

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы, превышающая нижний заявляемый предел на 50% от разности между верхним и нижним ее пределами, равна

$$\omega = 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,35}) +$$

$$+ \left[ \frac{\sqrt{2(100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94)}}{7000} - \right.$$

$$\left. - 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,35}) \right] \frac{50}{100} =$$

$$= 4,64 \text{ м/с.}$$

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_b = 0,3/4,64 = 0,065 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,3}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,03^2 / 4} - 0,0108 \cdot 0,065$$

$$= 0,0108$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 1,05^{-0,36} \cdot 4,64^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} [5,42$$

$$\cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,065 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{1,05}{0,065} \right)^{-0,75}]$$

Период пульсации составляет

$$T = 0,065 + 1,05 + 1,64 = 2,76 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60/2,76 = 21,7 \text{ мин.}^{-1}$$

Пример 9.

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе превышает верхний заявляемый предел и составляет 8 начальных гидравлических диаметров струи металла, т.е.

$$h_n = 8 \cdot 0,05 = 0,4 \text{ м.}$$

Остальные все заявляемые параметры отвечают оптимальным значениям.

Верхний уровень металла в огнеупорной трубе и абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этому уровню, равны приведенным в примере 1.

Диапазон изменения уровня металла в огнеупорной трубе составляет

$$h = 0,4 - 0,05 = 0,35 \text{ м.}$$

Нижнее положение металла в трубе относительно исходного уровня равно

$$0,25 - 0,4 = -0,15 \text{ м.}$$

Абсолютное давление аргона в трубе при нижнем положении металла в ней составляет

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot (-0,15) = 110300 \text{ Па.}$$

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы, превышающая нижний заявляемый предел на 50% от разности между верхним и нижним ее пределами, равна



$$\omega = 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,4}) +$$

$$+ \left[ \frac{\sqrt{2(100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94)}}{7000} - \right.$$

$$\left. -4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,4}) \right] \frac{50}{100}$$

**= 4,73 м/с.**

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_b = 0,36/4,73 = 0,074 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2/4 \cdot 0,35}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,03^2/4} - 0,018$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 1,23^{-0,36} \cdot 4,73^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} \cdot$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,074 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,86}{0,074} \right)^{-0,75}$$

Период пульсации составляет

$$T = 0,074 + 1,23 + 1,64 = 2,94 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60/2,94 = 20,4 \text{ мин.}^{-1}$$

Пример 10.

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы отвечает нижнему заявляемому пределу, т.е.

$$\omega = 4,55(0,72 \sqrt{0,67} \frac{0,0006453}{0,0019655} + \sqrt{0,3}) =$$

$$= 3,37 \text{ м/с.}$$

Остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний и нижний уровень металла в огнеупорной трубе, а также абсолютное давление аргона, отвечающее этим положениям металла в ней, равны приведенным в примере 1.

Время вытеснения металла из трубы равно

$$\tau_b = \frac{0,25}{3,37} = 0,074 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы составляет

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2/4 \cdot 0,25}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,03^2/4} - 0,018$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,86^{-0,36} \cdot 3,37^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} \left[ 5,42 \cdot$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,074 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,86}{0,074} \right)^{-0,75} \right]$$

Период пульсации равен

$$T = 0,074 + 0,86 + 2,17 = 3,1 \text{ с.}$$

Частота пульсаций составляет

$$n = 60/3,1 = 19,4 \text{ мин.}^{-1}$$

Пример 11.

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы ниже заявляемой и составляет  **$\omega = 2,5 \text{ м/с.}$**

Все остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний и нижний уровень металла в огнеупорной трубе, а также абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этим уровням, равны приведенным в примере 1.

Время вытеснения металла из трубы равно

$$\tau_b = \frac{0,25}{2,5} = 0,1 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы составляет

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2/4 \cdot 0,25}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,03^2/4} - 0,018 \cdot 0,1$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,83^{-0,36} \cdot 2,5^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - \frac{60}{100} \left[ 5,42 \cdot$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,1 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,83}{0,1} \right)^{-0,75} \right]$$

Период пульсации равен

$$T = 0,1 + 0,83 + 2,94 = 3,87 \text{ с.}$$

Частота пульсаций составляет

$$n = 60/3,87 = 15,5 \text{ мин.}^{-1}$$

Пример 12.

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы соответствует верхнему заявляемому пределу, т.е.

$$\omega = \frac{\sqrt{2(100000 + 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,2 - 4,94)}}{7000} =$$

$$= 5,7 \text{ м/с.}$$

Остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний и нижний уровень металла в огнеупорной трубе, а также абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этим уровням, равны приведенным в примере 1.

Время вытеснения металла из трубы равно

$$\tau_b = \frac{0,25}{5,7} = 0,044 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы составляет

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2/4 \cdot 0,25}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,03^2/4} - 0,018 \cdot 0,044$$

Продолжительность выдержки металла в

огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,89^{-0,36} \cdot 5,7^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - T = 0,055 + 0,88 + 0,4 = 1,34 \text{ с.}$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,044 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,61} \cdot \left( \frac{0,88}{0,055} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{0,05}{0,055} \right)^{-0,62} = 0,055 + 0,88 + 0,4 = 1,34 \text{ с.}$$

Период пульсации равен  
 $T = 0,044 + 0,89 + 1,35 = 2,28 \text{ с.}$

Частота пульсаций составляет  
 $n = 60/2,28 = 26,3 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 13.

Скорость вытеснения металла из огнеупорной трубы превышает заявляемую и составляет  
 $\omega = 6,27 \text{ м/с.}$  Остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям.

Верхний и нижний уровень металла в огнеупорной трубе, а также абсолютное давление аргона в ней, соответствующее этим уровням, равны приведенным в примере 1.

Время вытеснения металла из трубы составляет

$$\tau_b = 0,25/6,27 = 0,04 \text{ с.}$$

Время заполнения металлом огнеупорной трубы равно

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2/4 \cdot 0,25}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 \cdot 0,08 + 2 \cdot 0,03/2/4} - 0,01 = 0,0108$$

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже верхнего заявляемого предела на 60% от разности между верхним и нижним ее пределами, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,89^{-0,36} \cdot 6,27^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - T = 0,055 + 0,88 + 4,5 = 5,44 \text{ с.}$$

$$\times 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - 1114 \cdot 0,04 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,61} \cdot \left( \frac{0,88}{0,055} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{0,05}{0,055} \right)^{-0,62} = 0,055 + 0,88 + 4,5 = 5,44 \text{ с.}$$

Период пульсации составляет  
 $T = 0,04 + 0,89 + 1,25 = 2,18 \text{ с.}$

Частота пульсаций равна  
 $n = 60/2,18 = 27,5 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 14.

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении соответствует нижнему заявляемому пределу, т.е.

$$\tau = 5,42 \cdot 0,88^{-0,36} \cdot 4,54^{-0,61} \cdot 2,72^{0,012 \cdot 2,51/0,08} - T = 0,055 + 0,88 + 0,68 = 1,62 \text{ с.}$$

Все остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям и равны приведенным в примере 1.

Период пульсации составляет  
 $T = 0,055 + 0,88 + 0,68 = 1,62 \text{ с.}$

Частота пульсаций равна  
 $n = 60/1,62 = 37,0 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 15.

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении ниже заявляемого предела и составляет 0,4с.

Остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям, равным приведенным в примере 1.

Период пульсации составляет

Частота пульсации равна  
 $n = 60/1,34 = 44,8 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 16.

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении соответствует верхнему заявляемому пределу, т.е.

$$\tau = 1114 \cdot 0,055 \cdot \left( \frac{0,0019655}{0,0006453} \right)^{-0,75} \cdot \left( \frac{0,88}{0,055} \right)^{-0,62} \cdot \left( \frac{0,05}{0,055} \right)^{-0,62} = 0,055 + 0,86 + 3,29 = 4,23 \text{ с.}$$

Остальные заявляемые пределы отвечают оптимальным значениям, равным указанным в примере 1.

Период пульсации составляет  
 $T = 0,055 + 0,86 + 3,29 = 4,23 \text{ с.}$

Частота пульсаций равна  
 $n = 60/4,23 = 14,2 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 17.

Продолжительность выдержки металла в огнеупорной трубе в верхнем положении превышает заявляемый предел и равна 4,5с.

Все остальные заявляемые параметры отвечают оптимальным их значениям, равным приведенным в примере 1.

Период пульсации составляет  
 $T = 0,055 + 0,88 + 4,5 = 5,44 \text{ с.}$

Частоты пульсаций равна  
 $n = 60/5,44 = 11,0 \text{ мин.}^{-1}.$

Пример 18.

Отвечает условиям разливки способа-прототипа на вертикальной МНЛЗ при отливке слитка сечением 350 × 400мм со скоростью 0,0108м/с. Внутренний диаметр огнеупорной трубы равен 0,08м, толщина ее стен 0,03м. Глубина погружения огнеупорной трубы в металл составляет 0,2м, а скорость вытекания металла из стакана-дозатора промежуточного ковша составляет 2м/с.

Живое сечение потока металла на входе в стакан-дозатор равно

$$f = \frac{0,35 \cdot 0,4 \cdot 0,0108 \cdot 7800}{7000 \cdot 0,72 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,67}} = 0,0006453 \text{ м}^2$$

Живое сечение струи металла на выходе из стакана-дозатора превышает живое сечение потока металла на входе в этот стакан в 3,046 раза и составляет

$$F = 3,046 \cdot 0,0006453 = 0,0019655 \text{ м}^2.$$

Такую площадь живого сечения струи металла обеспечивает отверстие на выходе из стакана-дозатора диаметром

$$d = \frac{4 \cdot 0,0019655}{3,14} = 0,05 \text{ м.}$$

Расстояние от исходного уровня металла до стакана-дозатора составляет 0,25м. Верхний уровень металла в огнеупорной трубе расположен ниже стакана-дозатора на расстоянии 5, а нижний - 8 начальных гидравлических диаметров струи. Диапазон колебания металла в огнеупорной трубе

(h) при этом составляет

$$h = (8-5) \cdot 0,05 = 0,15 \text{ м.}$$

Нижний уровень металла в огнеупорной трубе расположен от исходного уровня на расстоянии 0,15м, а верхний - соответствует исходному.

Абсолютное давление аргона при нижнем положении металла в огнеупорной трубе составляет

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0,15 = 89700 \text{ Па.}$$

При верхнем положении металла в трубе абсолютное давление аргона равно

$$100000 - 7000 \cdot 9,81 \cdot 0 = 100000 \text{ Па.}$$

Скорость, вытекания металла из погружной трубы составляет  $(3-4)d/D$  скорости движения струи металла при вытекании его из промежуточного ковша и равна в среднем

$$\omega = 3,5 \cdot 0,04 / 0,08 \cdot 2 = 3,5 \text{ м/с.}$$

Время вытеснения металла из огнеупорной трубы составляет

$$\tau_b = 0,15 / 3,5 = 0,043 \text{ с.}$$

Продолжительность заполнения металлом огнеупорной трубы равна

$$\tau_3 = \frac{3,14 \cdot 0,08^2 / 4 \cdot 0,15}{0,35 \cdot 0,4 - 3,14 / 0,08 + 2 \cdot 0,03 / 2 / 4} - 0,01 = 0,52 \text{ с.}$$

Время выдержки металла в верхнем положении  $\tau$  равно 0. Период пульсации составляет

$$T = 0,043 + 0,52 = 0,56 \text{ с.}$$

Частота пульсаций равна

$$n = 60 / 0,56 = 107 \text{ мин.}^{-1}.$$

Химическую неоднородность непрерывнолитых слитков оценивали по степени осевой ликвации серы, а физическую - по макроструктуре их поперечных темплетов. Результаты этих анализов для всех рассмотренных примеров, представленных в таблице, подтверждают возможность осуществления изобретения.

Из приведенных в таблице данных видно, что минимальная протяженность зоны столбчатых кристаллов и наименьшая степень осевой ликвации серы достигаются в слитках, отливаемых по заявляемому способу при оптимальных значениях всех режимных параметров (пример 1).

Результаты отливки слитков заявляемым способом при граничных значениях его режимных параметров в соответствии с примерами 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 и 16, каждый из которых реализовал один из параметров разливки на нижнем или верхнем заявляемом пределах при оптимальных значениях остальных, несколько хуже, полученных в условиях разливки по примеру 1, отвечающему оптимальным значениям всех заявляемых параметров. Вместе с тем показатели этих примеров конкретного выполнения заявляемого способа оказались существенно выше, полученных по прототипу (пример 18) и по примерам 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 и 17, в которых один из режимных параметров выходил за заявляемые пределы при оптимальных значениях остальных.

В условиях организации способа, когда верхний уровень металла в огнеупорной трубе превышал заявляемый предел (пример 5), а скорость вытеснения металла и

продолжительность выдержки его в верхнем положении в трубе были ниже заявляемых (примеры соответственно 11 и 15), слитки оказались пораженными пятнистой ликвацией при значительной протяженности зоны столбчатых кристаллов. Такой же дефект имел место в слитке, полученном по способу-прототипу (пример 18). Причина появления пятнистой ликвации в слитках, отлитых данными способами, связана с образованием газосодержащих кольцевых вихрей. Попадание в эти вихри газа обусловлено его наличием в вытесняемой из трубы порции жидкого металла.

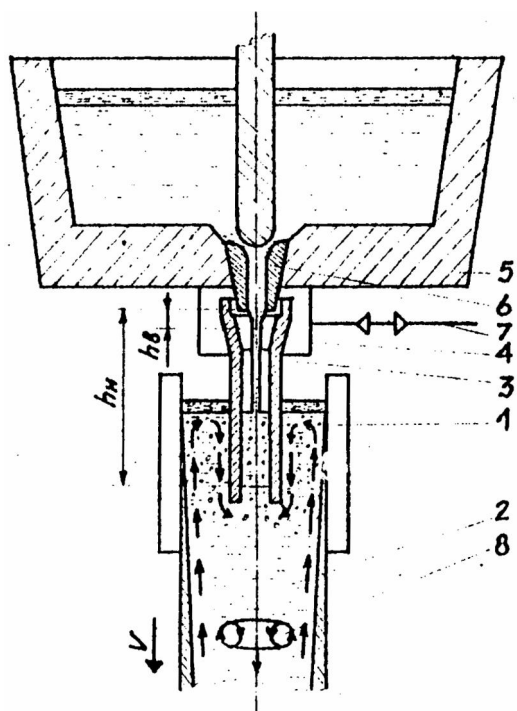
При осуществлении способа по примеру 3, в котором верхний уровень металла в трубе ниже заявляемого, разливка была прекращена в связи с заматыванием огнеупорной трубы в верхней ее части, что исключало возможность попадания газа в огнеупорную трубу и удаления его из нее.

Использование предлагаемого способа непрерывного литья слитков по сравнению с прототипом позволяет при одновременном снижении протяженности зоны столбчатых кристаллов и степени осевой ликвации серы избежать появления пятнистой ликвации в связи с насыщением слитка газом, что обеспечивает снижение брака на 0,13 - 0,18%.

Результаты осуществления заявляемого способа непрерывного литья слитков при оптимальных значениях параметров

Пример	Уровень металла в огнеупорной трубе от стакана-дозатора				Скорость вытесне- ния ме- талла из огнеупор- ной тру- бы, $\omega$ , м/с	Продолжи- тельность выдержки металла в огнеупор- ной трубе в верхнем по- ложении, $\tau$ , с	Период пульса- ции, T, с	Частота пульса- ций, $n$ , мин.
	верхний		нижний					
	$h_v$ , м	$h_v/d$	$h_n$ , м	$h_n/d$				
1	0.05	1	0.3	6	4.54	1.72	2.66	22.6
2	0.025	0.5	0.3	6	4.54	1.52	2.56	23.4
3	0.0125	0.25	0.3	6	4.54	1.41	2.48	24.2
4	0.075	1.5	0.3	6	4.54	1.74	2.58	23.3
5	0.09	1.8	0.3	6	4.54	1.76	2.57	23.3
6	0.05	1	0.25	5	4.43	1.69	2.44	24.6
7	0.05	1	0.2	4	3.71	2.01	2.57	20.4
8	0.05	1	0.35	7	4.64	1.64	2.76	21.7
9	0.05	1	0.4	8	4.73	1.64	2.94	20.4
10	0.05	1	0.3	6	3.37	2.17	3.1	19.4
11	0.05	1	0.3	6	2.5	2.94	3.87	15.5
12	0.05	1	0.3	6	5.7	1.35	2.28	26.3
13	0.05	1	0.3	6	6.27	1.25	2.18	27.5
14	0.05	1	0.3	6	4.54	0.68	1.62	37.0
15	0.05	1	0.3	6	4.54	0.4	1.34	44.8

16	0,05	1	0,3	6	4,54	3,29	4,23	14,2
17	0,05	1	0,3	6	4,54	4,5	5,44	11,0
18	0,25	5	0,4	8	4,54	3,5	0,56	107



Фиг.