

**А. В. Ноговицын**, д-р техн. наук, зам. директора,

e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**А. С. Нурадинов**, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., e-mail: nla\_73@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

*В лабораторных и реальных условиях исследовано влияние внешних физических воздействий на формирование непрерывнолитых заготовок. Оптимизированы конструктивные параметры устройства «турбостоп» и предложены рациональные параметры продувки жидкого металла инертным газом в промежуточном ковше. Установлено влияние электромагнитного перемешивания затвердевающего металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок на тепломассообменные процессы в нем. Разработаны устройство и режимы вибрационной обработки заготовок в зоне вторичного охлаждения, позволяющие существенно улучшить структурные и физико-механические характеристики литого металла.*

**Ключевые слова:** промежуточный ковш, рафинирование, гидродинамика металла, неметаллические включения (НВ), кристаллизатор, электромагнитное перемешивание (ЭМП), вибрация, тепломассообмен, зона вторичного охлаждения (ЗВО), кристаллизация, структура, механические свойства.

При постоянно возрастающих требованиях к эксплуатационным характеристикам стального проката особую актуальность приобретает проблема повышения качества заготовок при непрерывной разливке стали. Традиционные методы улучшения структуры и свойств металлов, в основном, себя исчерпали, поэтому наиболее эффективным способом решения данной задачи является всестороннее совершенствование технологии непрерывной разливки стали путем активного внешнего воздействия на заготовку на различных этапах ее формирования. Технические решения совершенствования технологии непрерывной разливки стали, как правило, заключаются в следующем: управлении гидродинамикой металла в промежуточном ковше; воздействии на затвердевающий металл в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения; упруго-пластической деформации заготовки в зумпфовой зоне (т. н. «мягкое обжатие»).

Во ФТИМС НАН Украины длительное время проводятся исследования по изучению влияния различных внешних воздействий на процессы кристаллизации и формирования структуры непрерывнолитых заготовок. В данной работе проведен обобщающий анализ полученных результатов.

*Промежуточный ковш.* Современный промежуточный ковш МНЛЗ является металлургическим агрегатом непрерывного действия, главными задачами которого являются стабилизация температуры жидкой стали и удаление неметаллических включений из нее [1–4]. Способы и успешное решение указанных задач в значительной степени зависят от гидродинамических особенностей движения металла в промежуточном ковше, прямое исследование которых при непрерывной его разливке практически невозможно. Поэтому выбор рациональной конструкции промежуточного ковша и режимов движения расплава в нем основывается, как правило, на результатах физического или математического моделирования [5–7].

В исследованиях, выполненных Гончаром Б. С. и Диюком Е. Ф., стояла задача определения наиболее рационального характера движения жидкого металла в ограниченном пространстве промежуточного ковша МНЛЗ для создания наилучшего

## Новые методы и прогрессивные технологии литья

эффекта рафинирования стали от неметаллических включений. Поставленная задача решалась путем оптимизации конструктивных характеристик металлоприемника типа «турбостоп» и донной продувки инертным газом.

Для оценки эффективности структуры течения с позиций удаления НВ в прямом потоке в качестве критерия используется величина угла наклона  $\alpha$  касательной  $B$ , проведенной из центра разливочного стакана к горизонтали (рис. 1).

Используемая оценка показывает, что при значениях  $\alpha$  меньше  $90^\circ$  протяженность зоны прямого течения увеличивается, вследствие чего создаются более

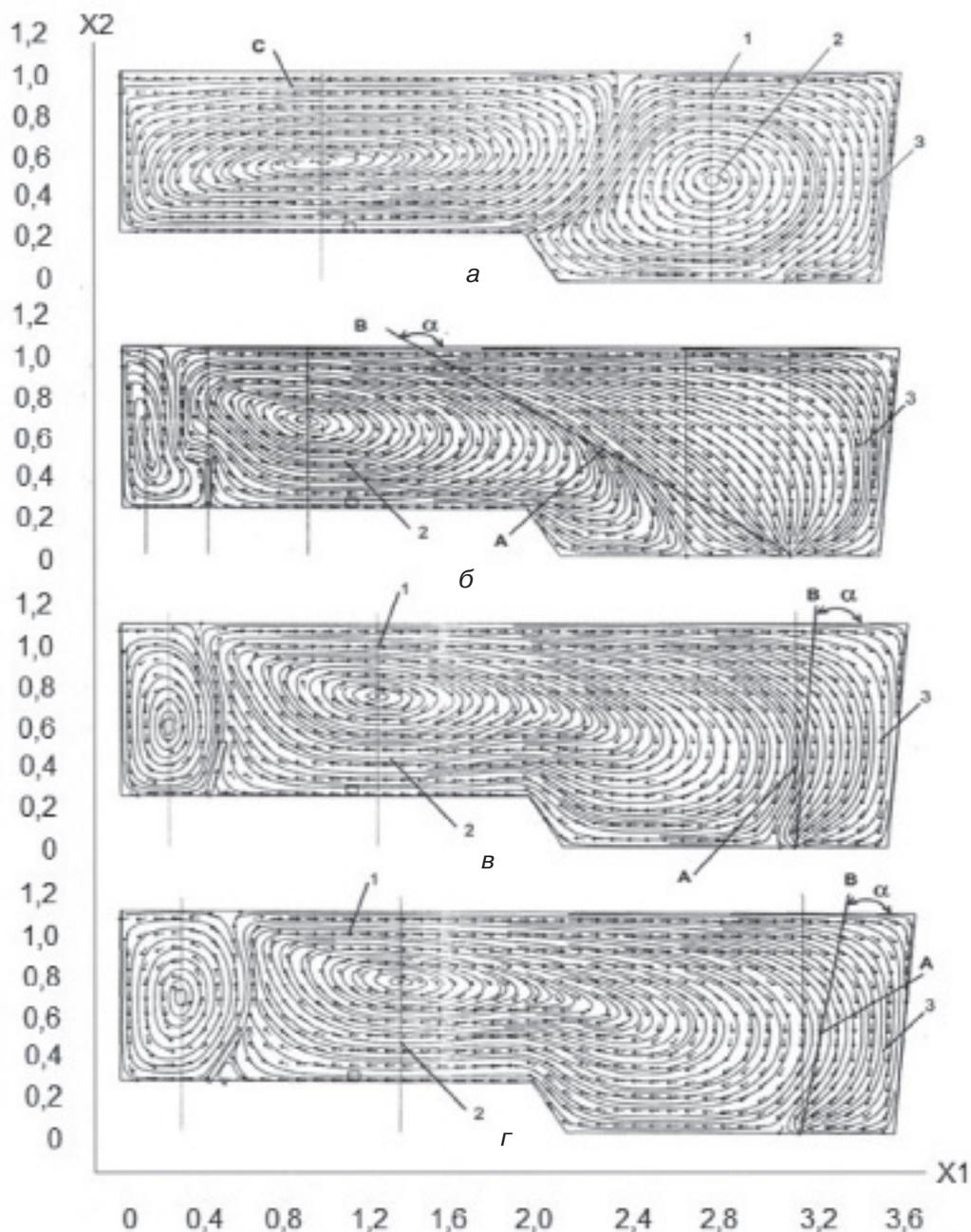


Рис. 1. Структура течений жидкой стали в вертикальном продольном осевом сечении промежуточного ковша МНЛЗ: а – «пустой» ковш; б – ковш со стандартным турбостопом фирмы Foseco; турбостоп с наклонной передней гранью под углом: в –  $15^\circ$ , г –  $30^\circ$

благоприятные условия для всплытия НВ и их ассимиляции в рафинирующем шлаке. В частности, для стандартного турбостоба фирмы Fosco (рис. 1, б) критерий  $\alpha$  имеет значение больше  $90^\circ$ , что означает недостаточную эффективность рафинирования.

Существующие представления о механизме удаления неметаллических включений из жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ основаны на модели «идеального» удаления, при которой с высокой степенью вероятности частицы диаметром  $(0,08-0,12) \cdot 10^{-3}$  м будут удаляться полностью. При образовании зоны обратной циркуляции процесс удаления НВ усложняется из-за обменных процессов между прямым и обратным потоками и зависит от кратности циркуляции зоны обратного потока. Полученные данные показывают, что величина диаметра полностью удаляемых включений выше, чем для случая без учета циркуляции и составляет  $(0,13-0,15) \cdot 10^{-3}$  м.

Математическим моделированием для 14 вариантов суперпозиции конструктивных элементов устройства «турбостоб» установлено, что решающее значение на такой характер движения металла оказывает угол наклона вертикальной стенки металлоприемника (оптимальное значение  $15-30^\circ$  – рис. 1, в, г). Предложенные конструкции металлоприемника с наклоненной передней стенкой в сторону торца промежуточного ковша обеспечивают оптимальный характер движения металла не только при номинальном уровне, но и при наполнении с уровня  $0,7 H_{\text{ном}}$  (то есть перековшовке).

Для эффективного удаления НВ размером менее  $(0,13-0,15) \cdot 10^{-3}$  м, как показали проведенные исследования, необходимо обеспечить продувку жидкого металла инертным газом в пузырьковом режиме (рис. 2). При этом необходимо обеспечить такие размеры пузырьков газа, которые не будут задерживаться на границе «металл-шлак» (расчетные размеры – 10–11 мм в диаметре).

Механизм удаления неметаллических включений меньших размеров при продувке инертным газом заключается в том, что в момент образования газовых пузырей жидкая фаза, содержащая НВ, вытесняется в приграничную зону сферического тела и за ним движется в зону раздела «металл-шлак» [8]. При достижении поверхности раздела «металл-шлак» пузырек инертного газа «схлопывается», вследствие чего происходит дробление микрообъемов жидкого металла в слое рафинирующего шлака, что способствует ассимиляции НВ сложного химического состава (в том числе и физико-химическому поглощению). И таким образом донная продувка аргоном в стабилизированном пузырьковом режиме создает наиболее благоприятные условия для непрерывного удаления НВ в процессе разливки.

Исследования взаимодействия газовых струй с металлом при донной продувке показало, что наиболее благоприятные газогидродинамические условия удаления НВ из жидкой стали создаются при подаче газовой фазы под углом  $30-60^\circ$  к вертикали и установке фурмы на расстоянии  $0,9-1,2$  м от центра промежуточного ковша (рис. 2, б, в и г).

Проведенные опытно-промышленные испытания разработанной технологии рафинирования при разливке сталей различных марок в условиях ОАО «Азовсталь» показали высокую эффективность по удалению НВ.

По результатам изучения качества металла установлено:

- в листовом прокате стали марки 10Г2ФБЮ силикаты хрупкие оцениваются в 0–0,5 балла, а недеформируемые – диапазоном в 2,1–2,5 балла, при этом НВ размером в 2,5 балла в опытном металле составляет 17 против 42 % в сравнительном;
- отсортировка листового проката из опытных плавок стали марки 10Г2ФБЮ по УЗК на соответствие стандарту SEL072 класс 3/2 составила 0 % против 2,08 % для сравнительных;
- факультативная оценка двух партий плит толщиной 50 мм стали марки S355J2 на соответствие требованиям стандарта SEL 072 класс 3/2, проведенная с повышенной чувствительностью, показала 100 % выход годного листового проката по УЗК.

*Кристаллизатор.* Большинство исследователей возникновения наружных и внутренних дефектов непрерывнолитых заготовок связывают с теплообменными процессами, происходящими в кристаллизаторе МНЛЗ [9–11]. Этими процессами

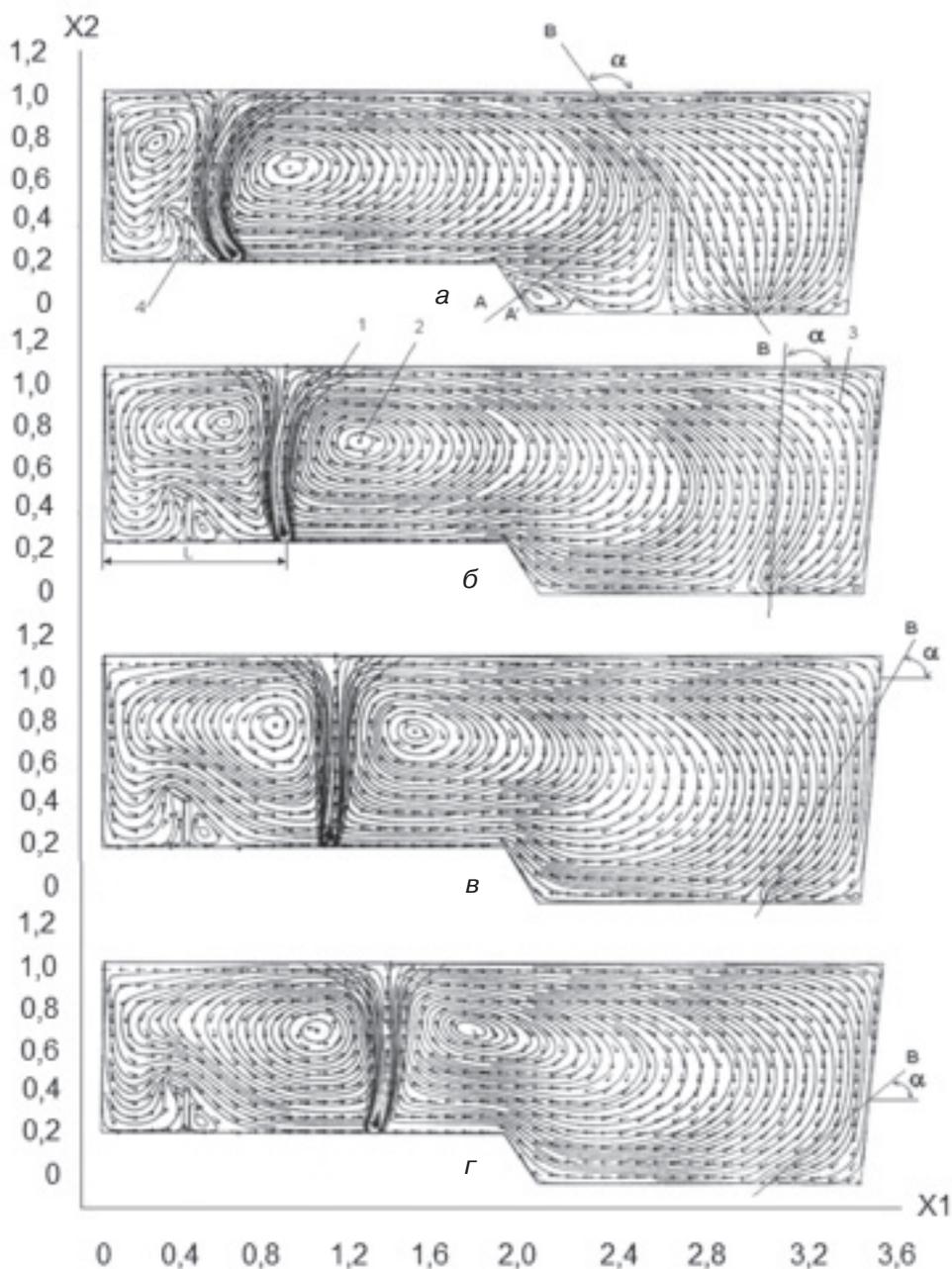


Рис. 2. Структура течений в продольном вертикальном сечении промковша МНЛЗ при использовании турбостопа фирмы Fosco FTS 1890 A01 с различным расположением продувочной фурмы:  $L$ , м: а – 0,6; б – 0,8; в – 1,0; г – 1,2

в кристаллизаторе можно управлять применением внешних физических воздействий на затвердевающий металл, в частности, электромагнитного перемешивания (ЭМП), что и было подтверждено исследованиями, проведенными Якобше Р. Я., Барановой В. Н. и Козловой З. Л., по изучению влияния ЭМП на качество круглых и квадратных сортовых заготовок.

Для расчета параметров теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ разработана методика, по которой тепло, отведенное в кристаллизаторе ( $Q_{кр}$ ), определяется из выражения [12]:

$$Q_{кр} = G_B c_B \Delta t_B \tau, \quad (1)$$

где  $G_B$  – расход воды на охлаждение кристаллизатора;  $c_B$  – удельная теплоемкость воды;  $\Delta t_B$  – перепад температуры охлаждающей воды на выходе и входе в кристаллизатор;  $\tau$  – время пребывания металла в кристаллизаторе.

Отведенное в кристаллизаторе тепло  $Q_{кр}$  включает в себя [12]:

$$Q_{кр} = Q_{пер} + Q_{кор}, \quad (2)$$

где  $Q_{пер}$  – тепло перегрева стали над  $t_L$ , поступающей в кристаллизатор;  $Q_{кор}$  – тепло, которое необходимо отвести для формирования корки.

Тепло, которое необходимо отвести для формирования корки, равно [12]:

$$Q_{кор} = m_3 [(q + c_{ж} (t_{пк} - t_L) + c_m (t_L - t_{об}))], \quad (3)$$

где  $m_3$  – масса затвердевшей корковой оболочки;  $q$  – удельная скрытая теплота кристаллизации;  $c_{ж}$ ,  $c_m$  – теплоемкости жидкой и затвердевшей стали;  $t_{пк}$ ,  $t_L$ ,  $t_{об}$  – температура стали в промежуточном ковше, температура ликвидуса и средняя температура затвердевшей корки.

Решая уравнение теплового баланса кристаллизатора, определяется масса и толщина затвердевшей корки заготовки:

$$m_3 = \frac{Q_B c_B \Delta t_B \tau - n m_{кр} c_{ж} (t_{пк} - t_L)}{q + c_{ж} (t_{пк} - t_L) + c_m (t_L - t_{об})}. \quad (4)$$

Об интенсивности тепловых процессов, протекающих в кристаллизаторах МНЛЗ на отдельных ручьях, можно судить по величине удельного теплоотвода  $q_{кр}$ , которая определяется из зависимости:

$$q_{кр} = \frac{Q_{кр}}{m_{кр}}, \quad (5)$$

где  $m_{кр}$  – масса всего металла, находящегося в кристаллизаторе.

Используя данные АСУТП, по вышеприведенной методике рассчитаны параметры, определяющие процесс формирования непрерывнолитой заготовки для каждой плавки. Параметры литья и результаты расчетов, к примеру, для квадратных заготовок 130x130 мм приведены в табл. 1.

Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют о том, что усиление перемешивания металла путем применения ЭМП обеспечивает повышение интенсивности теплоотвода в кристаллизаторе. Благодаря этому увеличивается масса затвердевшего в кристаллизаторе металла, что говорит о повышении коэффициента затвердевания и, соответственно, возможности повышения скорости разлива.

Влияние электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе на макроструктуру заготовок проявляется в следующем: при увеличении силы тока в обмотке ЭМП уменьшается осевая пористость; происходит рассредоточение усадочной рыхлости по поперечному сечению заготовок; уменьшается ликвация углерода в осевой зоне (рис. 3).

При этом ширина зоны равноосных кристаллов с увеличением силы тока ЭМП заметно увеличивается, соответственно, уменьшается протяженность зоны транскристаллизации. В результате электромагнитного перемешивания индекс загрязненности НВ уменьшается, кроме того, за счет вынужденной конвекции металла наблюдается более равномерное их распределение по всему сечению заготовок.

Таблица 1

Параметры формирования квадратных заготовок 130x130 мм

Номер плавки	1	2	3	4
Скорость разливки, м/мин	2,64	2,63	2,59	2,54
Сила тока перемешивания, А	443	352	343	182
Перепад температуры воды, охлаждающей кристаллизатор на входе и выходе из него, °С	5,7	5,5	5,3	5,05
Удельный теплоотбор в кристаллизаторе, ккал/кг	32,39	31,37	30,69	29,82
Масса затвердевшего в кристаллизаторе металла, кг	40,12	38,86	38,03	36,95

Еще одним эффективным способом управления процессами, происходящими в кристаллизаторе МНЛЗ, является вибрационная обработка затвердевающей заготовки [13–18]. Из работ, выполненных Нурадиновым А. С., Тарановым Е. Д. и Нурадиновым И. А., следует, что вибрация интенсифицирует теплообменные процессы в кристаллизаторе МНЛЗ на всех стадиях передачи тепла от жидкого металла к охлаждающей воде. Причем, наиболее эффективно вибрация влияет на теплопередачу через газовый зазор между заготовкой и стенкой кристаллизатора (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что независимо от толщины зазора вибрация уменьшает перепад температур ( $\Delta t_r$ ) по сечению газовой прослойки между поверхностями. Безусловно, это связано с повышением коэффициента теплопередачи ( $\alpha$ ) через газовый зазор и, как следствие, ростом количества тепла ( $Q_n$ ), которое передается от более горячей поверхности к холодной.

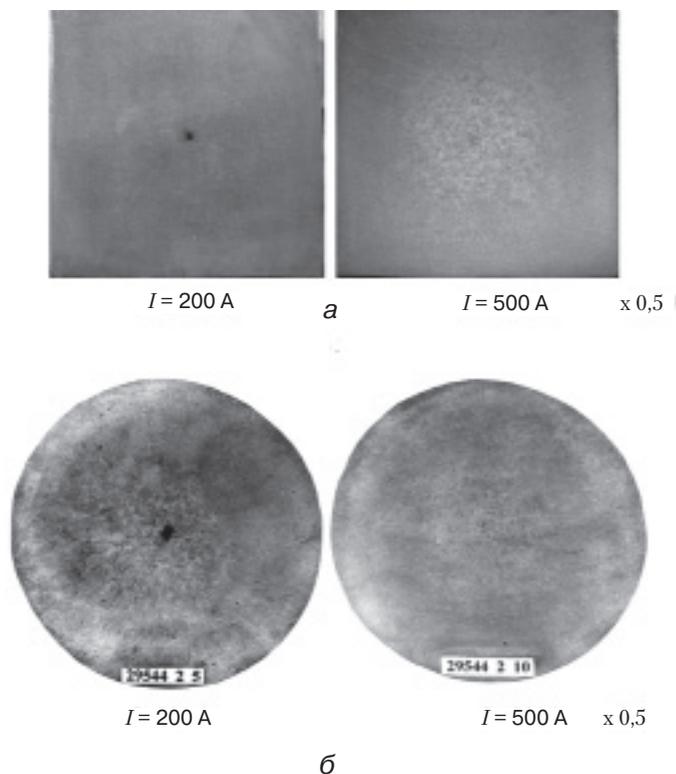


Рис. 3. Макроструктуры непрерывнолитых заготовок, отлитых с электромагнитным перемешиванием: а – квадрат 130x130 мм; б – круг  $\varnothing$  150 мм

Таблица 2

Параметры теплообменного процесса между поверхностями

Параметр теплообмена	Толщина зазора $\delta$ , мм				
	0	0,3	0,6	1,0	1,5
$\Delta t_1 = t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$	$\frac{22}{22}$	$\frac{151}{36}$	$\frac{178}{52}$	$\frac{228}{60}$	$\frac{252}{214}$
$\Delta t_2 = t_{2к} - t_{2н}, ^\circ\text{C}$	$\frac{259}{259}$	$\frac{183}{248}$	$\frac{168}{239}$	$\frac{135}{177}$	$\frac{125}{141}$
$\alpha = \frac{m \cdot C \cdot (t_{2к} - t_{2н})}{(t_1 - t_2) \cdot F \cdot \tau}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\frac{1400}{1400}$	$\frac{750}{1060}$	$\frac{113}{551}$	$\frac{71}{132}$	$\frac{60}{79}$
$Q_{нл} = m \cdot C \cdot (t_{2к} - t_{2н}), \text{кДж}$	$\frac{528}{528}$	$\frac{373}{506}$	$\frac{343}{488}$	$\frac{275}{361}$	$\frac{255}{288}$

Примечание: числитель без вибрации; знаменатель – с вибрацией:  $A = 0,6$  мм;  $v = 60$  Гц

Вибрация, наряду с влиянием на тепломассообменные процессы в кристаллизаторе, оказывает существенное воздействие на формирование структур литых заготовок из различных сплавов (табл. 3 и рис. 4 и 5). Видно, что вибрационное воздействие приводит к практически полному разрушению зоны столбчатых кристаллов, обеспечивая этим получение дисперсной мелкозернистой структуры.

В ходе проведенных исследований установлено, что вибрационная обработка затвердевающих заготовок из различных сплавов вызывает закономерное измельчение макро- и микроструктуры, обеспечивает измельчение и равномерное распределение неметаллических включений, повышает плотность и снижает анизотропию свойств металла по сечению в литом состоянии.

Перечисленные выше изменения в тепломассообменных процессах и структуре заготовок из различных сплавов под воздействием ЭМП и вибрации приводят к изменению качественных характеристик металла, снижая их анизотропию по зонам.

С увеличением интенсивности ЭМП качественные показатели металла заготовок возрастают: площадь, занимаемая равноосными кристаллами, увеличивается с 18 до 43 % от общей площади поперечного сечения заготовок; степень осевой ликвации и центральной пористости снижаются на 2 балла; показатели твердости и прочности повышаются на 8–15 % и происходит выравнивание их числовых показателей по

Таблица 3

Ширина структурных зон заготовок, мм

Марка металла	Условия затвердевания	Корковая зона	Зона столбчатых кристаллов	Зона равноосных кристаллов
Сталь 60	свободное	3	20	10
	с вибрацией	2	10	20
Сталь X18H9T	свободное	3	26	4
	с вибрацией	2	10	20
AK5M2	свободное	3	15	15
	с вибрацией	2	8	22
AD31	свободное	3	28	2
	с вибрацией	2	10	20

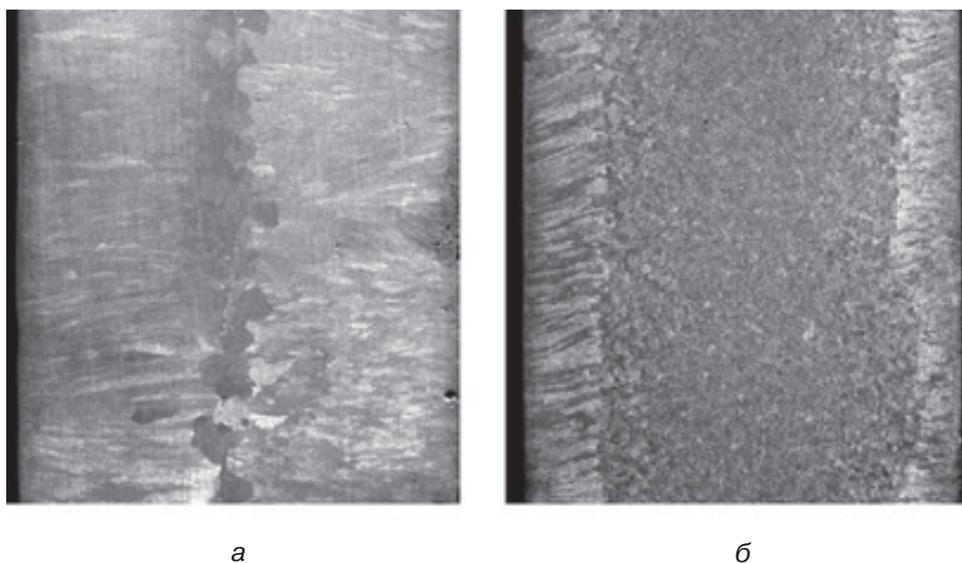


Рис. 4. Макроструктуры продольных темплетов заготовок из алюминиевого сплава АД31: а – без вибрации; б – при вибрации

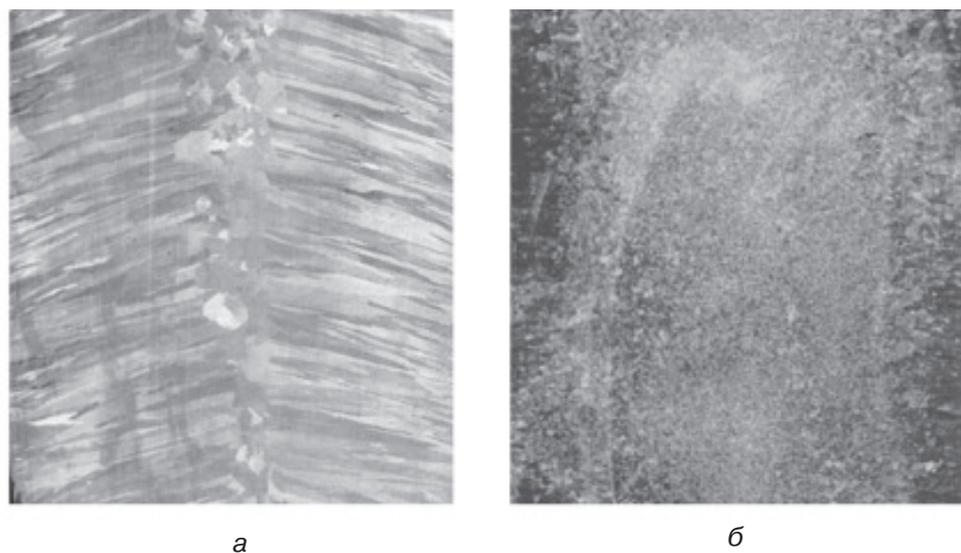


Рис. 5. Макроструктуры продольных темплетов заготовок из нержавеющей стали X18H9T: а – без вибрации; б – при вибрации

всему поперечному сечению, что особенно важно для повышения качества металла центральной части заготовок.

Физико-механические характеристики металла в заготовках после вибрационной обработки изменяются еще сильнее: плотность металла повышается на 2–2,5 % и выравнивается по сечению заготовок; показатели прочности при вибрационной обработке для сталей увеличиваются на 8–10 %, а пластические свойства – на 14–50 % в зависимости от марки сплава и структурной зоны заготовки; для алюминиевых сплавов, наоборот, показатели пластичности увеличиваются незначительно (9–11%), а показатели прочности – существенно (28–60 %).

*Зона вторичного охлаждения.* Основной технологической функцией зоны вторичного охлаждения (ЗВО) является создание оптимальных условий для полного затвердевания отливаемых заготовок, обеспечивая при этом требуемое качество литого металла. Для этого в ЗВО, в том числе, можно применить различные внешние воздействия (ЭМП, вибрация, «мягкое обжатие»). Исследованиями, проведенными Яковше Р. Я., Носоченко О. В., Барановой В. Н. и Барановым И. Р. в условиях ПАО «ДМК им. Ф. Э. Дзержинского» на радиальной МНЛЗ, изучено влияние вибрации на процессы кристаллизации и структурообразования блюмовых заготовок сечением 330x400 мм из углеродистой стали [19–21]. Виброимпульс подводился к заготовке в ЗВО на расстоянии (0,3–0,5) высоты жидкой лунки металла, параметры вибрации – амплитуда 1,5 мм; частота 1000 кол./мин.

Существенные преимущества структурных характеристик опытной заготовки (то есть подвергнутой вибрации) по сравнению с контрольной видны из рис. 6, 7 и табл. 4. Металлографическая картина свидетельствует о наличии химической неоднородности в структуре контрольных образцов по углероду (темные пятна в осевой части рис. 6, а). А химическая неоднородность, возникающая в результате сегрегации ликвирующих элементов при затвердевании стали, приводит к пониже-

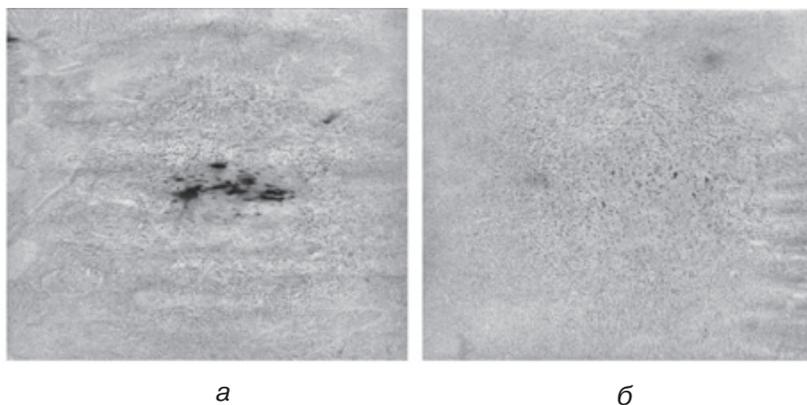


Рис. 6. Серные отпечатки поперечных темплетов блюмовой заготовки сечением 330x400 мм: а – контрольный; б – после вибрации

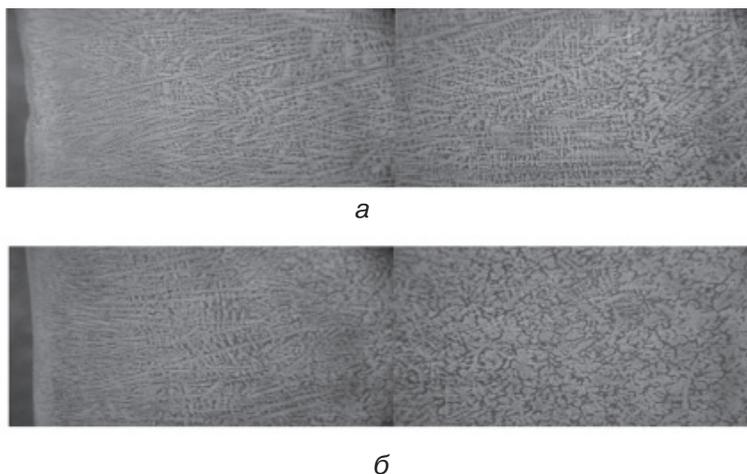


Рис. 7. Дендритная структура металла от поверхности заготовки до оси непрерывнолитого блюма сечением 330x400 мм из стали 20: а – контрольный; б – после вибрации

Таблица 4

Параметры дендритной структуры заготовок из стали 20

Номер образца	Ширина зоны столбчатых дендритов, мм	Ширина зоны равноосных дендритов, мм
111	120–125	40–45
112	50–55	110–115

нию ее механических свойств и их резкой анизотропии. В образцах, вырезанных из опытного металла, отмеченные выше отрицательные факторы отсутствуют (рис. 6, б).

Ширина зоны столбчатых дендритов в опытной заготовке в 2,2–2,4 раза меньше, чем в контрольной, соответственно, увеличивается зона равноосных дендритов. При этом дисперсность дендритной структуры в опытном металле существенно выше, чем в контрольном.

В результате исследований установлено, что вибрационная обработка затвердевающих заготовок из углеродистой стали вызывает закономерное измельчение макро- и микроструктуры, обеспечивает измельчение и равномерное распределение неметаллических включений, повышает плотность и снижает анизотропию свойств металла по сечению в литом состоянии.

Механические свойства металла оказались в прямой зависимости от макро- и микроструктуры заготовок: плотность металла повышается на 1,5–2 % и перепад по сечению заготовок составляет не более 1 %; предел прочности металла повышается до 11 %, а перепад его значений по сечению заготовки снижается до 3 % (в контрольной заготовке перепад составляет 10 %).

**Выводы**

Комплексом исследований, проведенных отделом непрерывной разливки и деформационных процессов ФТИМС НАН Украины показано, что, используя различные приемы внешнего физического воздействия на отдельных стадиях формирования непрерывнолитых заготовок, можно получить металлопродукцию с заданной структурой и свойствами.

**Список литературы**

1. Смирнов А. Н., Пилюшенко В. Л., Минаев А. А. и др. Процессы непрерывной разливки. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Смирнов А. Н., Глазков А. Я., Пилюшенко В. Л. и др. Теория и практика непрерывного литья заготовок. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – 371 с.
3. Лякишев Н. П., Шалимов А. Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. – М.: ЭЛИЗ, 2002. – 208 с.
4. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
5. Гуцин В. Н., Ульянов В. А. Комплексная внепечная обработка стали при непрерывной разливке // *Металлургия и машиностроение*. – 2007. – № 2. – С. 3–7.
6. Способ очистки жидкой стали в промежуточном ковше / Сайта К., Накато М., Когути Ю. и др. // Заявка 63149057. – Кокай токке кохо. – Сер. 2 (2). – 1988. – Т. 39. – С. 285–288.
7. Huskonen Wallace D. Transition in tundish tecnology. // 33 «Metal Prod». – 1988. – V. 26. – № 4. – Р. 18–22.
8. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
9. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
10. Скворцов А. А., Акименко А. Д., Ульянов В. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 216 с.
11. Борисов Б. Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.

12. *Скворцов А. А., Акименко А. Д.* Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. – М.: Metallurgy, 1966. – 190 с.
13. *Нурадинов А. С., Ефимов В. А.* Исследование теплофизических условий затвердевания стальных слитков в поле упругих волн // Процессы литья. – 2002. – № 4. – С. 30–35.
14. *Тарасевич Н. И., Нурадинов А. С., Таранов Е. Д.* и др. Влияние вибрационной обработки на параметры затвердевания стальной заготовки // Процессы литья. – 2006. – №1. – С. 64–69.
15. *Ефимов В. А., Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С.* Влияние вибрации на теплофизические процессы и структуру кристаллизующегося металла // Литейщик России. – 2003. – № 8. – С. 8–10.
16. *Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Ноговџин О. В., Таранов Е. Д.* Вплив вібрації на формування блокової безперервнолитої заготовки // Металознавство та обробка металів. 2013. – № 4. – С. 42–44.
17. *Ельдарханов А. С., Нурадинов А. С., Саипова Л. Х-А.* и др. Интенсификация теплообмена через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 8–11.
18. *Нурадинов А. С., Ельдарханов А. С., Дымнич А. Х.* и др. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 42–51.
19. *Нурадинов А. С., Ельдарханов А. С., Баранова В. Н.* и др. Воздействие вибрационной и газоимпульсной обработки затвердевающего металла на гидродинамические процессы формирования непрерывнолитых заготовок // Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 18–22.
20. *Нурадинов А. С., Ельдарханов А. С., Ахтаев С.С-С.* Применение вибрации для повышения качества непрерывнолитой заготовки из низкоуглеродистой стали // Metallurgy машиностроения. – 2015. – №1. – С. 32–35.
21. *Нурадинов А. С., Ельдарханов А. С., Баранова В. Н.* Некоторые аспекты формирования непрерывнолитых заготовок при газоимпульсной и вибрационной обработках затвердевающего сплава // Сталь. – 2015. – №10. – С. 17–20.

Поступила 02.08.2018

## References

1. *Smirnov, A. N., Pilyushenko, V. L., Minaev, A. A.* (2002) Continuous casting processes. Donetsk: DonNTU. 536 p. [in Russian].
2. *Smirnov, A. N., Glazkov, A. Y., Pilyushenko, V. L.* (2000) Theory and practice of continuous casting of blanks. Donetsk: DonGTU, 371 p. [in Russian].
3. *Lyakishev, N. P., Shalimov, A. G.* (2002) Development of continuous casting technology. Moscow: ELIZ, 208 p. [in Russian].
4. *Efimov, V. A., Eldarkhanov, A. S.* (1998) Modern technologies of casting and crystallization of alloys. Moscow: Machine building, 360 p. [in Russian].
5. *Gushchin, V. N., Ulyanov, V. A.* (2007) Integrated secondary steel processing for continuous casting. Metallurgy and machine building, no 2, pp. 3–7. [in Russian].
6. *Saita, K., Nakato, M., Koguti, Y.* et al. (1988) A method for cleaning liquid steel in an intermediate ladle. Application 63149057. Kokai Tokke koho. Ser. 2 (2), T. 39, pp. 285–288. [in Russian].
7. *Huskonen Wallace, D.* (1988) Transition in tundish technology. «33 Metal Prod» V. 26, no 4, pp. 18–22. [in Russian].
8. *Kutateladz, S. S., Styrikovich, M. A.* (1976) Hydrodynamics of gas-liquid systems. Moscow: Energy, 296 p. [in Russian].
9. *Efimov, V. A., Eldarkhanov, A. S.* Technologies of modern metallurgy. Moscow: New Technologies, 784 p. [in Russian].
10. *Skvortsov, A. A., Akimenko, A. D., Ulyanov, V. A.* Influence of external influences on the process of formation of ingots and blanks. Moscow: Metallurgy, 216 p. [in Russian].
11. *Borisov, B. T.* (1987) The theory of a two-phase zone of a metal ingot. Moscow: Metallurgy, 222 p. [in Russian].
12. *Skvortsov, A. A., Akimenko, A. D.* (1966) Heat transfer and solidification of steel in continuous casting plants. Moscow: Metallurgy, 190 p. [in Russian].
13. *Nuradinov, A. S., Efimov, V. A.* (2002) Investigation of thermophysical conditions of solidification of steel ingots in the field of elastic waves. Casting processes, no. 4, pp. 30–35. [in Russian].
14. *Tarasevich, N. I., Nuradinov, A. S., Taranov, E. D.* et al. (2006) Influence of vibration treatment on the parameters of solidification of a steel billet. Casting processes, no. 1, pp. 64–69. [in Russian].

15. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S. (2003) The influence of vibration on thermo-physical processes and the structure of crystallized metal. The Foundryman of Russia, no. 8, pp. 8–10. [in Russian].
16. Nuradinov, A.S., Eldarkhanov, A.S., Nohovitsin, O.V., Taranov, E.D. (2013) Influence of vibration on the formation of bloom continuous casting. Metallurgy and processing of metals, no. 4, pp. 42–44. [in Ukrainian].
17. Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Saipova, L.H.-A. et.al. (2006) Intensification of heat exchange through the gas gap in the crystallizer MNLZ. Stal, no. 4, pp. 8–11. [in Russian].
18. Nuradinov, A.S., Eldarkhanov, A.S., Dymnich, A.H. et.al. (2016) A method of optimization of thermal work of the Crystallizer MNLZ. Processes of casting, no. 2, pp. 42–51. [in Russian].
19. Nuradinov, A.S. Eldarkhanov, A.S., Baranova, V.N. et. al.(2014) Effect of vibration and gas pulse treatment of solidifying metal on hydrodynamic processes of formation of continuous casting blanks. Casting processes, no. 6, pp. 18–22. [in Russian].
20. Nuradinov, A.S. Eldarkhanov, A.S. Akhtaev, S.S-S. (2015) Application of vibration for improvement of the quality of continuously drawn billet from low-carbon steel // Metallurgy of machine-building, no.1, pp. 32–35. [in Russian].
21. Nuradinov, A.S., Eldarkhanov, A.S., Baranova, V.N. (2015) Some aspects of the formation of continuous-forged blanks at gas-pulse and vibrational treatments of a hardening alloy. Steel, no 10, pp. 17–20. [in Russian].

Received 02.08.2018

**О. В. Ноговіцин**, д-р техн. наук, заст. директора, e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**А. С. Нурадінов**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: nla\_73@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

### ВИКОРИСТАННЯ ЗОВНІШНІХ ФІЗИЧНИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ

У лабораторних і реальних умовах досліджено вплив зовнішніх фізичних впливів на формування безперервнолитих заготовок. Оптимізовано конструктивні параметри пристрою «турбостоп» і запропоновані раціональні параметри продувки рідкого металу, інертним газом в проміжному ковші. Встановлено вплив електромагнітного перемішування металу який твердіє в кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок на тепло-масообмінні процеси в ньому. Розроблено пристрій і режими вібраційної обробки заготовок в зоні вторинного охолодження, що дозволяють істотно поліпшити структурні і фізико-механічні характеристики литого металу.

**Ключові слова:** проміжний ківш, рафінування, гідродинаміка металу, неметалеві включення (НВ), кристалізатор, електромагнітне перемішування (ЕМП), вібрація, тепло- масообмін, зона вторинного охолодження (ЗВО), кристалізація, структура, механічні властивості.

**O. V. Nogovitsyn**, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director, e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**A. S. Nuradinov**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: nla\_73@ukr.net

Physico-technological institute of metals and alloys NAS of Ukraine, Kyiv

### USE OF EXTERNAL PHYSICAL INFLUENCES TO IMPROVE THE TECHNOLOGY OF CONTINUOUS CASTING OF STEEL

In laboratory and real conditions, the influence of external physical effects on the formation of continuously cast billets was investigated. The design parameters of the "turbo-stop" device are optimized and rational parameters for purging the liquid metal with an inert gas in the intermediate ladle are proposed. The effect of electromagnetic stirring of the solidifying metal in the CCM crystallizer on the heat-mass transfer processes in it is established. The device and modes of vibrational processing of blanks in the secondary cooling zone have been developed, which significantly improve the structural and physico-mechanical characteristics of the cast metal.

**Keywords:** intermediate ladle, refining, metal hydrodynamics, nonmetallic inclusions (NI), crystallizer, electromagnetic mixing (EMM), vibration, heat-mass transfer, secondary cooling zone (SCZ), crystallization, structure, mechanical properties.