А.С. Нурадинов, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр., e-mail: nla_73@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

А.Г. Пригунова, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: adel_nayka@ukr.net

В.Ю. Шейгам, науч. сотр.

А.Г. Вернидуб, науч. сотр.

И.А. Нурадинов, инженер I категории, e-mail: inuradinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины (Киев, Украина)

Физические методы управления формированием структуры металлов

В настоящей работе преследовалась цель разработать научно-обоснованные методы управления формированием литой структуры металлических заготовок на первом этапе производства металлопродукции. На модельной и металлической системах изучена возможность управления структурой заготовок внешними физико-термическими воздействиями на расплав в процессе его затвердевания (перегрев, интенсивность охлаждения и вибрация). Физическое моделирование, проведенное на плоской модели слитка из сплава камфена с трицикленом, позволило, регулируя интенсивность теплоотвода при затвердевании расплава, в режиме реального времени наблюдать зарождение и рост центров кристаллизации, определять скорость продвижения фронта и продолжительность общего времени затвердевания в зависимости от режимов вибрации. Полученные на модельном сплаве данные о специфике процесса кристаллизации, обусловленного внешними физико-термическими воздействиями, используя разработанную методику, пересчитаны на объекты из металла и проверены при исследовании формирования структуры слитков из алюминия технической чистоты марки А5. Интенсивность теплоотвода от затвердевающего металла регулировали заливанием перегретого до 750 °С расплава в формы с различной толщиной стенок и теплопроводностью, что обеспечило изменение скорости охлаждения от 0,3 °С/с до 5 °С/с. При повышении интенсивности теплоотвода и воздействии вибрацией на затвердевающий расплав меняется кинетика процесса кристаллизации, вследствие чего увеличивается однородность и дисперсность кристаллической структуры слитков.

Результаты физического моделирования и экспериментов, проведенных на металле, хорошо согласуются. Общей тенденцией является существенное уменьшение размеров элементов макро- и микроструктуры под воздействием вибрации. Величина зерен и кристаллов в среднем уменьшается в 3–5 раз, в таком же соотношении уменьшается и их размерный фактор, приближаясь к 1. Микроструктура слитков однородная, мелкокристаллическая. Установлено, что, используя различное сочетание рассмотренных факторов воздействия, можно управлять процессами кристаллизации и структурообразования. Отрицательное влияние больших перегревов на формирование дисперсной дендритной структуры можно практически нивелировать, регулируя интенсивность теплоотвода или воздействуя вибрацией на жидкий и затвердевающий металл.

Ключевые слова: сплав, кристаллизация, перегрев, переохлаждение, интенсивность охлаждения, вибрация, структура.

Введение. Машиностроительная отрасль на современном этапе своего развития характеризуется все возрастающими требованиями к качеству используемой металлопродукции, которое невозможно повысить без совершенствования технологий выплавки и литья. Из практики известно, что промышленные сплавы кристаллизуются с образованием двухфазной

зоны, и происходящие в ней процессы разделительной диффузии приводят к значительному развитию ликвации примесей по сечению литой заготовки и анизотропии физико-механических и эксплуатационных свойств металла. Принято считать, что одним из мощных средств подавления разделительной диффузии является значительное ускорение процессов теплоотвода

и затвердевания путем использования различных приемов внешних воздействий, в том числе термических и физических [1–5].

Поэтому **целью настоящей работы** является разработка научно-обоснованных физико-термических методов управления формированием литой структуры металлических заготовок.

Материалы и методы. В качестве модельного вещества при физическом моделировании использован сплав камфена с трицикленом, который, подобно металлам, кристаллизуется в интервале температур с образованием дендритной структуры, а также обладает следующими оригинальными свойствами: низкой температурой плавления, прозрачностью, склонностью к переохлаждению, небольшой скоростью кристаллизации. В качестве металлической системы в работе использован алюминий технической чистоты А5, химический состав которого приведен в таблице.

Химический состав алюминиевого сплава А5

Al	Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Mg	Zn	Ga
min 99,5	до 0,3	до 0,25	до 0,05	до 0,02	до 0,02	до 0,03	до 0,06	до 0,03

Рис. 1. Плоская физическая модель для изучения процессов кристаллизации и структурообразования слитков: 1 – основание; 2 – поддон; 3 – боковые грани; 4 – крышка; 5 – прозрачные грани (стекла); 6 – патрубок для заливки расплава; 7 – термопары

Пересчет полученных на модели данных на реально действующие объекты осуществляли по методике, описанной в работе [6]. В частности, масштаб подобия температур определяли из уравнения:

$$M_{\Delta t} = \frac{\Delta t_n}{\Delta t_m} = \frac{t_n - t_o}{t'_n - t'_o}, \quad (1)$$

где t_n – температура ликвидус металла; t_o – температура охлаждения металла; t'_n – температура ликвидус

моделирующей среды; t'_o – температура охлаждения моделирующей среды.

Физическое моделирование проводили на плоской модели слитка, позволяющей регулировать интенсивность теплоотвода от затвердевающего расплава (рис. 1). Конструкция модели позволяла в режиме реального времени визуально фиксировать зарождение и рост центров кристаллизации, а также продвижение фронта затвердевания. В ходе экспериментов определяли следующие параметры: скорость продвижения фронта затвердевания; характер перемешивания жидкой фазы в зависимости от режимов вибрации; продолжительность общего времени затвердевания слитка.

Влияние различных факторов на формирование структуры металлов исследовано на слитках диаметром 40 мм и высотой 60 мм из алюминия марки А5. Интенсивность теплоотвода от затвердевающего ме-

талла изменяли тем, что перегретый до одинаковой температуры расплав заливали в формы с различной теплопроводностью и толщиной стенок (вологранная форма ($V_{\text{охл.}} = 0,3$ °C/c) и металлические формы с толщинами стенок $\delta = 1, 10$ и 20 мм, что соответствовало скоростям охлаждения $V_{\text{охл.}} = 1-6$ °C/c). Для изучения влияния упругих колебаний на формирование структуры опытных слитков формы закрепляли на плите вибростола, которая совершала колебательные движения с амплитудой $A = 0,2$ мм и частотой $\nu = 60$ Гц (параметры подбирали расчетным путем). Температурные кривые охлаждения слитков строили по прямым замерам температур при помощи термопар. Макро- и микроструктуру слитков исследовали с использованием стандартных методик [7].

Основные результаты и их обсуждение. Известно, что главную роль в формировании структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств литого металла играет процесс его затвердевания, характер которого определяется двумя взаимосвязанными параметрами: скоростью кристаллизации (R) и величиной переохлаждения на границе фаз (Δt_k). При этом связь между скоростью кристаллизации и переохлаждением описывается зависимостью [3]:

$$R = k \cdot \Delta t_k, \quad (2)$$

где k – коэффициент затвердевания.

От скорости кристаллизации расплава зависит также и дисперсность дендритной структуры литого металла [8]:

$$\lambda_1^4 = \frac{A \cdot C}{G \cdot R}, \quad (3)$$

где λ_1 – расстояние между осями первого порядка; A – экспериментальный коэффициент; C – исходная концентрация примесей; G – температурный градиент перед границей твердой фазы.

Этими же параметрами (R , G) определяется и длина столбчатых кристаллов (L) [9]:

$$L = \frac{t_{\text{л}} - t_{\text{с}}}{G} - \frac{D}{R}, \quad (4)$$

где $t_{\text{л}}$, $t_{\text{с}}$ – температуры ликвидус и солидус сплава; D – коэффициент диффузии примесей.

Проведенный элементарный анализ показывает очевидную роль переохлаждения затвердевающего металла на дисперсность его структуры. Из практики известно, что литые заготовки с дисперсной кристаллической структурой, минимальной ликвацией и благоприятным расположением неметаллических включений имеют наиболее высокий уровень механических свойств. Для получения литого металла с такой структурой необходимо обеспечить максимальную скорость кристаллизации и величину переохлаждения на границе фаз, которые при формировании реальных металлических заготовок по мере увеличения толщины затвердевшего металла прогрессивно уменьшаются (в 5–10 раз).

О влиянии температуры перегрева на затвердевание модельного сплава можно судить по изменению

Рис. 2. Изменение скорости кристаллизации модельного сплава в зависимости от температуры перегрева его расплава: I – 2 °C; II – 4 °C; III – 8 °C

скорости кристаллизации и дисперсности его структуры. В частности, при перегреве расплава на 2 °C (соответствует перегреву алюминия и его сплавов на 50 °C) уже с первых секунд затвердевания наблюдается максимальная скорость кристаллизации, которая в дальнейшем непрерывно уменьшается вследствие роста толщины корочки (рис. 2, кривая I). А при перегревах расплава на 4 °C и 8 °C (соответствуют перегреву алюминия и его сплавов до 200 °C) процесс зарождения и роста кристаллов задерживается из-за наличия в нем большого количества тепла перегрева, а скорость кристаллизации достигает

Рис. 3. Макро- и микроструктура модельного сплава при перегреве расплава $\Delta t_{\text{пер}} = 12$ °C и скорости его охлаждения $V_{\text{охл.}} = 6$ °C/мин.: а, в – без вибрации; б, г – при действии вибрации

Рис. 4. Температурные кривые охлаждения затвердевающего расплава: $\blacktriangle$ – металлическая форма с $\delta = 20$ мм; $\times$ – металлическая форма с $\delta = 10$ мм; $\blacksquare$ – металлическая форма с $\delta = 1$ мм; $\blacklozenge$ – волограновая форма с $\delta = 30$ мм; а – контрольный вариант (без вибрации); б – под воздействием вибрации: $A = 0,2$ мм; $\nu = 60$ Гц

максимального значения, соответственно, к 150-й и 350-й секундам, а затем снижается (рис. 2, кривые II и III). При этом для всех вариантов перегрева интенсивность теплоотвода была одинаковой и соответствовала затвердеванию металла в песчаной форме.

Из сравнения максимальных значений скоростей кристаллизации видно, что в зависимости от температуры перегрева расплава она уменьшается более, чем в 3 раза. А от скорости кристаллизации, как видно из уравнений (3) и (4), напрямую зависит дисперсность структуры.

Для перевода расплава из неравновесного в равновесное состояние иногда необходимо обеспечить высокие значения температуры перегрева, что является главной причиной формирования крупнозернистой кристаллической структуры [8, 9]. Как один из наиболее эффективных способов устранения отрицательного влияния больших перегревов на формирование дисперсной дендритной структуры при затвердевании металлических сплавов может быть использована вибрация. В работах [3, 10, 11] доказано существенное воздействие вибрации на процессы кристаллизации и структурообразования металлических сплавов для небольших перегревов их расплавов (до 50–100 °C). В данной работе установлено, что вибрация кардинально меняет макро- и микроструктуру модельного сплава даже при больших перегревах, эквивалентных перегреву алюминиевых сплавов на 150–200 °C (рис. 3).

В контрольном эксперименте макроструктура модельного слитка представлена крупными разориентированными зернами неправильной формы величиной от 4 до 12 мм и размерным фактором от 3 до 40 (рис. 3, а). Границы зерен характеризуются большой протяженностью, имеют грубое строение (рис. 3, в). А под действием вибрации формируется однородная зернистая структура высокой дисперсности. Поэтому при небольшом увеличении (в 5 раз) границы зерен

методом оптической микроскопии не выявляются (рис. 3, б). С некоторыми трудностями это достигается при стократном увеличении (рис. 3, г). Из-за слабого выявления границ даже при таком увеличении привести статистически достоверные данные о размерах зерен весьма сложно. Рассматривая зерна, которые выявлены, можно утверждать, что их размер не превышает 100–200 мкм, а размерный фактор составляет 1–1,3. То есть, макроструктура близка к равноосной. Ширина границ зерен не менее чем в 5 раз меньше по сравнению с границами зерен в контрольном образце, не подвергнутом вибрации (см. рис. 3, в и г).

Воздействие вибрации проявляется и на микроструктуре модельного сплава (рис. 3, в и г). При обычном его затвердевании формируются дендритные кристаллы с размером в направлении оси первого порядка 50–150 мкм и размерным фактором не менее 5–10 (рис. 3, в). После воздействия вибрации величина кристаллов в среднем уменьшается в 3–5 раз, в таком же соотношении уменьшается и их размерный фактор. Микроструктура сплава однородная, мелкокристаллическая (рис. 3, г).

Среди характеристик теплового состояния системы слитков – форма, определяющих начальные условия формирования структуры слитков, температура перегрева расплава занимает особое положение. Она является не только характеристикой тепловых условий разлива металла, но и параметром физического состояния расплава в момент начала процесса кристаллизации, влияющим в значительной мере на формирование кристаллической структуры металла на макро- и микроуровнях, а также на степень его физической однородности [12].

Из представленных на рис. 4 температурных кривых охлаждения расплава алюминия А5, перегретого до одинаковой температуры (750 °C), видно, что, в зависимости от интенсивности теплоотвода, скорость

Рис. 5. Макроструктуры опытных слитков из алюминия марки А5: а, д – вологранная форма с $\delta = 30$ мм; б, е – металлическая форма с $\delta = 1$ мм; в, ж – металлическая форма с $\delta = 10$ мм; г, з – металлическая форма с $\delta = 20$ мм; а, б, в, г – контрольный вариант (без вибрации); д, е, ж, з – под воздействием вибрации

охлаждения затвердевающих расплавов меняется в широких пределах: от $0,3$ °C/c в вологранной форме до 6 °C/c в стальной форме с толщиной стенки 20 мм. Общая продолжительность затвердевания слитков зависит от скорости охлаждения и для крайних вариантов сокращается примерно в 6 раз.

При вибрационной обработке затвердевающего металла имеет место более интенсивный отвод тепла от него: в среднем для всех вариантов скорость охлаждения затвердевающих расплавов увеличивается в $1,6$ раза, а общая продолжительность затвердевания слитков сокращается более чем в $1,5$ раза (рис. 4, б).

При повышении интенсивности теплоотвода и воздействии вибрацией на затвердевающий расплав меняется кинетика процесса кристаллизации и, как следствие, увеличивается однородность и дисперсность кристаллической структуры металла. Как известно, кинетика процесса кристаллизации определяется соотношением следующих параметров: скорости образования зародышей твердой фазы и линейной скорости их роста. Эти параметры, в свою очередь, являются функциями величины переохлаждения (то есть интенсивности теплоотвода). Макроструктуры опытных слитков подтверждают такую зависимость (рис. 5).

Сравнительный анализ макроструктур слитков из алюминия марки А5, полученных в данной работе, и камфена, полученных авторами данной статьи ранее при физическом моделировании [4], показал их хорошую корреляцию. При низкой интенсивности теплоотвода, когда расплав заливался в форму из вологрana с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,14$ Вт/м·°C, металл остывает практически равномерно по всему

объему. Об этом свидетельствует грубая равноосная структура на всей площади шлифа (рис. 5, а). При затвердевании расплава в металлических формах (коэффициент теплопроводности в рассматриваемом интервале температур $\lambda = 36$ Вт/м·°C) структура слитков состоит из зон столбчатых и равноосных кристаллов, форма и размер которых зависит от интенсивности теплоотвода (рис. 5, б, в, г). К примеру, для металлической формы с толщиной стенки $\delta = 1$ мм ($V_{\text{охл.}} = 1$ °C/c) около 70 % площади макрошлифа занимает зона крупных столбчатых кристаллов, а остальные 30 % площади – зона грубых равноосных кристаллов (рис. 5, б). Для двух других вариантов металлических форм все 100 % площади макрошлифа слитков занимает зона столбчатых кристаллов, причем, чем интенсивнее теплоотвод, тем меньше размер кристаллов (рис. 5, в, г).

Совершенно иной характер структуры слитков, сформировавшихся под воздействием вибрации (параметры вибрации в данных исследованиях имели следующие значения: амплитуда $A = 0,2$ мм; частота $\nu = 60$ Гц). Для низкой интенсивности теплоотвода (затвердевание слитков в вологранной форме – $V_{\text{охл.}} = 0,3$ °C/c и металлической форме с толщиной стенки $\delta = 1$ мм – $V_{\text{охл.}} = 1$ °C/c) все 100 % площади макрошлифов слитков занимает равномерная зернистая структура высокой дисперсности (рис. 5, д, е). При существенном повышении интенсивности теплоотвода (затвердевание слитков в металлических формах с толщинами стенок $\delta = 10$ мм – $V_{\text{охл.}} = 4$ °C/c и $\delta = 20$ мм – $V_{\text{охл.}} = 6$ °C/c) в поперечном сечении слитков сохраняется небольшая зона дисперсных столбчатых кристаллов толщиной до 8 мм по периметру и зона мелких равноосных кристаллов на остальной поверхности шлифов (рис. 5, ж, з).

Такие изменения в структуре слитков под воздействием вибрации связаны с тем, что при наложении упругих волн на затвердевающий металл, наряду с принудительным его перемешиванием, происходит мгновенное изменение сил в объеме расплава, что обуславливает возникновение больших градиентов давлений. В результате существенно меняются параметры процесса кристаллизации металла (скорость образования зародышей твердой фазы и линейная скорость их роста), происходит механическое разрушение дендритов на фронте затвердевания и в объеме расплава [13–15], что приводит к существенным изменениям в структуре металлов и сплавов.

Выводы

Таким образом, в работе показана возможность эффективного управления структурой литого металла с применением физико-термических способов внешнего воздействия на затвердевающий расплав. Показано, что применение этих методов способствует повышению структурной однородности металлических заготовок. Это позволяет существенно сократить использование экологически вредных операций химического модифицирования, раскрывает перспективы ресурсо- и энергосбережения.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vorozhtsov S.A., Eskin D.G., Tamayo J. et al. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites. *Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci.* 2015. Vol. 46. No. 7. P. 2870–2875.
2. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Уздиева Н.С., Ахтаев С.С.-С. Влияние интенсивности бегущего магнитного поля в кристаллизаторе МНЛЗ на формирование сортовых заготовок. *Металлургия машиностроения*. 2019. № 5. С. 34–39.
3. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004. 784 с.
4. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Ахтаев С.С.-С., Саипова Л.Х.-А. Влияние внешних термосиловых воздействий на формирование структуры литых заготовок. *Сталь*. 2019. № 6. С. 9–13.
5. Овсиенко Д.Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. К.: Наукова думка, 1994. 256 с.
6. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. М.: Машиностроение, 2001. 208 с.
7. Лившица Б.Г. Лаборатория металлографии. М.: Металлургия, 1965. 439 с.
8. Баум Б.А. Металлические жидкости – проблемы и гипотезы. М.: Наука, 1979. 120 с.
9. Херлах Д., Файербах Б. Зародышеобразование и переохлаждение. М.: Мир, 1989. 179 с.
10. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М.: Янус-К, 2006. 688 с.
11. Campbell I. Effects of vibration during solidification. *Internationale Metals Reviews*. 1981. № 2. P. 71–108.
12. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливки. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
13. Найдек В.Л., Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С. и др. О механизме воздействия вибрации на кристаллизацию и структурообразование сплавов. *Литейное производство*. 2003. № 9. С. 13–15.
14. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С. Влияние вибрации на межфазный переход расплава в кристаллическую структуру слитков. *Материаловедение*. 2003. № 3. С. 36–38.
15. Нурадинов А.С. Измельчение структуры затвердевающего сплава в условиях низкочастотной вибрации. *Процессы литья*. 2008. № 4. С. 49–55.

Надійшла 11.02.2020

REFERENCES

1. Vorozhtsov, S.A., Eskin, D.G., Tamayo, J. et al. (2015). The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites. *Metal. Mater. Trans. A: Phys. Metal. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 7, pp. 2870–2875.
2. Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Uzdieva, N.S., Akhtaev, S.S.-S. (2019). The influence of the traveling magnetic field intensity in the continuous casting machine on the formation of high-quality billets. *Metallurgy of Mechanical Engineering*, no. 5, pp. 34–39 [in Russian].
3. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (2004). Technologies of modern metallurgy. Moscow: Novye tekhnologii, 784 p. [in Russian].

4. Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Akhtaev, S.S.-S., Saipova, L.Kh.-A. (2019). The influence of external thermo-force influences on the formation of the structure of cast billets. *Steel*, no. 6, pp. 9–13 [in Russian].
5. Ovsienko, D.E. (1994). The nucleation and growth of crystals from the melt. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p. [in Russian].
6. Eldarkhanov, A.S., Efimov, V.A., Nuradinov, A.S. (2001). The processes of casting formation and their modeling. Moscow: Mashinostroenie, 208 p. [in Russian].
7. Livshitsa, B.G. (1965). Laboratory of metallography. Moscow: Metallurgiya, 439 p. [in Russian].
8. Baum, B.A. (1979). Metallic fluids – problems and hypotheses. Moscow: Nauka, 1979, 120 p. [in Russian].
9. Herlach, D., Firebach, B. (1989). Nucleation and hypothermia. Moscow: Mir, 179 p. [in Russian].
10. Abramov, V.O., Abramov, O.V., Artemyev, V.V. et al. (2006). Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering. Moscow: Janus-K, 688 p. [in Russian].
11. Campbell, I. (1981). Effects of vibration during solidification. *Internationale Metals Reviews*, no. 2, pp. 71–108.
12. Balandin, G.F. (1973). The formation of the crystalline structure of the casting. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. [in Russian].
13. Naydek, V.L., Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S. et al. (2003). On the mechanism of the effect of vibration on the crystallization and structure formation of alloys. *Foundry*, no. 9, pp. 13–15 [in Russian].
14. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S. (2003). The effect of vibration on the interfacial transition of the melt into the crystalline structure of ingots. *Materials Science*, no. 3, pp. 36–38 [in Russian].
15. Nuradinov, A.S. (2008). Grinding the structure of the hardened alloy under conditions of low-frequency vibration. *Casting processes*, no. 4, pp. 49–55 [in Russian].

Received 11.02.2020

Анотація

А.С. Нурадінов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр.,
e-mail: nla_73@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

А.Г. Пригунова, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,
e-mail: adel_nayka@ukr.net

В.Ю. Шейгам, наук. співр.

А.Г. Вернидуб, наук. співр.

І.А. Нурадінов, інженер I категорії, e-mail: inuradinov@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
(Київ, Україна)*

Фізичні методи управління формуванням структури металів

У даній роботі ставилася мета розробити науково-обґрунтовані методи управління формуванням литої структури металевих заготовок на першому етапі виробництва металопродукції. На модельній і металевій системах вивчено можливість управління структурою заготовок зовнішніми фізико-термічними впливами на розплав в процесі його затвердіння (перегрів, інтенсивність охолодження і вібрація). Фізичне моделювання, проведене на плоскій моделі злитка зі сплаву камфена з тріцикленом, дозволило, регулюючи інтенсивність тепловідводу при затвердінні розплаву, в режимі реального часу спостерігати зародження і зростання центрів кристалізації, визначити швидкість просування фронту і тривалість загального часу затвердіння в залежності від режимів вібрації. Отримані на модельному сплаві дані про специфіку процесу кристалізації, обумовленого зовнішніми фізико-термічними впливами, використовуючи розроблену методику, перераховані на об'єкти з металу і перевірені при дослідженні формування структури злитків з алюмінію технічної чистоти марки А5. Інтенсивність тепловідведення від металу, що твердне, регулювали заливанням перегрітого до 750 °С розплаву у форми з різною товщиною стінок і теплопровідністю, що забезпечило зміну швидкості охолодження від 0,3 °С/с до 5 °С/с. При підвищенні інтенсивності тепловідведення і впливі вібрацією на розплав, що твердне, змінюється кінетика процесу кристалізації, внаслідок чого збільшується однорідність і дисперсність кристалічної структури злитків.

Результати фізичного моделювання та експериментів, проведених на металі, добре узгоджуються. Загальною тенденцією є суттєве зменшення розмірів елементів макро- і мікроструктури під впливом вібрації. Величина зерен і кристалів в середньому зменшується в 3–5 разів, в такому ж співвідношенні зменшується і їх розмірний фактор, наближаючись до 1. Мікроструктура злитків однорідна, дрібнокристалічна. Встановлено, що, використовуючи різне поєднання роз-

глянутих факторів впливу, можна управляти процесами кристалізації та структуроутворення. Негативний вплив великих перегрівів на формування дисперсної дендритної структури можна практично нівелювати, регулюючи інтенсивність тепловідводу або впливаючи вібрацією на рідкий метал і метал, що твердне.

Ключові слова

Сплав, кристалізація, перегрів, переохолодження, інтенсивність охолодження, вібрація, структура.

Summary

A.S. Nuradinov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading Researcher, e-mail: nla_73@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

A.G. Prigunova, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of Department, e-mail: adel_nayka@ukr.net

V.Yu. Sheigam, Research Scientist

A.G. Vernidub, Research Scientist

I.A. Nuradinov, Engineer of I category, e-mail: inuradinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Physical methods of control of formation of metal structure

The aim of this work was to develop scientifically based methods for controlling the formation of a cast structure of metal billets at the first stage of metal production. Using model and metal systems, the possibility of controlling the structure of the workpieces by external physical and thermal effects on the melt during its solidification (overheating, cooling rate, and vibration) was studied. Physical modeling carried out on a flat model of an ingot made of an alloy of camphene with tricyclene made it possible, by regulating the intensity of heat removal during solidification of the melt, to observe in real time the nucleation and growth of crystallization centers, to determine the rate of advancement of the front and the duration of the total solidification time depending on vibration modes. The data obtained on the model alloy on the specifics of the crystallization process due to external physical and thermal influences using the developed method are recalculated for metal objects and verified when studying the formation of the structure of aluminum alloy ingots of technical grade A5 grade. The intensity of heat removal from the hardened metal was controlled by pouring the melt superheated to 750 °C into molds with different wall thickness and thermal conductivity, which ensured a change in the cooling rate from 0.3 °C/s to 5 °C/s. With an increase in the heat sink intensity and vibration exposure to the solidified melt, the kinetics of the crystallization process changes, as a result of which the uniformity and dispersion of the crystal structure of the ingots increase.

The results of physical modeling and experiments conducted on metal are in good agreement. The general trend is a significant reduction in the size of macro- and microstructure elements under the influence of vibration. The size of grains and crystals on average decreases by 3–5 times, their size factor decreases in the same ratio, approaching to 1. The microstructure of the ingots is homogeneous, finely crystalline. It has been established that, using a different combination of the considered factors of influence, it is possible to control the processes of crystallization and structure formation. The negative effect of large overheating on the formation of a dispersed dendritic structure can be practically leveled by regulating the intensity of heat removal or by vibrating the liquid and hardening metal.

Keywords

Alloy, crystallization, overheating, hypothermia, cooling intensity, vibration, structure.