

Ю.П. Таран⁽¹⁾, инженер

А.Н. Николаенко⁽²⁾, зав. кафедрой, к.т.н., профессор

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ЕЕ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

⁽¹⁾ Запорожское отделение сервисного центра «Металлург» объединенной кампании «РУСАЛ»,

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия

Безперервне литво та прокат алюмінію є складним нестаціонарним процесом з множиною взаємозалежних вхідних і вихідних параметрів, характерною особливістю якого є створення температурних деформацій заготовки, що одержують. Потреба технології виробництва в компенсації виникаючих подовжень змінюванням швидкості прокатки, спричинює необхідність пошуку закономірностей утворення температурних деформацій заготовки металу.

Непрерывное литье и прокат алюминия представляет собой сложный нестационарный процесс с множеством взаимозависимых входных и выходных параметров, характерной особенностью которого является образование температурных деформаций получаемого слитка. Потребность технологии производства в компенсации возникающих удлинений изменением скорости прокатки вызывает необходимость поиска закономерностей образования температурных деформаций заготовки металла.

Введение. Производство алюминиевой катанки на ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» осуществляется методом непрерывной разливки металла. Расплавленный алюминий из печей-миксеров поступает на литейную машину (вращающееся колесо с медной кольцеобразной изложницей), охлаждается по определенной схеме и кристаллизуется. Далее полученную заготовку направляют по рольгангу в прокатный стан с прохождением от 6 до 10 формовочных клетей, в зависимости от диаметра проволоки (9, 12 и 15 мм).

Для компенсации провисания заготовки, образующейся в результате литья и создания определенного натяжения, используют специальный рычаг с грузом-противовесом – тонарм, на оси которого закреплен датчик пространственного положения. Механическое воздействие рычага на заготовку дополняет естественную усадку затвердевающего металла за счет несильного принуждения заготовки сохранять контакт с дном изложницы и способствует температурной стабилизации пограничного слоя затвердения [1].

Режим прокатки алюминиевой катанки является близким к свободному, без натяжения заготовки между тонармом и станом. При такой технологии очень важным является качественное управление процессом формирования заготовки и ее подачи в прокатные клетки. Однако отсутствие стабильности в процессе теплообмена при непрерывном литье, ручное регулирование температуры металла в разливном миксере и скорости вращения изложницы приводит к температурным деформациям заготовки, а, следовательно, вносит значительные возмущения в технологию ее литья и прокатки.

В связи с этим представляет значительный интерес исследование процесса формирования алюминиевой заготовки и ее температурной деформации на участке от литейной машины до первой прокатной клетки.

Постановка задачи. Исследовать температурную нестабильность заготовки в процессе ее формирования при литье, установить причины и величину температурных деформаций как фактора, влияющего на качество управления.

Основная часть исследований. При производстве катанки расплавленный алюминий подают в медную кольцевую изложницу. На участке АС металл и изложницу подвергают водяному охлаждению (рис.1).

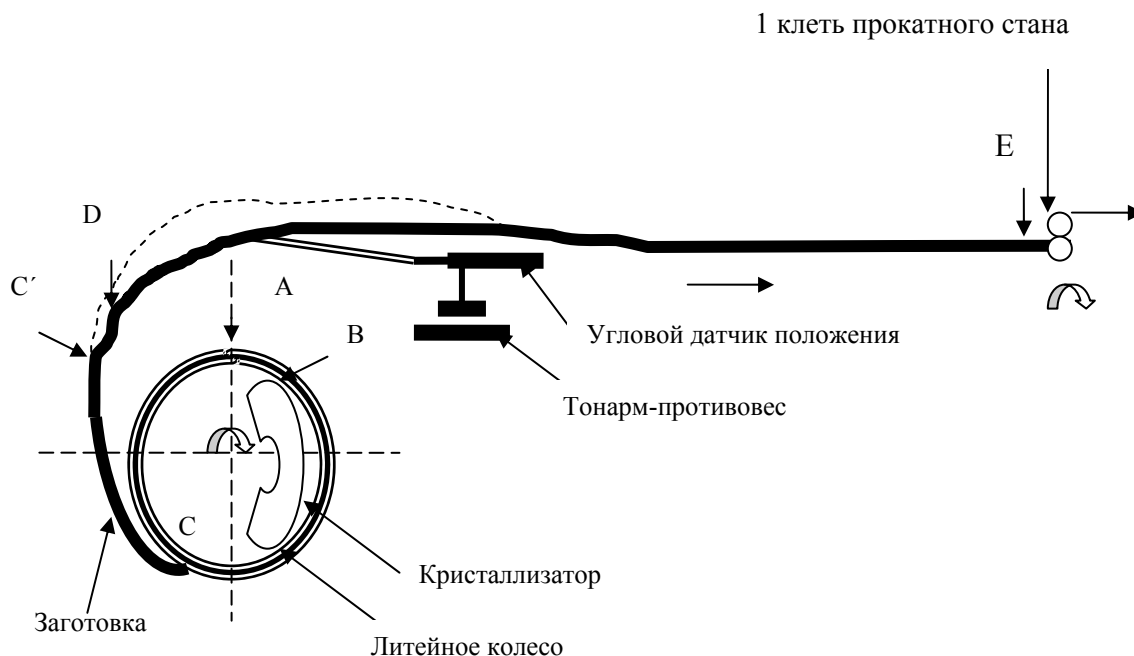


Рисунок 1 – Схема формирования алюминиевой заготовки при литье

Его интенсивность возрастает от точки А к точке В [2]. Это вызвано необходимостью форсирования процесса кристаллизации расплавленного алюминия, который обеспечивает начало образования твердой кристаллической основы заготовки при температуре порядка 600 °С в точке В. Ранее проведенными исследованиями установлено, что с этого момента заготовку можно рассматривать как твердое тело и оценивать в нем величину температурных деформаций.

После точки В интенсивность подачи воды снижается и прекращается в точке С, где сформировавшаяся заготовка отделяется от изложницы. Объясняется это тем, что точка В характеризуется началом перехода жидкой фазы в твердую, которая требует новых условий охлаждения. При этом в точке С кристаллизуется около 90...95 % металла.

Скорость кристаллизации при литье, согласно работе [3], определяется отводом теплоты от фронта кристаллизации и ее можно рассчитать как:

$$U_k = \frac{4\lambda \cdot (t_m - t_{изл})}{I \cdot \gamma \cdot R}, \quad (1)$$

где U_k – скорость кристаллизации металла; λ – коэффициент теплопроводности металла; t_m , $t_{изл}$ – соответственно температура поверхности металла и температура поверхности изложницы; I , γ – соответственно теплосодержание и плотность металла; R – радиус заготовки, получаемой при литье.

Из уравнения (1) видно, что, при прочих равных условиях, скорость кристаллизации металла зависит от разности температур металла и изложницы, которая характеризует избыточную температуру слитка θ в любой его точке при охлаждении:

$$\theta = t_m - t_{изл}.$$

Закономерности распределения избыточной температуры по длине охлаждаемой заготовки описаны в теории регулярного теплового режима [4]. Согласно данной теории, любой процесс охлаждения тела можно условно разделить на две стадии. Первая стадия определяет начальное развитие теплового процесса и характеризует распространение температурных возмущений, а также вовлечение все новых и новых слоев тела и является неупорядоченным режимом. При этом скорость изменения температуры в отдельных точках тела различна и поле температур тела определяется его начальным состоянием. Применительно к схеме формирования алюминиевой заготовки (рис. 1) – это участок АВ. С течением времени влияние начальной неравно-мерности снижается и относительная скорость изменения температуры во всех точках тела становится постоянной. Наступает вторая стадия – режим упорядоченного процесса или регулярный режим, который, в зависимости от характера изменения температуры может быть трех родов (участок ВС).

При непрерывном литье по меньшей мере 93...95 % теплообмена происходит в боковых направлениях, то есть перпендикулярно к основным осям литья и направлению вращения литейного колеса. В таких условиях охлаждения фронт кристаллизации обязательно имеет форму большой буквы *V* и скорость его движения определяется по формуле (1).

После прекращения охлаждения и выхода алюминиевой заготовки из медной изложницы на участке СС' прекращается интенсивный отвод теплоты от фронта кристаллизации. Происходит процесс «прямой кристаллизации», то есть затвердевание металла от боковых стенок отливки в ее середину, и большая часть теплоты переходит в только что затвердевшую заготовку. После завершения полного процесса кристаллизации на участке С'D наблюдается выравнивание температуры по краям и внутри заготовки, после чего наступает установившийся режим, в течение которого средняя по сечению температура заготовки остается практически неизменной (участок DE).

Для регулярного режима первого рода, применительно к процессу непрерывного литья на участке ВС, избыточная температура тела θ во времени изменяется по экспоненциальному закону [4]:

$$\theta = G \cdot \exp[-m \cdot \tau], \quad (2)$$

где G – константа, m – темп теплового режима, τ – период цикла литья.

Темп регулярного теплового режима m представляет собой относительную скорость изменения избыточной температуры в теле. Если в регулярном режиме теплообмена по истечении времени τ_1 от начала процесса избыточная температура составляет θ_1 , а по истечении времени $\tau_2 - \theta_2$, то, согласно работе [6]:

$$\ln \frac{\theta_2}{\theta_1} = -m \cdot \Delta \tau. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что процесс непрерывного литья заготовки от цикла к циклу характеризуется непостоянством теплообмена между алюминием и изложницей, а, следовательно, и колебаниями температуры заготовки относительно среднего значения в пределах одного цикла литья, то для описания температурного состояния

заготовки справедливо применять уравнение регулярного теплового режима третьего рода:

$$t_c = t_m + t_a \cdot \cos(\omega \cdot \tau), \quad (4)$$

где t_c – температура заготовки; t_m – средняя температура заготовки; ω – частота циклов литья; t_a – амплитудное значение температуры заготовки в цикле литья.

Существующая температурная нестабильность при формировании заготовки в литейной машине приводит к температурным удлинениям, которые восстанавливаются и не восстанавливаются, накапливаясь от цикла к циклу, образуя петлю заготовки. Можно предположить, что эти деформации описываются уравнениями, подобными уравнениям регулярного теплового режима первого и третьего рода, то есть

$$\Delta L_{\partial 3} = \Delta L_{\partial a} \cdot \cos(\omega \cdot \tau) \quad (5)$$

$$\Delta L_{\partial 1} = G_m \cdot \exp[-m \cdot \tau], \quad (6)$$

где $\Delta L_{\partial 1}$ – температурные деформации при регулярном тепловом режиме первого рода; G_m – постоянная, характерная для параметров литейной машины данного типа; $\Delta L_{\partial 3}$ – температурные деформации при регулярном тепловом режиме третьего рода; $\Delta L_{\partial a}$ – среднее амплитудное значение температурных деформаций за цикл литья.

Для определения темпа теплового режима m в условиях производства алюминиевой катанки были проведены исследования температуры металла и изложницы. Температуру металла на входе литейной машины фиксировали стационарной термопарой, установленной в разливочном желобе. Температуру заготовки, передаваемой на участок СЕ, измеряли контактной термопарой. Лазерным пирометром измеряли температуру изложницы в точках А и С через интервал τ , равный времени прохождения металлом участка АС при скорости литейного колеса $3,4 \text{ мин}^{-1}$, что соответствует линейной скорости металла $0,249 \text{ м/с}$.

Результаты исследований показали, что максимальная температура поверхности изложницы зафиксирована в точке А и достигает $140 \dots 160 \text{ }^\circ\text{C}$. По мере охлаждения алюминия температура изложницы в точке С уменьшается до $110 \dots 130 \text{ }^\circ\text{C}$. Когда изложница выходит из области влияния кристаллизатора и попадает в воздушную среду, температура ее поверхности начинает возрастать и в точке А достигает $140 \dots 160 \text{ }^\circ\text{C}$. Это связано с тем, что теплота алюминия, аккумулированная изложницей, поглощается воздушной средой не так интенсивно, как при аэрозольном охлаждении. Величина колебаний температуры в точках измерения находится в пределах $20 \text{ }^\circ\text{C}$, что указывает на существенную нестабильность процесса охлаждения, которая вносит дополнительные возмущения в каждый последующий цикл литья.

Измерения температуры металла показали, что на входе литейной машины температура составляет $700 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. После точки С, когда действие водяного кристаллизатора завершается, температура поверхности заготовки при оптимальном теплообмене металла с изложницей составляет около $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и достигает величины $450 \text{ }^\circ\text{C}$ после полного завершения процесса кристаллизации в точке D.

Вычисление темпа регулярного теплового режима m проводили с использованием формулы [5]:

$$m = \frac{\ln \theta_b - \ln \theta_c}{\tau_1}, \quad (7)$$

где θ_b и θ_c – соответственно избыточная температура заготовки в точках В и С.

Для нахождения избыточной температуры заготовки использовали измеренные значения температур изложницы в соответствующих точках. Температуру металла в точке В, где начинается образование основы заготовки, принимали равной 600 ± 6 °С, а температуру в точке С брали в интервале 450...545 °С вместо реального значения 300 °С. Вызвано это тем, что усадка металла на участке АС, происходящая в изложнице под воздействием водяного кристаллизатора, компенсируется удлинением заготовки на участке CD, когда происходит рост температуры ее поверхности под воздействием выравнивания температур по сечению после завершения кристаллизации металла. Время цикла регулярного теплового режима τ_1 рассчитывали как частное от деления длины дуги ВС на скорость движения заготовки. На рис. 2 представлено семейство логарифмических характеристик для восьми циклов литья при изменении температуры отливки на выходе из колеса в интервале 450...545 °С. Расчетные значения темпа теплового режима для этого диапазона температур составили 0,037...0,012.

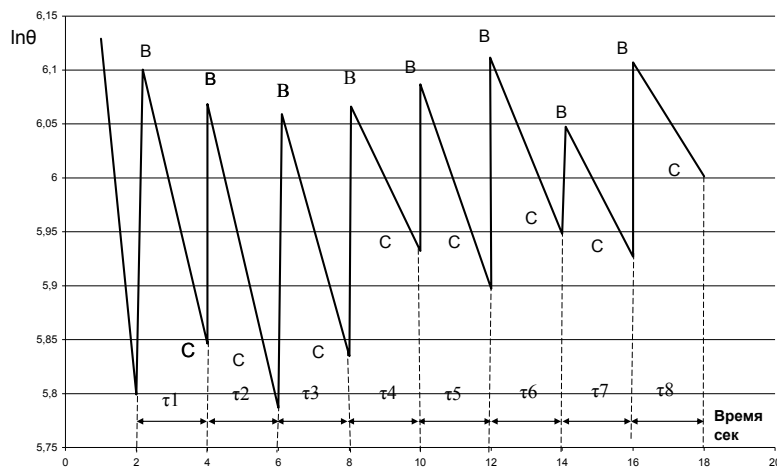


Рисунок 2 – Изменение логарифма избыточных температур в точках В и С по циклам литья

Для установления соответствия между темпом теплового режима и температурной деформацией заготовки рассчитывали ее линейное температурное удлинение на участке ВС в диапазоне температур металла на выходе литейной машины – 450... 545 °С по формуле [6]:

$$\Delta L_T = 3L_{\delta} \cdot c \cdot \Delta t_m, \quad (8)$$

где ΔL_T – линейное удлинение мерного участка заготовки при увеличении температуры металла; L_{δ} – базовая длина заготовки при ее температуре 450 °С в точке С; c – температурный коэффициент линейного расширения алюминия; Δt_m – величина температурного градиента.

По полученным данным построен график зависимости между ΔL_T и темпом регулярного режима m , рассчитанным для того же диапазона температур на выходе из литейного колеса (рис. 3). Полученный график с высокой достоверностью (корреляционное отношение составляет 0,85) аппроксимируется уравнением вида:

$$\Delta L_{\partial 1} = 0,053 \exp[-94m]. \quad (9)$$

В соответствии с этим уравнением удлинение заготовки может быть предсказано по величине темпа теплового режима, рассчитанного согласно измеренным температурам металла и изложницы в точках В и С.

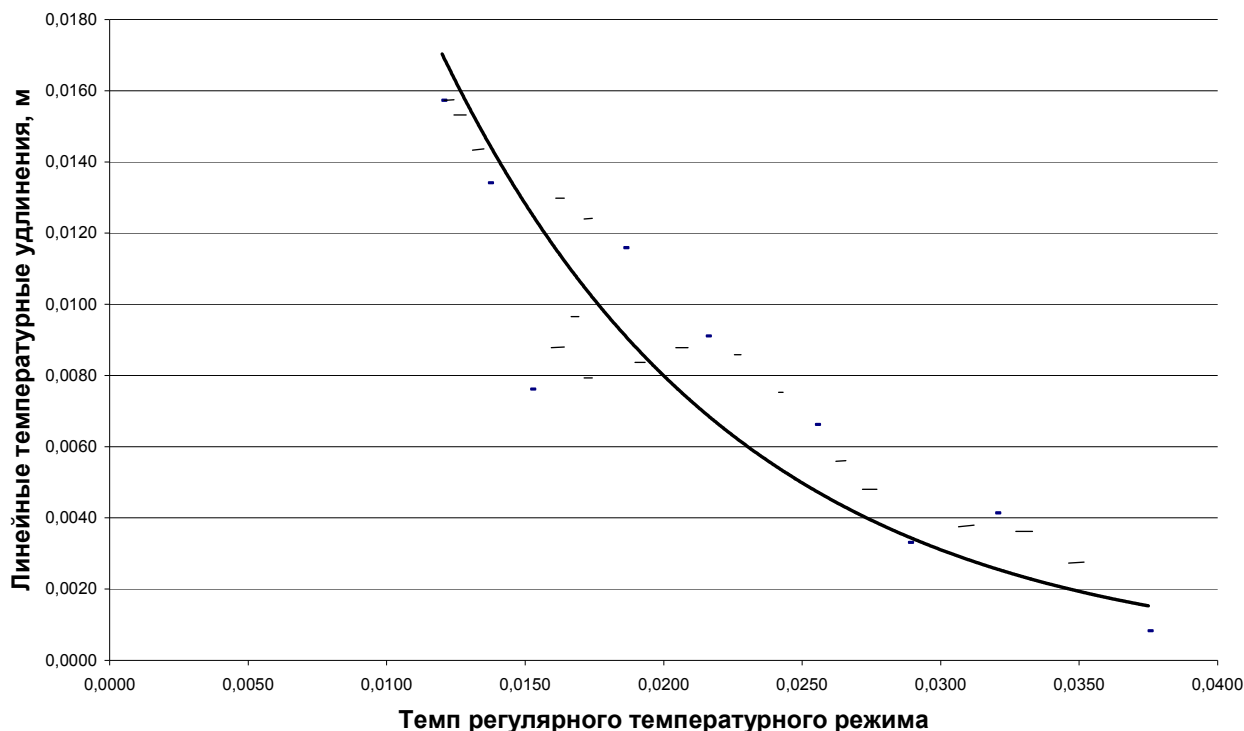


Рисунок 3 – Зависимость линейного температурного удлинения заготовки от темпа теплового режима

Заготовку длиной L_c , получаемую при непрерывном литье, можно представить в виде суммы мерных отрезков, каждый из которых образуется в результате одного цикла литья. При этом каждый отрезок суммы состоит из базового размера заготовки $L_{\bar{\theta}}$, который соответствует температуре металла на входе и выходе литейной машины, соответственно 600 и 450 °С, а также температурной деформации первого $\Delta L_{\partial 1}$ и третьего $\Delta L_{\partial 3}$ рода, образующихся вследствие нарушения теплообмена между металлом и изложницей:

$$L_c = \sum_{i=1}^n L_{\bar{\theta}} + \Delta L_{\partial 1} + \Delta L_{\partial 3}, \quad (10)$$

где L_c – длина литейной заготовки; $L_{\bar{\theta}}$ – базовая длина заготовки при температуре 450 °С; n – число циклов литья с длительностью единичного цикла, равной τ .

В связи с тем, что циклические температурные деформации третьего рода самокомпенсируются в течение цикла и не накапливаются в процессе литья, их можно не учитывать при определении длины литейной заготовки.

Выполненные расчеты показали, что за восемь циклов литья длина заготовки при темпе регулярного теплового режима, равном 0,0255, и соответствующем росту температуры слитка в точке С на 40 °С увеличивается на 0,031 м.

Для подтверждения полученных данных на линии по производству алюминиевой катанки, при постоянстве скоростей электроприводов литейной машины и прокатного стана, с использованием информационно-измерительной системы [7,8] фиксировали показания датчика пространственного положения тонарма, откалиброванного в единицах относительного удлинения заготовки (рис. 4). Как видно из рисунка, температурные деформации имеют форму последовательных

колебаний с различной амплитудой и периодичностью, равной периоду цикла литья, причем эти колебания совершаются относительно среднего значения, которое увеличивается во времени. Такой характер деформации заготовки полностью подтверждает суждения о ней на основе теории регулярного теплового режима. В конце восьмого цикла литья приращение длины заготовки составляет 0,033 м, что практически совпадает с расчетными данными (табл. 1). При сохранении смоделированных условий охлаждения металла в течение 15 минут увеличение длины заготовки, относительно базового значения, будет достигать 0,25 м, что внесет существенное возмущение в процесс управления производством катанки.

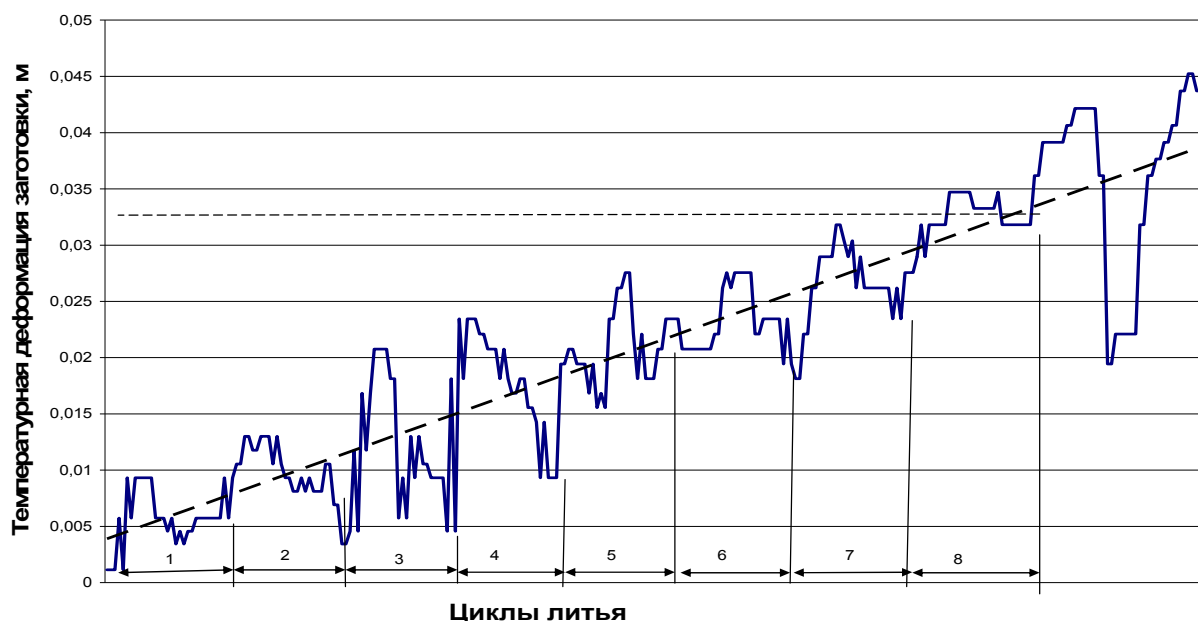


Рисунок 4 – Изменения температурных деформаций при непрерывном литье алюминия

Таблица 1 – Расчетные значения деформаций первого рода

Цикл литья	1	2	3	4	5	6	7	8
Деформации первого рода	0,0037	0,0069	0,0112	0,0145	0,0168	0,0224	0,0276	0,0312

Таким образом, проведенные исследования показали, что, зная температуру изложницы и металла в точках начала кристаллизации алюминия и выхода заготовки из литейного колеса, можно рассчитать темп регулярного температурного режима и по его величине предсказать температурную деформацию заготовки, что позволит существенно повысить качество управления производством алюминиевой катанки.

Выводы

1. При исследовании температуры алюминиевой заготовки в процессе ее формирования при литье установлено, что температура отливки на выходе из разливочного колеса изменяется в пределах 450...545 °С.
2. Существующая температурная нестабильность металла приводит к его температурным деформациям и вносит значительные возмущения в процесс прокатки алюминиевой заготовки.
3. Величина температурных деформаций определяется темпом регулярного температурного режима и может быть рассчитана до ее фактического появления.
4. Наличие информации о предстоящей деформации заготовки позволит внести упреждающие действия в процесс управления производством алюминиевой катанки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Техническая документация технологической линии по производству алюминиевой катанки. – «*Continuous Properzi S.P.A.*», 1992. – 153 с.
2. Шульга А. И. Исследование влияния условий охлаждения алюминиевой катанки на ее свойства / А. И. Шульга, С. Г. Егоров, А. В. Головина // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – Вип. 16. – С. 144-148.
3. Добаткин В. И. Слитки алюминиевых сплавов / В. И. Добаткин. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 112 с.
4. Нащекин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащекин. – М.: Высшая школа, 1989. – 346 с.
5. Болгарский А. В. Термодинамика и теплопередача / А. В. Болгарский, Г. А. Мухачев. – М.: Высшая школа, 1964. – 398 с.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982 – 145 с.
7. Таран Ю. П. Локальная информационно-измерительная система для контроля параметров технологического процесса / Ю. П. Таран, А. Н. Николаенко // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – Вип. 16. – С. 136-139.
8. Таран Ю. П. Совершенствование управления скоростными режимами работы технологической линии по производству катанки / Ю. П. Таран, А. Н. Николаенко // Металургія: наукові праці ЗДІА. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – Вип. 16. – С. 139-144.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2010 р.

Рецензент, проф. Б.П. Серета