

М 498338.
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КОРАБЛИН Александр Игоревич

УДК 669.18

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАСТРОЙКИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО
АППАРАТА МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1991

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор ДАНИЛОВ В.Л.

Официальные оппоненты - доктор технических наук
ПАНОВКО Г.Я.

кандидат технических наук
ШИНКАРЕВИЧ Ю.П.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета

Защита диссертации состоится "11" декабря 1991 г.
в 10 ч. на заседании специализированного совета "Машино-
строение" К053.15.11 при Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по
адресу: 107005 Москва 2-я Бауманская ул., д. 5.

рах, заверенные печатью, просьба

иметься в библиотеке МГТУ

ноябрь 1991 г.

П.К. ПОПОВ

апринт МГТУ им. Н.Э. Баумана
10.91г. Заказ № 869

М 498338

Актуальность темы. Широкое применение непрерывной разливки стали обусловлено рядом существенных преимуществ перед старым способом разливки в изложницы. Это, прежде всего, уменьшение себестоимости получаемого металла на 10-15%, повышение производительности труда на 15-25% в результате механизации производства, улучшение качества непрерывных слитков и структуры металла, так, например, повышается степень однородности слитка, качество поверхности, уменьшается осевая рыхлость слитка.

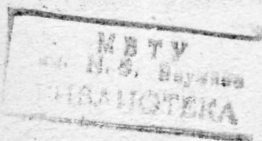
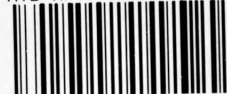
Эти основные преимущества создают предпосылки для дальнейшего развития способа непрерывной разливки стали и полной замены старого способа разливки в изложницы.

Технология непрерывной разливки интенсивно разрабатывается в течение последних десятилетий во всем мире и состоит в том, что жидкий металл непрерывно заливается в верхнюю часть водоохлаждаемой формы - кристаллизатор, постепенно затвердевает и охлаждается, проходя вдоль всей технологической оси машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Улучшение качества непрерывнолитых заготовок путем уменьшения пораженности их внутренними трещинами, является одним из главных направлений развития как конструкций машин, так и технологии непрерывного литья.

Качество формирующегося слитка зависит от комплекса теплофизических, физико-химических, механических и других явлений, определяющих его внутреннее строение. Для непрерывного литья характерно одновременное протекание процессов кристаллизации и деформирования и, как следствие, возможность образования дефектов макроструктуры в виде внутренних трещин, вызванных деформацией слитка в двухфазном состоянии. Неудачное конструктивное решение МНЛЗ или неправильный режим вытягивания и охлаждения слитка, а также плохое состояние роликовой проводки приводят к недопустимому количеству внутренних трещин в литой структуре получаемого металла.

В настоящее время имеется значительное число публикации посвященных исследованию влияния отдельных факторов на качество непрерывнолитых заготовок. Тем не менее, область применения существующих решений и математических моделей процесса непрерывной



М 498 338

разливки является весьма ограниченной. Это обусловлено как значительным разбросом имеющихся немногочисленных данных по описанию механических свойств стали в высокотемпературном интервале хрупкости, так и несовершенством расчетных схем, лежащих в основе решения задачи получения бездефектных слитков.

Цель работы - создание численных методов, позволяющих проводить комплексное исследование влияния настройки и состояния направляющего и поддерживающего роликового аппарата МНЛЗ на качество кристаллизующегося непрерывного слитка, расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) слитка при его движении вдоль технологической оси МНЛЗ и выработка критериев определения рациональных параметров настройки и контроля за состоянием направляющего аппарата МНЛЗ.

Научная новизна. Разработана новая постановка технологической задачи деформирования слитковой непрерывнолитой заготовки в направляющем аппарате МНЛЗ, включающая как изгиб оси слитка, так и выпучивание оболочки слитка под действием ферроситического давления в жидкой фазе.

Разработаны численные алгоритмы расчета НДС непрерывного слитка, основанный на явной разностной схеме Эйлера при использовании уравнения состояния нелинейно вязкоупругопластического тела. Решение контактной задачи о взаимодействии непрерывнолитой заготовки с роликовой проводкой МНЛЗ выполнено на основе метода градиентного спуска, в предположении линейного контакта между слитком и роликовыми опорами.

Разработана инженерная методика оценки возможности возникновения внутренних трещин в конечном стальном продукте при различных отклонениях элементов направляющего и поддерживающего аппарата МНЛЗ в пространстве от расчетного положения, основанная на определении допустимых отклонений роликов и их пар.

Достоверность результатов исследования вытекает из обоснованности использованных теоретических положений и математических методов и подтверждена численными экспериментами по оценке точности разработанных алгоритмов, а также сравнительным анализом расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными других авторов по целому ряду параметров характерных для процесса непрерывной разливки стали на установках радиально-криволинейного типа.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе численного моделирования разработана инженерная методика расчета влияния отклонения опор направляющего аппарата МНЛЗ, при различных сочетаниях технологических режимов разливки и конструктивных параметров машины, на качество получаемой заготовки. Это дает возможность, без детального изучения НДС непрерывного слитка, оценивать опасность различных вариантов смещений элементов роликовой системы и принимать решения об остановке процесса разливки для проведения соответствующих профилактических работ по наладке оборудования.

Результаты работы в виде математических алгоритмов и расчетных методик переданы во Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения (ВНИИМетМаш) для практического использования.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований докладывались на Всесоюзной конференции по непрерывной разливке (Свердловск, 1987 г.), на Сибирской школе-семинаре по современным проблемам механики деформируемого твердого тела (Якутск, 1990 г.), а также на научном семинаре "Прикладная теория пластичности и ползучести" в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1987, 1988 и 1990 годах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, раздел с основными результатами и выводами по работе, списка литературы. Работа изложена на 164 страницах, включая 53 рисунка и 10 таблиц. Библиография насчитывает 94 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы, содержатся краткие сведения о технологии процесса непрерывной разливки стали, сформулирована цель работы.

В первой главе выполнен анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию термомеханических процессов в кристаллизующейся заготовке при ее получении на МНЛЗ криволинейного типа. Приведена классификация дефектов непрерывного слитка, содержащаяся в работах В.М. Нисковских, С. Миоши,

К. Вюнненберга, Т. Штадлера, Р. Флендера. Эти данные показывают, что основным внутренним дефектом, резко снижающим качество конечного стального продукта, являются поперечные или гнездобразные трещины, причем основной причиной их образования следует считать выпучивание оболочки слитка в шаге поддерживающих роликов.

Вопросы, связанные с выпучиванием формирующейся корки непрерывного слитка, исследованы в работах К. Мичавы, К. Швердтфегера, А. Грилла, А. Кихары, В. Л. Данилова, А. П. Коротаевского и других авторов. Приведены экспериментальные данные по исследованию выпучивания, полученные К. Вюнненбергом на радиальной слябовой МНЛЗ, которые свидетельствуют о наличии механизма высокотемпературной ползучести при деформировании корки непрерывного слитка в шаге роликов.

При схематизации геометрии непрерывного слитка используются следующие расчетные схемы: плоские, в которых анализ НДС производится в продольном сечении, проходящем через середины широких граней заготовки, и пространственные. Проведенный анализ результатов трехмерного математического моделирования выпучивания, содержащийся в работах К. Бримаcombe, К. Окамуры, подтверждает применимость схематизации геометрии корки непрерывного слитка стержнем или полосой единичной ширины для случая разливки слябов.

Появление криволинейных МНЛЗ, требующих выпрямления заготовки при переходе технологической оси в горизонтальное положение, поставило перед исследователями новые задачи, связанные с проектированием участка распрямления непрерывного слитка.

Некоторые проблемы конструирования технологической оси криволинейных МНЛЗ и расчета НДС непрерывного слитка в зоне разгиба рассмотрены в работах С. Е. Марлинского, Д. П. Евтеева, Р. Флендера, Х. Фиджи, С. В. Зарубина. Однако существующие математические модели для анализа изгиба-разгиба описывают этот процесс, в случае деформирования широких слябов в двухфазном состоянии, весьма приблизительно, так как не учитывают эффект выпучивания оболочки заготовки, что существенно ограничивает диапазон их применения для практических расчетов.

Для анализа НДС в непрерывном слитке необходимо располагать информацией о температурном состоянии материала и, прежде всего, в области, прилегающей к фронту затвердевания. Такая информация

может быть получен расчетным путем при математическом моделировании всего комплекса термомеханических процессов, сопровождающих получение слитка.

Однако во многих случаях моделирования процесса непрерывной разливки приходится, из-за отсутствия данных по условиям кристаллизации заготовки, приближенно задавать движение фронта затвердевания и распределения температуры в слитке на основе имеющихся теоретических и экспериментальных данных. Анализ работ Ю. А. Самойловича, А. Грилла, М. Я. Бровмана, К. Бримакомбе, Л. Шмырга, К. Ясумото и других, посвященных исследованию температурного состояния и затвердевания непрерывного слитка, показал, что приближенно динамику роста толщины затвердевающей оболочки слитка, спустя 3-10 с после начала затвердевания можно описать законом квадратного корня. Профиль температуры в поперечном сечении заготовки, с достаточной точностью, аппроксимируется линейной или параболической зависимостью.

Другой самостоятельной проблемой является изучение свойств материалов при температурах непрерывной разливки и низких скоростях деформирования.

В ходе экспериментального изучения явления выпучивания оболочки слитка, а также в специальной серии опытов на растяжение, проведенной в МГТУ им. Н. Э. Баумана, было показано, что в условиях непрерывной разливки основным процессом, определяющим общее деформирование и разрушение материала, становится ползучесть.

В настоящее время большинство исследователей для описания ползучести материала заготовки используют уравнение состояния нелинейно-вязкого тела. Так для стали 20 предложены следующие зависимости

$$\dot{\epsilon} = 0,04125 \cdot \exp(-12374/T) \cdot \sigma^{4,5}, \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = 6,2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-50660/T) \cdot \sigma^{4,06}, \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = 695 \cdot \exp(-27200/T) \cdot \text{Sh}[\sigma / (2460/T)^{2,25}], \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации ползучести, 1/с; T - температура, К;
 σ - напряжение, МПа.

Для наиболее точного отражения поведения материала непрерыв-

ного слитка в высокотемпературной области необходим, наряду с ползучестью, упругих свойств материала. В связи с этим представляет интерес предложенная в НИИТЯЖМАШ УЗТМ обобщающая зависимость для модуля упругости сталей в интервале температур 10³-1700 К, определяемых статическими методами

$$E = -4,566 \cdot 10^5 + 160 \cdot T + 3,266 \cdot 10^8 / T, \text{ МПа.} \quad (4)$$

Выполненный сравнительный анализ имеющихся в литературе критериев оценки качества получаемой на МНЛЗ стали, позволил заключить, что из-за ограниченности экспериментальных данных, наиболее оправданным является использование простейших теорий накопления повреждений. Так, например, функцию накопления повреждений можно определить на основе принципа линейного суммирования повреждений следующим образом:

$$\omega(t) = \int_{t_0}^t \frac{1}{t_{разр}(\tau)} \cdot d\tau, \quad (5)$$

где t_0 - момент времени начала деформирования (для процесса непрерывной разливки, это момент затвердевания конкретного материального элемента слитка); $t_{разр}$ - время до разрушения. Функция ω изменяется от 0 до 1. Условием разрушения материала можно считать равенство $\omega = 1$.

Во второй главе разработана математическая модель совместного изгиба и выпучивания оболочки непрерывнолитого кристалла уходящего стального слэба, при его движении вдоль технологической оси МНЛЗ. Описана система нагрузок, действующая на слэб в процессе его деформирования в направляющем аппарате МНЛЗ. Разработаны алгоритмы численного анализа НДС и функции накопленной поврежденности в непрерывном слитке с учетом податливости роликовой системы машины. Дана методика расчета для частного случая изгиба - разгиба заготовки блумового сечения и полностью закристаллизовавшегося слэба, когда выпучивание отсутствует полностью или им можно пренебречь.

Задача определения НДС непрерывнолитых слитков при их разливке на МНЛЗ относится к механике растущих нелинейно вязкоупругих тел. Рассматривались только стационарные режимы работы уста-

новки непрерывной, разливки стали.

Для исследования совместного выпучивания и изгиба широких слябов вводится предположение, что в середине широких сторон заготовки НДС практически не зависит от боковых граней слитка, и, следовательно, анализ можно проводить в одной плоскости. Поэтому, в качестве расчетной схемы деформирования непрерывнолитой слябовой заготовки в направляющем аппарате МНЛЗ, использовалась схема неравномерно нагретой многоопорной движущейся полосы переменной толщины и нагруженной переменным давлением.

При расчете НДС тела с изменяющимися границами, удобнее сначала определить временные зависимости скоростей деформаций и изменения напряжений, а затем, проинтегрировав их по времени от момента затвердевания конкретного материального элемента тела, получить деформации и напряжения в этом элементе с учетом соответствующих граничных условий на подвижной и неподвижной границах.

Полная скорость деформации представляется в виде суммы скорости упругой деформации, скорости деформации ползучести и температурной составляющей скорости деформации

$$\dot{\xi}_{z(y)} = \dot{\xi}_{z(y)}^e + \dot{\xi}_{z(y)}^c + \dot{\xi}_{z(y)}^T \quad (6)$$

Принимая гипотезу плоских сечений как для всего непрерывного слитка, так и отдельно для корок, для скоростей полных деформаций имеем

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{z,1} &= \dot{\xi}_{z0} - \dot{x} \cdot x + x_1 \cdot \dot{x}_1, \\ \dot{\xi}_{z,2} &= \dot{\xi}_{z0} - \dot{x} \cdot x + x_2 \cdot \dot{x}_2, \\ \dot{\xi}_{z,3} &= \dot{\xi}_{z0} - \dot{x} \cdot x, \\ \dot{\xi}_{y,i} &= \dot{\xi}_{y0} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где индексом $i = 1, 2, 3$ обозначены следующие элементы поперечного сечения сляба: 1 - верхняя корка, 2 - нижняя корка, 3 - боковые грани заготовки; $\dot{\xi}_{z0}$, $\dot{\xi}_{y0}$ - скорость удлинения слитка в продольном и поперечном направлении и постоянная для

данного сечения; $\dot{\mathcal{X}}$ - скорость изменения кривизны оси слитка; $\dot{\mathcal{X}}_1, \dot{\mathcal{X}}_2$ - скорость изменения кривизны корки слэба, обусловленная выплыванием от ферростатического давления в жидкой фазе; x, x_1 и x_2 - расстояние до нейтральной линии всего сечения и отдельных корок соответственно в локальной системе координат, связанной с поперечным сечением.

Для определения $\dot{\mathcal{E}}_{z0}, \dot{\mathcal{X}}, \dot{\mathcal{X}}_{1,2}$, входящих в (7) использовались интегральные уравнения равновесия, записанные как для всего сечения слитка, так и для изгиба корок под действием ферростатического давления в жидкой фазе

$$\sum_{i=1}^3 \int_{S_i} \dot{\mathcal{E}}_{z,i} \cdot x \cdot dS_i = \dot{M}, \quad \sum_{i=1}^3 \int_{S_i} \dot{\mathcal{E}}_{z,i} \cdot dS_i = \dot{P}_z, \quad (8)$$

$$\int_0^h \dot{\mathcal{E}}_{z,i,2} \cdot x_{i,2} \cdot dx_{i,2} = \dot{M}_{i,2},$$

где $\dot{\mathcal{E}}_{z,i}$ - скорость изменения напряжения; S_1, S_2 и S_3 - площадь корок и боковых граней в поперечном сечении соответственно; h - толщина корок слэба; $\dot{M}$ - скорость изменения момента для всего сечения слитка под действием силы веса и реакций роликовых опор; $\dot{P}_z$ - скорость изменения или вытягивания заготовки; $\dot{M}_{i,2}$ - скорость изменения изгибающих моментов в корках, включающая ферростатическое давление в жидкой фазе.

Добавив к выведенным соотношениям (5)-(6) уравнение состояния, граничные и начальные условия, получим полную систему уравнений и условий, определяющих постановку начально-краевой задачи о нахождении напряженного состояния нелинейно вязкоупругого растущего тела.

Граничные условия накладывались на перемещения в точках контакта слитка с роликовой проводкой, причем учитывались смещения поддерживающих опор от действия реакций со стороны непрерывной заготовки.

Для вновь приращиваемого на жидкой фазы элемента принимались нулевые начальные условия

$$\mathcal{E}_{z(y),i} = 0, \quad \mathcal{E}_{z(y),i} = 0 \quad \text{при } t = \tau^*, \quad (9)$$

где τ^* - момент зарождения элемента, совпадающий с моментом его присоединения к основному телу; $\epsilon_{2(y)}$ - деформация.

Поставленная начально-краевая задача решалась с использованием явной пошагово-временной схемы Эйлера.

Определение усилий взаимодействия непрерывного слитка с роликов с проводкой МНДЗ осуществлялось методом градиентного спуска. путем удовлетворения граничным условиям в точках контакта. Необходимо отметить что задачи расчета НДС непрерывнолитой заготовки и контактных усилий взаимосвязаны и могут быть проанализированы только совместно.

В третьей главе дано сопоставление результатов математического моделирования с имеющимися в литературе экспериментальными данными по усилиям взаимодействия поддерживающих роликов со слитком. величине и профилю выпученной оболочки слитка в шаге роликов и по определению условий возникновения внутренних трещин в непрерывнолитых заготовках.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие основные выводы:

- предложенная математическая модель деформирования широких слэбов позволяет вычислить величину выпучивания и профиль деформированной оболочки слитка в шаге роликов, удовлетворительно совпадающие с опытными измерениями; модель также отражает качественные эффекты, например такие, как смещение максимума выпученной корки в направлении движения заготовки, отрицательное выпучивание, зарегистрированное в некоторых экспериментальных измерениях; влияние распределения температуры по поперечному сечению и скорости движения слитка на величину выпучивания;
- выпучивание корки непрерывнолитого широкого слэба под действием ферростатического давления является основным фактором, ведущим к трещинообразованию;
- получены численными методами величин усилий взаимодействия направляющего аппарата МНДЗ с заготовкой, близких к экспериментально измеренным значениям, возможно только в случае учета реальной податливости роликовых опор;
- наилучшее совпадение результатов математического моделирования с экспериментальными данными достигается при использовании в

расчетах уравнения состояния (2);

-использование в численных расчетах параметра накопленной поврежденности (5) позволяет в условиях высоких температурной нагрузки получить удовлетворительные результаты по определению области наиболее вероятного разрушения непрерывного слитка и по определению условий возникновения внутренних трещин в конечном стальном продукте.

В четвертой главе проведено численное исследование влияния на качество получаемого стального проката состояния и точности настройки направляющего аппарата МНЛЗ.

Все возможные виды отклонений роликовых опор в направлении от расчетного положения можно свести к двум основным: изменению раствора роликов и смещению пары роликов, без изменения величины раствора, от технологической оси МНЛЗ.

Увеличение раствора роликов направляющего аппарата МНЛЗ может происходить вследствие износа роликов, погрешности их настройки и из-за теплового прогиба роликов. Также возможно и колебательное изменение раствора, например, при вращении ролика с изогнутой осью или при изменениях скорости движения непрерывной заготовки. В последнем случае колебания поддерживающих роликов связаны с изменением температурного поля в ролике при переходе от одного стационарного режима работы к другому.

Рассмотрено влияние изменения раствора поддерживающих роликов в одном из сечений по оси МНЛЗ, на НДС, а, следовательно, и на качество непрерывного слитка.

Введено понятие допустимого отклонения δ , при котором максимальная величина функции накопленной поврежденности Σ_{max} в поперечном сечении непрерывной заготовки достигает единицы.

Величина допустимого отклонения δ определяется значениями технологических и конструктивных параметров МНЛЗ. К числу основных параметров, воздействие которых на δ необходимо учитывать, следует отнести: скорость движения непрерывной заготовки, толщину корки слитка, величину ферростатического давления в жидкой фазе, температуру на поверхности слитка и шаг роликовых опор. Считая влияние исследуемых параметров на δ линейно независимыми, допустимое отклонение было представлено в виде:

$$\delta = C \cdot K_v \cdot K_h \cdot K_y \cdot K_T \cdot K_s ,$$

(10)

где C - константа, определяемая численно и равная 2,0мм и -2,7мм, что соответствует положительному и отрицательному отклонению опор; K_v , K_h , K_Y , K_T и K_S - безразмерные коэффициенты влияния скорости движения непрерывного слитка, толщины корки заготовки в исследуемом сечении, координаты отклоняемого ролика по вертикали в глобальной системе координат, температуры на поверхности слитка под смещаемой опорой и шага поддерживающих роликов на допустимое отклонение δ . Зависимости для коэффициентов, входящих в (10), были получены методом математического моделирования процесса деформирования непрерывнолитого слитка в направляющем аппарате МНЛЗ и представлены на рис. 1-3, причем кривые для K_v и K_Y достаточно точно описываются степенной функцией:

$$K_v^+ = (V/V_0)^{0,35}, \quad K_v^- = (V/V_0)^{0,42}, \quad (11)$$

$$K_Y^+ = 1,06 \cdot (Y/Y_0)^{-0,34}, \quad K_Y^- = 1,09 \cdot (Y/Y_0)^{-0,57}, \quad (12)$$

где индекс "+" соответствует случаю увеличения раствора поддерживающих роликов, "-" - уменьшению; Y - координата смещаемого ролика, отсчитываемая по вертикали от мениска металла в кристаллизаторе; V - скорость движения слитка.

За базовые размерные параметры приняты следующие значения: $V_0 = 1\text{м/мин}$; $h_0 = 43,1\text{мм}$; $Y_0 = 6166\text{мм}$; $T_0 = 1166\text{ К}$; $S_0 = 371\text{мм}$; $B_0 = 200\text{мм}$.

Для пары роликов вводится допустимое отклонение δ_n аналогично тому, как это было сделано для изменения раствора роликов

$$\delta_n = C_n \cdot K_{B,n} \cdot K_{Y,n} \cdot K_{h,n} \cdot K_{Y,n} \cdot K_{S,n} \cdot K_{T,n}, \quad (13)$$

где C_n - константа равная 0,31мм; K_B - безразмерный коэффициент влияния высоты слитка на допустимое отклонение пары роликов δ_n . Значения коэффициентов, входящих в (13), в зависимости от соответствующего параметра процесса непрерывной разливки представлены на рис. 4-5.

Исследовано изменение значений δ , δ_n на радиальном участке конкретной МНЛЗ в зависимости от номера опоры. Результаты проведенного численного анализа показали, что с ростом порядкового номера поддерживающего ролика происходит уменьшение допу-

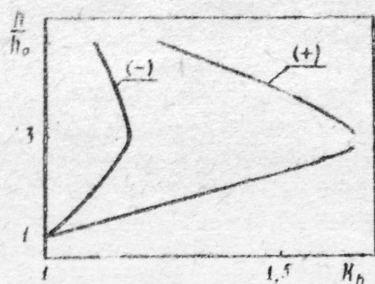


Рис. 1

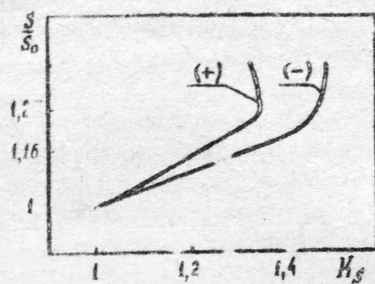


Рис. 2

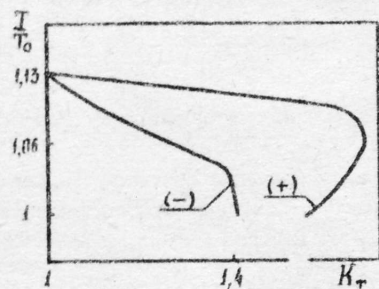


Рис. 3

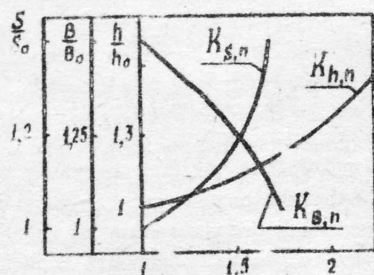


Рис. 4

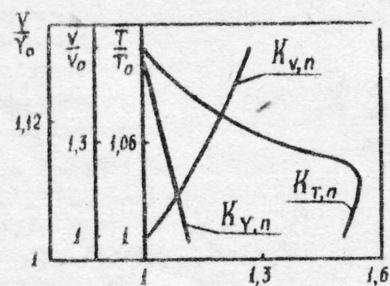


Рис. 5

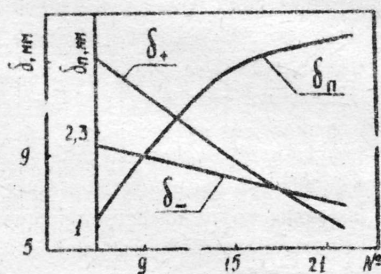


Рис. 6

стимого отклонения δ (рис. 6) и, наоборот, рост δ_n . Таким образом, наибольшую опасность представляет смещение пар роликов направляющего аппарата радиально-криволинейной МНЛЗ волни кристаллизатора и увеличение раствора роликов в конце жидкой лунки.

В реальном процессе непрерывной разливки стали естественно возможно отклонение роликовых опор сразу в нескольких поперечных сечениях. И даже, если смещения всех роликов меньше допустимых, то суммарный вклад от дополнительного многократного деформирования может привести к образованию внутренних трещин в конечном стальном продукте.

Современные методы контроля за состоянием системы поддерживающих роликов МНЛЗ позволяют получить точную информацию о всех видах отклонений элементов направляющего аппарата от расчетного положения в процессе эксплуатации машины. Для принятия, на основе этой информации, решения об остановке процесса для проведения профилактических работ по настройке или замене части элементов роликовой системы МНЛЗ необходимо располагать определенным критерием.

Обычно, в качестве подобных критериев, используются жесткие ограничения на величину допустимого износа роликов (менее 2-х мм), на изменение раствора роликов (не более ± 1 мм) и т. д.

При разработке более общего критерия учтен тот факт, что на НДС непрерывного слитка, а, следовательно, и на возможность образования внутренних трещин, влияет не величина смещения роликовой опоры как таковая, а результирующее отклонение поперечного сечения самой непрерывнолитой заготовки. Это отклонение может быть получено двумя способами: расчетным и путем измерений в процессе работы установки непрерывной разливки стали. Также учтено и то, что важны не только сами величины смещений роликов, но и их взаимное расположение в пространстве.

Для отдельного i -го ролика введен параметр K_i , определяемый как сумма отклонений от расчетного положения i -го ролика и ближайших к нему роликовых опор с определенными весовыми коэффициентами. Проведенные численные исследования показали, что для корректного определения K_i достаточно учитывать смещения двух опор, как слева, так и справа от i -го ролика.

Обобщая результаты математического моделирования процесса непрерывной разливки при различных вариантах отклонений элементов

направляющего аппарата МНЛЗ, предложена следующая зависимость для расчета параметра $K_{L,j}$

$$K_{L,j} = \max \left\{ \left| \frac{\Delta i}{\delta_{i,j}} - C_1 \cdot \left(\frac{\gamma_{i+1}}{|\delta_{i+1}|} - \frac{\Delta_{i+1}}{|\delta_{i+1}|} \right) + C_2 \cdot \left(\frac{\Delta_{i+2}}{|\delta_{i+2}|} + \frac{\Delta_{i-2}}{|\delta_{i-2}|} \right) \right|, \left| \frac{\Delta i}{\delta_{i,j}} \right| \right\}_j, \quad (14)$$

где Δ - отклонение элемента поддерживающей системы МНЛЗ измеренное динамическим методом; δ - допустимое отклонение соответствующего элемента; j - принимает значения 1, 2 и 3, что соответствует верхнему, нижнему ряду роликов и парам роликовых опор. C_1, C_2 - константы равные 0,8 и 0,4 для случая $j = 1, 2$ и 0,9 и 0,45 для случая $j = 3$.

Достижение параметром $K_{L,j}$ значений близких или равных единице указывает на необходимость настройки или замены i -го поддерживаемого ролика или i -ой пары роликов.

Для приближенного учета взаимного влияния на ТЭС непрерывного слитка одновременного смещения i -ой пары роликов от расчетного положения и изменения раствора поддерживающих роликов в i -ом и двух соседних сечениях введен дополнительный параметр $K_{L,3}^*$

$$K_{L,3}^* = \max \left\{ \begin{aligned} & \left| \frac{\Delta_{i,3}}{\delta_{i,3}} + \left(\frac{|\Delta i - \Delta|}{2 \cdot \delta} \right)_{i,1} + \left(\frac{|\Delta i + \Delta|}{2 \cdot \delta} \right)_{i-1,1} + \left(\frac{|\Delta i + \Delta|}{2 \cdot \delta} \right)_{i+1,1} \right|, \\ & \left| \frac{\Delta_{i,3}}{\delta_{i,3}} + \left(\frac{|\Delta i - \Delta|}{4 \cdot \delta} \right)_{i-1,2} + \left(\frac{|\Delta i - \Delta|}{4 \cdot \delta} \right)_{i+1,2} \right|, \quad \Delta_{i,3} \geq 0. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Предложенная методика, основанная на расчете параметров $K_{L,j}$ и $K_{L,3}^*$, позволяет без численного анализа НДС в непрерывнолитом стальном слитке эффективно оценивать состояние направляющего и поддерживающего аппарата конкретных действующих МНЛЗ, причем, по ряду значений параметров можно определить положение наиболее неблагоприятного поперечного сечения слитка вдоль технологической оси установки непрерывного литья.

1. Разработана математическая модель и численный алгоритм расчета ГТС непрерывного слитка в процессе его деформирования в направляющем аппарате МНЛЗ криволинейного типа, основанная на явной разностной схеме Эйлера.

1.1. Для описания свойств стали при температурах характерных для процесса непрерывной разливки использована нелинейно вязкоупругопластическая модель поведения материала.

1.2. Разработанная математическая модель деформирования широких слабов включает как изгиб всей непрерывнолитой заготовки относительно ее оси симметрии, так и вынужденные обескорки слитка в шаге поддерживающих роликов под действием ферростатического давления в жидкой фазе, причем, учтены все основные воздействия на кристаллизующийся непрерывный слиток: реакции со стороны роликовой системы МНЛЗ, усилие вытягивания, сила собственного веса слитка, градиент температуры по длине и высоте заготовки.

1.3. Дано описание математической модели изгиба/разгиба олюма и полностью закристаллизовавшегося слитка в направляющем аппарате установки непрерывного литья.

2. Выполнен сравнительный анализ расчетных результатов с экспериментальными данными. Получено хорошее качественное и количественное совпадение этих результатов, что позволяет сделать вывод о допустимости принятых гипотез, эффективности и точности разработанных алгоритмов и возможности использования выбранного критерия разрушения для оценки пораженности непрерывного сталеного слитка внутренними трещинами.

3. Разработан пакет программ на алгоритмическом языке PASCAL, позволяющий реализовать разработанные расчетные методики на ЭВМ типа IBM AT.

4. Изучено влияние отклонения пары роликов от технологической оси МНЛЗ, изменения раствора роликов и различных комбинаций этих отклонений на НДС слитка. Методом математического эксперимента установлены и проанализированы наиболее опасные варианты одновременно о смещения нескольких элементов роликовой системы.

4.1. Выведены аналитические зависимости для расчета допустимого отклонения пары роликов и изменения раствора роликов, как функции от конструктивных и технологических параметров процесса

непрерывной разливки стали.

4.2. Разработана расчетная методика, позволяющая оценивать состояние направляющего и поддерживающего аппарата МНЛЗ и влияние отклонений опор в пространстве от расчетного положения, на качество непрерывного слитка непосредственно в процессе его получения на установках криволинейного типа.

4.3. Предложенные инженерные методы расчета дают возможность, без детального изучения НДС слитка, проанализировать влияние на качество конечного стального продукта различных вариантов отклонений направляющего аппарата МНЛЗ, возникающих в ходе эксплуатации установки, и принять решение об остановке процесса разливки и проведения соответствующих профилактических работ по наладке оборудования.

5. Результаты работы в виде математических алгоритмов и расчетных методик переданы для практического использования в ЕНИИМетМаш.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Данилов В. Л., Кораблин А. И. Анализ влияния отклонений в геометрии машины непрерывной разливки заготовок на качество получаемых стальных слабов // Конструирование, расчет и исследование МНЛЗ криволинейного типа. - Свердловск, 1989. - С. 66-85.
2. Данилов В. Л., Кораблин А. И. Расчет допустимых отклонений роликовой проводки машины непрерывного литья заготовок от технологической оси // ИВУЗ. Машиностроение. - 1989. - №9. - С. 88-92.
3. Данилов В. Л., Кораблин А. И. Математическая модель деформирования непрерывнолитых стальных слабов // ИВУЗ. Машиностроение. - 1989. - №12. - С. 142-145.
4. Данилов В. Л., Кораблин А. И. Математическая модель деформирования непрерывного слитка при контакте с направляющим аппаратом МНЛЗ // Сибирская школа по современным проблемам механики деформируемого твердого тела: Тезисы докладов. - Якутск, 1990. - С. 54.
5. Разработка методов расчета рациональных параметров настройки роликовой проводки слабовых МНЛЗ: Отчет по теме К051286А / МПТУ; Рук. темы В. Л. Данилов; №ГРО1830015273; Инв. №047604. - М., 1988. - 73с.