

М 449039
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

— * —
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЗАРУБИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 539.376

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНОМ СЛИТКЕ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1986

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

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Данилов В.Л.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор ГУИ Г.Я.
кандидат технических наук,
доцент ГАЙНОВ В.И.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета

Защита диссертации состоится "19" марта 1987 г.
в 14⁰⁰ ч. на заседании специализированного совета Д 053.15.08
при Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005 Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ

_____ 1987 г.

В.В. ДУБИНИН

М449039

им. Н.Э. Баумана.
в № 104

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. На современном этапе развития производства стали процесс непрерывного литья благодаря его технико-экономическим преимуществам утвердился как наиболее рациональный способ получения заготовок для проката. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года поставлена задача по увеличению к 1990 году разливки стали непрерывным способом: менее чем в 2 раза, созданию и освоению высокопроизводительных машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

За последние 30 лет в СССР и за рубежом разработаны и созданы несколько типов МНЛЗ, которые, в основном, несмотря на различия в конструкции работают по одной и той же принципиальной схеме. Затвердевание слитка начинается в кристаллизаторе, куда подается жидкий металл. Слиток с еще жидкой сердцевинкой непрерывно вытягивается из кристаллизатора в зону вторичного охлаждения. При вертикальном расположении кристаллизатора слиток (иногда неполностью затвердевший) переводится в горизонтальное положение, где после окончательного затвердевания разрезается на заготовки. В результате для непрерывного литья характерно одновременное протекание процессов деформирования и кристаллизации и, как следствие, возможность образования дефектов макроструктуры в виде внутренних трещин, вызванных деформацией металла в двухфазном состоянии. Промышленный опыт показывает, что неудачное конструктивное решение МНЛЗ или неправильный режим охлаждения слитка приводят к недопустимому количеству дефектов в литой структуре получаемого металла.

Ряд конструктивных решений позволяют частично исключить деформирование формирующегося слитка. Так, применение приводных роликов по всей длине МНЛЗ практически исключает деформацию затвердевшей оболочки слитка под действием силы вытягивания и значительно снижает ее обжатие. Выпучивание оболочки слитка от ферростатического давления можно свести до минимума правильным расположением поддерживающих устройств.

Иначе обстоит дело с температурными деформациями, которые компенсировать в процессе разливки практически невозможно. То же самое можно сказать и про выпрямление слитка, что технологи-

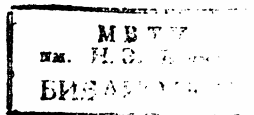
I

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1449039

Зарубин С.В. Разработка ра



чески необходимо в машинах с изогнутой осью. В этих случаях необходимо знать, отразится ли деформирование слитка на качестве непрерывнолитых заготовок. Успешное решение поставленного вопроса возможно только при сочетании исследования условий образования внутренних трещин и создания методов расчета, позволяющих проводить оценку опасности возникновения трещин при различных технологических режимах охлаждения заготовок и конструктивных исполнениях МНЛЗ.

Цель исследования. В силу сложности термомеханических процессов и взаимообусловленности действующих факторов для установления связи качества получаемого металла с конструктивными и технологическими параметрами МНЛЗ и определения наиболее рациональных параметров машины и режимов ее работы необходимо комплексное исследование, связанное с созданием модели поведения непрерывнолитого материала в широком диапазоне температур и напряжений, разработкой методов расчета температурного и напряженно-деформированного состояний затвердевающего слитка и с анализом на основе этой информации закономерностей процесса накопления повреждений в материале.

Научная новизна. Получены результаты экспериментального исследования ползучести и разрушения непрерывнолитой стали 20 при различных условиях температурного и силового нагружений. Проведено теоретическое описание экспериментальных данных, позволяющее при математическом моделировании термомеханических процессов в непрерывном слитке получить достоверную информацию о поведении его материала в процессе разливки.

Разработана методика численного решения задачи теплопроводности для затвердевающего непрерывного слитка, основанная на комбинации явной и неявной разностных схем.

Разработана методика оценки опасности возникновения внутренних трещин в непрерывном слитке в процессе разливки, основанная на расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) слитка с использованием метода граничных элементов в предположении о нелинейно-термовязкоупругом поведении материала и на концепции непрерывного накопления повреждений.

Достоверность результатов исследования вытекает из обоснованности использованных теоретических положений и математичес-

ких методов и подтверждена численными экспериментами по оценке сходимости и точности разработанных алгоритмов, а также сравнительным анализом расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными других авторов по образованию трещин в непрерывных слитках.

Практическая ценность работы состоит в том, что на основе разработанных алгоритмов составлены ЭВМ-программы для численного исследования влияния различных сочетаний технологических режимов разливки и конструктивных параметров МНЛЗ различного типа на качество получаемых заготовок. Результаты такого исследования позволяют при проектировании МНЛЗ выбрать наиболее рациональную с точки зрения качества заготовок и производительности МНЛЗ комбинацию этих параметров и режимов. Результаты работы в виде расчетных методик и ЭВМ-программ переданы в НИО ННТИМТМАШ для практического использования.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались на УШ Всесоюзной конференции по прочности и пластичности (Пермь, 1983), IX научно-технической конференции по проблемам стального слитка "Усовершенствование процессов разливки и кристаллизации стали" (Киев, 1984), II Всесоюзной конференции "Ползучесть в конструкциях" (Новосибирск, 1984), III Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин (Жданов, 1985), Всесоюзной школе-семинаре "Метод конечных элементов в механике деформируемых тел" (Запорожье, 1985), Всесоюзном семинаре "Технологические задачи ползучести и сверхпластичности" (Новосибирск, 1986), а также на научном семинаре "Прикладная теория пластичности и ползучести" в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1984, 1985 и 1986 годах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, раздела с основными результатами и выводами по работе, списка литературы из 166 наименований, приложения и содержит 131 страницу машинописного текста и 57 рисунков. В приложении приведены документы о практическом использовании результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы, содержатся краткие сведения о технологическом процессе непрерывной разливки, рассмотрены основные проблемы качества непрерывнолитых заготовок, сформулирована цель работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных исследованию термомеханических процессов в непрерывном слитке. Рассмотрены вопросы, связанные с условиями возникновения внутренних трещин в слитках и описанием механических свойств непрерывнолитого материала, а также - различные подходы к определению термонапряженного состояния слитка. В частности, обсуждение механизма возникновения внутренних трещин в слитках и отливках, а также количественное описание процесса трещинообразования при непрерывном литье приведено в работах А.А.Бочвара, Б.И.Медовара, И.И.Новикова, Н.Л.Лапотышкина, А.В.Лейтеса, В.Л.Колмогорова, В.А.Чичигина, Д.П.Евтеева, *H.Fujii*, *K.Narita*, *T.Mori* и др.

Для уточнения условий трещинообразования необходимо располагать информацией о температурном и напряженно-деформированном состоянии прежде всего в области, прилегающей к фронту затвердевания. Такая информация может быть получена расчетным путем при математическом моделировании процессов затвердевания и деформирования слитка. Этим вопросам посвящены работы Д.А.Самойловича, В.Т.Борисова, В.А.Журавлева, Е.М.Китаева, М.Я.Бровмана, Л.М.Мурадяна, В.Л.Данилова, И.Н.Шифрина, *R.Siegel*, *J.D.Kristiansson*, *K.Sorimachi*, *A.Grill*, *J.R.Williams*, *J.K.Briacombe*, *K.Kinoshita* и др.

Выполненный анализ литературных источников позволил заключить, что несмотря на значительное число публикаций проблема нарушения сплошности слитка (трещинообразования) до сих пор остается нерешенной. Это объясняется недостаточной изученностью термомеханических свойств литого металла в области повышенных температур, а также чрезвычайно сложной картиной термонапряженного состояния слитка в процессе непрерывного литья.

Отличительной особенностью кристаллизующихся металлических сплавов является наличие в них слоя, переходного от жидкого состояния к твердому. Твердо-жидкая область этого слоя, состоящая

из сформировавшегося кристаллического каркаса с жидкими прослойками, способна воспринимать нагрузку и испытывать деформацию. Однако деформационная способность этого слоя низка и в процессе кристаллизации возможно возникновение хрупких межкристаллитных разрушений. Использование в качестве критериев разрушения таких механических характеристик, как предельная деформация в высокотемпературном интервале хрупкости и, в особенности, предела прочности при растяжении является ненадежным, так как результаты экспериментов свидетельствуют о большом их разбросе и зависимости от условий испытания. Это не случайно, поскольку при температурах, близких к температуре плавления, существенное влияние на результаты любого механического испытания оказывает ползучесть. Как показали исследования М.Я.Бровмана, Ю.И.Бойцова, В.Л.Данилова и др., именно процесс ползучести является основным фактором, определяющим общее деформирование и разрушение материала непрерывного слитка. Поэтому перспективным является предложение Н.Н.Малинина, В.Л.Данилова и некоторых других авторов описывать процесс зарождения внутренних трещин в слитках феноменологически введением функции накопления повреждений.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования и теоретического описания ползучести и длительной прочности непрерывнолитого материала. Непосредственными результатами экспериментов являлись измерения накопленной деформации ползучести ϵ^c в фиксированные моменты времени t при неизменных в опыте значениях температуры T и растягивающего напряжения σ . Кроме того, в опытах фиксировалось время $t_{разр}$ до разрушения образцов. Эксперименты проводились на образцах, вырезанных из непрерывнолитых заготовок стали 20, в диапазоне температур 1123...1573 К и напряжений 5,5...28,0 МПа.

Результаты опытов на ползучесть проанализированы с точки зрения возможной формулировки уравнений состояния, позволяющих с определенной степенью точности описать ползучесть при переменных температурах и напряжениях при расчете деформирования слитка. Использован один из вариантов теории ползучести с анизотропным упрочнением:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \sigma'_{ij}, \quad s_{ij} = s_{ij}^0 + s'_{ij}, \quad (1)$$

$$\epsilon^c_{ij} = \frac{3}{2} \frac{s_{ij}^0}{\sigma_e^0} A_c \exp\left(-\frac{D}{T}\right) sh \frac{\sigma_e}{B(T)}, \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}'_{ij} = \frac{2}{3} E'(T) \epsilon^c_{ij} - \frac{\dot{\epsilon}'_{ij}}{G'_e} A'_c \exp\left(-\frac{D'}{T}\right) \sinh \frac{G'_e}{B(T)}, \quad (3)$$

где обозначено: G'_{ij} , G^0_{ij} и G'_{ij} - полные, активные и добавочные напряжения соответственно; $\dot{\epsilon}'_{ij}$, $\dot{\epsilon}^0_{ij}$ и $\dot{\epsilon}'_{ij}$ - компоненты скоростей полных, активных и добавочных напряжений соответственно; G^0_e и G'_e - интенсивности активных и добавочных напряжений. На рис.1 показано сравнение некоторых кривых ползучести, рассчитанных по уравнениям (1)-(3) (сплошная линия - 1253 К, штриховая - 1423 К, штрих-пунктирные - 1573 К), с экспериментальными данными. Из проведенного сравнения расчетных данных с экспериментами при нестационарных режимах нагружения (в частности, при ступенчатом изменении нагрузки и изменении температурного режима в процессе испытания, при испытаниях с выдержкой образца в разгруженном состоянии, растяжении образца с различными постоянными скоростями деформирования) можно заключить, что уравнения (1)-(3) удовлетворительно описывают основные особенности неупругого деформирования непрерывной стали в диапазоне температур формирования слитка.

При экспериментальном исследовании ползучести стали 20 обнаружено существенное различие в характеристиках ползучести для образцов, вырезанных из различных структурных зон непрерывного слитка. Показана возможность отражения этого различия при теоретическом описании деформирования материала в рамках используемого варианта теории ползучести введением в уравнения (2), (3) лишь одного дополнительного параметра, зависящего от местонахождения зоны по отношению к поверхности слитка.

В качестве исходной информации о разрушении стали 20 использованы кривые длительной прочности, связывающие σ с $t_{разр}$. Учитывая, что экспериментальные данные при температурах предплавления весьма ограничены, оправданным является применение простейших теорий длительной прочности. Процесс трещинообразования описан путем введения функции накопления повреждений в точке тела, которая определена на основе принципа линейного суммирования повреждений,

$$\omega(t) = \int_{t_0}^t \frac{d\tau}{t_{разр}(\tau)}, \quad (4)$$

где t_0 - момент времени начала деформирования (для конкретного элементарного объема литого материала - момент затвердевания). Функция ω изменяется от 0 до 1, причем $\omega = 1$ является условием разрушения. Для описания экспериментальных данных использовано выражение

$$t_{\text{разр}} \dot{\epsilon}_{\min}^c = \epsilon_p, \quad (5)$$

где $\dot{\epsilon}_{\min}^c = \dot{\epsilon}_{\min}^c(\sigma, T)$ - минимальная скорость деформации ползучести для постоянных σ и T , $\epsilon_p = \epsilon_p(\sigma, T)$ - параметр, имеющий смысл деформации. Эксперименты по разрушению стали 20, проведенные в диапазоне температур 1173...1573 К для различных структурных зон слитка (рис.2), показали, что ϵ_p в этом диапазоне можно принять не зависящим от σ и T и равным 0,15.

При температурах более 1600 К деформационная способность стали резко падает, причем ϵ_p постепенно снижается до 0,002 и по данным *H. Fujii, T. Ohashi* и др. зависит от скорости деформирования, увеличиваясь при ее уменьшении. Эту особенность деформирования металлических сплавов в окрестности температуры солидуса, видимо, можно объяснить наличием между формирующимися кристаллитами жидких прослоек металла и легкоплавких эвтектик примесей типа серы и фосфора, что, с одной стороны, приводит к ослаблению межзеренных границ, а с другой, - к возможности "залечивания" дефектов за счет заполнения пустот жидкой фазой с последующим ее затвердеванием. После обработки известных экспериментальных данных вид функции $\epsilon_p(\sigma, T)$ конкретизирован с учетом указанных особенностей. Сравнение экспериментальных данных И.И.Новикова по разрушению алюминиевых сплавов в двухфазном состоянии с результатами расчетов по уравнениям (4) и (5) при различных программах нагружения, показало, что эти уравнения позволяют с удовлетворительной точностью описать разрушение кристаллизующихся сплавов.

Разрушение металла в процессе непрерывной разливки носит чисто хрупкий характер, причем преимущественное расположение внутренних трещин перпендикулярно оси действия растягивающего напряжения. Поэтому при расчетах в случае сложного напряженного состояния в качестве эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ принято максимальное растягивающее напряжение σ_{max} , а уравнение (5) фактически использовано в качестве уравнения длительной проч-

ности, в котором конкретизация функций $\xi_{\min}^c(\zeta_{\text{эф}}, T)$ и $\epsilon_p(\zeta_{\text{эф}}, T)$ проведена по результатам опытов на одноосное растяжение.

В третьей главе приведены постановка и методика численного решения задачи теплопроводности для затвердевающего непрерывного слитка. При затвердевании сплавов, в отличие от чистых металлов, имеется температурная зона, в которой возможно равновесие между твердой и жидкой фазами. Существование фронта кристаллизации слитка в виде пространственно распределенной двухфазной зоны учтено заданием в дифференциальном уравнении нестационарной теплопроводности зависимости эффективной удельной теплоемкости сплава от температуры

$$C_{\text{эф}}(T) = C_S \Psi + C_L(1 - \Psi) - q_{\text{кр}} d\Psi/dT, \quad (6)$$

где C_S и C_L - теплоемкости твердой и жидкой фаз соответственно; Ψ - доля твердой фазы в некотором элементарном объеме материала, зависимость которой от температуры определялась из равновесной диаграммы состояния данного сплава; $q_{\text{кр}}$ - удельная теплота кристаллизации.

Граничные условия, используемые при решении задачи, задавались с учетом теплообмена конвекцией и излучением на поверхности слитка. Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется типом и интенсивностью охлаждения заготовки.

Задача теплопроводности решена в двумерной постановке. Как показали расчеты Н.И.Никитенко и А.Н.Черепанова, при применяемых в МНЛЗ скоростях вытягивания стальных слитков отношение тепловых потоков вдоль осевой координаты и в направлении нормали к боковой поверхности не превышает 1 %. Это позволяет исследовать кинетику процесса затвердевания в отдельном движущемся поперечном сечении слитка от момента начала затвердевания в кристаллизаторе до момента выхода этого сечения из МНЛЗ.

Методика численного решения задачи основана на использовании явной и неявной конечноразностных схем. Во всех узлах сравнительно крупной сетки, непосредственно не примыкающих к двухфазной зоне, использована явная схема. Поскольку при использовании только крупной сетки не удастся обеспечить требуемую точность решения задачи, двухфазная зона и ее окрестности покрыты более мелкой сеткой. Чтобы избежать ограничений по устойчивости счета, характерных для явной схемы, в узлах мелкой сетки исполь-

зована абсолютно устойчивая неявная схема. В результате на каждом временном интервале на первом этапе по условиям в начале интервала определяется конфигурация двухфазной области и мелкой сетки, а на последующих этапах - по явной схеме вычисляется температура в узлах крупной сетки, при помощи линейной интерполяции определяется температура в граничных узлах мелкой сетки и, наконец, производится вычисление температуры в узлах этой сетки по уравнению неявной схемы, которое при помощи метода дробных шагов сводилось к двум "одномерным" неявным уравнениям. Следует отметить, что для повышения точности расчета можно на каждом временном интервале организовать итерационную процедуру уточнения средних на интервале значений теплофизических характеристик. Однако тестовые расчеты показали, что при используемых временных шагах, удовлетворяющих условию устойчивости явной схемы, получаемые уточнения незначительны и необходимость в итерациях отпадает.

Четвертая глава посвящена определению НДС затвердевающего непрерывного слитка. Характерной особенностью затвердевающих тел является то, что в процессе деформирования они меняют свою конфигурацию, приобретая новые материальные элементы. В этом случае у одного и того же тела нет двух различных состояний, и поэтому нельзя говорить о перемещениях и деформациях, постоянных даже в упругом теле при неизменных нагрузках. В математической формулировке задач такого рода приходится вводить переменные, характеризующие мгновенное состояние тела. Кроме того, при использовании конечноэлементных методов в случае непрерывно затвердевающего тела приходится на каждом временном шаге изменять дискретизацию расчетной области. Указанные трудности можно преодолеть, если в качестве расчетной области рассматривать все поперечное сечение слитка без явного выделения границы между твердой Ω_T и жидкой Ω_K частями (рис.3).

В каждой точке расчетной области введены некоторые фиктивные деформации ϵ_{ij}^f , так что полные деформации

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \delta_{ij} \epsilon^T + \epsilon_{ij}^c + \epsilon_{ij}^f, \quad (7)$$

где ϵ_{ij}^e - упругие деформации. Температурная деформация ϵ^T отсчитывается от температуры образования кристаллического каркаса. Деформации ползучести ϵ_{ij}^c определяются уравнением (2) только в

области Ω_T . Деформации ϵ_{ij}^f могут изменяться только в области $\Omega_{ж}$, фактически являясь начальными деформациями конкретного материального элемента в момент его затвердевания. Этот момент соответствует срастанию отдельных кристаллитов в двухфазной зоне в кристаллический каркас, способный воспринимать действующую на него нагрузку. Изложенный прием аналогичен методу фиктивных областей, в частности, использованному В.Г.Осмоловским и В.Я.Ривкиндом для решения задачи установившейся ползучести в телах с внутренними полостями.

Ввиду значительной протяженности слитка и сравнительно медленного изменения условий охлаждения и разгиба вдоль его оси задачу по определению НДС затвердевающего слитка, как и задачу теплопроводности, можно считать двумерной. В результате имеем

$$\epsilon_{33} = \epsilon_{33}^0(t) + \mathcal{K}(t)x_2, \quad \epsilon_{13} = \epsilon_{23} = 0, \quad (8)$$

где ϵ_{33}^0 характеризует удлинение слитка в направлении его оси, а $\mathcal{K}$ - зависящую от конструкции МНЛЗ кривизну этой оси. Таким образом, для анализа НДС затвердевающего слитка достаточно в рамках двумерной задачи определить изменение напряжений и деформаций в каждой рассматриваемой точке поперечного сечения слитка по времени t , с которым однозначно связано значение текущей координаты x_3 этого сечения (см. рис.3). Задача сведена к решению на каждом n -ом временном шаге уравнения

$$\nabla^2 \nabla^2 F(M, t_n) = g_1(M, t_n) - \nabla^2 g_0(M, t_n), \quad M \in \Omega = \Omega_{ж} + \Omega_T, \quad (9)$$

где

$$g_0 = \frac{\tilde{E}}{1-\nu^2} \left[(1-\nu)\epsilon^T + \nu(\epsilon_{33}^c + \epsilon_{33}^f - \epsilon_{33}^0 - \mathcal{K}x_2) + \alpha(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right], \quad (10)$$

$$g_1 = \frac{\tilde{E}}{1-\nu^2} \left[\sigma_{11} \frac{\partial^2 b}{\partial x_1^2} + \sigma_{22} \frac{\partial^2 b}{\partial x_2^2} + 2\sigma_{12} \frac{\partial^2 b}{\partial x_1 \partial x_2} + 2 \frac{\partial^2 (\epsilon_{12}^c + \epsilon_{12}^f)}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (\epsilon_{11}^c + \epsilon_{11}^f) - \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} (\epsilon_{22}^c + \epsilon_{22}^f) \right], \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{\partial^2 F}{\partial x_2^2}, & \sigma_{22} &= \frac{\partial^2 F}{\partial x_1^2}, & \sigma_{12} &= -\frac{\partial^2 F}{\partial x_1 \partial x_2}, \\ \sigma_{33} &= \nu \nabla^2 F + E(\epsilon_{33}^0 + \mathcal{K}x_2 - \epsilon^T - \epsilon_{33}^c - \epsilon_{33}^f), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$\tilde{\gamma}$ и $\tilde{E}$ - некоторые постоянные величины, соответствующие по смыслу осредненным значениям коэффициента Пуассона и модуля упругости; $a = [1 - \nu^2(\tau)]/E(\tau) - (1 - \tilde{\gamma}^2)/\tilde{E}$, $b = [1 + \nu(\tau)]/E(\tau) - (1 + \tilde{\gamma})/\tilde{E}$. На поверхности слитка задавались граничные условия в напряжениях, а в проекции на направление продольной оси удовлетворялось интегральное уравнение равновесия

$$\int_{\Omega} \sigma_{33}(M, t_n) d\Omega(M) = P(t_n), \quad (13)$$

где P - сила вытягивания слитка.

Для решения нелинейного уравнения (9) использована итерационная процедура, в которой на каждой итерации с номером m уточняются функции g_0 и g_1 , а в области Ω_* определяются деформации

$$\epsilon_{ij,m}^f = \epsilon_{ij,m-1}^f + \left[\epsilon_{ij,m-1}^e + \delta_{ij} \frac{1-2\nu}{E} p \right], \quad (14)$$

где p - давление, зависящее от высоты столба жидкого металла до открытой поверхности в кристаллизаторе.

Уравнение (9) для функции напряжений F сведено к системе двух уравнений Пуассона, решаемых на каждой итерации совместно с использованием численной процедуры метода граничных элементов в непрямой формулировке, позволяющей значительно сократить число подлежащих определению неизвестных и обеспечивающей высокую скорость сходимости последовательных приближений. При этом граница расчетной области и сама область разбивались на постоянные граничные Γ_j и внутренние Ω_k элементы (см. рис. 3). Для частных случаев определения НДС при затвердевании линейно упругого и вязкоупругого тел установлено хорошее согласование аналитических решений с результатами численных расчетов по предложенной методике.

Использование пошагово-временной процедуры в задачах ползучести заставляет ограничивать шаг по времени из условий обеспечения устойчивости процесса вычислений и получения физически непротиворечивых результатов. При интенсивной ползучести ограничения, определяемые обычно по условиям в начале интервала, приводят к большим затратам машинного времени. Предложен способ выбора временного шага, основанный на прогнозировании средней скорости полных деформаций на рассматриваемом интервале времени,

что позволяет ослабить указанные ограничения.

В пятой главе приведены и проанализированы результаты численной реализации разработанных расчетных методик применительно к реальным МНЛЗ. Для оценки опасности образования внутренних трещин в литой структуре металла наиболее важной является информация о распределении функции ω по поперечному сечению слитка, что позволяет выделить области наиболее вероятного разрушения материала и определить участки на технологической оси МНЛЗ, где сочетание параметров разливки наиболее неблагоприятно. На рис. 4 в качестве примера показано распределение ω в центральной части бланковой заготовки с размерами поперечного сечения $250 \times 320 \text{ мм}^2$, рассчитанное для одного из режимов разливки применительно к радиальной МНЛЗ с базовым радиусом 12 м конструкции ВНИИМЕТМАШ. Из областей повышенных значений ω , где существует опасность образования внутренних трещин, периферийные области возникают в период выхода рассматриваемого сечения из зоны вторичного охлаждения, когда снижается теплоотвод с поверхности слитка и увеличиваются растягивающие напряжения в прилегающих к фронту затвердевания слоях материала, а средняя - в период выпрямления слитка, когда в зону выпрямления попадают центральные слои, находящиеся при температурах интервала хрупкости.

Варьируя параметры процесса разливки (скорость вытягивания слитка, интенсивность теплоотвода в различных секциях зоны вторичного охлаждения и длину этих секций, характеристики зоны выпрямления), можно путем вычислительного эксперимента исследовать их влияние на опасность образования внутренних трещин в получаемых заготовках и при проектировании МНЛЗ выбрать наиболее рациональную с точки зрения качества заготовок и производительности МНЛЗ комбинацию этих параметров. Анализ проведенного сравнения различных режимов непрерывного литья позволил сделать и обосновать выводы, которые фактически совпадают с рекомендациями, сформулированными в работах Д.П.Евстеева и др. для организации вторичного охлаждения и выпрямления слитка и обобщающими практический опыт эксплуатации МНЛЗ, что говорит о внутренней непротиворечивости предложенной модели деформирования и разрушения непрерывного слитка.

Пораженность заготовок внутренними трещинами обычно оцени-

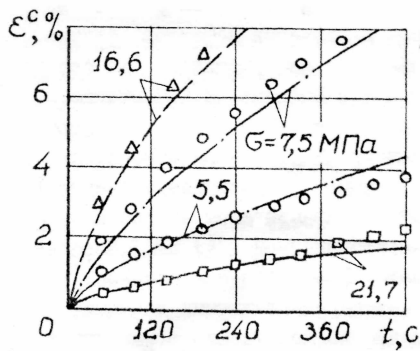


Рис. 1

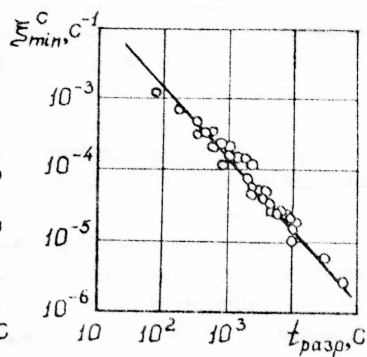


Рис. 2

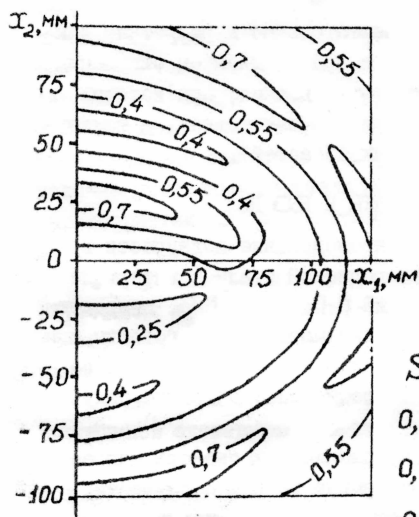


Рис. 4

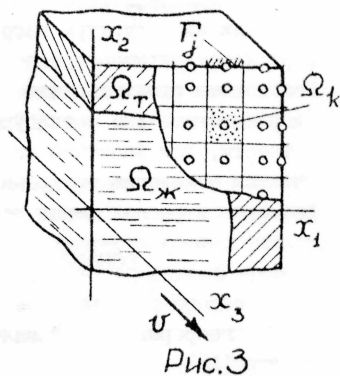


Рис. 3

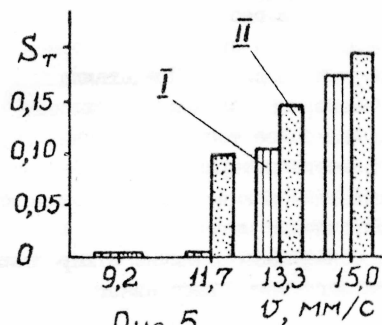


Рис. 5

вают по пятибалльной шкале ЦНИИЧМ. В количественном отношении эта оценка зависит от общего числа и размеров дефектов, фактически являясь некоторой интегральной характеристикой. Для сравнения с экспериментальными данными И.Н.Шифрина, И.Г.Панченко, В.Т.Сладкошteeва и др. по пораженности слитков внутренними трещинами использован расчетный параметр S_T , равный относительному размеру области, в которой функция ω достигла значения 1. На рис.5 приведены зависимости этого параметра от скорости вытягивания для радиальной (I) и криволинейной (II) МНЛЗ Новолипецкого металлургического комбината. Проведено аналогичное сравнение расчетного параметра с экспериментальными данными Д.А.Дюджина, И.В.Шукстульского и др. по исследованию различных режимов вторичного охлаждения на криволинейной МНЛЗ металлургического завода "Азовсталь". Выявлено, что расчетный параметр S_T качественно удовлетворительно отражает реальную зависимость дефектности литой структуры заготовок как от скорости вытягивания, так и от конструктивного исполнения МНЛЗ.

Необходимо отметить, что экспериментальные и расчетные данные удовлетворительно согласуются и в количественном отношении (в частности, для значений скорости вытягивания, при которых наблюдается появление внутренних трещин в заготовках, а также для размеров и расположения дефектных областей).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Проведено экспериментальное исследование ползучести и разрушения непрерывнолитой малоуглеродистой стали в интервале температур 1123...1573 К и напряжений 5,5...28,0 МПа, позволяющее выяснить особенности деформирования материала заготовки при температурах и скоростях деформаций, характерных для процесса непрерывного литья. Представлено теоретическое описание полученных экспериментальных данных.

I.1. Для более точного описания деформационных свойств непрерывнолитого материала использован вариант теории ползучести, учитывающий как деформационное упрочнение, так и термическое разупрочнение материала.

I.2. Обнаружено различие в характеристиках ползучести для материала заготовки, вырезанного из различных структурных зон не-

прерывного слитка, и показана возможность отражения этого различия при теоретическом описании деформирования материала в рамках используемого варианта теории ползучести.

1.3. Предложен критерий разрушения непрерывнолитого материала, единым образом учитывающий прочность материала при нахождении его в двухфазном и твердом состояниях и адекватно отражающий экспериментальные данные по разрушению металлических сплавов в высокотемпературном интервале хрупкости.

2. Разработана методика расчета температурного состояния затвердевающего слитка, основанная на комбинации явной и неявной разностных схем и позволяющая при хорошей точности получаемого решения добиться значительной экономии машинного времени.

3. Разработана методика расчета НДС непрерывного слитка в процессе его затвердевания.

3.1. Показана высокая эффективность методов граничных элементов и фиктивных областей в задачах подобного класса. Результаты тестирования разработанной методики численного анализа деформирования слитка свидетельствуют о возможности получения достаточно достоверной информации о его НДС при ограниченных ресурсах ЭВМ по памяти и быстродействию.

3.2. Показано, что имеется возможность существенно увеличить временной шаг при численном решении задачи ползучести, ослабляя условие устойчивости счета при помощи прогнозирования некоторых характеристик НДС рассматриваемого тела на следующий временной шаг.

4. Разработана методика оценки опасности возникновения внутренних трещин в непрерывном слитке на основе предложенного критерия разрушения затвердевающего материала и концепции непрерывного накопления повреждений.

5. Выполнен сравнительный анализ расчетных результатов с имеющимися экспериментальными данными, который при удовлетворительном качественном и количественном совпадении этих результатов позволяет сделать заключение о справедливости принятых гипотез, эффективности разработанных алгоритмов и возможности использования предложенного критерия разрушения для оценки поразенности непрерывнолитых заготовок внутренними трещинами.

6. Разработан комплекс программ на алгоритмическом языке

ФОРТРАН, позволяющий реализовать предложенные расчетные методики на ЭВМ типа ЕС.

7. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования при проектировании новых и совершенствовании действующих МНЛЗ разработанных расчетных методик для определения наиболее рациональных с точки зрения качества получаемых заготовок и производительности МНЛЗ конструктивных и технологических параметров машин.

8. Результаты работы в виде расчетных методик и программ переданы для практического использования в НПО ВНИИМЕТМАШ.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Данилов В.Л., Зарубин С.В. Анализ деформирования и степени поврежденности плоского непрерывного слитка // ИВУЗ. Машиностроение.- 1986.- № 1.- С. 97-102.

2. Бойцов Ю.И., Данилов В.Л., Зарубин С.В. Ползучесть непрерывнолитой стали при нестационарных режимах деформирования и нагрева.- М., 1985.- 15 с.- Деп. в НИИ Черметинформации 26.12.86, № 3230-ЧМ.

3. Данилов В.Л., Зарубин С.В. Численный анализ процессов кристаллизации и накопления повреждений в непрерывном слитке // Тезисы докладов УШ Всесоюзной конференции по прочности и пластичности.- Пермь, 1983.- С. 55-56.

4. Зарубин С.В. Ползучесть кристаллизующегося непрерывного слитка // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции "Ползучесть в конструкциях".- Новосибирск, 1984.- С. 25.

5. Данилов В.Л., Зарубин С.В., Коротаевский А.П. Прочность непрерывного слитка и вопросы проектирования МНЛЗ // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин. Часть II.- М., 1985.- С. 56.

6. Данилов В.Л., Зарубин С.В., Налбандов А.В. Численный анализ термпрочности роликов МНЛЗ // Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин. Часть II.- М., 1985.- С. 62.

Зарубин

