

М434064

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

КОРОТАЕВСКИЙ Александр Петрович

УДК 539.376:669.18:621.746.27

РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКА И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
РОЛИКОВОЙ ЗОНЫ 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 - 1985

Работа выполнена в МВТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре
"Динамика и прочность машин".

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

Официальные оппоненты - доктор технических наук
Никитин Г.С.

кандидат технических наук
Пановко Г.Я.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета.

Защита диссертации состоится "16" декабря 1985 г.
в 14³⁰ ч. на заседании специализированного Совета "Машиностро-
ение" (К053.15.11) Московского ордена Ленина, ордена Октябрьс-
кой Революции и ордена Трудового Красного Знамени Высшего тех-
нического училища им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Моск-
ва, 2-я Бауманская ул., д. 5, Большой Ученый Совет.

Ваши отзывы
сылать по

ба вы-

С диссертат
Баумана.

Н.Э.

Авторефера

УЧЕНЫЙ СЕК
кандид

П.К.)

Объем I п.
Л.С7616

ана.

M434064

НА ДС
НЕ ВЫДАЕТ

Актуальность проблемы. В настоящее время в развитых в промышленном отношении странах большая часть стальных заготовок производится непрерывным способом, который в сравнении с традиционными методами разливки характеризуется более высоким уровнем производительности труда, высоким качеством получаемого металла и значительно меньшей энергоемкостью производственного процесса.

Вопросы качества непрерывнолитых заготовок связаны с наличием внутренних и поверхностных трещин и ликвации химических элементов в пределах поперечного сечения отливки. В настоящее время доказано, что решающую роль в формировании этих дефектов играет выпучивание формирующейся корочки, которое вызывается, главным образом, действием ферростатического давления. Рост прогибов корочки при увеличении скорости вытягивания слитка является основным сдерживающим фактором для увеличения производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Указанное отрицательное воздействие выпучивания на качество непрерывных слитков объясняет тот практический интерес, который вызывает это явление у специалистов в области конструирования и эксплуатации установок непрерывной разливки.

Предложенные различными авторами методы исследования выпучивания корки непрерывнолитых заготовок разработаны с применением большинства существующих в механике деформируемого твердого тела расчетных схем. Существенным разнообразием отличается описание механических свойств материала корочки при температурах, характерных для непрерывной разливки. Исторически первыми были решения в предположении упругого деформирования материала; последовавшее совершенствование расчетов связано с переходом к зависимостям для упругопластического деформирования и ползучести. Тем не менее, область применения существующих решений задачи выпучивания корки непрерывнолитых заготовок является весьма ограниченной. Это обусловлено как значительным разбросом имеющихся немногочисленных данных по описанию механических свойств сталей при температурах выше 900 °С, так и несовершенством расчетных схем и численных методов, лежащих в основе решения задачи выпучивания.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1434064

Коротавский А.П. Расчет де



М 434064

Цель исследования. Целью диссертационной работы является создание методик расчета выпучивания слябовых и блюмовых заготовок непрерывного литья, поверочного расчета на прочность и жесткость непрерывного слитка и проектировочного расчета расположения поддерживающих элементов зоны вторичного охлаждения установки непрерывной разливки стали.

Научная новизна. Разработаны методики расчета выпучивания слябовых и блюмовых заготовок непрерывного литья, поверочного расчета на прочность и жесткость непрерывнолитой заготовки и проектировочного расчета расположения поддерживающих элементов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ из условия прочности материала корочки слитка.

Выпучивание корочки непрерывнолитых заготовок изучено в предположении ползучести металла для двухосного напряженного состояния на основании расчетной схемы движущейся неравномерно нагретой пластинки переменной толщины, нагруженной изменяющимся по оси слитка ферростатическим давлением и осевыми усилиями. Учет осевых нагрузок позволил существенным образом уточнить решение задачи выпучивания.

При анализе деформирования слябовых заготовок непрерывного литья использован эффективный приближенный метод определения скорости изменения кривизны, основанный на аппроксимации функции потенциала скоростей ползучести аналитической зависимостью, полученной на основании условия постоянства мощности диссипации и теоремы Келледайна-Друкера. Для приближенного исследования деформирования непрерывнолитых блюмов применен метод Бубнова-Галеркина. Распределение деформаций в корочке непрерывного слитка определено путем интегрирования скоростей деформаций за время, прошедшее с момента кристаллизации металла в рассматриваемой точке. Расчет расположения поддерживающих элементов в пределах зоны вторичного охлаждения МНЛЗ выполнен из условия прочности материала корочки в высокотемпературном интервале хрупкости разливаемого материала.

Достоверность результатов подтверждена сравнением результатов теоретического исследования, выполненного по различным методикам, а также сравнением с теоретическими и эксперимен-

тальными исследованиями других авторов.

Практическая ценность и внедрение. Разработанные методики применены для исследования деформирования корки непрерывнолитых заготовок слябового и блюмового типов. Выполнен численный анализ влияния конструктивных и технологических параметров установок непрерывной разливки на степень деформирования формирующейся корочки. Разработана методика оценки прочности непрерывнолитой заготовки по уровню накопленной деформации в пределах высокотемпературного интервала хрупкости разливаемого материала. Разработана методика проектировочного расчета расположения поддерживающих элементов в пределах зоны вторичного охлаждения из условия прочности заготовки. Разработан комплекс программ на алгоритмическом языке FORTRAN, реализующих расчеты непрерывнолитых заготовок согласно вышеупомянутым методикам.

Результаты расчетов использованы НПО ВНИИМЕТМАШ при конструировании ряда установок непрерывной разливки и модернизации действующих МНЛЗ.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались четырежды на научном семинаре "Прикладная теория пластичности и ползучести" в МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981, 1983, 1984 и 1985 годах, на семинаре отделения плавильных и непрерывнолитых машин НПО ВНИИМЕТМАШ в 1983 году, на второй Всесоюзной конференции "Ползучесть в конструкциях" в 1984 году в г. Новосибирске, на девятой Всесоюзной конференции по проблемам сталльного слитка "Усовершенствование процессов разливки и кристаллизации стали" в 1984 году в г. Киеве, на третьей Всесоюзной научно-технической конференции по расчетам на прочность металлургических машин в 1985 году в г. Жданове.

Основное содержание диссертационной работы изложено в четырех статьях и трех научно-технических отчетах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения на 150 страницах, включая 52 рисунка; содержит список литературы из 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Введение содержит общие сведения о технологическом процессе непрерывной разливки. Рассмотрены проблемы качества непрерывнолитого металла. Отмечено, что выпучивание непрерывнолитых заготовок вызывает большой практический интерес у специалистов в области производства и эксплуатации МНЛЗ.

В первой главе выполнен анализ работ, посвященных исследованию выпучивания непрерывнолитых заготовок между опорными роликками. Рассмотрены вопросы, касающиеся механических свойств материала корочки, нарастания толщины корочки и распределения температуры в ее пределах, применяемых в исследованиях расчетных схем и используемых для интегрирования дифференциального уравнения изгиба граничных условий. Проанализированы имеющиеся результаты экспериментального изучения выпучивания и результаты моделирования условий деформирования корочки на пластичной модели. Некоторые вопросы деформирования непрерывнолитых заготовок исследованы в работах М.Я. Бровмана, В.Л. Данилова, С.Е. Карлинского, В.М. Нисковских, И.Н. Шифрина и других специалистов. Из зарубежных исследований следует отметить результаты экспериментального изучения, выполненного К. Ённенбергом, а также работы сотрудников института стали и сплавов Японии. Теоретическое решение задачи выпучивания приведено в работах А. Грилла, И. Като, Х. Матсумото, К. Миязавы, К. Нагаи, К. Соримачи, Я. Сугитани, К. Фукавы, К. Швердтфегера и других. Основными центрами по изучению выпучивания корочки непрерывнолитых заготовок являются ПО "УРАЛМАШ", НПО ВНИИМЕТМАШ и институт стали и сплавов Японии.

Выполненный анализ литературных источников позволил заключить следующее. Выпучивание формирующейся корочки непрерывного слитка приводит к образованию внутренних и поверхностных дефектов отливки, а также к увеличению нагрузки на приводные и поддерживающие ролики зоны вторичного охлаждения МНЛЗ. Процесс выпучивания экспериментально изучен недостаточно. Полученные опытные характеристики отдельных МНЛЗ не могут служить основой для проектирования установок непрерывной разливки других типов и размеров. Существующие математические модели для расчета выпучивания описывают этот процесс весьма приближенно, что су-

ущественно ограничивает диапазон их применения для практических расчетов. Основной вклад в формирование прогибов выпучивания вносят деформации ползучести. Наиболее достоверной оценкой опасности образования внутренних трещин является величина накопленной линейной деформации растяжения в пределах высокотемпературного интервала хрупкости.

Во второй главе рассмотрены соотношения ползучести, которые в дальнейшем использованы при анализе деформирования коротки непрерывнолитых заготовок. Связь между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью скоростей деформаций ползучести $\dot{\epsilon}_i$ принята в виде зависимости для нелинейно-вязкого тела с учетом изменчивости температуры:

$$\dot{\epsilon}_i = K \exp \left\{ -\frac{Q}{T} \right\} \sigma_i^n, \quad (I)$$

где K , Q и n - постоянные материала, определяемые экспериментально; T - температура, $^{\circ}\text{K}$.

Изменение толщины коротки и температуры в ее пределах с удалением от менисковой поверхности определено путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в одномерной постановке. Граничные условия, необходимые для решения уравнения, являются следствием симметрии охлаждения заготовки, а также отражают теплообмен на поверхности слитка по закону Стефана-Больцмана совместно с конвекцией. Коэффициент теплопередачи конвекцией определяется типом и интенсивностью охлаждения внешней поверхности заготовки.

Определена система нагрузок, воспринимаемых широкой гранью непрерывного слитка. К их числу принадлежат ферростатическое давление и осевое усилие, определяемое силой трения в кристаллизаторе, трением в подшипниковых узлах поддерживающих роликов, трением качения роликов по внешней поверхности заготовки и весовой нагрузкой. В направлении, нормальном к плоскости технологической оси машины, действует растягивающая нагрузка, которая уравнивает давление жидкой фазы на боковые грани слитка.

В третьей главе приведена методика расчета и выполнен анализ деформирования срединной части широкой грани непрерывнолитых слэбов. Рассмотрены различные методы расчета кривых выпучивания, проведено сравнение полученных результатов. Проанали-

зировано влияние конструктивных и технологических параметров установки непрерывной разливки на степень деформирования корочки. Изучено изменение выпучивания при остановке процесса разливки.

Исследование выпучивания широкой грани непрерывного сляба выполнено на основании расчетной схемы опертой на ролики пластинки переменной толщины $h(z)$, нагруженной изменяющимся с расстоянием от менисковой поверхности ферростатическим давлением $p(z)$ и осевым усилием N (см. рис. 1). В направлении, нормальном к плоскости технологической оси МНЛЗ, на пластинку действует растягивающая нагрузка интенсивности $F(z)$, обусловленная давлением жидкой фазы на узкие грани сляба. Пластика движется в направлении координаты z со скоростью вытягивания слитка V . Координата z для каждого участка отсчитывается от ролика, ближайшего к менисковой поверхности. При опирании пластинки на поддерживающие ролики возникают контактные усилия R_0 и R_L , а в сечениях над опорами — изгибающие моменты M_0 и M_L .

При ширине слитка δ , большей шага роликов ℓ в 3 и более раза, прогибы широкой грани в ее центральной части не зависят от поперечной координаты и усилие N может считаться равномерно распределенным по периметру заготовки с интенсивностью N . Эта особенность дает возможность исследования деформирования слябов по одномерной расчетной схеме. С целью определения точности различных методов исследования выпучивания получены решения для линии прогибов и осевых перемещений при совместном растяжении и изгибе движущегося стержня с учетом и без учета влияния температурных деформаций, а также рассмотрены приближенные решения, основанные на замене реального поперечного сечения стержня идеальным двутавровым и на аппроксимации функции потенциала скоростей ползучести аналитической зависимостью, определенной с помощью условия постоянства мощности диссипации и теоремы Келледайна-Друкера. Анализ трудоемкости и точности результатов расчетов показал целесообразность использования для практических целей метода с приближенным заданием функции потенциала скоростей ползучести, соотношения которого были распространены на случай двухосного растяжения движущейся пластинки (с учетом влияния усилия F). Дифференциальное уравнение изгиба корочки для установившегося режима работы МНЛЗ в этом

случае имеет следующий вид:

$$\frac{d^3\delta}{dz^3} = \frac{R^{n-1} M_z}{V J_c^n}, \quad (2)$$

где δ - прогиб, мм;

R - обобщенная эквивалентная нагрузка, определяемая следующим образом:

$$R = \sqrt{M_z^2 + C^2 (\bar{N}^2 - \bar{N}F + F^2)}; \quad (3)$$

M_z - изгибающий момент, который в соответствии с расчетной схемой рисунка 1 задается соотношением:

$$M_z = M_0 - R_0 z + \int_0^z p(\eta) \eta d\eta; \quad (4)$$

J_c - температурно-геометрическая характеристика поперечного сечения, имеющая смысл обобщенного момента инерции при изгибе;

C - множитель, определяемый следующим образом:

$$C = \left(\frac{J_c}{F_c} \right)^{\frac{n}{n+1}}; \quad (5)$$

F_c - температурно-геометрическая характеристика, имеющая смысл обобщенной площади.

Дифференциальное уравнение (2) интегрируется численно со следующими граничными и начальными условиями:

$$z=0, l: \quad \delta=0; \quad \frac{d\delta}{dz}=0; \quad z=0: \quad \frac{d^2\delta}{dz^2}=0. \quad (6)$$

Скорость осевых удлинений $\dot{\epsilon}_s$ может быть найдена следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{R^{n-1} C^2}{J_c^n} \left(\bar{N} - \frac{1}{2} F \right). \quad (7)$$

Типичные решения для линии прогибов δ и осевых удлинений Δ приведены на рисунке 2.

Результаты выполненного анализа влияния конструктивных и технологических параметров МНЛЗ на степень выпучивания (шага поддерживающих роликов и точности их установки, скорости вытягивания заготовки, величины осевого усилия, уровня менисковой

поверхности и расстояния от нее до рассчитываемого участка) являются общими для МНЛЗ слэбового типа и могут быть использованы при конструировании и модернизации установок непрерывного литья.

Для получения решения в случае остановки производственного процесса выполнено интегрирование по времени t дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{d^2 \delta}{dz^2} = \frac{R^{n-1} M_z}{J_c^n} \quad (8)$$

В качестве начального условия для интегрирования по времени использовано решение дифференциального уравнения (2) для установившегося режима. При определении обобщенной эквивалентной нагрузки R усилие N принималось равным нулю (отсутствует составляющая сил трения). Расчеты показали значительное увеличение выпучивания корочки при остановке вытягивания заготовки, что находит хорошее экспериментальное подтверждение при сравнении с результатами исследований К. Вюнненберга.

В целом сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследования выпучивания корочки непрерывных слитков показывает хорошее качественное соответствие расчетных и опытных данных и позволяет сделать вывод об определяющем влиянии ползучести в формировании поверхности выпучивания и удовлетворительном описании механических свойств материала слитка соотношением (1).

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с расчетом деформирования корочки непрерывнолитых блюмов. Разработан приближенный способ определения величины выпучивания на основе метода Бубнова-Галеркина. Выполнены расчеты выпучивания при заданном расположении поддерживающих роликов и проведен анализ влияния конструктивных и технологических параметров установки непрерывной разливки на степень выпучивания корочки блюмовой заготовки непрерывного литья.

Характер деформации блюмовых непрерывнолитых заготовок существенно образом отличается от деформации слэбовых отливок. Поскольку размеры поперечного сечения слитка таковы, что шаг поддерживающих роликов уже в верхней части зоны вторичного охлаждения может быть равен или превосходить ширину слитка δ ,

поверхность выпучивания уже не является функцией одной лишь осевой переменной z , но зависит и от поперечной координаты x . Принимая, что угол поворота нормали к внешней поверхности заготовки в области ребра между узкой и широкой гранью равен нулю, расчет деформирования блочных заготовок сведем к расчету системы движущихся пластинок, края которых защемлены.

Процесс получения решения строится следующим образом. На первом этапе определяется величина выпучивания, обусловленного изгибом движущейся пластинки распределенным ферростатическим давлением. Дифференциальное уравнение равновесия элемента нейтральной поверхности пластинки, полученное на основании гипотезы Кирхгоффа-Лява, решается приближенно методом Бубнова-Галеркина. Для этого поверхность выпучивания $\delta(x, z)$ аппроксимируется следующим образом:

$$\delta(x, z) = \delta_0 X_0 Z_0, \quad (9)$$

где X_0 - функция, зависящая только от координаты x ; $0 \leq X_0 \leq 1$;
 Z_0 - функция, зависящая только от координаты z ; $0 \leq Z_0 \leq 1$;
 δ_0 - множитель, имеющий смысл максимального прогиба при изгибе пластинки распределенным ферростатическим давлением.

В качестве функции Z_0 использовано одномерное безразмерное решение для слябов; функцию X_0 можно задать тригонометрическим

$$X_0 = 0,5 \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{b-2h} \right) \quad (10)$$

или гиперболо-тригонометрическим выражением:

$$X_0 = 1 - E_1 \operatorname{ch} \alpha x \cos \beta x + E_2 \operatorname{sh} \alpha x \sin \beta x, \quad (11)$$

где α и β для упругого решения равны $4,146/l$ и $2,286/l$ соответственно, а постоянные E_1 и E_2 определяются граничными условиями в области ребра между узкой и широкой гранью - нулевым прогибом и углом поворота прямой нормали к нейтральной поверхности заготовки.

После определения величины δ_0 получаем функции распределения моментов M_x , M_{xz} и M_z , соответствующие аппроксимации (9).

На втором этапе по известным функциям изменения моментов находится решение для величины максимального прогиба при совместном двухосном изгибе и растяжении движущейся пластинки.

Для этого рассмотренный в третьей главе метод с использованием приближенной аппроксимации функции потенциала скоростей ползучести обобщен на случай изгиба пластинки по двум координатам. Дифференциальное уравнение изгиба в направлении оси x

$$\frac{R}{\eta_c^{n-1}} \left(M_z - \frac{1}{2} M_x \right) = \delta_{\max} V Z_3 X_0 \quad (12)$$

решается приближенно также методом Бубнова-Галеркина, в результате чего получим значение прогиба пластинки при изгибе ее распределенным давлением с учетом влияния осевых усилий $\delta_{\max}$. В уравнении (12) символом Z_3 обозначена третья производная функции Z_0 по координате Z . Обобщенная эквивалентная нагрузка R в этом случае определяется зависимостью:

$$R = \sqrt{M_x^2 - M_x M_z + M_z^2 + 3M_{xz}^2 + C^2 (\tilde{N}^2 - \tilde{N}F + F^2)} \quad (13)$$

Принимая $X_0 = 1$, получим приближенное решение для слабых заготовок непрерывного литья, которое в диссертационной работе использовано для контроля точности рассматриваемого решения.

Распределение усилия $\tilde{N}$ по периметру непрерывнолитой заготовки определяется условием отсутствия в пределах рассматриваемого поперечного сечения деформации нейтральной линии при изгибе и интегральным условием равновесия для силы $\tilde{N}$ в целом.

По рассмотренной выше методике было выполнено исследование влияния конструктивных и технологических параметров машины непрерывной разливки на степень выпучивания. Исследование деформирования корочки при различных значениях отношения ширины слитка к шагу поддерживающих роликов показало, что при $b/l > 3$ расчет деформирования может быть выполнен по одномерной расчетной схеме.

В пятой главе исследованы вопросы прочности непрерывных слитков. В качестве критерия прочности использовано сравнение величины накопленной максимальной деформации растяжения в пределах высокотемпературного интервала хрупкости с критическим значением для данного материала. Скорость деформации $\dot{\epsilon}_x$ в каждой точке поперечного сечения слитка складывается из скорости осевой деформации, возникновение которой обусловлено воздействием системы осевых усилий, и скорости осевой деформации, определяемой поворотом плоских сечений или прямых нормалей к нейтральной

ральной поверхности вследствие выпучивания корочки непрерывно-литой заготовки. Определение накопленной деформации ϵ_z выполнено путем интегрирования скорости $\dot{\epsilon}_z$ за время, прошедшее с момента кристаллизации металла в данной точке. Распределение деформации ϵ_z в пределах поперечного сечения заготовки, найденное таким образом, имеет существенно нелинейный характер, что связано с непрерывностью процесса кристаллизации и наличием прогибов выпучивания корочки между опорными роликами.

При известных конструктивных и эксплуатационных параметрах спроектированной установки непрерывной разливки целесообразно выполнение поверочного расчета на прочность и жесткость отливаемой заготовки. Аналогичный расчет может быть выполнен при изучении возможности перевода действующей установки на более высокий скоростной режим и при изменении параметров машины в процессе эксплуатации. На рисунке 3 приведены результаты поверочного расчета слитка слябового типа (установка непрерывной разливки Новолипецкого металлургического комбината). При расчетах использованы механические характеристики для стали 20. Выполненные поверочные расчеты машин непрерывной разливки отечественного и зарубежного производства позволили заключить следующее.

1. Принятое расположение поддерживающих роликов обеспечивает безопасный с точки зрения прочности заготовки уровень выпучивания.
2. Общепринятый характер расположения роликов в пределах зоны вторичного охлаждения (постоянные шаги в пределах секции или нескольких секций и наличие увеличенных расстояний между поддерживающими роликами в местах стыковки секций) является не- рациональным с точки зрения прочности и жесткости корочки слитка и металлоемкости конструкции.
3. Шаги поддерживающих роликов в верхней части зоны вторичного охлаждения существенно занижены, что может являться конструктивной мерой борьбы с возможными прорывами корочки жидким металлом вследствие неравномерности толщины твердой фазы на выходе слитка из кристаллизатора.
4. На всех участках зоны вторичного охлаждения возможно увеличение шага поддерживающих роликов без возникновения опасности разрушения материала корочки. Определя коэффициент запаса по

шагу роликов n_ρ как

$$n_\rho = \frac{l_{\text{доп}}}{l_{\text{прин}}}, \quad (14)$$

где $l_{\text{доп}}$ - максимальный расчетный шаг роликов, при котором нет разрушения в материале корочки;

$l_{\text{прин}}$ - принятый конструктором размер l ,

можно установить область изменения n_ρ для существующих машин. Для установок слябового типа n_ρ изменяется от 1,18 до 2,72; для блюмовых мартенов n_ρ значительно выше и находится в пределах от 1,32 до 3,58.

Выполненные проверочные расчеты показали необходимость проведения проектировочных расчетов с наперед заданным значением коэффициента n_ρ для каждого участка зоны вторичного охлаждения. Пример проектировочного расчета расположения поддерживающих элементов приведен на рисунке 4 (для слябовой установки непрерывной разливки). Величина коэффициента n_ρ задана кусочно-постоянным образом: для 1 - 5 роликов $n_\rho = 1,75$; для 6 - 10 $n_\rho = 1,5$; далее $n_\rho = 1,25$. Аналогичные расчеты выполнены и для машин непрерывного литья блюмового типа.

Проектировочный расчет МНЛЗ блюмового типа связан с определением границы так называемой зоны удержания - части зоны вторичного охлаждения, в пределах которой выпучивание корочки слитка существенно и требует установки поддерживающих роликов для его уменьшения. Длина зоны удержания может быть определена как расстояние от кристаллизатора до начала участка, для которого неограниченно увеличивается шаг роликов l при поиске его величины, дающей значение накопленной деформации ϵ_z в пределах высокотемпературного интервала хрупкости, равное критическому. Расчеты показали, что длина зоны удержания, определенная теоретически, может быть значительно меньше той, что принята конструкторами данной МНЛЗ.

Применение методики проектировочного расчета существенным образом облегчает работы по конструированию установок непрерывной разливки и может привести не только к существенной экономии материальных ресурсов, но и к повышению качества получаемого металла.

Выполненное в диссертационной работе качественное и коли-

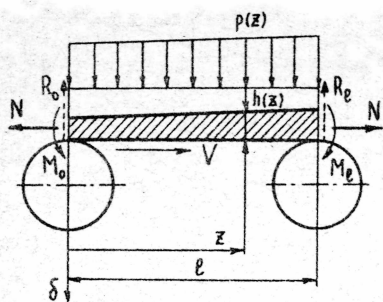


Рис. 1.

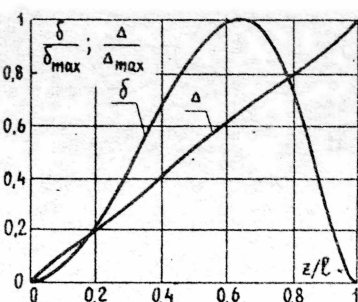


Рис. 2.

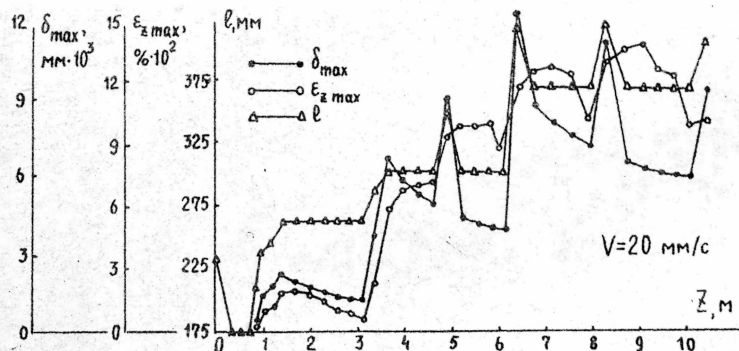


Рис. 3.

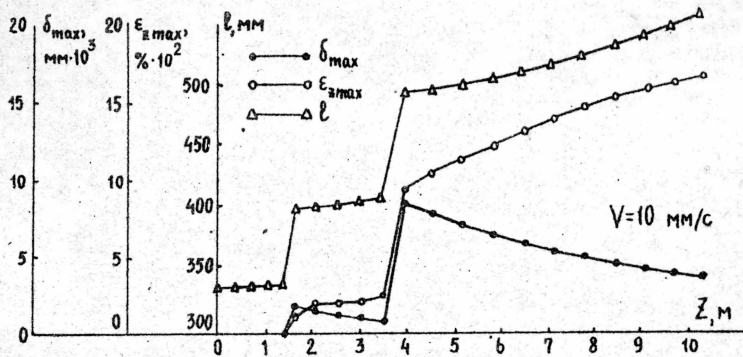


Рис. 4.

чественное сравнение результатов расчетов с опубликованными в научной литературе экспериментальными данными показало удовлетворительное соответствие расчетных и опытных результатов, на основании чего разработанные методики рекомендованы к использованию в конструкторской и исследовательской работе организаций, связанных с проектированием и эксплуатацией установок непрерывного литья заготовок.

О С Н О В Н Ы Е В Ы В О Д Ы .

1. Разработана методика расчета деформирования корки непрерывнолитых слабов на основании модели нелинейно-вязкого тела по одномерной расчетной схеме, учитывающая переменность по оси слитка ферростатического давления, толщины и температуры корочки. Соотношения, на основании которых исследовано деформирование слабов, учитывают действие осевых усилий, которое в значительной степени влияет на характер деформирования корки.

2. Разработана методика исследования деформирования корки блюмовых заготовок непрерывного литья. Эффективный приближенный метод Бубнова-Галеркина впервые применен для расчета выпучивания. Исследование деформирования по двумерной расчетной схеме без ограничений на переменность в осевом направлении силовых и температурно-геометрических параметров с учетом осевых растягивающих нагрузок позволило существенным образом расширить границы применимости предложенного решения по сравнению с существующими и получить общие для машин непрерывной разливки данного типа результаты и выводы.

3. Разработана методика оценки прочности материала корочки непрерывного слитка, основанная на сравнении величины накопленной линейной деформации растяжения в высокотемпературном интервале хрупкости с критическим для данного материала значением. Величина накопленной деформации определена путем интегрирования скоростей деформаций за время, прошедшее с момента кристаллизации металла в рассматриваемой точке. Распределение деформации, определенное таким образом, имеет существенно нелинейный характер и в значительной степени зависит от величины действующих осевых усилий.

4. Разработана методика поверочного расчета на прочность и жесткость заготовок непрерывного литья как слябового, так и бломового типа. Использование такой методики целесообразно в ходе выполнения конструкторских работ на стадии выбора расположения поддерживающих элементов в пределах зоны вторичного охлаждения. Кроме этого, поверочный расчет необходим при изменении технологических и конструктивных параметров действующих установок непрерывной разливки.

5. Разработана методика и приведены примеры выполнения проектировочных расчетов расположения поддерживающих элементов машин непрерывного литья слябового и бломового типов. Создание и внедрение в практику работы конструкторских бюро этой методики позволит значительно сократить трудоемкость конструкторских разработок, уменьшить металлоемкость установок непрерывной разливки и повысить качество получаемых заготовок.

6. Разработан комплекс программ на алгоритмическом языке FORTRAN, реализующих выполнение расчетов деформирования корки непрерывнолитых заготовок в соответствии с описанными в диссертационной работе методиками. Широкое применение стандартных программ из математического обеспечения ЭВМ в сочетании с использованием современных вычислительных методов позволило создать эффективные экономичные программы, ориентированные на выполнение электронными цифровыми вычислительными машинами типа ЕС.

7. Выполнен сравнительный анализ имеющихся опытных и расчетных результатов исследования выпучивания корки непрерывнолитых заготовок, показавший удовлетворительность использованных расчетных схем и механических характеристик материала.

8. Результаты расчетов использованы НПО ВНИИМЕТМАШ при конструировании ряда установок непрерывной разливки и модернизации действующих машин.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Данилов В.Л., Коротаевский А.П. Совместное растяжение и изгиб неравномерно нагретых стержней в условиях ползучести. - Известия вузов. Машиностроение, 1984, № 2, с. 3 - 7.

2. Данилов В.Л., Коротаевский А.П. Выпучивание корки слэба при непрерывной разливке. - Известия вузов. Машиностроение, 1984, № 4, с. 93 - 96.

3. Коротаевский А.П. Выбор расчетной схемы при определении выпучивания корки непрерывнолитых заготовок. - М., 1984. - 31 с. - Рукопись представлена МВТУ. Деп. в ЦНИИ Черметинформация 24 окт. 1984, № 2595чм-84.

4. Данилов В.Л., Коротаевский А.П., Шифрин И.Н. Влияние шага роликов и скорости вытягивания на выпучивание корочки непрерывного слитка. - В кн.: Новое в создании металлургических машин. М., 1985, с. 47 - 51.

5. Коротаевский А.П. Исследование выпучивания корки слэба в процессе непрерывной разливки стали. - Известия вузов. Машиностроение, 1982, № 7, с. 160.

6. Коротаевский А.П. Выпучивание корки слитка в процессе непрерывной разливки стали. - Известия вузов. Машиностроение, 1984, № 9, с. 158.

7. Коротаевский А.П. Расчет выпучивания корки непрерывных слитков в процессе разливки. - Известия вузов. Машиностроение, 1984, № 10, с. 158.

8. Данилов В.Л., Коротаевский А.П. Учет ползучести непрерывного слитка при выборе параметров машин непрерывного литья заготовок. - В кн.: Ползучесть в конструкциях: Тезисы докл. Всесоюз. конф. Новосибирск, 1984, с. 19 - 20.

9. Данилов В.Л., Зарубин С.В., Коротаевский А.П. Прочность непрерывного слитка и вопросы проектирования МНЛЗ. - В кн.: 3 Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докл. Всесоюз. конф. Жданов, 1985, с. 56.

