

ванного аустенита, в процессе превращения которого и образуются сплошные прослойки перлита (в плоскости шлифа — его полосы), протяженность которых в направлении течения металла при низкотемпературной прокатке заметно превосходит таковую, рассчитанную с учетом параметров возможной деформации аустенитных зерен. Исходя из предложенной гипотезы, можно объяснить значительное возрастание степени развития структурной полосчатости при понижении температуры прокатки в чистовой клетке стана.

Таким образом, при выборе технологических режимов контролируемой прокатки листов из строительных сталей повышенной и высокой прочности необходимо учитывать не только достигаемый общий уровень свойств металла, но и допустимую степень их анизотропии в готовых изделиях, вызванной возникновением структурной неоднородности. Основной причиной усиления степени развития структурной полосчатости металла листов после низкотемпературной прокатки является наличие в структуре стали перед началом перлитного превращения сильно вытянутых в направлении течения металла остатков нерекристаллизованных аустенитных зерен.

Список литературы

1. Баранов А.А., Минаев А.А., Геллер А.Л., Горбатенко В.П. Проблемы совмещения горячей деформации и термической обработки стали. — М.: Металлургия, 1985. — 128 с.
2. Погоржельский В.И., Литвиненко Д.А., Матросов Ю.И., Иваницкий А.В. Контролируемая прокатка. — М.: Металлургия, 1979. — 184 с.
3. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. Сталь для магистральных газопроводов. — М.: Металлургия, 1989. — 289 с.
4. Оценка анизотропии механических свойств и трещиностойкости листов и труб большого диаметра / В.М. Дорохин, В.П. Горбатенко, Ю.Д. Морозов и др. // Сталь, 2001. — № 1. — С. 65–69.
5. Влияние параметров нагрева непрерывнолитых слябов при контролируемой прокатке листов на структуру и свойства высокопрочной трубной стали / В.П. Горбатенко, В.М. Дорохин, В.В. Бурховецкий и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002. — № 10. — С. 70–74.

© Горбатенко В.П., 2004

КРАВЦОВ В.В., ШЕЛУДЧЕНКО В.И., БИРЮКОВ А.Б., МИТИН А.В. (ДОННТУ)

АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОРОЧКЕ ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА

Углубленное изучение напряженно-деформированного состояния формирующихся непрерывнолитых заготовок является необходимой ступенью на пути повышения их качества. Знания, полученные в результате этих исследований, должны быть использованы при отработке технологических режимов МНЛЗ.

В условиях жесткой конкуренции на рынках металлопродуктов, металлургические предприятия вынуждены постоянно повышать качество своей продукции. В случае непрерывнолитых заготовок это соображение усиливается еще и тем, что дальнейшее повышение производительности МНЛЗ невозможно без решения комплекса проблем, связанных с качеством. В данной работе произведено исследование термических напряжений в корочке непрерывного слитка.

В работе [1], посвященной этому же вопросу, было приведено интегро-дифференциальное уравнение, описывающее термические напряжения как функцию толщины корочки и координаты. Однако это уравнение является одномерным и потому может быть использовано только для описания напряжений в корочке слябовых заготовок с соотношением граней большим 3:1.

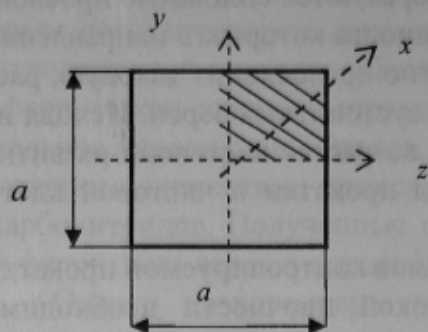


Рис. 1. Схема геометрических условий для решения задачи о напряженном состоянии слитка

В сортаменте заготовок, отливаемых сегодня, значительную долю занимают блюмовые заготовки, для описания процессов в которых необходимо использовать двухмерные дифференциальные уравнения. В случае симметричности полей исследуемых величин целесообразно выполнять решение только для четверти слитка, как это показано на рисунке 1.

На основании предположений о равновесии оболочки, сделанных в работе [1], можно заключить, что компоненты напряжений не меняются вдоль одноименных осей. Для определения напряжений, действующих вдоль оси OY, необходимо решать задачу вдоль оси OZ, и, наоборот.

Задача решается для области затвердевшей стали, определяемой следующими условиями:

$$y_{mv}(z, x) \leq y \leq a/2, z_{mv}(y, x) \leq z \leq a/2, 0 \leq x \leq L_{жс}; \quad (1)$$

$$0 \leq y \leq a/2, 0 \leq z \leq a/2, L_{жс} \leq x \leq L, \quad (2)$$

где $a/2$ — полуширина слитка; $L_{ж}, L$ — длина жидкой лунки и расстояние от мениска до газорезки; $y_{mv}(z, x), z_{mv}(y, x)$ — совокупность всех точек, принадлежащих поверхности раздела между твердой и двухфазной зонами.

Основываясь на данных работы [1] была сконструирована система интегро-дифференциальных уравнений, описывающая напряженное состояние формирующейся блюмовой заготовки.

$$\phi(y, \omega_y)_k = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \int_y^{\omega_y} d\omega_y \cdot \exp\left[-\frac{1 + \mu}{3 \cdot \tau^* \cdot (1 - \mu)} \cdot (\tau(\omega) - \tau'(\omega))\right] \cdot \left(-\frac{\partial \delta T}{\partial \omega_y} + \frac{1}{\omega_y} \cdot \int_y^{\omega_y} \frac{\partial \delta T}{\partial \omega_y} dy\right); \quad (3)$$

$$\phi(z, \omega_z)_j = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \int_z^{\omega_z} d\omega_z \cdot \exp\left[-\frac{1 + \mu}{3 \cdot \tau^* \cdot (1 - \mu)} \cdot (\tau(\omega) - \tau'(\omega))\right] \cdot \left(-\frac{\partial \delta T}{\partial \omega_z} + \frac{1}{\omega_z} \cdot \int_z^{\omega_z} \frac{\partial \delta T}{\partial \omega_z} dz\right), \quad (4)$$

где j, k — осевые индексы вдоль осей OY и OZ соответственно; ω_y, ω_z — толщина корочки вдоль осей OY и OZ соответственно; $\phi(y, \omega_y), \phi(z, \omega_z)$ — функции, описывающие напряженное состояние корочки слитка, причем $\phi(y, \omega_y) = \sigma_{zz}, \phi(z, \omega_z) = \sigma_{yy}$; E — модуль упругости, МПа; α — коэффициент линейного расширения, K^{-1} ; μ — коэффициент Пуассона; $\delta T = T - T_{пов}$ — избыточная температура, К; τ^* — время релаксации, с; $\tau(\omega), \tau'(\omega)$ — некоторый исследуемый момент времени в который толщина корочки составила ω и момент времени когда толщина корочки была $\omega - \Delta\omega$, с.

Решение системы интегро-дифференциальных уравнений производилось при помощи метода Симпсона с разбиением расчетных интервалов $y - \omega_y$ и $z - \omega_z$ на

$\frac{\omega_y}{\Delta y}$ и $\frac{\omega_z}{\Delta z}$ слоев соответственно, где Δy и Δz — шаги сетки вдоль осей OY и OZ соответственно.

Система интегро-дифференциальных уравнений в общем случае решается численным методом. При некоторых упрощениях в постановке задачи удастся получить решение в замкнутой форме. Уравнение (3) решается для каждого вертикального ряда узлов сетки, а уравнение (4) для каждого горизонтального ряда. Причем система урав-

нений (3)–(4) решается совместно с дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_3}{\rho c_3} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right). \quad (5)$$

Учет выделения тепла фазового перехода в этом уравнении производится за счет введения величины эффективной теплоемкости c_3 . Это уравнение решается при помощи численных методов. Его решение детально рассмотрено в работах [3], [4]. В данной работе решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности выполнено при помощи метода прогонки для конечно разностного аналога этого уравнения, составленного по неявной схеме. На основании решения уравнения (5) были определены поле температур в непрерывном слитке и толщина твердой корочки вдоль осей OY и OZ для любого исследуемого сечения.

Таким образом, для каждого узла сетки будет найдено две компоненты напряжений σ_{yy} и σ_{zz} . Совокупность компонентов напряжений для каждого из узлов сетки представляет собой векторное поле, анализируя которое можно судить о напряженно-деформированном состоянии слитка в целом.

Для первых инвариантов тензоров деформаций и напряжений предполагается наличие зависимости, соответствующей упругому поведению материала [1]:

$$\sigma = \frac{E}{1 - 2\mu} \cdot (\varepsilon - \alpha \cdot \delta T), \quad (6)$$

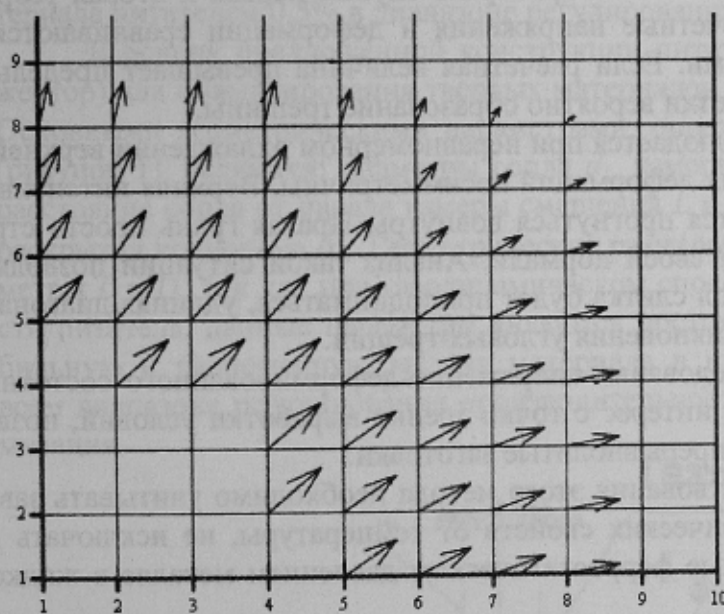


Рис. 2. Векторное поле деформаций для случая равномерного охлаждения слитка

где σ, ε — первые инварианты тензоров напряжений и деформаций.

Эта зависимость позволит рассчитать двухмерное поле деформаций на основании поля напряжений.

В рамках данной работы было проведено два численных эксперимента по определению поля деформаций в слитке для разных условий охлаждения. Это исследование было направлено на качественное сравнение полученной информации с целью выяснения механизма зарождения дефектов, связанных с неравномерным охлаждением граней непрерывного слитка.

Расчеты проводились для следующих исходных данных:

— для исследования выбрана стальная блюмовая заготовка сечением 100x100 мм;

— $E = 4 \cdot 10^{10}$ МПа, $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/К, $\mu = 0,5$ (расчет основан на допущении, что механические свойства стали не зависят от температуры);

— на выходе из кристаллизатора в первом случае слиток равномерно охлаждается при $\alpha_{в} = \alpha_{п} = 500$ Вт/(м²К), а во втором случае верхняя грань слитка подвергается охлаждению при $\alpha_{в} = 500$ Вт/(м²К), а правая при $\alpha_{п} = 50$ Вт/(м²К);

— векторные поля деформаций для обоих случаев охлаждения рассчитаны на расстоянии 4,5 метра от мениска.

Результаты расчетов показаны на рисунках 2 и 3.

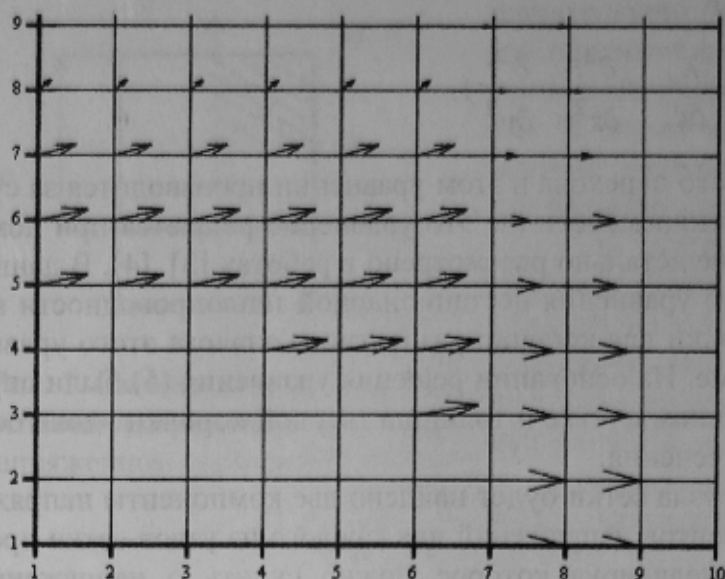


Рис. 3. Векторное поле деформаций для случая неравномерного охлаждения слитка

Информация, представленная на рисунке 2, соответствует случаю равномерного охлаждения слитка. Несложно убедиться, что поля деформаций вблизи верхней и правой граней симметричны относительно диагонали, соединяющей середину слитка и его верхний правый угол. Отчетливо видно, что грани слитка стремятся прогнуться вовнутрь. Это говорит об их интенсивном охлаждении. Необходимо отметить тот факт, что при очень интенсивном охлаждении боковых граней возможно образование угловых трещин, лежащих на диагонали слитка в области контакта изгибающихся участков двух граней. Возможность растрескивания целесообразно проверять при помощи критериев трещинообразования, приведенных в

работах [2], [4]. Основой определения этих критериев служат первая и вторая теории прочности, согласно которым расчетные напряжения и деформации сравниваются с предельно допустимыми значениями. Если расчетная величина превышает предельно допустимую, то для данного узла сетки вероятно образование трещины.

Совсем другая ситуация наблюдается при неравномерном охлаждении верхней и правой граней слитка (рис. 3). Поля деформаций несимметричны. Верхняя интенсивно охлаждаемая грань слитка стремится прогнуться вовнутрь. Правая грань просто стремится расширяться в направлении своей нормали. Анализ такой ситуации позволяет заключить, что правый верхний угол слитка будет приподниматься, удлиняя диагональ слитка и создавая вероятность возникновения угловых трещин.

Предложенный способ исследования напряженно-деформированного состояния слитка представляет значительный интерес с точки зрения выработки условий, позволяющих получать бездефектные непрерывнолитые заготовки.

Для дальнейшего совершенствования этого метода необходимо учитывать зависимость механических и теплофизических свойств от температуры, не исключать из рассмотрения напряжения вызванные ферростатическим давлением металла в жидкой лунке и усадкой.

Список литературы

1. Самойлович Ю.А., Кабаков З.К. «Горение, теплообмен и нагрев металла». — М.: «Металлургия», 1973 (ВНИИМТ. Сб. № 24), С. 100–113.
2. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев и др. — М.: Metallurgy, 1971. — 296 с.
3. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. Емельянов В.А. Учебн. пособие для вузов. — М.: Metallurgy, 1988. — 143 с.
4. Дюдкин Д.А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. — К.: Тэхника, 1988. — 253 с.

© Кравцов В.В., Шелудченко В.И., Бирюков А.Б., Митин А.В., 2004