

Расчет деформирования затвердевающей непрерывнолитой заготовки под действием внутреннего ферростатического давления

С.Х. Аль–Згуль

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

Аннотация: Статья посвящена изучению теплообмена и затвердевания слитка в зоне вторичного охлаждения (далее ЗВО) в машине для непрерывного литья заготовок (далее МНЛЗ). Решена задача по определению напряженно–деформированного состояния слитка, с учетом непрерывно изменяющегося температурного поля внутри него с целью предотвращения процесса выпучивания слитка посредством установки роликов в местах возникновения наибольших перемещений и деформаций и как следствие уменьшения длины роликовой секции. Поставленная цель достигается за счет разработки методики расчета напряженно–деформированного состояния слитка в МНЛЗ решением температурной задачи, наиболее рационального выбора модели аппроксимации экспериментальных данных, а также выбора конечного элемента на основе Лагранжева описания движения сплошной среды и сравнения результатов расчета для нескольких выбранных сечений.

Ключевые слова: МНЛЗ, слиток, затвердевание в ЗВО, ролики, теплообмен.

В процессе направленного движения металла в МНЛЗ, после его выхода из кристаллизатора существует риск раздутия затвердевающего слитка, приводящий к образованию дефектов внутренней структуры материала и искажению заданной формы. Для решения этой проблемы в ЗВО устанавливается роликовая секция, способная работать при больших температурах и в агрессивных средах, поддерживая заготовки в процессе ее движения вдоль технологической оси МНЛЗ. Так как ролики представляют собой дорогостоящий расходный материал, в целях снижения стоимости обслуживания МНЛЗ было принято решение по ограничению длины роликовой секции величиной, начиная с которой, раздутие слитка будет технологически допустимым.

Для решения этой задачи было выполнено численное исследование термомеханического поведения слитка в процессе его движения вдоль

технологической оси МНЛЗ, проведен анализ выпучивания слитка в результате действия внутреннего ферростатического давления [1,2].

При определении температурного состояния затвердевающей заготовки принято уравнение нестационарной теплопроводности в виде:

$$\rho c_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T), \quad (1)$$

где $c_{\text{эф}}$ – эффективная теплоемкость, характеризующая фазовый переход при кристаллизации жидкой стали; λ – коэффициент теплопроводности.

Граничное условие на поверхности заготовки реализуем в виде уравнения, связывающего температуру поверхности теплообмена с температурой окружающей среды через заданное значение коэффициента теплоотдачи:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{нов}} - T_{\text{сп}}), \quad (2)$$

где n – вектор внешних нормалей; α – коэффициент теплоотдачи, зависящий от положения рассматриваемого элемента слитка на технологической оси МНЛЗ; λ – теплопроводность; $T_{\text{нов}}$ – температура поверхности теплообмена; $T_{\text{сп}}$ – температура окружающей среды;

При описании напряженно- деформированного состояния принята модель упруго нелинейно–вязкого тела [3].

Учитывались упругие деформации ε_{ij}^e и деформации ползучести ε_{ij}^c . Тогда суммарные деформации представимы в виде:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^c, \quad (3)$$

В свою очередь, деформации ползучести выражаются через скорость деформаций ползучести

$$\varepsilon_{ij}^c = \int_0^t \xi_{ij}^c(t) dt, \quad (4)$$

где ξ_{ij}^c – скорость деформаций ползучести [10]:

$$\xi_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\xi_e^c}{\sigma_e} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0), \quad (5)$$

Для описания поведения материала была использована зависимость скорости деформаций от температуры и напряжений [3, 4]

$$\xi_e^c(\sigma_e, T) = B \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right) \sinh\left(\sigma \left(\frac{T}{D_0}\right)^m\right), \quad (6)$$

где B, D_0, T_0 – константы материала, получаемые из конкретных данных по ползучести для определенной марки стали.

В результате была решена тепловая задача в конечно-элементной постановке [5,6] и получены распределения температур для каждого момента времени. С целью иллюстрации термомеханического расчета слитка, приведены результаты расчетов для двух разных сечений.

В каждом конкретном случае была рассчитана толщина h затвердевшей корочки и конфигурация затвердевающей области. В качестве рассчитываемого образца была выбрана стандартная блюмовая заготовка с прямоугольным поперечным сечением (размерам 360×300 мм), выполненная из среднелегированной низкоуглеродистой стали. Ввиду симметрии поперечного сечения и физико-механических свойств слитка, расчет был выполнен для четверти поперечного сечения.

Результаты теплового расчета слитка показаны на рис.1.

Используя результаты температурной задачи, были получены поля интенсивности напряжений при нагружении внутренним ферростатическим давлением для этих же моментов времени (рис.2).

С учетом результатов, полученных на предыдущих этапах, был выполнен расчет величины накопленных перемещений (dh) срединной точки широкой грани блюма в процессе движения по МНЛЗ (рис.3).

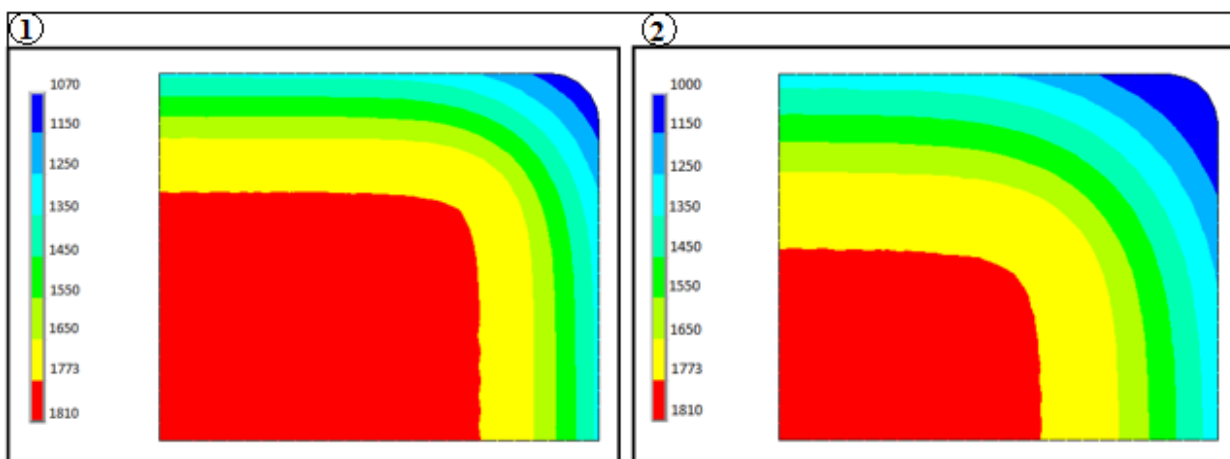


Рис. 1. – Распределение температур по сечению слитка.

- ①–температурное поле для момента времени $t = 207c$, $h = 30мм$;
②–температурное поле для момента времени $t = 400c$, $h = 46мм$;

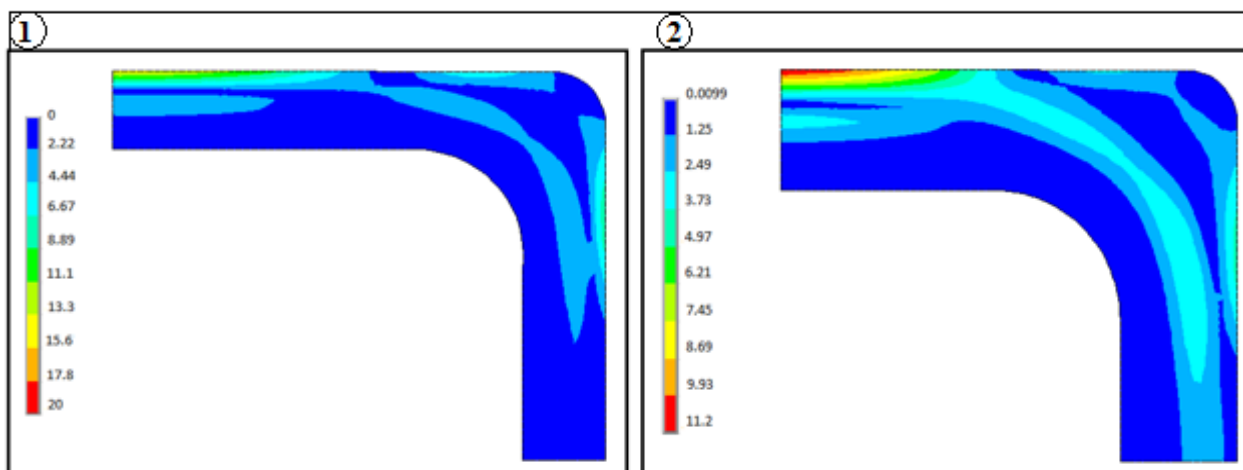


Рис. 2. – Интенсивность напряжений по сечению слитка.

- ①–распределение напряжений для момента времени $t = 207c$, $h = 30мм$;
②–распределение напряжений для момента времени $t = 400c$, $h = 46мм$;

График (рис.3) наглядно демонстрирует незначительные перемещения границ слитка уже после прохождения 6 метров по ЗВО в МНЛЗ и продолжающуюся динамику уменьшения выпучивания после 8 метров. Таким образом, можно констатировать, что на этом этапе затвердевшая часть материала достаточно прочная, чтобы выдерживать внутреннее ферростатическое давление жидкой фазы материала [6 – 9].

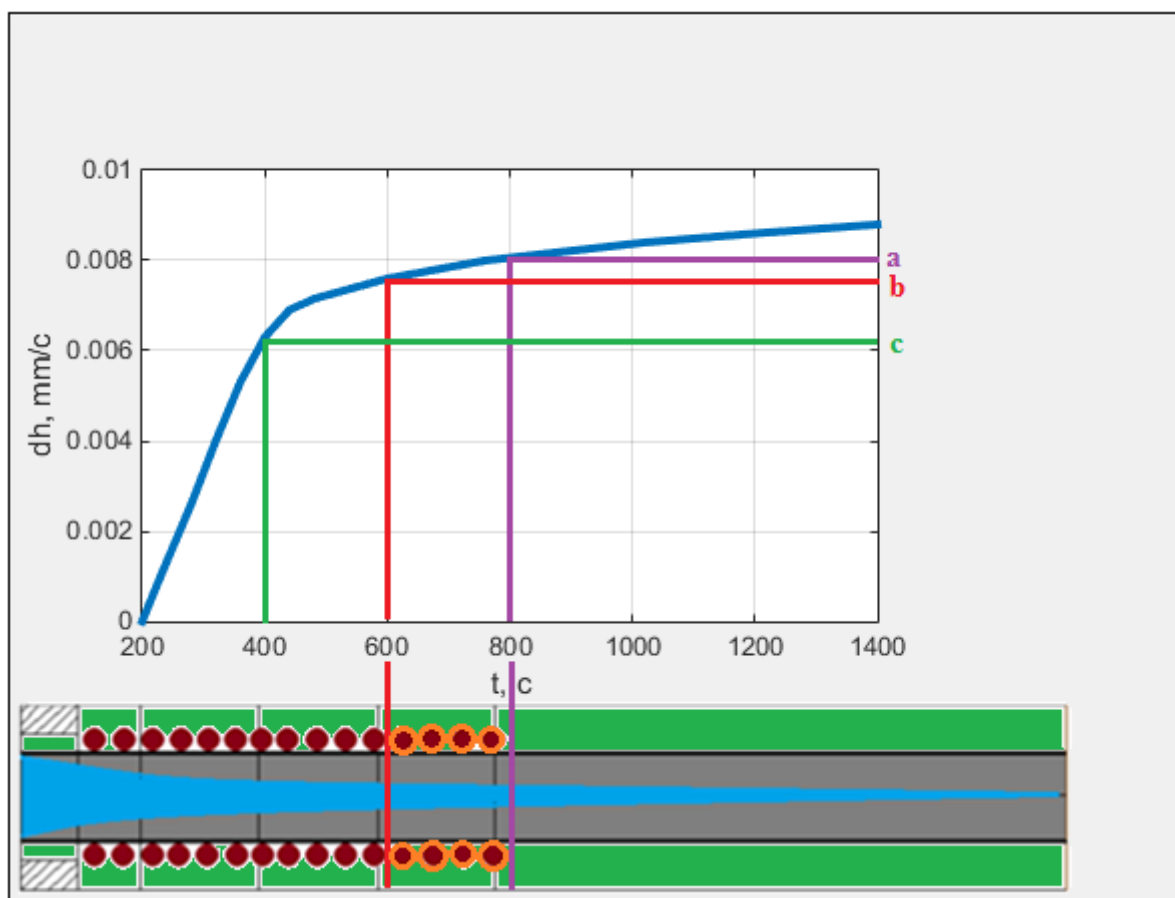


Рис. 3. – Установка роликов в зависимости от величины накопленного перемещения.

Анализируя построенный график (рис.3), можно судить о динамике величины раздутия слитка [10] в каждый момент времени прохождения заготовки по ЗВО. Область на графике выше горизонтальной линии *a* – позволяет судить о накопленных перемещениях слитка после истечения 800 секунд с момента выхода слитка из кристаллизатора; область выше линии *b* – накопленные перемещения после истечения 600 секунд; горизонтальная линия *c* – это граница, позволяющая оценивать накопленные перемещения слитка после истечения 400 секунд.

Использование полученных графических зависимостей позволяет, при наличии допуска на искажение профиля, определять технически обоснованную длину зоны удержания (зоны поддержки роликовой секции

для оболочки слитка), что позволит добиться значительной экономии материальных и трудовых ресурсов в процессе эксплуатации МНЛЗ.

Литература

1. Паршин Л.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: ОАО "НЛМК", 2011. 221 с.
 2. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1998.143с.
 3. Данилов В.Л., Зарубин С.В. Анализ деформирования и степени поврежденности плоского непрерывного слитка // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1985. №1. С. 97-102.
 4. Danilov, L.V., Zarubin V.S. Numerical Modeling of Fracture Front Motion in a Solidifying Body. Mechanics of Solids, Vol. 29, No. 1, 1994, pp. 70-75.
 5. Kung, E.Y. and J.C. Pollock, A mathematical model of heat transfer in continuous casting. SIMULATION, Vol. 10, No. 1, 1998, pp. 29-36.
 6. Soliman J.I., Fakhroo E.A. Finite element solution of heat transmission in steel ingots. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 1, No. 14, 1972, pp. 19–24
 7. Morgan K., Lewis R. W., Seetharamu K. N. Modelling heat flow and thermal stress in ingot casting. SIMULATION, Vol.2, No. 36, 1981. pp. 55–63.
 8. Кривонос В.А., Митин А.С. Наблюдаемость и управляемость системы стабилизации уровней расплавленного металла на МНЛЗ. //Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1831.
 9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 3 изд. М: Юрайт, 2018. 402 с.
 10. Смирнов Р.В, Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в энергосберегающих установках. // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.
-

References

1. Parshin L.M., Bulanov L.V. Nepreryvnaya razlivka stali. [Continuous casting of steel]. Lipeck: OAO "NLMK", 2011. 221 p.
2. Emel'yanov V.A. Teplovaya rabota mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok. [Thermal operation of continuous casting machines.] M.: Metallurgiya, 1998.143p.
3. Danilov V.L., Zarubin S.V. Izvestiya VUZov. Mashinostroenie. 1985. №1. pp. 97-102.
4. Danilov, L.V., Zarubin V.S. Numerical Modeling of Fracture Front Motion in a Solidifying Body. Mechanics of Solids, Vol. 29, № 1, 1994, pp. 70-75.
5. Kung, E.Y. and J.C. Pollock, A mathematical model of heat transfer in continuous casting. SIMULATION, Vol. 10, № 1, 1998, pp. 29-36.
6. Soliman J.I., Fakhroo E.A. Finite element solution of heat transmission in steel ingots. Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 1, № 14, 1972, pp. 19–24
7. Morgan K., Lewis R. W., Seetharamu K. N. Modelling heat flow and thermal stress in ingot casting. SIMULATION, Vol.2, № 36, 1981. pp. 55–63.
8. Krivonosov V.A., Mitin A.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1831.
9. Malinin N.N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. [The applied creep theory] 3 izd. M: Yurajt, 2018. 402 p.
10. R.V. Smirnov., Bahvalov YU.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782.