

НАПРЯЖЕНИЯ В НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКЕ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ

А.С. Нурадинов, Л.Х.-А. Саипова, Э.М. Балатханова, А.Н.Тепсаев

Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия

Качество заготовок непрерывного литья в значительной мере определяется не только конструкцией кристаллизатора, но и температурой разливаемой стали, а неравномерный теплоотвод от затвердевающей заготовки вызывает неодинаковое распределение температур в твердой корочке и различные деформационные свойства металла по высоте и поперечному сечению заготовки. Это приводит к развитию многочисленных поверхностных и внутренних дефектов, снижающих механические свойства литого металла, и сокращение срока службы металлоизделий из них.

Многие авторы связывают появление трещин в непрерывнолитой заготовке с ее напряженно-деформированным состоянием. Структура металла формируется в двухфазной зоне, которая представляет собой гетерогенную зону из растущих кристаллов с окружающим расплавом. С одной стороны двухфазная зона ограничивается твердой фазой, через которую происходит перенос тепла на молекулярном уровне (теплопроводностью), протекают диффузионные процессы, снижающие химическую неоднородность. С другой стороны она ограничена столбом жидкой стали, который оказывает ферростатическое давление. Затвердевающий объем в процессе формирования твердой оболочки, охлаждаясь, испытывает напряжения усадки. Закристаллизовавшиеся ранее внешние слои препятствуют усадке. В процессе выделения внутренней теплоты кристаллизации внешние слои разогреваются и расширяются, препятствуя усадке внутренних слоев. Таким образом,

внутренние слои испытывают напряжения сжатия, а внешние - соответственно напряжения расширения, под давлением которых оболочка сжимается и расширяется.

Однако кроме ферростатического давления жидкой стали и неравномерности распределения температурного поля, полужатвердевшая заготовка в МНЛЗ подвергается действию различных механических нагрузок, которые могут быть вызваны трением в кристаллизаторе, обжатием валков, несовпадением осей различных частей машины, а также возникших при разгibe и правке. К образованию трещин может привести любое из перечисленных условий.

Наибольший интерес с точки зрения причин образования трещин представляют главные параметры, влияющие на их возникновение - прочность, деформационная способность и скорость деформации металла при температурах затвердевания стали [1]. Необходимо, чтобы вследствие усадки стали, температурных напряжений и ферростатического давления суммарные напряжения, деформационная способность и скорость деформации не превышали их критических значений, при которых наступает разрыв металла [2].

Величины напряжений и деформаций, возникающих в оболочке заготовки, зависят от ее температуры, марки стали и других факторов. При значительных силах трения оболочка заготовки, находящаяся в кристаллизаторе, деформируется и даже может разрушиться, так как прочность ее при температурах, близких к температуре кристаллизации, сравнительно мала. Следствием деформации могут быть прорывы металла. В большинстве случаев они происходят на выходе из кристаллизатора, но зарождаются в результате предшествующего разрыва оболочки слитка в верхней части кристаллизатора.

Действующие в твердой оболочке заготовки растягивающие и сжимающие напряжения принимают различные значения в различных точках сечения твердой оболочки. Огромное влияние на возникновение и распределение

напряжений в твердой оболочке оказывает равномерность продвижения фронта кристаллизации по направлению к технологической оси МНЛЗ. Неравномерность продвижения фронта кристаллизации обусловлена, прежде всего, разной скоростью кристаллизации отдельных участков, обусловленной, в том числе, неравномерным теплоотводом от поверхности. При наличии растягивающих напряжений в корке неравномерной толщины, в наиболее тонкой и нагретой части, концентрируется деформация, возникает изгибающий момент, стремящийся выгнуть эту часть оболочки внутрь корочки. При этом возможно открытие трещин в плоскости, перпендикулярной направлению продвижения фронта затвердевания, то есть в плоскости действия растягивающего напряжения.

Соответственно, основными видами напряжений, возникающих по толщине широких граней оболочки слитка при его затвердевании, являются: термические напряжения; растягивающие напряжения от действия ферростатического давления на узкие грани; напряжения от сил трения, обусловленные ферростатическим давлением на широкую грань при наличии перемещений оболочки вследствие ее усадки и при движении слитка относительно кристаллизатора; напряжения от момента изгиба оболочки на участках, прилегающих к углам.

Деформация металла весьма существенно влияет на допустимые напряжения в затвердевшей стали. В результате обработки экспериментальных данных предложены формулы для определения допустимого предела прочности в зависимости от температуры поверхности заготовки и температуры плавления заданной марки стали [3]:

$$\sigma_{кр.} = \sigma_m \cdot \exp^{\beta \left(1 - \frac{T_{нл.}}{T_{нов.}} \right)}, \quad (1)$$

где σ_m - напряжение вблизи температуры солидуса стали, равное по экспериментальным данным 7,5 - 8,0 МПа; $T_{нл.}$ - температура плавления стали; $T_{нов.}$ - температура поверхности непрерывного слитка; β - экспериментальный коэффициент, равный 6,88.

При температуре, близкой к солидусу, значение допустимой деформации может быть определено по эмпирической формуле [3]:

$$\varepsilon_{кр.} \approx 2,0 \cdot \tau^{-0,55}, \quad (2)$$

где τ - продолжительность затвердевания корочки.

Склонность к образованию трещин зависит от соотношения деформационной способности и прочностных свойств затвердевающей стали. Трещины всегда возникают в том случае, если прочность металла σ , относительная деформация ε и скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ определенного участка затвердевшего металла выше допустимых, т.е. когда выполняются хотя бы одно из следующих неравенств [3]:

$$\begin{aligned} \sigma > \sigma_{кр}; \quad \varepsilon > \varepsilon_{кр}; \quad \dot{\varepsilon} > \dot{\varepsilon}_{кр}; \\ \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot l}{l} = \alpha \cdot \Delta T; \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{\tau}; \quad \sigma = \varepsilon \cdot E \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ε - деформация; $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации; Δl - усадка рассматриваемого участка заготовки; l - протяженность участка заготовки; α - коэффициент усадки стали; ΔT - перепад температур на рассматриваемом участке; τ - продолжительность охлаждения этого участка; σ , $\sigma_{кр}$ - прочность и критическая прочность при высоких температурах стали; E - модуль упругости стали.

Таким образом, термонапряженное состояние корочки затвердевающей заготовки определяется прочностными и пластичными свойствами стали при высоких температурах, усадкой стали и образованием зазора между оболочкой заготовки и стенкой кристаллизатора, интенсивностью теплового потока и напряжениями в оболочке формирующейся заготовки после образования зазора.

Так как причиной возникновения термических напряжений считается только неравномерность температурного поля, то предполагается, что прочие воздействия на оболочку слитка (ферростатическое давление, усилия изгиба, вытягивания и пр.)

можно исследовать отдельно с использованием принципа суперпозиции. Однозначного решения вопроса о степени влияния различных факторов на макроструктуру и качество поверхности непрерывнолитых заготовок по отдельным видам дефектов в многочисленных литературных источниках нет, так как каждая МНЛЗ представляет собой сложный агрегат со своей спецификой как в технологии разлива металла и конструкции зоны вторичного охлаждения, так и в обслуживании. В связи с этим совершенствование технологии непрерывной разлива идет в направлении создания моделей, описывающих технологические процессы с учетом большого числа технологических и конструктивных факторов [4].

В машине непрерывного литья твердая корка слитка формируется при высоких температурах достаточно медленно. Время формирования слитка велико по сравнению со временем релаксации напряжений. Сами приращения температурных напряжений в растущей корке слитка от изменения температурного поля при предельном переходе от одного момента времени к другому релаксируют практически мгновенно. Поэтому термонапряженное состояние корки слитка в процессе его затвердевания безынерционно соответствует температурному полю в данный момент времени [5].

В области моделирования термонапряжений и термодформаций в настоящее время не существует единого подхода. Так в работе [6] рассматривается упругое приближение, в [7, 8] решается упруго-пластическая задача, в [9-11] используются модели вязкоупругого поведения материала. Существует также большое число различных постановок задач в рамках указанных основных подходов. Различия результатов в различных моделях зачастую весьма велики. Как показано в [11], напряжения на ранних этапах затвердевания стального слитка в кристаллизаторах машин непрерывного литья, рассчитанные по упругой модели, на два порядка выше напряжений, найденных по вязкоупругой модели. В то же время проведенные в [8] оценки

времен релаксации напряжений указывают на возможность пренебрежения в этом случае вязкими эффектами. Ситуация еще более усугубляется отсутствием надежных данных о механических свойствах материалов при высоких температурах.

Как отмечается в [10, 11], в настоящее время наиболее широко используются два основных подхода к расчету термонапряжений в непрерывнолитом слитке, основанные на моделях упругопластического и вязкоупругого поведения материала.

При построении математической модели для расчета термических напряжений и деформаций учитывали, что формирование напряженного состояния происходит в условиях изменения толщины корки затвердевшего металла во времени, сложного характера теплообмена и т.д., т.е. в условиях сложного нагружения. Расчет напряжений и деформаций при наличии вязких и пластических эффектов требует в этом случае учета истории нагружения. Последнее достаточно полно можно осуществить только в рамках теории течения [12], в соответствии с которой процесс разбивался на последовательные этапы и задача решалась в приращениях напряжений и деформаций для поэтапного изменения нагружения.

В рассматриваемом случае затвердевшую часть слитка можно рассматривать как неограниченную вдоль координат x и z пластину переменной во времени толщины h , определяемой текущим положением изотермы солидуса ($T_{сол.}$), которое находится из решения тепловой задачи (ось x направлена вдоль пластины, ось z – по высоте, ось y – поперек в направлении действия градиента температур).

Пренебрегая внешними механическими нагрузками по сравнению с термическими и учитывая, что температура пластины зависит лишь от координаты x в соответствии с [12] для любого n -го этапа нагружения, запишем:

$$\Delta\sigma_y^n(x) = \Delta\sigma_z^n(x); \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_x^n = \Delta\sigma_{xy}^n = \Delta\sigma_{xz}^n = \Delta\sigma_{yz}^n = 0. \quad (5)$$

Тогда уравнения равновесия при условиях (4) и (5) выполняются тождественно, а уравнения совместности деформаций приобретают форму:

$$\frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_y^n}{\partial x^2} = 0, \frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_z^n}{\partial x^2} = 0. \quad (6)$$

Соотношения, связывающие полные приращения деформаций, а также их упругие $\Delta \varepsilon^l$, пластические $\Delta \varepsilon^p$, вязкие $\Delta \varepsilon^c$ и термические $\Delta \varepsilon^T$ компоненты с приращениями напряжений, имеют вид [13] (индекс n для сокращения записи опускаем):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_x &= \Delta \varepsilon_x^l + \Delta \varepsilon_x^p + \Delta \varepsilon_x^c + \Delta \varepsilon^T \\ \Delta \varepsilon_z &= \Delta \varepsilon_y = \Delta \varepsilon_y^l + \Delta \varepsilon_y^p + \Delta \varepsilon_y^c + \Delta \varepsilon^T \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

$$\Delta \varepsilon_x^l = -\frac{2\nu}{E} \Delta \sigma_y + 2 \left(\frac{\nu \sigma_y}{E^2} \frac{dE}{dT} - \frac{\nu \sigma_y}{E} \frac{d\nu}{dT} \right) \Delta T;$$

$$\Delta \varepsilon_y^l = \frac{1-\nu}{E} \Delta \sigma_y - \left(\frac{(1-\nu) \sigma_y}{E^2} \frac{dE}{dT} - \frac{\sigma_y}{E} \frac{d\nu}{dT} \right) \Delta T$$

$$\Delta \varepsilon_x^p = (F_\sigma(\sigma_i, T) \Delta \sigma_y + F_T(\sigma_i, T) \Delta T) S_x;$$

$$\Delta \varepsilon_y^p = (F_\sigma(\sigma_i, T) \Delta \sigma_y + F_T(\sigma_i, T) \Delta T) S_y;$$

$$\Delta \varepsilon_x^c = \nu_x \Delta \tau; \Delta \varepsilon_y^c = \nu_y \Delta \tau;$$

$$\Delta \varepsilon^T = \alpha_T(T) \Delta T; F_\sigma = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right); F_T = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\beta + \frac{\sigma_i}{E} \frac{dE}{dT} \right);$$

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_y^2 + \sigma_z^2)/2}; S_x = -\frac{2}{3} \sigma_y; \frac{\sigma_y}{3}.$$

Касательный модуль E_k и коэффициент температурной податливости β зависят от температуры и интенсивности напряжений σ_i [13] и вычисляются по эмпирическим диаграммам растяжения $\sigma - \varepsilon$. Согласно теории ползучести Максвелла скорости ползучести в нашем случае имеют вид:

$$\nu_x = \frac{S_x}{2G\tau_p}; \nu_y = \frac{S_y}{2G\tau_p}, \quad (8)$$

и теории Нортонa [13]:

$$\nu_x = \frac{3}{2} B(T) \sigma_i^{m(T)-1} S_x; \nu_y = \frac{3}{2} B(T) \sigma_i^{m(T)-1}. \quad (9)$$

Учитывая то, что время релаксации в интересующем нас диапазоне является функцией температуры [13] $\tau_p(T) = 9 \cdot 10^8 \exp(-0,01147T)$ для стали, то можно аппроксимировать зависимости $B(T)$ и $m(T)$ в виде $m=5$, $\log B=0,0117(T-273)-21,69$. Решение задачи на каждом шаге осуществляется по методике [13]. Таким образом,

$$\Delta \varepsilon_z = \Delta \varepsilon_y = \varepsilon_0 + \chi_0 x. \quad (10)$$

Неопределенные константы ε_0 и χ_0 находятся из условий отсутствия внешних механических усилий и моментов:

$$\int_0^h \Delta \sigma_y dx = 0; \int_0^h x \Delta \sigma_y dx = 0. \quad (11)$$

При этом в (11) используются значения $\Delta \sigma_y$, найденные подстановкой (10) в (7):

$$\Delta \sigma_y = \frac{\varepsilon_0 + \chi_0 x - \Delta \varepsilon^T - \Delta \varepsilon^c + \left(\frac{\sigma_y (1-\nu) dE}{E^2} - \frac{\sigma_y d\nu}{E dT} - F_T S_y \right) \Delta T}{\left(\frac{1-\nu}{E} + \frac{\sigma_y^2 F_\sigma}{E} \right)}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) интегралы можно взять численно. В результате на каждом шаге нагружения из (11) получаем систему линейных алгебраических уравнений, решая которую находим ε_0 и χ_0 и далее по формуле (12) $\Delta \sigma_y$. Просуммировав полученное изменение напряжений с (12), характерных на предыдущих шагах нагружения, определяем полное напряжение на n -м этапе нагружения ($\sigma_y = \sigma_y + \Delta \sigma_y$), после чего переходим к следующему шагу.

Устойчивость решения при учете вязких эффектов $\Delta \varepsilon^c \neq 0$ обеспечивается выбором временных шагов Δt меньше характерных времен релаксации напряжений в наиболее горячих зонах слитка. Достаточно точное и устойчивое решение упругопластической задачи ($\Delta \varepsilon^c = 0$) получается при выполнении для каждой точки по толщине слитка условия $\Delta T \leq 10K$.

Вывод: На основе проведенного анализа разработано программное обеспечение оценки изменения параметров

формирования непрерывнолитой заготовки при различных режимах ее получения.

Литература

1. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
2. *Еланский Г.Н.* Разливка и кристаллизация стали. М: МГВМИ, 2010. – 192 с.
3. *Алешко П.И.* Механика жидкости и газа. – Харьков: Вища школа, 1977. – 320 с.
4. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов / Под ред. *Варгафтика Н.Б.* – М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. – М.: ИЛ, 1951. – 576 с.
6. *Гуляев А.Г., Коминов С.В., Огороков Б.Н., Бакума С.С.* Математическая модель процесса взаимодействия газовых струй с жидкой металлической ванной // Изв. ВУЗов. ЧМ. – №7. – 2000. – С. 20-22.
7. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. – М.: Наука, 1965. – Ч.1. – 640 с.
8. *Якобше Р.Я., Козлова З.Л., Кучаев А.А., Дубоделов В.И., Фарук Саддики, Касьян Г.И.* Влияние интенсивности электромагнитного перемешивания стали в кристаллизаторе МНЛЗ на структуру непрерывнолитой заготовки // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2006. – № 2. – С. 19–22.
9. *Жильцов А.В., Касьян Г.И., Кучаев А.А., Петрушенко Е.И.* Численное моделирование скорости жидкой стали в кристаллизаторе МНЛЗ при воздействии бегущего магнитного поля // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее». – 22-26 сентября 2008 года, г. Киев, Украина. – С. 131–135.
10. *Скворцов А.А., Акименко А.Д.* Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. – М.: Metallurgy. – 1988. – 143 с.
11. *Борисов Б.Т.* Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Metallurgy, 1987. – 222 с.
12. *Дымнич А.Х., Корниец И.В.* Основы теории подобия и физического моделирования. – Киев: Наш формат, 2016. – 172 с.
13. *Еронько С.П., Быковских С.В.* Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разливки стали. – Киев: Техника, 1998. – 136 с.