

Рис. 3. Влияние бора на отношение σ_T/σ_B для стали 08кп: \circ — в горячекатаном состоянии; \bullet — после старения

ных дефектов проката. При модифицировании кипящей стали бором наблюдается более равномерное распределение элементов, как в микрообъемах, так и по всему объему слитка. Кроме того, микролегирование кипящей стали бором обеспечивает повышение пластичности стали и придает ей иммунитет против старения.

Список литературы

1. Маняк Н.А., Шлемко С.В., Крикунов Б.П. Сталь с регламентированным микросоставом. — Донецк: Донбасс, 1995. — 166 с.
2. Морозов А.Н. Водород и азот в стали. — М.: Металлургия, 1968. — 283 с.

© Маняк Н.А., 2002

ГРИДИН С.В. (ДонНТУ), БЕЛОУСОВ В.В. (ДОННУ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ЛИТЬЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Предложена математическая модель и методика численного расчета гидродинамических и температурных полей в период формирования центробежнолитых биметаллических заготовок (ЦБЛЗ) и разработано программное обеспечение для комплексного численного исследования указанных процессов.

Технологические особенности центробежного литья (ЦБЛ) открывают такие преимущества, как отливка полых крупногабаритных стальных слитков без применения стержней, отливка двухслойных и многослойных изделий, динамическое воздействие на процесс кристаллизации и кристаллическую структуру отливок, покрытие по-

верхности форм сыпучим теплоизолирующим материалом и т.д. Кроме того, по экономии металла, трудозатратам, сокращению капиталовложений и длительности цикла производства ЦБЛЗ превосходят поковки.

К недостаткам способа ЦБЛ можно отнести следующее [1–4]: формы центробежно-литейных машин должны иметь повышенную прочность и герметичность ввиду повышенного давления металла; требуется точная дозировка заливаемого металла для получения правильного размера внутреннего отверстия отливки; усиливается ликвация компонентов сплава по плотности. Поэтому для дальнейшего повышения качества изделий, получаемых методом ЦБЛ, необходимо глубже изучить гидродинамические и теплофизические факторы, влияющие на процесс формирования ЦБЛЗ.

Решение данной задачи невозможно без математического моделирования процесса литья, тем более что экспериментальные исследования особенностей кристаллизации металла в изложнице центробежной машины, как правило, затруднены из-за высоких температур расплава, наличия вращения, загазованности полости изложницы и других факторов. В связи с этим цель проведенных исследований состояла в разработке математической модели гидродинамических и тепломассобменных процессов при формировании ЦБЛЗ для получения данных о распределении гидродинамических и температурных полей, а также доли твердой фазы вдоль поперечного сечения заготовки. Эти данные необходимы для подбора оптимальных частоты вращения формы, расхода заливаемых металлов, времени выдержки между заливкой первого и второго металлов, толщины песчаной подсыпки и момента включения внешнего водяного охлаждения оптимальной температуры.

При моделировании процесса заливки и формирования биметаллической ЦБЛЗ за основу взят следующий физический процесс [2–6]. Во вращающуюся с постоянной угловой скоростью вокруг горизонтальной оси цилиндрическую стальную форму, внутренняя поверхность которой покрыта тонким слоем песка, свободно подается жидкий металл через отверстие в одной из торцевых крышек. В период неустановившегося движения расплава при заливке металл под действием центробежной силы, силы тяжести и кинетической энергии струи растекается по вращающейся форме и вовлекается во вращательное движение за счет сил трения металла о форму. На внутренней поверхности изложницы образуется сплошной кольцевой поток. Свободная поверхность расплава смещается книзу от оси вращения; изменяется величина давления жидкости на стенки вращающейся формы и закон распределения давления в слое; возрастают архимедовы силы. Вместе с тем, все прочие физические свойства металла, такие как плотность, вязкость, поверхностное натяжение, константы затвердевания и др. в условиях вращения остаются неизменными [3].

Вначале в изложницу подается низкоуглеродистая сталь. Теплоотвод от ее внешней поверхности осуществляется за счет воздушного охлаждения. По окончании заливки первый металл выдерживается до температуры, при которой он теряет «технологическую текучесть» ($\approx 50\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ниже температуры солидус) [7–9]. Необходимость соблюдения данного условия вызвана тем, что при более высоких температурах может произойти взаимное перемешивание металлов или наоборот, их расслоение при более низких температурах [10, 11].

Далее в изложницу заливается расплав высокоуглеродистой стали. Теплоотвод при заливке второго металла осуществляется за счет охлаждения стенок формы водой или другой жидкостью. Условия теплообмена на внешней поверхности изложницы одинаковы для всех точек поверхности, поэтому перепад температур по длине системы изложница-расплав может возникнуть только в период заполнения изложницы расплавом.

При вращении вокруг горизонтальной оси угловая скорость частиц жидкости не может быть постоянной, поскольку совместное действие силы тяжести и центробежной силы в течение каждого оборота формы изменяется по величине и направлению. Возникают пульсации угловой скорости жидкости, следовательно, нельзя считать, что жидкость находится в состоянии относительного покоя. Эти пульсации приводят к тому, что жидкость распределяется неравномерно по стенкам формы [3].

Но при обычно принятых режимах вращения полых отливок, когда центробежная сила превосходит силу тяжести в десятки раз, эффект смещения и искажения свободной поверхности ничтожен. Даже при наличии искажений этот эффект не сказывается на форме внутренней поверхности готовой отливки, которая остается строго цилиндрической без всякого смещения, поскольку нарастание слоя при вращении вокруг горизонтальной оси происходит равномерно по всей окружности независимо от формы свободной поверхности. Кроме того, поскольку изменения в условиях кристаллизации претерпевают в одинаковой степени все точки на цилиндрической стенке, то скорость нарастания слоя во всех точках одинакова и граница между твердой и жидкой фазой параллельна поверхности формы.

Исходя из вышесказанного видно, что процесс симметричен относительно горизонтальной оси. При формулировке уравнения энергии длинномерность ЦБЛЗ заставляет учитывать двумерное распределение температуры в многосвязной области: изложница — песчаная подушка — многослойная отливка [7–9]:

$$c_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_e \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $c_e = 1 - \frac{W}{c_{*} T_0} \left(\frac{\partial \xi}{\partial T} \right)$ — эффективная теплоемкость; λ_e — эффективная теплопроводность [7]; r — радиальная координата; z — продольная координата; c_{*} — теплоемкость в жидкой фазе расплава; W — скрытая теплота кристаллизации; T_0 — начальная температура расплава; ξ — доля твердой фазы, определяемая по правилу неравновесного рычага [12].

Скорость вращения отдельных слоев жидкого металла в силу вязкого взаимодействия между ними неодинакова и уменьшается по мере удаления от фронта затвердевания, где она имеет величину угловой скорости вращения изложницы. При этом металл не теряет своей жидкотекучести до тех пор, пока доля твердой фазы в нем не превышает значения 0,4–0,5.

В период заполнения верхний уровень металла подвергается механическому воздействию струи, стекающей по стенкам формы. Учет ее существенно усложняет уравнение движения и граничные условия. Поэтому необходимо дать оценку вкладам струи и центробежной силе на гидродинамические процессы в заготовке. На основании результатов исследований [7–9] установлено, что вклад центростремительной силы в несколько десятков раз больше, чем влияние заливочной струи.

Согласно критерию Gr/Re^2 [5] (Gr — критерий Грасгофа, Re — критерий Рейнольдса) был оценен вклад тепловой конвекции. Так, в неподвижной форме в период заливки величина этого критерия при составляет 0,044, т.е. преобладает тепловая конвекция, а во вращающейся форме $Gr/Re^2 = 2,95 \times 10^5$, т.е. гидродинамический фактор значительно преобладает над тепловым. Это позволило упростить гидродинамическую постановку задачи:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r V_r w)}{\partial r} + \frac{\partial (V_z w)}{\partial z} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 v_B \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_B \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (2)$$

где V_r и V_z — радиальная и горизонтальная компоненты скорости; t — время счета; r и z — радиальная и горизонтальная координаты; ν_b — коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Система уравнений (1)–(2) замыкается краевыми условиями. В начальный момент времени считаем, что температура стенок формы и песка равны температуре окружающей среды. Скорость продвижения расплава в период разлива определялась из эксперимента [8]. Зная расход металла и площадь внутренней поверхности формы, можно определить высоту уровня расплава H . На свободной поверхности расплава касательные напряжения равны нулю, поэтому справедливо следующее условие:

$$\left. \frac{\partial V_r}{\partial r} \right|_H = 0. \quad (3)$$

На фронте кристаллизации ($\xi=0,45$) угловая скорость жидконеподвижного металла V_r совпадает со скоростью вращения кокиля $V_{вр}$: $V_r|_{r1}=V_{вр}r$.

Граничные условия для температуры имеют вид:

— на торцах области:

$$\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r_2} = \alpha(T - T_B), \quad \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r_3} = \alpha(T - T_B). \quad (4)$$

— на границе расплав — песок — форма:

$$\lambda_M \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1} = \lambda_\Phi \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1}, \quad \lambda_M \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1} = \alpha_p(T_M - T_\Phi), \quad (5)$$

где $\alpha_p = \lambda_p / \delta_p$ — величина термического сопротивления песчаной прослойки; λ_p , δ_p — коэффициент теплопроводности прослойки и толщина прослойки; T_M , T_Φ , T_B — температуры металла, формы и воздуха в форме; λ_M , λ_Φ — теплопроводность металла и формы;

— на границе форма — охлаждающая система:

$$T = T_c; \quad (6)$$

— на границе уровня расплава:

$$T|_H = T_{0(0,z)}, \quad (7)$$

где T_c — температура внешней среды.

По окончанию разлива наступает этап формирования отливки, на котором реализуется вышеописанная модель, однако область активного воздействия струи отсутствует и условие имеет вид:

$$\lambda_M \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_H = \alpha_k(T - T_c), \quad (8)$$

где α_k — коэффициент конвективного теплообмена с поверхности расплава.

Для учета конвективной составляющей теплового потока при формировании отливки необходимо решение совместной задачи теплопереноса и гидродинамики движения жидкого металла, требующее больших затрат машинного времени. Поэтому применен метод эффективного учета коэффициента теплопроводности в жидкой фазе [7], в основе которого лежит предположение о пропорциональности эффективной теплопроводности λ_e теплопроводности твердой фазы λ_T [12], т.е. $\lambda_e = K\lambda_T$, где K — коэффициент пропорциональности. Для определения K разобьем процесс формирования отливки на несколько этапов.

На этапе заполнения формы металл турбулизируется и теплопередача осуществляется за счет вынужденной конвекции. Второй этап начинается после заполнения формы, когда под действием центробежных сил интенсивность турбулентных потоков падает и теплоперенос осуществляется за счет конвекции. Здесь K определяется по зависимостям [7]:

$$K=0,45(\text{Pr Re})^{0,438} \text{ при } (\text{Pr Re}) < 8600;$$

$$K=1,35(\text{Pr Re})^{1,84} \text{ при } (\text{Pr Re}) > 8600. \quad (9)$$

Выражения (1)–(9) образуют замкнутую систему уравнений, составляющую полное математическое описание задачи центробежного литья в период заливки и затвердевания ЦБЛЗ.

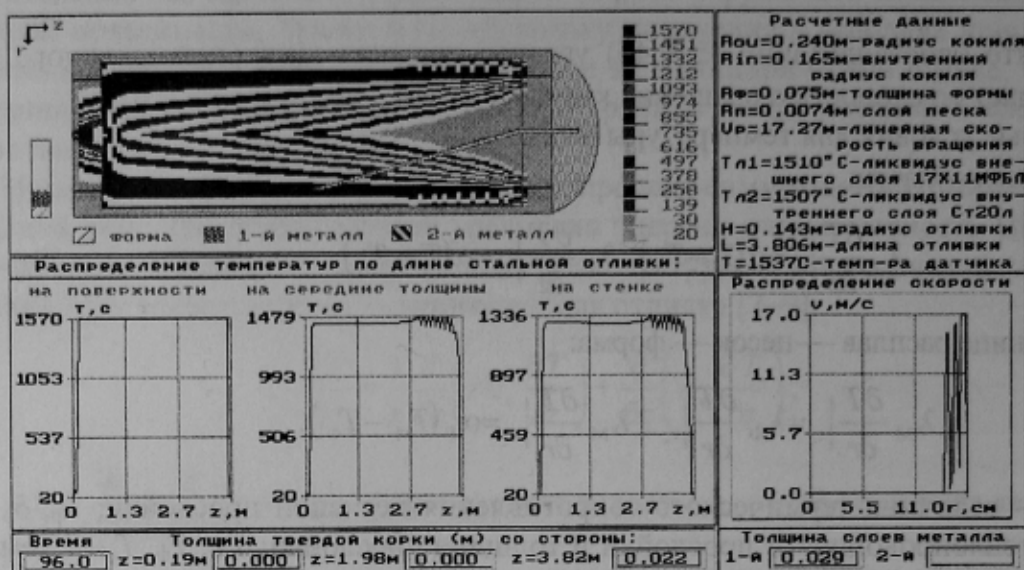


Рис. 1. Окончание заливки 1-го металла, $t=96$ с

Вычислительный эксперимент проводился для ЦБЛЗ длиной 3,806 м (рис.1–3) цилиндрической формы (толщина слоя первого металла из стали марки 20Л 0,29 м; толщина слоя второго металла из стали марки 17Х11МФБЛ 0,020 м). Кинетической энергии струи заливаемого металла при таких параметрах отливок недостаточно для равномерного растекания его вдоль формы [3]. В этом случае необходимо либо наклонять ось вращения формы, либо перемещать заливочный желоб вдоль формы во время заливки. В данной работе было предложено изменить наклон оси вращения формы за счет засыпки неравномерного слоя кварцевого песка вдоль формы. Толщина слоя песка колебалась от 7,5 мм (у заливочного желоба) до 12,5 мм (у противоположного торца формы).

В результате расчетов было получено, что оптимальное число оборотов формы составляет $n \approx 900 \div 1000$ об/мин, т.е. линейная скорость вращения $\approx 17,27$ м/с. При таких параметрах в форму поступает от 10 до 20 кг металла в секунду, и заливка первого металла осуществляется примерно за 90–100сек (рис. 1). Время выдержки между заливкой первого и второго металлов составляет $\approx 100 \div 120$ сек (рис. 2); время на заливку второго металла порядка $\approx 60 \div 70$ сек; общее время процесса от начала заливки до выемки заготовки из формы $\approx 290 \div 300$ сек (рис. 3).

Из распределения температур вдоль радиуса ЦБЛЗ (рис.2) видно, что затвердевание жидкого металла сопровождается температурным градиентом в отливке, обусловленным теплоотводом через стенки формы. Причем, если в период разлива первого металла теплоотвод незначителен, то при разливе второго металла прогрев фор-

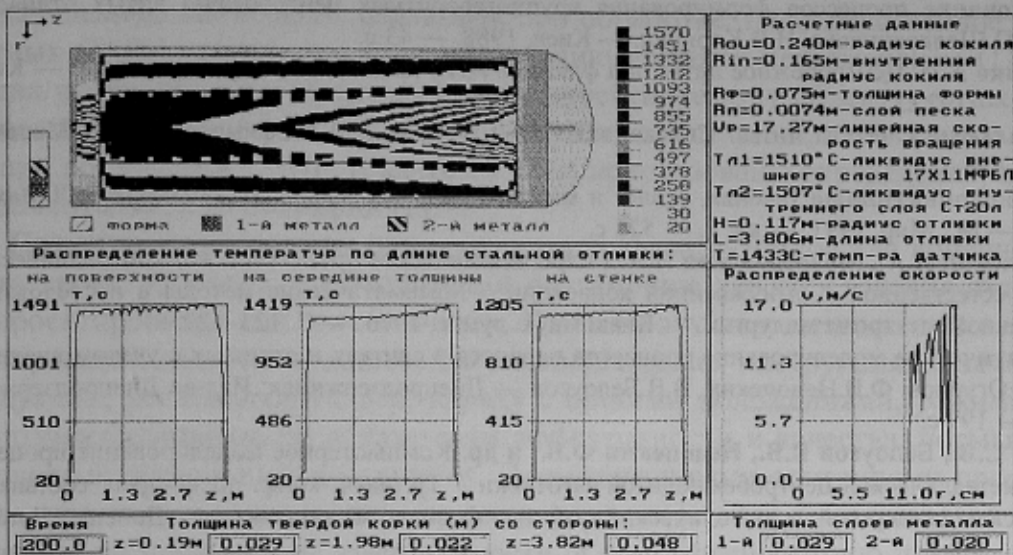


Рис. 2. Окончание заливки 2-го металла, $t=200\text{ с}$

мы увеличивается. Что касается тепловых потерь со свободной поверхности, то с прогревом воздуха они уменьшаются. Поэтому возникновение встречного фронта затвердевания осуществляется в начале процесса затвердевания, а затем его продвижение замедляется. Это подтверждается анализом кинетики затвердевания биметаллической ЦБЛЗ (рис.3).

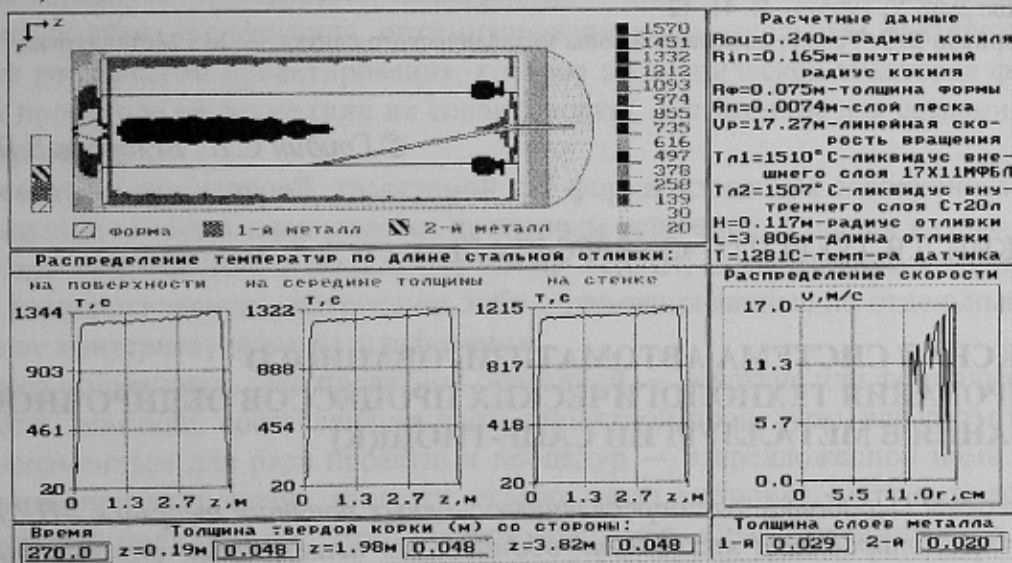


Рис. 3. Момент выемки ЦБЛЗ из формы, $t=270\text{ с}$

Таким образом, в данной работе представлены математическая модель, методика компьютерного расчета и программное обеспечение для расчета гидродинамических и температурных полей в формирующейся цилиндрической отливке ЦБЛ. В результате численного исследования получены удовлетворительные количественные оценки величин, характеризующих процесс заливки, охлаждения и затвердевания цилиндрической ЦБЛЗ. Эти данные были использованы при разработке технологических рекомендаций и методики определения оптимальных параметров технологического производства крупногабаритных биметаллических ЦБЛЗ в условиях Южного трубного завода [8].

Список литературы

1. Марченко И.К., Бровман М.Я. Производство крупных стальных слитков. — М.: Metallurgia, 1980. — 240 с.

2. Исследование процессов формирования крупногабаритных центробежно литых отливок / Н.И.Тарасевич, Л.П.Шелковникова, И.В.Корниец. — Киев, 1988. — 43 с.
3. Шевченко А.И. Центробежное литье под флюсом. АН Украины. Ин-т проблем литья. — Киев: Наук. думка, 1991. — 192 с.
4. Специальные способы литья: Справочник / Под общ. ред. В.А.Ефимова. — М.: Машиностроение, 1991. — 436 с.
5. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен // Б.Гебхард, И.Джалурия, Р.Л.Махаджан, Б.Саммакия. — М.: Мир, 1991. — кн. 1. — 528 с.
6. Волохонский Л.А., Медведовская Л.А. Гидродинамические процессы в жидкометаллической ванне в условиях естественной и вынужденной конвекции // Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1976. — С. 123–129.
7. Математическое моделирование процессов переноса в слитках и отливках с учетом внешних воздействий / А.П.Огурцов, Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов — Днепродзержинск: Изд-во Днепродзержинского ГТУ, 1997. — 199 с.
8. Гридин С.В., Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., и др. Компьютерное моделирование процесса формирования биметаллической центробежнолитой заготовки // Тр. науч. конф. проф.-преп. состава по итогам научно-исследовательской и методической работы: физика, математика. — Донецк: ДонГУ, 1995. — С. 43–44.
9. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гридин С.В. Численное исследование процесса формирования биметаллической центробежнолитой заготовки // Тр. VII Украинской конф. «Моделирование и исследование устойчивости систем». — Киев, 1996. — С. 105.
10. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гридин С.В. Анализ напряженнодеформированного состояния слитков с помощью экспертной системы «Дефект» // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1995. — № 7. — С. 57–59.
11. Гридин С.В. Расчет термонапряженного состояния центробежнолитой заготовки // Тр. науч. конф. проф.-преп. состава по итогам научно-исследовательской и методической работы: физика, математика. — Донецк: ДонГУ, 1995. — С. 41–42.
12. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. — М.: Металлургия, 1987. — 232 с.

©Гридин С.В., Белоусов В.В., 2002

СТАЛИНСКИЙ Д.В. (УКРГНТЦ «ЭНЕРГОСТАЛЬ»)

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБДИРОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ САПР-ТПОШ(К)

Приведены выработанные определения основных понятий теории САПР применительно к проектированию технологии обдирочного шлифования, описана разработанная технологическая САПР, базирующаяся на теоретических и экспериментальных исследованиях в области абразивной зачистки металлопродукции.

Разработка оптимизированной технологии обдирочного шлифования (абразивной зачистки) металлопродукции, одной из основных и наиболее распространенных отделочных операций на металлургических предприятиях, как проектная процедура, базируется на теоретических и прикладных основах данного вида механической обработки металла, детально рассмотренных в монографии [1]. Наиболее эффективным путем объединения разработанных подходов в единую методологию является построение комплексной и локальных систем автоматизированного проектирования (САПР) технологических процессов обдирочного шлифования.

Настоящая работа посвящена описанию разработанной комплексной системы.

Ввиду принципиальных различий как самих технологических процессов обдирочного шлифования и иных видов механической обработки металла, включая чисто-