

*д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
Левит М.Б.,
к.т.н. Семирягин С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО МЯГКОГО ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА

Розроблено фізичну модель яка дозволяє імітувати «м'яке» динамічне обтиснення безперервнолитого слябу з рідкою серцевиною і проведена оцінка її адекватності для моделювання технологічних параметрів процесу.

***Ключові слова:** фізичне моделювання, безперервне розливання, м'яке обтиснення, сляб.*

Разработана физическая модель позволяющая имитировать «мягкое» динамическое обжатие непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевиной и проведена оценка ее адекватности для моделирования оптимальных технологических параметров процесса.

***Ключевые слова:** физическое моделирование, непрерывная разливка, мягкое обжатие, сляб.*

На практике достаточно распространенными дефектами непрерывнолитых слябов из низколегированных марок стали являются осевая ликвация и осевая пористость.

В последнее время для подавления осевой пористости и ликвации при разливке качественных марок стали на промышленных МНЛЗ все большее применение получает метод так называемого «мягкого» механического обжатия («*soft mechanical reduction*») непрерывнолитой заготовки. Реализация процесса «мягкого» обжатия, заключающегося в создании сравнительно небольшого обжатия непрерывнолитых заготовок на стадии их неполной кристаллизации, при которой центральная часть поперечного сечения находится в жидком или в полутвердом состоянии. Это компенсирует объемную усадку стали при затвердевании, способствует значительному снижению осевой пористости, V-образной и осевой ликвации, повышению плотности металла и измельчению первичного зерна при одновременном повышении однородности кристаллической структуры [1-3].

Основными условиями для успешной реализации метода «мягкого» обжата являются:

- данные о рациональном соотношении твердой и жидкой фаз в месте приложения силы обжата в каждом конкретном случае;

- определение эффективных значений степени и динамики обжата с учетом прилагаемых сил;

- наличие системы, способной в реальном масштабе времени определять профиль затвердевания в зависимости от скорости разливки, марки стали, условий первичного и вторичного охлаждения и перегрева металла в проковше;

- наличие системы, позволяющей оперативно корректировать точку приложения сил обжата при изменении условий разливки.

Математическое описание процесса кристаллизации слитка в условиях «мягкого» обжата содержится в работах [3-6]. Однако создание адекватной математической модели, охватывающей ряд взаимосвязанных физических явлений и химических превращений, имеющих место при формировании непрерывнолитого слитка, весьма затруднительно. Это приводит к тому, что на практике не всегда реализуются выводы, сделанные на основе математического моделирования [6]. Поэтому вопрос разработки оптимальных параметров «мягкого» обжата непрерывнолитых слитков является актуальным.

Прямое изучение процессов, происходящих при затвердевании заготовки, затруднено и поэтому наиболее целесообразно применять косвенные методы исследования, основанные на моделировании. Наиболее эффективным методом исследования динамики затвердения различного рода слитков является физическое моделирование, поскольку в этом случае удастся контролировать отвод тепла от исследуемого объекта в совокупности с визуализацией основных процессов, сопровождающих наращивание твердой фазы.

Основной целью настоящей работы была разработка физической модели процесса «мягкого» обжата непрерывнолитого сляба и проверка ее адекватности.

Задача исследований на физической модели заключалась в изучении процессов, происходящих при деформации непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевиной. В опытах, проводимых на модели, предназначенной для исследования процессов затвердевания сляба, по сравнению с производственными условиями могут изменяться материалы исследования, температура, давление, масштаб агрегата или установки и другие условия (при неизменности физической сущности процесса, который исследуется).

Известно, что результаты лабораторных опытов распространяются на группу явлений, если выполняются условия, которые сформули-

рованы в третьей теореме тождества: для тождества двух процессов достаточно и необходимо, чтобы они были качественно одинаковые и их определяющие критерии попарно эквивалентны.

В работе было принято, что моделирование затвердевания целесообразно осуществлять, имитируя поперечное сечение слитка, что позволяет визуализировать процессы деформации твердой корочки во времени, а также осуществлять измерение ее толщины.

Основные параметры физической модели поперечного сечения слитка определялись в следующей последовательности:

– геометрический масштаб μ_L выбирали из условия удобства проведения экспериментов (продолжительность одного эксперимента, возможность визуальных наблюдений и др.);

– временной масштаб μ_τ определяли исходя из идентичности критерия Фурье ($Fo = idem$)

$$\mu_\tau = \frac{a_m}{a_{st}} \cdot \mu_L^2, \quad (1)$$

где a_m и a_{st} – коэффициенты теплопроводности соответственно моделирующего вещества и стали.

Так как при кристаллизации моделирующего вещества присутствует развитая двухфазная зона, то для расчета временного масштаба следует использовать эффективные значения коэффициентов теплопроводности, которые можно определить с помощью уравнения

$$a_{эф} = \lambda / \rho (C + L / \Delta T_{кр}), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м К);

ρ – плотность вещества, кг/м³;

C – средняя массовая теплоемкость вещества, кДж/(кг К);

L – теплота кристаллизации вещества, кДж/кг;

$\Delta T_{кр}$ – интервал температур затвердевания, К.

– компенсация различий в физических параметрах стали и моделирующего вещества осуществлялась путем регулирования отвода тепла, при этом соблюдалось условие тождественности произведения критерия Био (Bi) и критерия фазового перехода (N) ($BiN=idem$) [7].

Очень важным моментом при физическом моделировании «мягкого» обжата непрерывнолитого сляба является выбор рабочего (моделирующего) вещества, используемого в модели которое должно удовлетворять следующим требованиям:

– моделирующее вещество должно эффективно воспроизводить разные явления, имеющие место при мягком обжате реального непре-

рывнолитого сляба. Затвердевание корочки сляба не должно сопровождаться какими-либо дополнительными физико-химическими процессами, которые могут существенно влиять на изучаемые явления;

- формирование кристаллической структуры в моделирующем веществе и стали должно проходить по единому механизму (на микро и макро уровне);

- растущие кристаллы должны иметь морфологическую устойчивость;

- для визуального наблюдения за процессом затвердевания, массопереноса и применения оптических методов сравнительных оценок и количественных измерений вещество должно быть оптически прозрачным в жидком, и, по возможности, в твердом состоянии;

- температура кристаллизации вещества должна быть близка к комнатной температуре, что исключает необходимость применения специальных приспособлений для проведения экспериментов;

- после кристаллизации корочка заготовки должна легко обрабатываться и подвергаться исследованию на выявление особенностей макроструктуры;

- моделирующее вещество должно быть относительно легкодоступным и недорогим, а также отвечать требованиям техники безопасности (в том числе не иметь вредных для организма последствий), не требовать специальных условий хранения и сложных технологий предэкспериментальной обработки.

Для исследования теплофизических процессов и явлений формирования твердой фазы при затвердевании на практике обычно применяют два типа моделей: «горячие» и «холодные». Для холодных моделей стремятся использовать прозрачные рабочие вещества органического и неорганического происхождения. В научной литературе [7] достаточно подробно описаны опыты на нафталине, парафине, воске, салоле, тимоле, битоле, бензофеноле, циклогексаноле, гипосульфите, камфене и др. веществах.

Принято считать, что такие вещества хорошо воспроизводят конфигурацию и динамику нарастания твердой фазы, процессы теплопереноса, формирования дефектов макроструктуры, а также зарождения, роста и диспергирования кристаллов.

Наиболее универсальным из веществ, получивших распространение при моделировании процессов затвердевания в последнее время, следует считать камфен (2, метилен-бициклогептан). Это вещество оптически прозрачно в жидком и твердом состоянии, имеет низкую температуру плавления (таблица), а также не оказывает вредного воздействия на человека и не требует специальных условий хранения и сложных технологий предэкспериментальной обработки. Камфен, как и сталь,

является дендритокристаллизующимся веществом, что позволяет моделировать процессы дендритного роста кристаллов и явления, происходящие в двухфазной зоне [8].

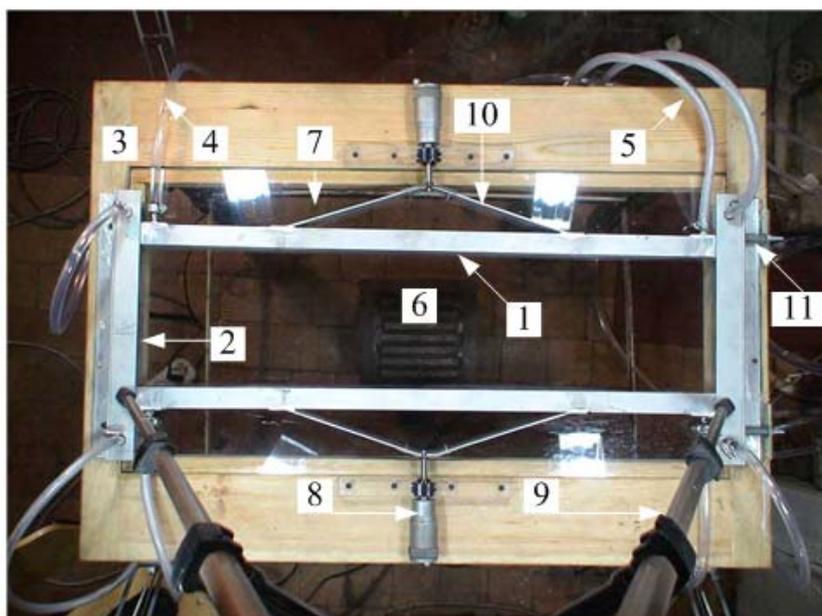
Таблица – Некоторые физические и теплофизические свойства стали и камфена

Параметр	Единицы измерения	Материал	
		Сталь углеродистая	Камфен
Температура плавления, ($t_{л}$)	$^{\circ}C$	1520	42-45
Интервал температур затвердевания ($\Delta t_{кр.}$)	$^{\circ}C$	50	2
Теплота кристаллизации (Q_o)	$кДж/кг$	267,5	40,2
Коэффициент теплопроводности (λ),	$Вт/м\cdot K$	29,1	–
		23,6	1,85
Средняя массовая теплоемкость (C),	$кДж/кг\cdot K$	0,69	2,1
		0,83	2,4
Плотность (ρ),	$кг/м^3$	7800	845
		7200	815
Коэффициент температуропроводности (α),	$м^2/с$	$6,3\cdot 10^{-6}$	–
		$4,6\cdot 10^{-6}$	$1,3\cdot 10^{-8*}$
Коэффициент линейного теплового расширения (β),	$1/K$	–	–
		$1\cdot 10^{-5}$	–
Кинематическая вязкость (ν),	$м^2/с$	–	–
		$6,3\cdot 10^{-7}$	$7,2\cdot 10^{-6}$

Примечание: в числителе – в твердом состоянии; в знаменателе – в жидком

Для моделирования метода мягкого обжатия непрерывнолитого слитка была изготовлена лабораторная установка (рисунок 1) представляющая собой поперечное сечение сляба сечением 220×700 мм. Стенки модели были изготовлены из пустотелого алюминиевого профиля сечением 25×25 мм и установлены на стекле толщиной 6 мм. Для охлаждения в каждой грани профиля были вварены патрубки для подвода и отвода охлаждающей воды \varnothing 6 мм. Для реализации обжатия конструкция модели предусматривала возможность передвижения широких граней между узкими с помощью упора и винтового механизма, который позволял задавать обжатия по одной грани до 40 мм с шагом 0,1 мм. С помощью подпружиненных упоров осуществлялось более сильное прижатие узких граней к широким и исключалось образование зазоров в углах. Для предотвращения кристаллизации моделирующего вещества на стекле использо-

вали электрическую плиту и фен для прогрева мест нежелательной кристаллизации.



- 1, 2 – широкая и узкая грани кристаллизатора; 3 – подставка;
4, 5 – шланги для подвода и отвода воды; 6 – электрическая плита;
7 – стекло; 8 – устройство для обжатия; 9 – штатив для видео камеры;
10 – упор для равномерного обжатия; 11 – подпружиненные упоры

Рисунок 1 – Установка для физического моделирования метода «мягкого» обжатия непрерывнолитого сляба

Лабораторные исследования проводили в следующей последовательности:

– подставку с помощью регулировочных винтов приваренных к ее ножкам и уровня выставляли в горизонтальное положение;

– затем монтировали каркас кристаллизатора, устанавливая его элементы на стекло и подставку с обязательным промазыванием горизонтальных зазоров силиконом для предотвращения протекания моделирующего вещества;

– после этого присоединяли к штуцерам шланги для подвода и отвода охлаждающей воды и закрепляли их с помощью хомутов. Для предотвращения протекания воды, в местах соединения, использовали специальную сантехническую паклю;

– перед заливкой камфена включали подачу воды;

– модельное вещество (камфен) разогревали на паровой бане до жидкого состояния после чего выливали его в полость модели кристал-

лизатора и начинали отсчет времени эксперимента, параллельно включая камеру для фиксации процесса кристаллизации.

Физическая модель выполнена в масштабе 1:2 по отношению к моделируемому объекту – непрерывнолитому слябу сечением 300×1500 мм. Температура заливки камфена составила $43 \pm 0,5$ °С. Среднее значение температуры воды для охлаждения стенок модели составило 18-20 °С, а расход $100 \text{ мм}^3/\text{с}$. В разработанной модели предусматривалась возможность регулирования расхода охлаждающей воды для каждой грани отдельно и измерения ее расхода с помощью расходомера. Температура воды на входе и выходе из модели измерялась с помощью ртутного термометра с точностью $\pm 0,1$ °С.

С целью предотвращения влияния теплоотвода через стекло и мениск расплава на процесс затвердевания высота модельного слоя жидкости была принята 20 мм. Процесс кристаллизации наблюдался визуально и фиксировался с помощью цифровой видеокамеры. По полученным видеофайлам осуществлялась количественная оценка кинетики затвердевания, деформации и трещинообразования в затвердевающей заготовке.

На первом этапе лабораторного эксперимента кристаллизацию моделирующего вещества осуществляли до достижения толщины затвердевшей корки 33 мм (30% твердой фазы). Такая толщина корки была достигнута за 169 мин эксперимента (рисунок 2). Т.е. скорость кристаллизации составила около 0,2 мм/мин., а коэффициент кристаллизации соответственно $2,54 \text{ мм}/\text{мин}^{0,5}$.



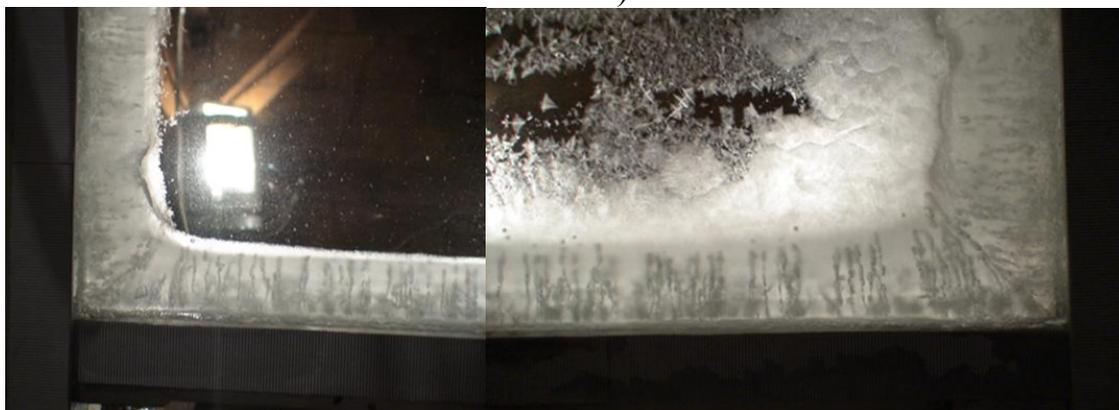
Рисунок 2 – Состояние моделирующего вещества через 169 мин от начала эксперимента

После этого осуществляли механическое обжатие оболочки слитка на глубину 5 мм для каждой грани и проводили обследования ее состоя-

ния. Деформации поверхности и трещин после такого воздействия установлено не было, что вероятно связано с частичным уплотнением твердой фазы и вытеснением жидкой фазы в вертикальной плоскости. При дополнительном обжати каждой грани на 5 мм произошло выпучивание твердой фазы в районе узких граней на высоту около 5 мм (рисунок 3), но трещин по периметру оболочки установлено не было.



а)



б)

в)

Рисунок 3 – Выпучивание оболочки слитка возле узких граней при обжати на 10 мм (а, б) и характер кристаллизации моделирующего вещества (в)

Таким образом, в результате проведенной работы разработана установка и предложена методика исследований связанных с изучением воздействия «мягкого» обжати на качество сляба. Предварительные исследования на физической модели показали ее достаточную работоспособность, а также позволили установить некоторые технические и методиче-

ские недостатки. Предложенная модель впервые позволила визуализировать процессы, сопровождающие деформацию твердой корочки заготовки при ее мягком обжатии. При доле жидкой фазы около 30% деформация сляба на 10 мм не сопровождается трещинообразованием, однако имеет место выпучивание узких граней и частичное перетекание жидкости из объемов, подвергшихся обжатию в соседние объемы заготовки.

В ходе дальнейших исследований будут внесены корректировки в конструкцию экспериментальной установки и осуществлено моделирование основных параметров процесса динамического мягкого обжатия с целью определения их оптимальных значений, а именно соотношения доли твердой и жидкой фазы в момент механического воздействия, а также величины и скорости деформации оболочки слитка.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н. *Непрерывная разливка стали* / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Бринза В.В. *Определение эффективных условий деформирования непрерывнолитых слябов с жидкой сердцевиной* / В.В. Бринза // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 68-234.
3. Смирнов Е.Н. *Развитие научных основ повышения качества сортового проката из непрерывнолитой стали и совершенствование технологии производства; дис. доктора техн. наук: 05.03.05* / Смирнов Е. Н. – Донецк, 2009. – 577 с.
4. Буланов Л.В. *Математическая модель и расчет параметров «мягкого» обжатия непрерывнолитых заготовок* / [Л.В. Буланов, Н.А. Юровский, Т.Г. Химич и др.]. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2003. – № 8. – С. 126-130.
5. Мазур И.П. *Математическая модель упругопластического деформирования непрерывного слитка с жидкой сердцевиной* / И.П. Мазур, В.В. Барышев, М.О. Седых // *Производство проката*, 2002. – № 9. – С. 2-6.
6. Борисов В.Т. *Теория двухфазной зоны металлического слитка* / В.Т. Борисов. – М.: *Металлургия*. – 1987. – 224 с.
7. Смирнов А.Н. *Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ* / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // *Процессы лития*, 2009. – №1. – С. 33-42.
8. Smirnov A. *Rhomboidity Phenomena During Solidification in the CCM Mould* / A. Smirnov, V.Ukhin // *Simulation and Modelling of Metallurgical Processes in Steel-making, Steelsim 2009*. – September 8-10, 2009, Leoben /Austria. – CD-print.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.