

**Список использованных источников:**

1. Фиге Л., Гердом К.-Х., Кайзер Х.-П., Шеффер Х. Применение зондов-активометров при раскислении алюминием сталей для глубокой вытяжки / Л. Фиге, К.-Х. Гердом, Х.-П. Кайзер, Х. Шеффер // Черные металлы. – 1984. – № 1. – С. 10-14.
2. Шооп И., Реш В., Манн Г. Применение зондов-активометров в кислородно-конвертерном производстве / И. Шооп, В. Реш, Г. Манн // Черные металлы. – 1976. – № 6-7. – С. 35-40.
3. Шооп И., Фляйге Г., Уилински Г. и др. // Черные металлы. – 1984. – № 1 – С. 20-21.
4. Свяжин А.Г., Рябов В.В., Романович Д.А и др. Использование кислородных зондов для контроля окисленности и процесса раскисления малоуглеродистой стали / А.Г. Свяжин, В.В. Рябов, Д.А. Романович и др. // Сталь. – 1996. – № 2. – С. 12-16.
5. Гальперин Г.С., Бученков А.К., Александров А.И., Болотников В.В. Исследование окисленности стали в 350-т конвертерах / Г.С. Гальперин, А.К. Бученков, А.И. Александров, В.В. Болотников // Сталь. – 1996. – № 1. – С. 28-29.
6. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические закономерности / Г. Кнюппель // Москва, Металлургия. – 1973.
7. Плюшкель В. // Черные металлы. – 1976. – № 14. – С. 14-18.
8. Герман В.И., Добромилов А.А., Саврасов А.И., Швецов А.Н. Стабилизация окисленности кипящей стали / В.И. Герман, А.А. Добромилов, А.И. Саврасов, А.Н. Швецов // Сталь. – 2000 – № 6. – С. 28-30.
9. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов / Киев-Донецк. – Вища шк. Головн. Изд-во, 1986. – 280 с.
10. Кожеуров В.А. Термодинамика металлургических шлаков / В.А. Кожеуров // Свердловск. Изд-во ГНТИЛ. – 1955. – 164 с.

Рецензент: А.А. Казаков  
д-р техн. наук, проф., СПбГПУ

Статья поступила 28.03.2011

УДК 621.746.62:669.189

Федосов А.В.<sup>1</sup>, Бурлаков В.И.<sup>2</sup>, Ларионова С.В.<sup>3</sup>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ТВЕРДОЙ КОРКИ СТАЛИ,  
ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВЫХ МНЛЗ**

*Предложен комплексный подход к решению задачи математического моделирования процессов теплового и механического взаимодействия формирующейся корочки непрерывно-литого сляба со стенками кристаллизатора МНЛЗ. Предложенный подход позволяет рассчитать распределение температуры, усадки, механических напряжений и геометрическое искажение профиля сляба в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ.*

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок, кристаллизатор, конусность, сляб, усадка.

**Федосов А.В., Бурлаков В.И., Ларионова С.В. Дослідження деформації твердої кірки сталі, яка формується в кристалізаторі МБЛЗ. Запропоновано комплексний підхід до розв'язання задачі математичного моделювання процесів теплової та механічної взаємодії кірки безперервно-литого слябу, що формується, зі стінками кристалізатора МБЛЗ. Запропонований підхід дозволяє розраховувати розподіл температури, усадки, механічних напружень та геометричних спотворення профілю сляба в кристалізаторі слябової МБЛЗ.**

**Ключові слова:** машина безперервного лиття заготовок, кристалізатор, конусність, сляб, усадка.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*A.V.Fedosov, V.I. Burlakov, S.V. Larionova. Research of still solid shell deformation forming in slab CCM mold. The integrated approach to the solving the problem of thermal and mechanical interaction mathematical modeling of a continuous-cast slab formed shell with CCM mold walls is offered. The offered approach allows to calculate temperature, shrinkage, mechanical pressure distribution and geometrical distortion of a slab profile in slab CCM mold.*

**Keywords:** *continuous casting machine, mold, taper, slab, shrinkage.*

**Постановка проблеми.** Кристаллизатор является формообразующим элементом конструкции МНЛЗ, основное назначение которого – это формирование твердой корки непрерывно-литого слитка требуемого сечения, с достаточной механической прочностью обеспечивающей сопротивление ферростатическому давлению. Рост корочки стали в кристаллизаторе МНЛЗ проходит в условиях высоких температурных градиентов при контактном взаимодействии с возвратно-поступательно движущимися стенками кристаллизатора. Нерациональные значения технологических параметров кристаллизатора МНЛЗ приводят к образованию большинства возможных дефектов непрерывно-литой заготовки, в особенности различного рода как поверхностных, так и внутренних трещин. Одним из важнейших технологических факторов, оказывающих влияние, как на условия теплообмена, так и на механические воздействия на формирующуюся корку стали, является конусность кристаллизатора. Определение рациональных значений этого параметра позволит повысить качество продукции и снизить величину отбраковки металла, поэтому ему следует уделить отдельное внимание в вопросе трещинообразования. Также следует отметить, что конусность в современных кристаллизаторах является удобно варьируемым параметром и может быть легко изменена в зависимости от условий разлива и состава разливаемой стали. В связи с этим представляет интерес изучение вопроса взаимодействия корочки стали и кристаллизатора.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Изучение процесса формирования корки непрерывно-литого слитка проводится с применением физических [1] и математических методов моделирования [2]. Физические методы моделирования позволяют достаточно достоверно оценить процесс взаимодействия с качественной стороны, однако, количественное определение таких величин взаимодействия как термические и механические напряжения целесообразнее проводить с помощью методов математического моделирования. При этом следует отметить часто имеющее место разделение задачи определения взаимодействий в кристаллизаторе МНЛЗ на подзадачи теплообмена, усадки стали и механических взаимодействий. Так, разработано множество моделей расчета теплового состояния профиля непрерывно-литого слитка [3,4], реже встречаются модели учитывающие усадку стали и связанные с этим изменения условий взаимодействия корочки со стенкой кристаллизатора (они позволяют определять термические напряжения в формирующейся корочке) [2]. Однако для более полного воспроизведения формирования слитка в кристаллизаторе МНЛЗ необходимо создание комплексных моделей, позволяющих рассчитывать также механические напряжения, возникающие в корочке при ее контакте со стенками кристаллизатора.

Создание системы уравнений для таких комплексных моделей представляет собой сложную математическую задачу, а ее решение может потребовать значительных вычислительных ресурсов. Поэтому является целесообразным разделить процесс моделирования на два этапа: вычисление температурных и геометрических параметров профиля заготовки и расчет контактных взаимодействий корочки со стенкой кристаллизатора.

**Цель статьи** – разработка подхода к решению комплексной задачи моделирования тепловых и механических взаимодействий формирующейся корочки непрерывно-литого слитка со стенками кристаллизатора слябовой МНЛЗ.

**Изложение основного материала.** Расчеты в данной работе проводились для слябовых кристаллизаторов, конструкция которых позволяет изменять конусность только узких граней, конусность широких граней остается постоянной – 0,1 %. Поэтому в дальнейшем рассматривается варьирование конусности только по узким граням кристаллизатора. Входными параметрами для расчета условий взаимодействия твердой корочки со стенками кристаллизатора является набор основных технологических параметров непрерывной разливки стали: геометрия кристаллизатора, расход воды на его охлаждение, теплофизические параметры ШОС, состав и начальная температура стали, скорость разливки и теплофизические параметры разливаемой стали.

Сложность тепловых расчетов заключается в том, что условия теплоотдачи в системе слиток-кристаллизатор определяются толщиной и составом зазора между стенкой кристаллизатора и поверхностью слитка, а толщина зазора определяется уменьшением размеров сляба (при движении по направлению разлива), зависящим от усадки стали, и уменьшением сечения кристаллизатора, зависящим от величины его конусности. Поэтому для расчета геометрического и теплового профиля кристаллизатора использовалась математическая модель, которая позволяет учитывать взаимное влияние процессов теплообмена и усадки сляба в кристаллизаторе МНЛЗ. Основные положения данной модели подробно рассмотрены в работе [5].

На первом этапе для упрощения расчетов принято допущение, исключающее усилия и напряжения, возникающие в результате механических воздействий стенок кристаллизатора на формирующуюся корочку сляба.

Результатами работы используемой математической модели являются: распределение тепловых и геометрических параметров по объему сляба в кристаллизаторе, величины образующихся зазоров между формирующейся корочкой и стенками кристаллизатора по его периметру, распределение тепловых потоков по всей площади теплообмена между слитком и кристаллизатором, температура рабочей поверхности кристаллизатора.

В процессе затвердевания и усадки твердой корочки слитка в кристаллизаторе происходит значительное искажение профиля слитка. Наибольшая усадка наблюдается в граничных (затвердевших) слоях широкой грани сляба, а наименьшая – вдоль осей заготовки. Это приводит к значительным искажениям профиля сляба по углам. Так, на рис. 1 (а) представлен результат искажения геометрического профиля сляба вследствие усадки стали при ее кристаллизации. Полученную форму профиля слитка уже нельзя рассматривать как геометрический примитив в расчетах механических напряжений. На результаты распределения усилий большое значение будут оказывать разнотолщинность корочки, углы наклона и величина смещений линий периметра. Поэтому полученные геометрические размеры профиля слябовой заготовки являются исходными данными для второго этапа моделирования процесса взаимодействия корочки стали со стенками кристаллизатора.

На втором этапе расчета полученные тепловые и геометрические параметры корочки стали используются как начальные условия для конечно-элементной твердотельной сеточной модели (рис. 1 (б)). В качестве геометрической формы расчетного конечного элемента выбран тетраэдр. Узлам конечных элементов присваивается рассчитанная на первом этапе температура твердой корочки стали в соответствии с их геометрическим положением. Таким образом, сформированная расчетная сетка корочки стали может использоваться для моделирования процессов ее деформирования при взаимодействии со стенками кристаллизаторов МНЛЗ в различных конечно-элементных комплексах типа ANSYS, Abacus, Deform3D и др. Применение подобных расчетных комплексов в целом для моделирования процесса затвердевания, усадки и механических взаимодействий слитка в объеме кристаллизатора затруднено. Эти затруднения связаны с ограниченным машинным ресурсом персональных компьютеров, поэтому на данном этапе работы, с целью сохранения точности решения, моделируется ограниченный элемент профиля слитка высотой 100 мм. В качестве среды моделирования использовали программу Abacus, средства которой позволяют моделировать процессы деформации металлических конструкций при высоких температурах. Также этот программный комплекс имеет широкие возможности по заданию различных граничных условий, что позволяет учесть при моделировании ферростатическое давление жидкой стали на корочку слитка.

Для моделирования механических взаимодействий кристаллизатора с корочкой сляба создается сеточная модель рабочих стенок кристаллизатора. Средняя температура рабочей поверхности кристаллизатора МНЛЗ принимается равной 250 °С. Моделирование ограничивалось нижней частью кристаллизатора (100 мм). Выбор нижней части кристаллизатора обусловлен тем, что именно здесь происходит наиболее активное взаимодействие рассматриваемых элементов, о чем свидетельствует повышенный износ стенок кристаллизатора в этой части. Заданный закон перемещения узких граней кристаллизатора предусматривал их взаимное сближение вдоль оси широкой грани слитка, тем самым задавались условия взаимодействия узких стенок кристаллизатора и слитка.

Стенки кристаллизатора представляют собой плоскость, а вот затвердевающая корочка слитка имеет сложную форму в углах, обусловленную процессом усадки стали, что и определяет специфику взаимодействия и распределения усилий и напряжений в процессе деформации корочки. На рис. 2 представлено распределение напряжений в углах моделируемого профиля слитка в зависимости от величины деформации 2 и 3 мм.

Как видно из рис. 2 (а), области концентрации механических напряжений расположены возле углов профиля корочки.

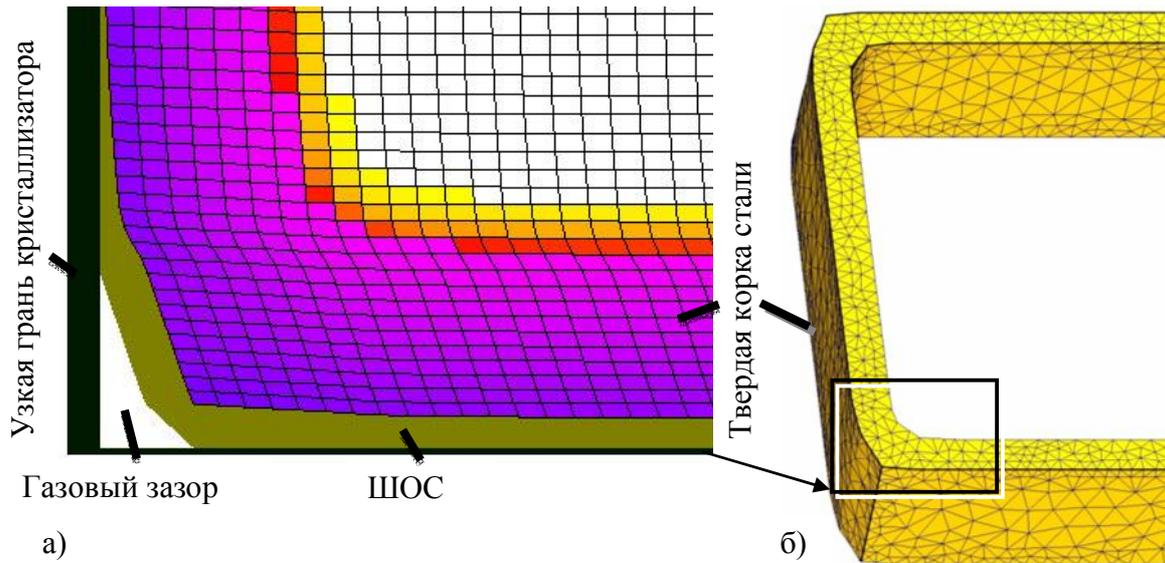


Рис. 1 – Схемы искажения профиля сляба в процессе усадки стали в кристаллизаторе МНЛЗ (а) и расчетной сетки формирующейся твердой корочки стали (б)

Причем максимальные значения располагаются на расстоянии 20-30 мм от угла слитка – в местах сопряжения тонкой корочки, сформированной по граням, с более массивным участком корочки, сформированной по углам сляба. Следствием высоких значений этих напряжений может быть образование продольных трещин, расположенных вблизи углов сляба. Также немаловажно отметить эффект смещения максимальных значений напряжений по профилю твердой корочки. Стрелками на рис. 2 (а) указаны расположения максимумов напряжений, что наглядно демонстрирует их смещение от внутренних слоев корочки к внешним, и наоборот. Эти перемещения напряжений вызваны процессом деформации корочки, что изменяет картину распределения усилий. Негативным моментом этого явления является повышение вероятности совпадения максимумов термических и механических напряжений в результате их дрейфа, что соответственно значительно повышает риск образования трещин в формирующейся корочке. Так же, следует отметить, что повышение вероятности трещинообразования напрямую связано с ростом значений механических напряжений при увеличении степени деформации корочки, как это видно из рис. 2 (а).

Кроме распределения напряжений большой интерес представляют полученные в результате моделирования данные о перемещении различных участков корочки в процессе ее деформации. Так, на рис. 2 (б) представлена векторная схема перемещения конечных объемов металла под сжимающим воздействием узких граней кристаллизатора. Большими стрелками указан общий характер перемещения металла на различных участках профиля. Корочка по узкой грани перемещается внутрь слитка под воздействием стенки кристаллизатора. Металл по углам профиля перемещается к широким граням кристаллизатора. Возможность этих перемещений обусловлена образовавшимся ранее зазором между корочкой (в результате ее усадки) и стенкой кристаллизатора. При этом перемещении и возникают отмеченные ранее растягивающие напряжения на расстоянии 20-30 мм от углов слитка.

Сжимающие воздействия узких стенок кристаллизатора приводят к поперечным перемещениям корочки широкой грани, имеющих различные направления на разных участках как это видно на рис. 2 (б). Это приводит к образованию волн на широкой грани слитка, и, как следствие, к неравномерному охлаждению широкой грани, что в свою очередь является еще одним фактором, способствующим образованию разнотолщинности формирующейся корочки и связанными с этим дефектами слябов.

Опираясь на проведенные исследования, можно отметить, что образование таких дефектов непрерывно литых слябов как поверхностные и внутренние продольные трещины, паукообразные трещины, связано с возникновением чрезмерных сжимающих усилий при нерационально выбранной конусности кристаллизатора. Конусность кристаллизатора должна точно соответствовать изменению профиля слитка вызванного его усадкой в процессе кристаллизации.

На данном этапе решения поставленной задачи алгоритм воздействия стенок кристаллизатора на профиль сляба рассматривался как однонаправленное линейное сжатие стенок узких граней.

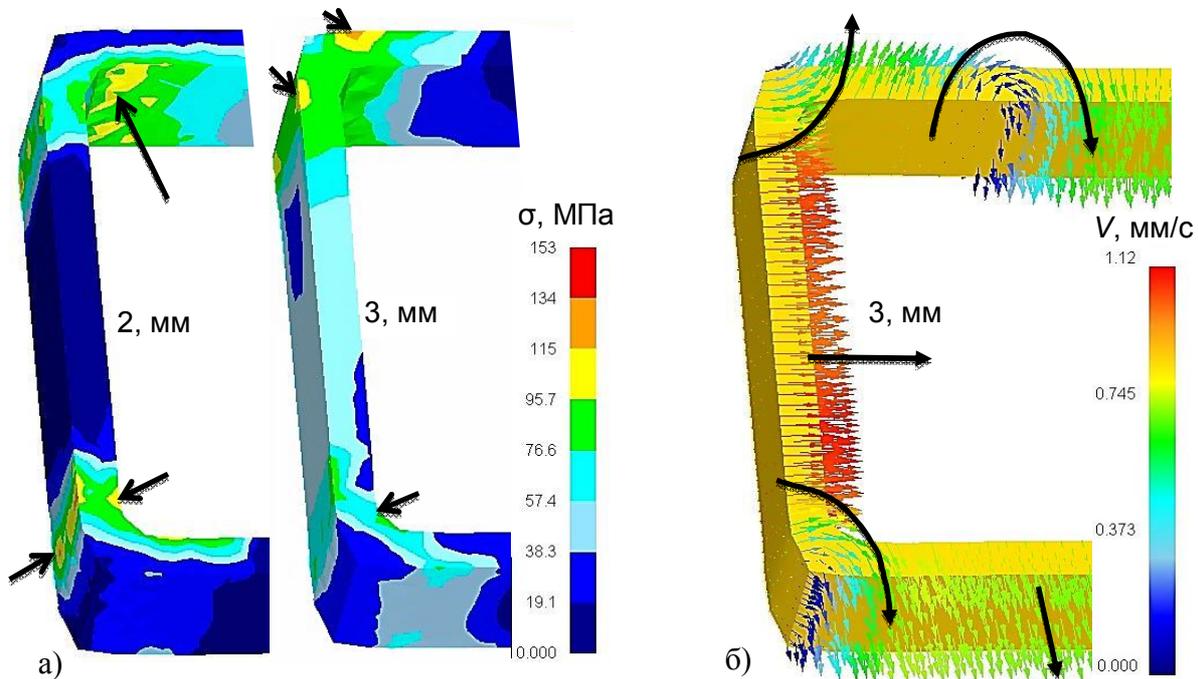


Рис. 2 – Результаты математического моделирования процесса деформации формирующейся корочки стали, при ее взаимодействии со стенками кристаллизатора: а – расчетное распределение эффективных напряжений в корочке стали, б – векторная диаграмма распределения скоростей перемещения металла

Однако на практике в результате качания кристаллизатора происходят циклические воздействия стенок кристаллизатора на корочку стали. При движении кристаллизатора против направления разливки происходит сжатие, при его возврате со скоростью большей скорости разливки давление стенок уменьшается. В последнем случае в роли деформирующих сил выступает ферростатическое давление стали. Таким образом, профиль сляба получает циклические нагрузки различного характера в зависимости от закона движения кристаллизатора, расстояния от мениска стали и др. параметров. Решение такой задачи позволит получить новые сведения об условиях формирования корочки стали в кристаллизаторе и образовании дефектов слитка.

### Выводы

1. Разработан новый подход к процессу моделирования тепловых и механических параметров формирования непрерывно-литого сляба, позволяющий количественно оценивать термо-механические напряжения, возникающие в результате взаимодействия формирующейся корочки слитка со стенками кристаллизатора МНЛЗ.
2. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для расчета рациональных значений конусности кристаллизаторов, применение которых позволит повысить качество непрерывно-литых слябов.

### Список использованных источников:

1. Смирнов А.Н. Физическое моделирование условий формирования непрерывнолитой сортовой заготовки в кристаллизаторе высокоскоростной МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Е. Ухин, Е.Ю. Жибоедов // Процессы литья. – 2009. – № 1. – С. 33–42.
2. Li C. Maximum casting speed for continuous cast steel billets based on sub-mold bulging computation / C. Li, B. G. Thomas // 85th Steelmaking Conf. Proc. ISS. Warrendale. PA., 2002, March 10–13. – Nashville, 2002. – P. 109–130.
3. Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывно-литого слитка /

И.О. Мищенко, А.В. Дуб, Е.В. Макарычева [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. –2006. – № 3. –С.15–21.

4. Ya Meng Heat transfer and solidification model of continues slab casting / Meng Ya, Thomas Brian G. // Metallurgical and materials transaction. -2003. –V.34B. -№5. –P. 685-705.

5. Математическое моделирование процессов кристаллизации и усадки непрерывнолитого сляба в кристаллизаторе МНЛЗ / А.В. Федосов, Е.А. Казачков, Е.А. Чичкарев [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2009. – № 19. – С. 44–49.

Рецензент: А.М. Скребцов  
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 20.02.2011