

УДК 669:621.746.042:519.872

*к.т.н. Боровик П.В.,  
к.т.н. Куберский С.В.,  
Максаев Е.Н.*

*(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, [borovikpv@mail.ru](mailto:borovikpv@mail.ru))*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛЯБА В ПРОЦЕССЕ РАЗЛИВКИ**

*Приведений опис математичної моделі напружено-деформованого стану сляба в процесі безперервного розливання. Описані особливості моделювання процесу. Приведені результати моделювання для оцінки можливих дефектів в процесі безперервного розливання.*

**Ключові слова:** *безперервне розливання, сляб, дефект, напружено-деформований стан.*

*Приведено описание математической модели напряженно-деформированного состояния сляба в процессе непрерывной разливки. Описаны особенности моделирования процесса. Приведены результаты моделирования для оценки возможных дефектов в процессе непрерывной разливки.*

**Ключевые слова:** *непрерывная разливка, сляб, дефект, напряженно-деформированное состояние.*

Непрерывнолитые заготовки занимают значительную долю в общем объеме экспортного рынка металлопродукции Украины. Расширение производственного потенциала металлургической отрасли неразрывно связано с улучшением технико-экономических показателей за счет снижения ресурсо- и энергозатрат, а также повышения эксплуатационных и качественных показателей металлопродукции. В тоже время эффективность процесса непрерывной разливки существенно зависит от технологических параметров жидкого металла обеспечиваемых внепечной подготовкой к разливке, а также организации и строгого соблюдения заданных параметров и условий поведения металла в промежуточном ковше, кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения.

Высокое качество непрерывнолитого металла в значительной степени зависит от возможности прогнозирования и управления процессами дефектообразования на основании сведений о параметрах разливки и химическом составе стали.

Поэтому, создание эффективных математических моделей способных прогнозировать напряженно-деформированное состояние (НДС) твердой фазы слитка в любой точке технологической оси МНЛЗ является весьма актуальной научной задачей.

Среди разнообразия математических моделей процесса непрерывной разливки [1-3] отсутствуют модели, которые позволяли бы определить параметры НДС в различных точках заготовки и тем самым оценить вероятность образования дефектов с учетом деформирования твердой фазы металла в процессе литья.

Авторы работ [4, 5] для прогнозирования НДС непрерывнолитых заготовок в процессе последующей обработки давлением использовали метод конечных элементов (МКЭ) [6, 7]. При этом предложенная модель в более полной мере позволяет учесть неоднородность химических и механических свойств по сечению слитка и оценить склонность к образованию дефектов поверхности и внутренней структуры.

Для математического моделирования НДС непрерывнолитого металла в любой точке технологической оси МНЛЗ важное значение имеет целый ряд технологических параметров, таких как температурно-скоростной режим разливки, организация вторичного охлаждения и настройка ее элементов, толщина слитка, химический состав разливаемого металла, а также его изменение по сечению в процессе формирования непрерывнолитых заготовок.

Целью данной работы является разработка на базе МКЭ математической модели НДС твердой фазы непрерывнолитого слитка при установившемся процессе разливки и оценка ее работоспособности.

Для достижения данной цели осуществлялось математическое моделирование МКЭ на базе программного комплекса ABAQUS. В основу модели положен подход Эйлера с применением процедуры адаптации сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера [7], которая позволяет в процессе моделирования корректировать конфигурацию сетки, постепенно приближая решение к точному.

Модель (рис. 1) содержит одну вторую симметричную часть и состоит из недеформируемых (абсолютно упругих) роликов и деформируемого бруса, моделирующего только затвердевшую часть слитка. Сетка бруса состоит из трехмерных изопараметрических элементов с редуцированной схемой интегрирования.

Ролики моделируются как аналитические недеформируемые цилиндрические поверхности.

Симметричные граничные условия накладываются на поверхность XY бруса при  $Z=0$  (см. рис. 1).

Непрерывнолитой слиток в соответствии с его внутренней структурой можно разделить на две части:

- 1) содержащая твердую (корочка) и жидкую фазу;
- 2) содержащая твердую структуру по всему поперечному сечению.

Таким образом, в первой части слитка брус выполнен полым, т.е. рассматривается только корочка слитка, а вместо жидкой фазы на внутреннюю поверхность корочки наложено давление, соответствующее ферростатическому. Во второй части брус имеет сплошную структуру.

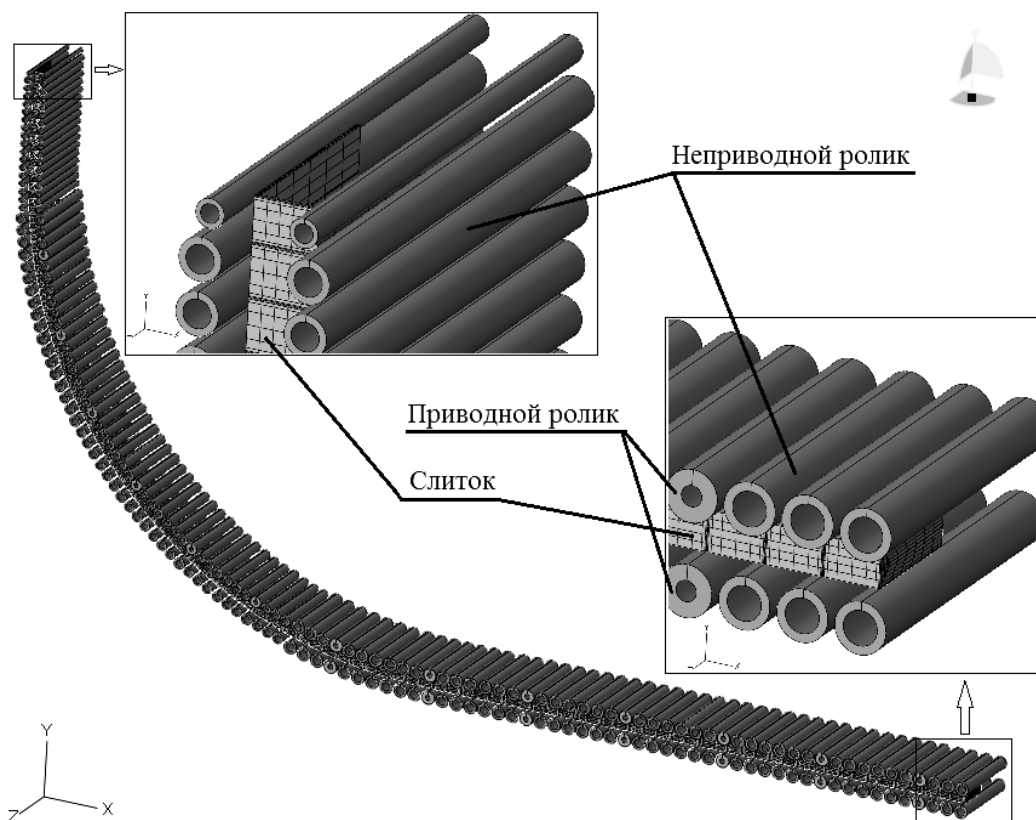


Рисунок 1 – Общий вид модели вдоль всей технологической оси МНЛЗ

Количество элементов по толщине корочки принято постоянным. Однако в ее структуру внесены ряд модификаций (рис. 2), позволяющих учесть специфические особенности решаемой задачи, а именно:

- 1) при переходе от жидкой к твердой фазе в структуру сетки введены дополнительные элементы, формирующие дно жидкой фазы, а далее полностью затвердевший металл, путем заполнения внутренней части слитка между сформировавшейся корочкой;

- 2) эффект нарастания корочки моделируется путем введения дополнительных элементов на участке между роликами, при этом сделано допущение что по длине слитка в пределах между дополнительными элементами толщина корочки не изменяется;

3) соизмеримый с толщиной слитка размер роликов, а также весьма малая степень сближения (уменьшения зазора) роликов вдоль ручья, требует значительного уменьшения размеров элементов, что неоправданно увеличивает объемы и время вычислений, поэтому применяется сгущение сетки в области контакта ролика и слитка с наложением ограничений на перестроение сетки в этой области.

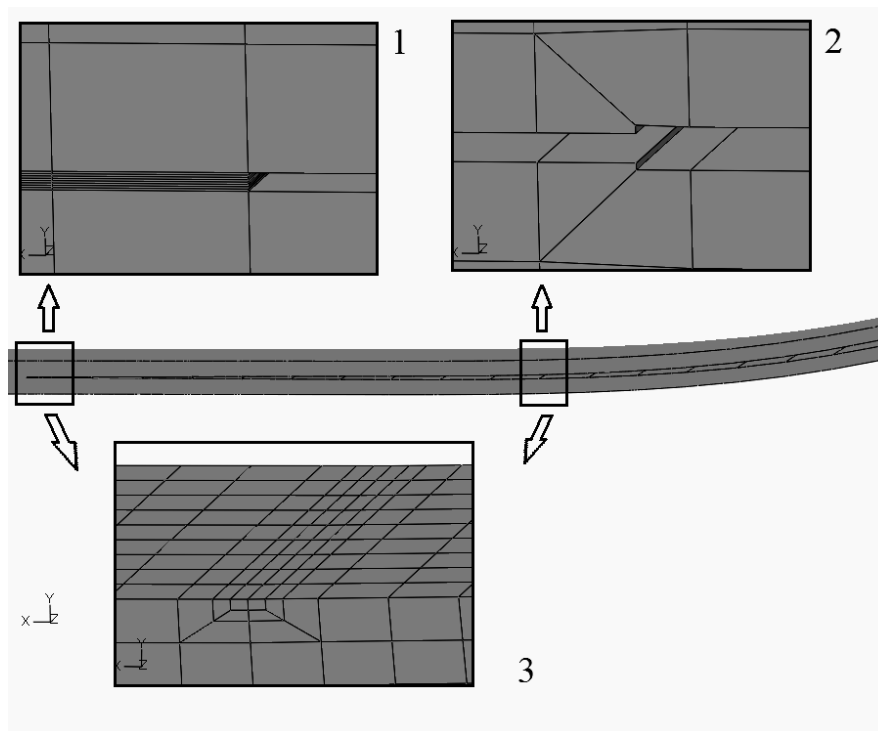


Рисунок 2 – Модификации сетки, позволяющие учесть ряд специфических особенностей решаемой задачи

Материал бруса моделируется как упруго-пластический материал с изотропным упрочнением. При этом учитывалась неоднородность распределения температуры по длине и сечению заготовки.

При разработке модели была предусмотрена возможность рассмотрения только части технологической оси МНЛЗ, т.е. выбора интересующего участка, при условии, что в плоскостях начала и конца его необходимо обеспечить условие равновесия с учетом нагружения слитка до и после выбранного участка.

В основу модели контактного взаимодействия был положен закон трения Амонтона-Кулона, как отношение напряжения трения (касательного) к внешнему контактному давлению между контактирующими телами с учетом зависимости коэффициента трения от температуры.

Для оценки возможных дефектов в данной работе использовали независимые модели повреждения базирующиеся на величине исчерпания ресурса пластичности в соответствии с диаграммой пластичности [7].

Для оценки работоспособности модели необходимо было получить решение, по результатам которого можно было бы оценить напряженно-деформированное состояние сляба в процессе вытягивания на машине непрерывного литья заготовок.

В качестве моделируемого материала применяли автолистовую низкоуглеродистую сталь 1006 с химическим составом, представленным в таблице 1. Выбранный для моделирования химический состав стали 1006 приведен в таблице 2. При этом распределение химических элементов по всему объему бруса предполагалось равномерным.

Таблица 1 – Химический состав стали 1006

Содержание элементов, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	P	S
0,02-0,06	≤0,03	0,2-0,3	≤0,05	≤0,05	≤0,06	0,02-0,06	≤0,02	≤0,015

Таблица 2 – Химический состав стали 1006 выбранный для моделирования

Содержание элементов, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	P	S
0,04	0,014	0,22	0,0286	0,0137	0,0183	0,0338	0,0067	0,0099

Напряжения текучести материала при различной температуре и скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  в зависимости от величины пластической деформации  $\epsilon$  определяли по известной методике Л.В. Андреюка [8].

В основу модели была заложена роликовая проводка машины непрерывного литья заготовок ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК»).

Моделирование осуществляли для сляба сечением 230×1540 мм, разливаемого со скоростью 1,3 м/мин.

Коэффициент трения определяли для указанной марки стали в зависимости от температуры, используя известную методику [9].

Зазор между роликами, поле распределения температур и толщина корочки слитка в различных сечениях по длине ручья, устанавливались в соответствии с данными АСУТП непрерывной разливки действующими на МНЛЗ ПАО «АМК».

В качестве моделируемого участка при исследовании был выбран участок между 3 роликом 7-го сегмента и 1 роликом 10-го сегмента (рис. 3).

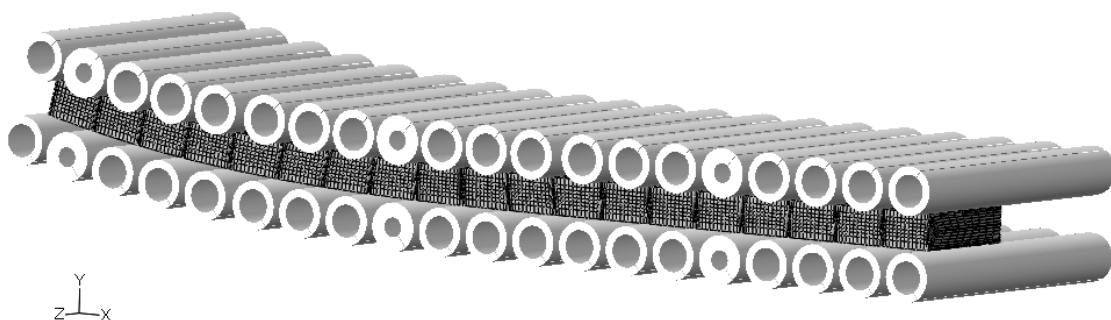


Рисунок 3 – Исходная конфигурация модели исследуемого участка

Рабочее давление в гидроцилиндрах приводных роликов составляло 60 бар. Температура солидуса для выбранной марки стали – 1440 °С. Уровень мениска в кристаллизаторе 13960 мм. Для учета весовых характеристик учитывали ускорение свободного падения  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

В ходе моделирования, после достижения установившегося состояния были получены ряд показателей с целью оценки НДС сляба в процессе разливки, а также оценки возможных дефектов в теле сляба. Так на рисунке 4 представлено распределение интенсивности напряжений в теле сляба в процессе непрерывной разливки.

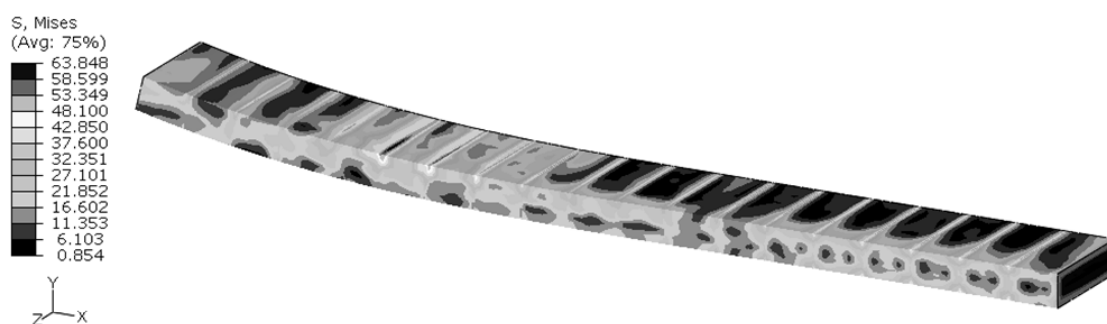


Рисунок 4 – Пример распределения интенсивности напряжений в слябе на исследуемом участке

Для оценки возможных дефектов, в качестве основных показателей НДС сляба в процессе разливки были выбраны эквивалентная пластическая деформация и показатель напряженного состояния. Эпюры указанных величин представлены на рисунках 5 и 6.

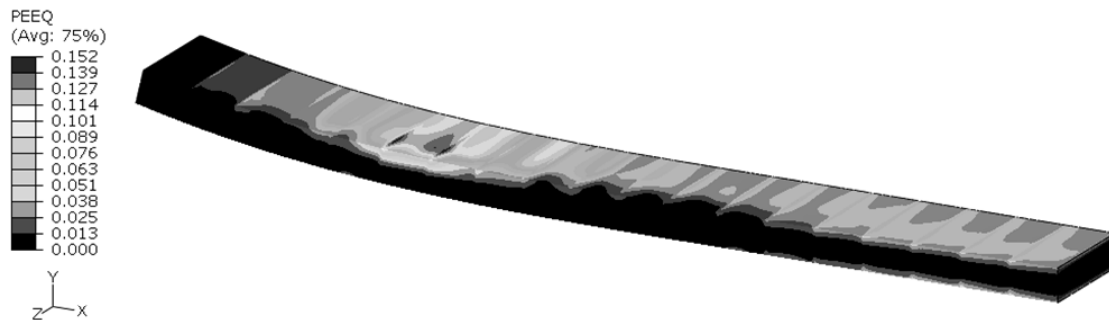


Рисунок 5 – Пример распределения пластических деформаций в слябе на исследуемом участке

В том случае, если известна диаграмма пластичности, то можно получить распределение степени использования ресурса пластичности, как показано на рисунке 7

Обобщенный анализ полученных результатов позволяет утверждать, что на базе разработанной математической модели, при известных механических и пластических свойствах разливаемой марки стали, а также условиях реализации процесса, можно производить сопоставительный анализ напряженно-деформированного состояния непрерывно-литого сляба целиком, либо отдельных его участков при установившемся процессе разливки, с целью оценки степени вероятности возникновения дефектов.

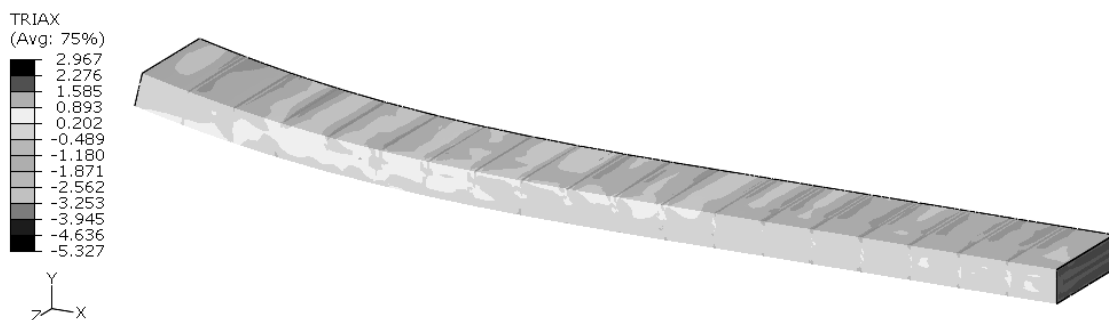


Рисунок 6 – Пример распределения показателя напряженного состояния в слябе на исследуемом участке

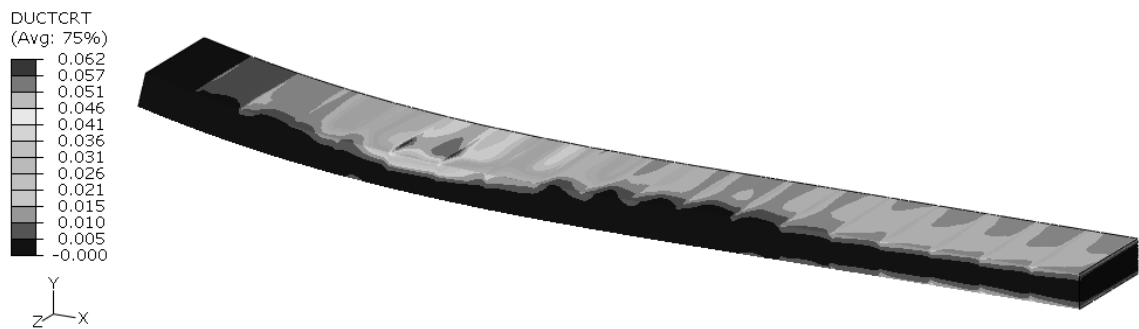


Рисунок 7 – Пример распределения показателя использования ресурса пластичности в слябе на исследуемом участке

Результаты работы могут быть использованы при исследованиях НДС затвердевшей части непрерывнолитого слитка при установившемся процессе разливки, с целью оценки влияния различных технологических параметров на вероятность возникновения дефектов, а также выявления факторов способствующих повышению качества готового сляба.

Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию разработанной модели к условиям АСУТП непрерывной разливки МНЛЗ ПАО «АМК».

### Библиографический список

1. Паршин В.М. Интеллектуальные системы управления качеством непрерывнолитой заготовки / В.М. Паршин, А.Д. Чертов // *Сталь*. - 2005. – № 20. – С.37-43.
2. Юрковский Н.А. Расчетный анализ влияния параметров непрерывной разливки на порообразование слитка / Н.А. Юрковский, Л.В. Буланов // *Сталь*. - 2005. – №9. – С.14-16.
3. Логунова О.С. Исследование качественных зависимостей образования внутренних дефектов и теплового состояния непрерывнолитых заготовок / О.С. Логунова // *Сталь*. - 2008. – №10. – С.60-63.
4. Луценко В.А. Влияние особенностей структуры непрерывнолитых слябов на математическое моделирование неустановившегося процесса горячей прокатки / В.А. Луценко, П.В. Боровик, Н.Н. Заблодский, С.В. Куберский, Й. Чизмадиа, Ж. Чеппели, В. Гонда // *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр.* – Краматорск, 2010. – №1(22). – С. 209-213
5. Луценко В.А. Моделирование неустановившегося процесса горячей прокатки непрерывнолитых слябов с учетом ликваций / В.А. Луценко, П.В. Боровик, Н.Н. Заблодский, С.В. Куберский // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском*



матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. – С. 9-16

6. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 с.

7. Боровик П.В. *Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением: монография* / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонДТУ, 2011. – 299 с.

8. Коновалов Ю.В. *Расчет параметров листовой прокатки: справочник* / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.

9. Грудев А. П. *Трение и смазки при обработке металлов давлением: справ. изд.* / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. Ульяницьким В.Н.**