

УДК 621.771.23.001.573

Луценко В. А.
Боровик П. В.
Куберский С. В.
Заблодский Н. Н.
Чизмадия Ж.
Чепели Ж.
Гонда В.

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СЛЯБОВ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

В последнее время процесс непрерывной разливки стали получил широкое распространение и быстрое развитие, учитывая целый ряд преимуществ. Однако одним из недостатков, существенно влияющих на качество непрерывнолитой заготовки, является ликвация. Суть данного явления заключается в неравномерной скорости роста столбчатых кристаллов на различных участках поперечного сечения слитка. Таким образом, в окончательно кристаллизовавшемся слитке могут образовываться усадочные микрораковины, а вблизи них области, как позитивных, так и негативных ликваций.

Неравномерное распределение химических элементов по поперечному сечению непрерывнолитой заготовки приводит к анизотропии механических свойств и должно оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние металла в процессе прокатки и возможность появления дефектов.

Как указывают различные исследователи основными факторами, влияющими на параметры ликвационных процессов, являются скорость разливки и охлаждения заготовки, а также ее геометрические размеры [1].

Известные математические модели напряженно-деформированного состояния непрерывнолитых заготовок предполагают равномерное распределение химических элементов по объему заготовки [2, 3] и моделируют установившееся состояние процесса. В работе [4] акцентируется внимание на влиянии отдельных химических элементов на вероятность возникновения дефектов при горячей прокатке, особенно в условиях неустановившегося процесса.

Цель данной работы установить особенности математического моделирования на основе метода конечных элементов, с целью адекватного определения напряженно-деформированного состояния неустановившегося процесса горячей прокатки, с возможностью учета наличия ликваций.

В данной работе был применен метод конечных элементов, который широко используется в механике деформируемого тела [5]. Разработанная конечно-элементная математическая модель позволяет симулировать как переходное, так и установившееся состояние процесса горячей прокатки сляба без учета и с учетом ликваций.

Модель содержит одну четвертую симметричную часть и состоит из недеформируемого (абсолютно упругого) валка и деформируемого бруса (рис. 1, а). Сетка бруса состоит из изопараметрических шестигранных линейных элементов с редуцированной схемой интегрирования, имеющих свойства сплошной деформируемой среды. Валок моделируется как аналитическая недеформируемая цилиндрическая поверхность. Симметричные граничные условия накладываются на правую ($Z = 0$) и нижнюю ($Y = 0$) поверхности бруса (рис. 1, б).

Трение между контактными поверхностями валка и бруса моделирует закон трения Кулона. При этом коэффициент трения является величиной постоянной, характеризующей связь между контактным давлением и эквивалентным касательным (контактным) напряжением.

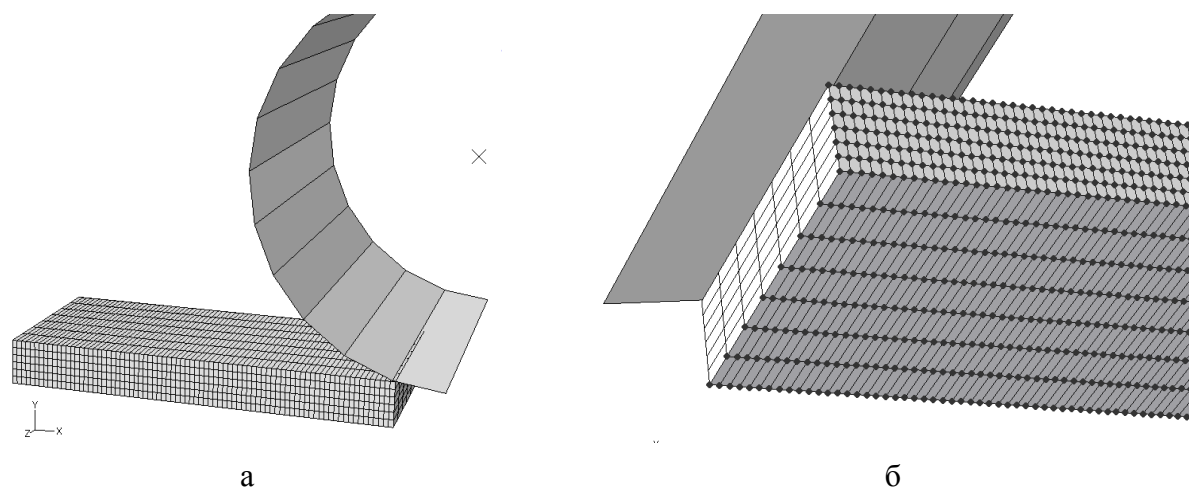


Рис. 1. Начальная конфигурация модели (а) и поверхности симметрии (б)

На ось цилиндра валка наложены ограничения по его перемещению во всех трех плоскостях и допускается его вращение только относительно оси Z . В процессе математической реализации валку предписывается постоянная угловая скорость.

С целью инициализации контакта между валком и бруском, последнему предписывается начальная линейная скорость в направлении X .

Материал моделируется как упруго-пластический с изотропным упрочнением. Механические свойства материала представляются как зависимость напряжения текучести от условий реализации процесса прокатки и полей распределения химических элементов:

$$s_S = f(e, \dot{\epsilon}, T, F_1 \mathbf{K} F_{12}), \quad (1)$$

где e и $\dot{\epsilon}$ – соответственно степень и скорость деформации;

T – температура деформации;

$F_1 \mathbf{K} F_{12}$ – содержание химических элементов по сечению сляба (максимальное число варьируемых параметров 12).

Для получения числовых значений s_S из выражения (1) можно использовать известные аналитические зависимости Андreyюка-Тюленева [6] или экспериментальные данные.

Пример исходного поля распределения углерода в стали 17Г1С по объему сляба представлен на рис. 2.

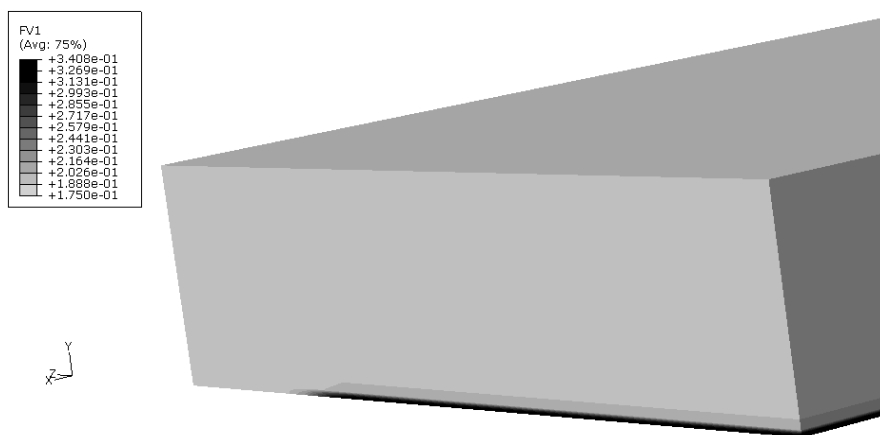


Рис. 2. Пример исходного поля распределения углерода

В качестве критериев установившегося состояния используются нормы – эквивалентной пластической деформации, расположения поверхности элементов, силы и момента.

Плоскость выхода для каждой нормы определена как плоскость, проходящая через центр валка с нормалью к плоскости, совпадающей с направлением прокатки. При стабилизации данных параметров наступает установившееся состояние.

Для оценки вероятности возникновения возможных повреждений используются кривые деформационного разрушения, которые дают соотношение между эквивалентной пластической деформацией разрушения $\bar{\varepsilon}_f^P$ и показателем напряженного состояния k . Показатель напряженного состояния определяется отношением гидростатического давления σ_h к эквивалентному напряжению Мизеса σ_{eq} :

$$k = \sigma_h / \sigma_{eq} . \quad (2)$$

Полученные в результате математического моделирования установившегося состояния без учета ликваций хорошо согласуются с известными решениями [7]. Стремление расширить спектр решаемых задач при помощи, данной математической модели позволило выявить ряд особенностей при описании задачи неустановившегося состояния горячей прокатки слэбов с учетом ликваций.

Учитывая, что по высоте слэба зона ликваций составляет $\approx 3\%$ (см. рис. 2), то дискретизация всего бруса конечными элементами одинакового размера является нецелесообразной по ряду причин:

- 1) при размере всех элементов высотой более толщины зоны ликваций оценить их влияние на напряженно-деформированное состояние не представляется возможным;
- 2) при размере всех элементов высотой менее толщины зоны ликваций значительно возрастает общее число элементов и как следствие число решаемых уравнений.

В данной ситуации является логичным сгустить элементы по высоте в зоне ликваций и несколько уменьшить высоту элементов в зоне, где ликвации отсутствуют (рис. 3).

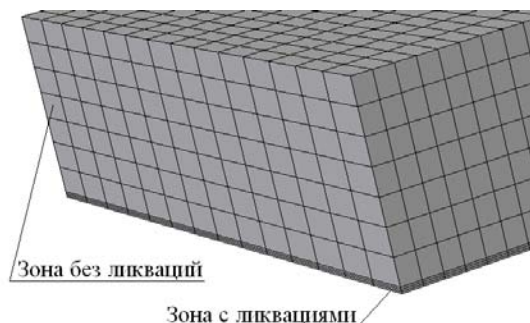


Рис. 3. Пример начальной сетки бруса в случае наличия ликваций

Необходимость исследования неустановившегося состояния, также указала на ряд особенностей построения сетки по длине бруса:

- 1) при равной длине всех элементов бруса, ситуация подобна описанной выше: либо значительно снижается точность расчетов, либо быстро растет число уравнений;
- 2) сгущение сетки только в зоне неустановившегося процесса несколько улучшает ситуацию, однако объемы вычислений остаются достаточно большими.

С точки зрения обеспечения достаточной точности вычислений и снижения времени решения целесообразным является деление бруса по длине на три зоны (рис. 4):

I – исследуемая зона неустановившегося движения; II – зона, где достигается установившееся состояние; III – оставшаяся часть бруса.

При этом следует указать еще на одну особенность моделирования неустановившегося состояния. Дробление сетки в зоне неустановившегося состояния по длине и по высоте связано с дроблением сетки в зоне ликваций. Несогласованное дробление сетки приводит к появлению ложных колебаний напряжений в теле бруса (рис. 5).

Необходимо заметить, что вероятность возникновения данных колебаний, при неизменной длине элементов в зоне неустановившегося состояния, может быть снижена за счет достаточного уменьшения высоты элементов в зоне отсутствия ликваций.

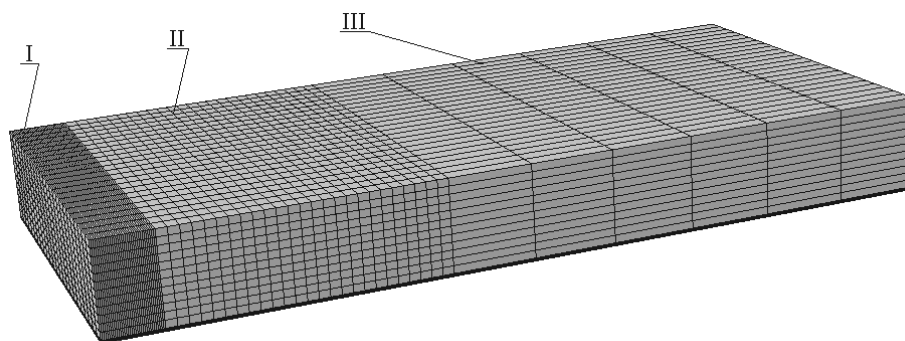


Рис. 4. Пример начальной сетки бруса при моделировании переходного процесса

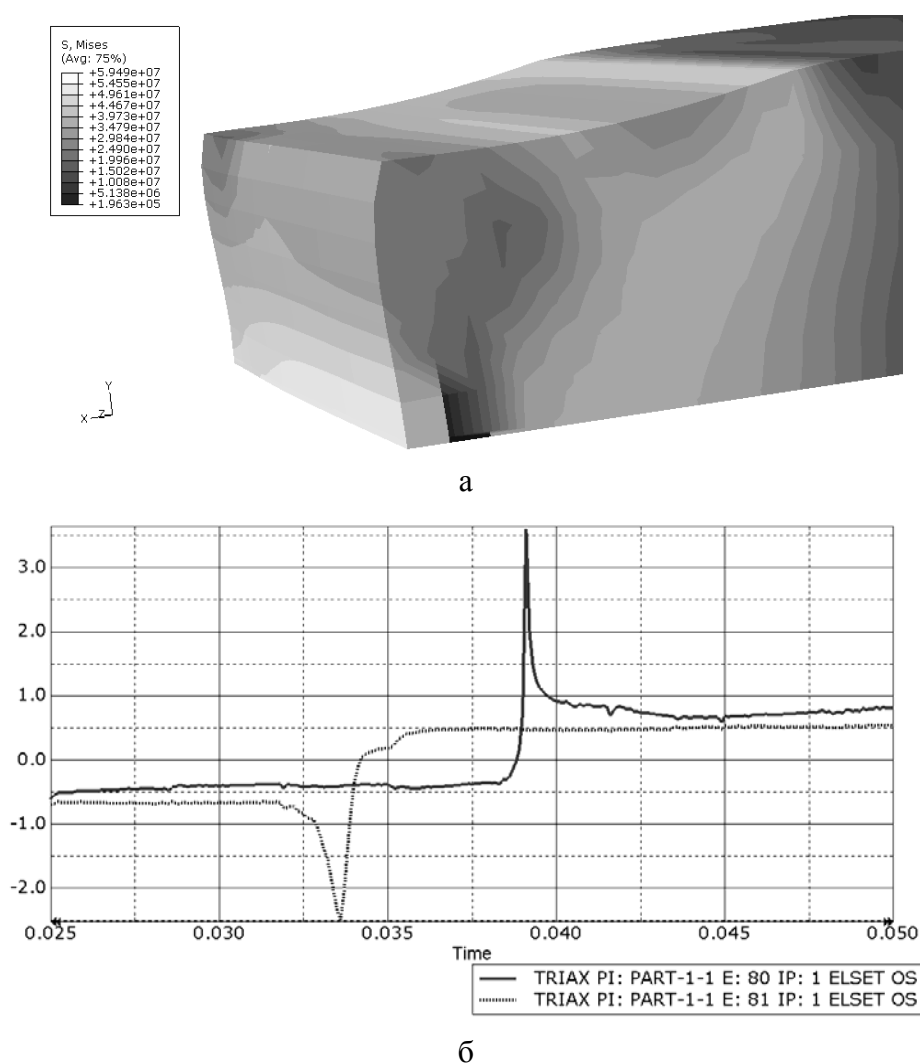


Рис. 5. Пример ложных колебаний напряжений в теле бруса:
а – эквивалентные напряжения по Мизесу; б – показатель напряженного состояния (triaxiality соотношение)

В заключении необходимо отметить, что при оценке вероятности возникновения дефектов, обусловленных условиями деформации с учетом наличия ликваций, необходимы экспериментальные исследования для получения кривых деформационного разрушения с учетом химического состава, т. к. информация в этой области знаний весьма ограничена.

ВЫВОДЫ

Необходимость математического моделирования неустановившегося процесса горячей прокатки непрерывнолитых слэбов с учетом ликваций позволила выявить ряд важных особенностей при описании задачи, которые оказывают существенное влияние на конечные результаты вычислений:

1) для учета влияния ликваций необходимо сгущение элементов по высоте в зоне ликваций и небольшое уменьшение высоты элементов в зоне, где ликвации отсутствуют;

2) для обеспечения достаточной точности вычислений и снижения времени решения целесообразным является деление бруса по длине на три зоны: I – исследуемая зона неустановившегося движения; II – зона, где достигается установившееся состояние; III – оставшаяся часть бруса;

3) дробление сетки в зоне неустановившегося состояния по длине и по высоте должно быть согласовано с дроблением сетки в зоне ликваций;

4) существует необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований механических свойств материалов. Реализация подобного рода исследований представляется возможным путем использования физического симулятора «Gleeble®».

Результаты данной работы и экспериментальных исследований могут быть использованы при изучении влияния ликваций на напряженно-деформированное состояние слэба при неустановившемся процессе горячей прокатки с целью разработки технологических режимов, позволяющих снизить вероятность возникновения дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дюдкин Д. А. *Качество непрерывнолитой стальной заготовки* / Д. А. Дюдкин. – К. : Техника, 1988. – 253 с.
2. Смирнов Е. Н. *Моделирование и исследование особенностей процесса деформирования непрерывнолитой заготовки с дефектом формы «ромбичность»* / Е. Н. Смирнов, В. А. Скляр // *Наукові праці ДонНТУ. – Випуск 10 (141). – Донецьк, 2008. – С. 149–157.*
3. *Математическое моделирование прокатки непрерывно-литого слитка из стали ШХ15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины* / А. А. Миленин, Х. Дья, А. Б. Стеблов [и др.] // *Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. : ДГМА, Краматорск. – 2000. – С. 178–183.*
4. Паршин В. А. *Деформируемость и качество* / В. А. Паршин, Е. Г. Зудов, В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1979. – 192 с.
5. Кузьменко В. И. *Решение на ЭВМ задач пластического деформирования* / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – Киев : Техніка, 1990. – 136 с.
6. Коновалов Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки : справочник* / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.
7. Целиков А. И. *Тория прокатки* / А. И. Целиков, А. И. Гришков. – М. : Металлургия, 1970. – 358 с.

Луценко В. А. – д-р техн. наук, проф. ДонГТУ;
Боровик П. В. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ;
Куберский С. В. – канд. техн. наук, доц. ДонГТУ;
Заблодский Н. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонГТУ;
Чизмадиа Ж. – канд. техн. наук, Дунайварошский институт;
Чепели Ж. – канд. техн. наук, Дунайварошский институт;
Гонда В. – канд. техн. наук, Дунайварошский институт.

ДонГТУ – Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск;
Дунайварошский институт, Дунайварош, Венгрия.

E-mail: amm@dgma.donetsk.ua