

И.П. Мазур<sup>1</sup>, д-р.техн.наук, проф., Т.И. Черкашина<sup>1</sup>, магистрант, Е.Н. Смирнов<sup>2</sup>, д-р.техн.наук, проф.,  
1 - Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия  
2 - Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ "МЯГКОГО ОБЖАТИЯ" НА МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦАХ

---

*В работе представлены результаты изучения механизма проникновения деформации во внутренние слои сляба на стадии неполной кристаллизации. Физическое моделирование обжатия сляба с жидкой сердцевиной осуществлено на модели, выполненной из сплава Вуда и тарированных сферических элементов из свинца, и представляющей замкнутую оболочку. Замкнутая оболочка позволяет создавать различное внутреннее давление, имитирующее ферростатическое, и моделировать деформирование сляба на различных стадиях разлива. Результаты физического моделирования использованы для адаптации математической модели.*

*In the work there are presented the results of research of the mechanism of deformation penetration into slab inside layers at the incomplete crystallization stage. Physical modeling of deformation of a slab with liquid core was performed on the model of Wood's alloy and calibrated spherical lead elements. The physical model looks like a closed shell. A closed shell allows to produce various internal pressures simulating the ferrostatic pressures and to model slab deformation at the various casting stages. Results of the physical modeling are used for the mathematical model adaptation.*

---

### **Введение.**

В металлургии одно из наиболее перспективных направлений снижения себестоимости металлопродукции – это развитие технологии совмещения в одном агрегате смежных технологических операций. К такой технологии принадлежит и совмещение процессов непрерывного литья и обработки давлением [1 – 4].

Формирование изделия на стадии неполной кристаллизации, особенно при непрерывных технологиях, является сложным необратимым процессом, состоящим из ряда простых явлений, которые невозможно рассматривать без взаимодействия друг с другом. Необратимость процесса связана с необходимостью переноса тепла и массы, внутренним движением в жидкой и твердой фазах. В общем случае количественное описание данного процесса основывается на рассмотрении неравновесной термодинамики гетерогенной неизолированной системы, состоящей из нескольких компонентов и фаз, и отделенной от окружающей среды ограниченной оболочкой. Толщина оболочки непрерывно изменяется за счет отвода тепла от слитка и выделения тепла от пластической деформации и трения, вплоть до полного смыкания противоположащих фронтов кристаллизации [5].

Теоретические и экспериментальные исследования деформирования металлов на стадии неполной кристаллизации начали появляться в 90-тых годах. В первую очередь, это работы Кнеппе G., Rosenthal D., Flick A., Flemming G., Fernandez A. и др. Это сотрудники исследовательских центров зарубежных фирм, занимающихся производством оборудования для черной и цветной металлургии. Оценка эффективности процесса деформирования непрерывнолитых слитков на стадии неполной кристаллизации в большинстве опубликованных работ этого времени выполнена по результатам металлографических исследований без детализации механизма проникновения деформации в многофазные металлические системы. А имеющиеся сегодня научные представления показывают, что процесс редуцирования непрерывнолитых слябов и блюмов, имеет различный характер, как с точки зрения технологической реализации, так и с позиции временной фазы реализации [6]. И хотя в обоих случаях имеются две многофазные металлические системы (закристаллизовавшаяся и жидко – твердая составляющие), которые находятся в динамическом состоянии формирования и отличаются друг от друга удельным весом составляющих.

Известные методы анализа процесса деформирования металла на стадии неполной кристаллизации, основанные на результатах математического моделирования методом конечных элементов, в большинстве случаев требуют проверки полученных результатов в условиях реального физического эксперимента. Однако отсутствие возможности текущего контроля металлической системы в реальном масштабе времени, приводит к необходимости оценки результатов внешнего деформационного воздействия по косвенным данным, полученным в результате разрушающих методов контроля качества конечной продукции. Кроме того, в ходе такого подхода крайне сложно обеспечить достаточную воспроизводимость условий, что, в свою очередь, снижает значимость полученных результатов.

**Целью** данного исследования является разработка физической модели сляба с жидкой сердцевиной для изучения особенностей формоизменения сляба на стадии неполной кристаллизации, а так же исследования закономерностей проникновения деформации в металлических системах со скачкообразным изменением физико-механических свойств.

### **Исследование.**

Нанесение координатной сетки, которая хорошо зарекомендовала себя в обработке металлов давлением для исследования деформирования внутренних слоев сплошных объемов [7], на модельный образец сляба с жидкой

сердцевиной не представляется возможным. Это связано с тем, в реальных условиях совмещения непрерывной разливки и обжатия на стадии неполной кристаллизации толщина корочки металла составляет 30-50 мм, что значительно меньше геометрических размеров слитка. Кроме этого, внутри слитка находится жидкий металл.

Модельный образец выполнили в виде замкнутой твердотельной оболочки прямоугольной формы (рис. 1). Исходные размеры образца  $H_0 = 16$  мм,  $B_0 = 72$  мм,  $L_0 = 135$  мм, толщина стенки 4 мм. Оболочка представляет собой композит из сферических зерен основного металла. Пространство между зернами заполнено металлом-заполнителем. Учитывая, что модель должна гарантировать однородную деформацию в качестве основного металла использован свинец, а наполнителя – сплав Вуда. Такой выбор компонентов обусловлен тем, что сплав Вуда содержит значительную долю свинца, который традиционно используют для моделирования горячей прокатки [8]. Кроме этого, температура плавления свинца значительно выше, чем у сплава Вуда, что гарантирует неизменность исходной геометрии зерен при изготовлении модели, и они обладают достаточным диффузионным схватыванием, чтобы обеспечить однородность деформирования композита после кристаллизации. Дополнительно, отличия в контрастности позволяют хорошо определять границы компонентов при исследовании изменения размеров зерен в процессе деформирования.

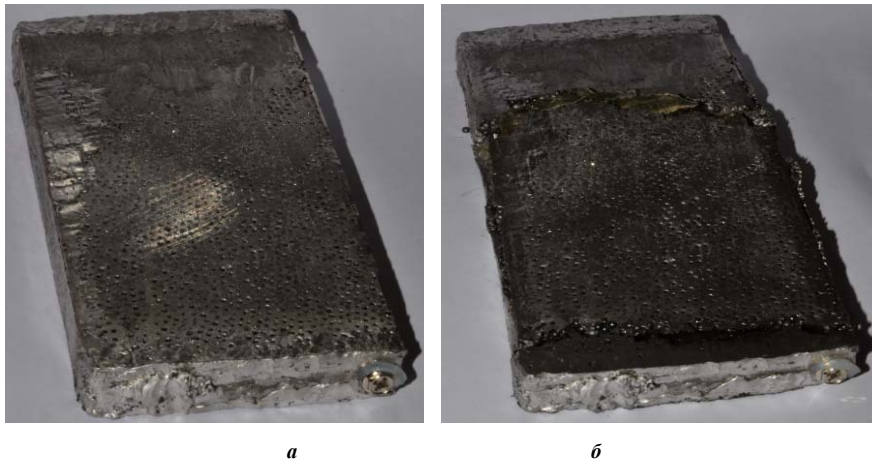


Рис. 1. Модельный образец сляба с жидкой сердцевиной:  
а) – исходное состояние, б) – после деформирования

В качестве сферических зерен применили твердую литую охотничью дробь № 9 (ГОСТ 7837-76). Для имитации наличия жидкого металла внутри оболочки через ниппель, расположенный на средней грани модели, закачали под давлением желатин (ГОСТ 11293-89).

Особенность использования в твердотельной модели сферических зерен заключается в том, что переход исходной сферической формы в деформированную эллипсоидную происходит по направлениям главных деформаций [9]. Тогда диаметр сферы, в силу равенства объемов зерна до и после деформирования, определяется путем непосредственного измерения главных диагоналей эллипсоида через уравнение

$$d = \sqrt[3]{l_1 l_2 l_3}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр сферы;  $l_1, l_2, l_3$  – главные диагонали эллипсоида.

Это позволило при изготовлении твердотельной модели сляба с жидкой сердцевиной отказаться от фиксирования местоположения зерен при кристаллизации и измерения их исходных диаметров. Единственное требование, которое становилось главенствующим при таком подходе – малый допуск на сферичность в исходном состоянии. Это в достаточной мере обеспечивается технологией изготовления литой дроби. Диаметр по трем взаимно перпендикулярным осям выборочного массива дроби, измеренного на микроскопе отсечном МПБ-2, не отличался более чем 0.05 мм, что приемлемо для таких исследований.

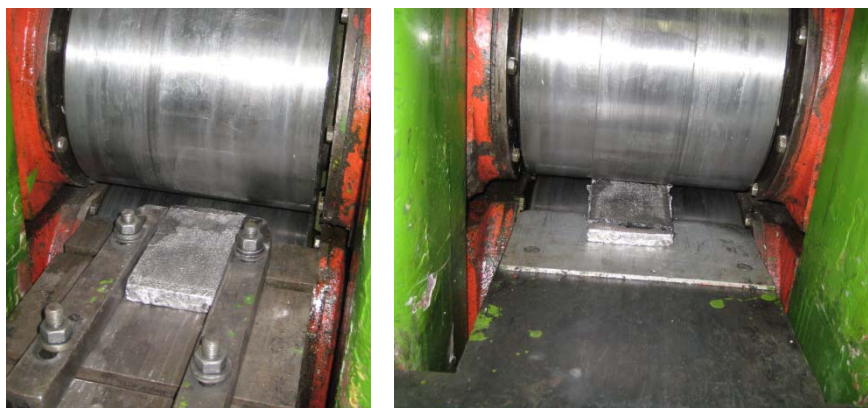


Рис. 2. Прокатка на лабораторном стане 250

Прокатку модельного образца осуществили на кафедре ОМД Липецкого государственного технического университета на лабораторном стане 250 (рис. 2.). Суммарное обжатие за 2 прохода составило 3 (2 + 1) мм.

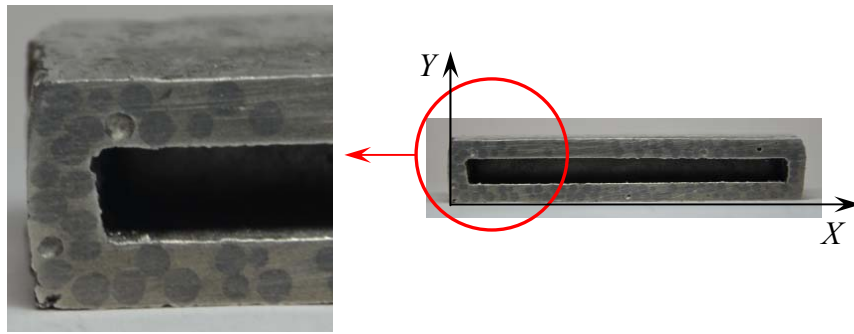


Рис. 3. Поперечное сечение образца после деформирования

После деформирования выполнили порезку образца поперек направления прокатки. Первичный визуальный осмотр сечений показал, что деформация зерен произошла только вдоль узкой грани, в то время как вдоль широкой они остались не деформированными. Характерное сечение представлено на рис. 3., где зерна по узкой грани имеют вид эллипса, а по широкой – окружности.

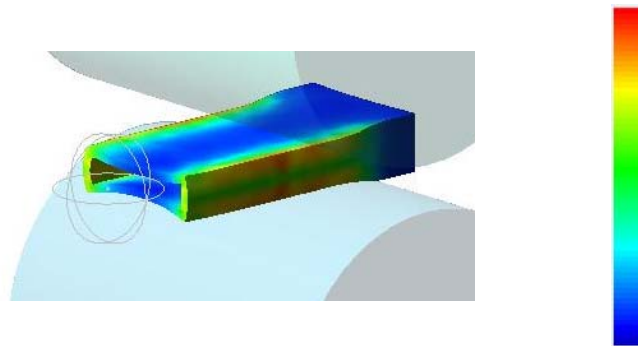


Рис. 4. Характерное распределение интенсивности деформации сдвига в твердой корочке при мягком обжатии сляба с жидкой сердцевиной (QForm)

Такая картина деформированного состояния соответствует общепринятым закономерностям развития напряженно-деформированного состояния при мягком обжатии слитков на стадии неполной кристаллизации. Это объясняется тем, что нормальные напряжения на контактной поверхности деформируемых слябов имеют максимум в области пересечения широкой и узкой граней, а затем снижаются до значения, близкого к ферростатическому давлению, которое действует на твердую фазу слитка со стороны жидкого расплава в рассматриваемом сечении [10]. Таким образом, при обжатии слябов с жидкой сердцевиной переход металла в пластическое состояние происходит лишь в плоскости, перпендикулярной бочке деформирующего ролика, в которой присутствует исключительно твердая фаза, т.е. в корочке вдоль узкой грани (рис. 4.). Противоположные корочки широких граней сляба не деформируются, а лишь перемещаются в направлении друг друга с усилием, достаточным для преодоления воздействия жидкого расплава. Экспериментальным подтверждением этого является то, что свинцовая дробь вдоль широкой грани в процессе прокатки твердотельной модели осталась близкой к сферической, а вдоль узкой приняла эллиптическую форму (рис. 5.).

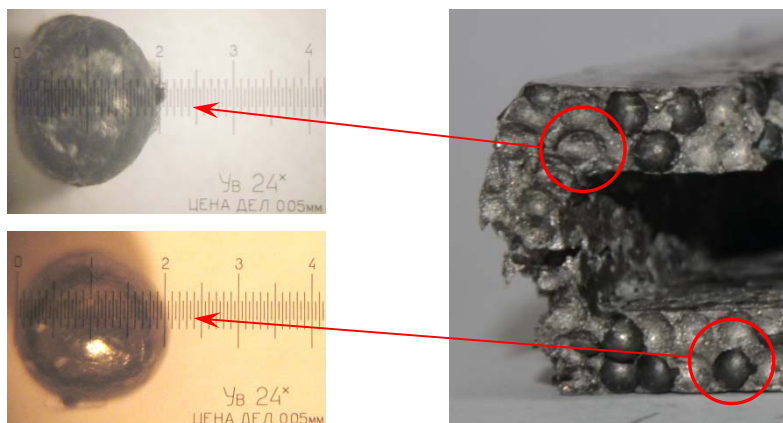


Рис. 5. Форма дроби, извлеченной после прокатки 16 → 13 мм

Как отмечено ранее, свинцовая дробь, расположенная вдоль широкой и узкой грани, в процессе прокатки по разному изменила первоначальную форму. Поэтому на твердотельной модели выбрали фрагменты, в которых форма зерен представляла наибольший интерес для исследования деформированного состояния после прокатки. Перед извлечением, положение зерен исследуемого фрагмента фиксировалось, фрагмент локально нагревался, и у высвобожденного зерна измерялись главные диагонали эллипсоида –  $\ell_1$ ,  $\ell_2$ ,  $\ell_3$ . Тогда, в окрестности такого зерна значения деформаций вычисляются как

$$\varepsilon_1 = \frac{\ell_1 - d}{d}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\ell_2 - d}{d}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\ell_3 - d}{d}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – главные относительные деформации в окрестности эллипсоида;  $d$  – исходный диаметр дроби (1). Далее по известным зависимостям можно определить остальные характеристики деформированного состояния.

В качестве примера, в таблице представлены компоненты деформации зерен, выбранных для изучения на данном этапе исследования (координаты исследуемых точек приведены по рис. 3).

Таблица

Компоненты деформации свинцовой дроби, извлеченной из модели

X, мм	Y, мм	$\ell_1$ , мм	$\ell_2$ , мм	$\ell_3$ , мм	d, мм	$\varepsilon_1$ , %	$\varepsilon_2$ , %	$\varepsilon_3$ , %
74,3	2,0	2,65	2,30	2,25	2,39	10,71	-3,91	-6,00
2,3	10,0	2,50	2,25	2,10	2,28	9,77	-1,20	-7,79
2,3	8,0	2,40	2,20	2,05	2,21	8,50	-0,54	-7,33
2,3	5,5	2,50	2,35	2,25	2,36	5,73	-0,61	-4,84
2,3	6,5	2,40	2,25	2,25	2,30	4,40	-2,13	-2,13
36,0	11,0	2,05	2,05	2,00	2,03	0,83	0,83	-1,63
38,0	3,5	2,10	2,10	2,10	2,10	0,00	0,00	0,00

Таким образом, с использованием физической модели сляба с жидкой сердцевиной рассчитаны величины, отображающие закономерности проникновения деформации во внутренние слои слитка при редуцировании. На их основе осуществлена адаптация математических моделей, реализованных с использованием МКЭ, и используемых для исследования механизм влияния параметров процесса литья и внешнего деформационного воздействия на качество проката [6, 11].

Представленный экспериментальный подход, в силу простоты и наглядности, можно рекомендовать для изучения деформированного состояния в других задачах ОМД.

#### Выводы.

Показано применение твердотельной модели сляба с жидкой сердцевиной, выполненной из сплава Вуда и тарированной литой свинцовой дроби, для исследования мягкого обжатия слитков на стадии неполной кристаллизации. Рассмотрен процесс создания физической модели, а также качественные и количественные характеристики проникновения деформации в многокомпонентной системе. Полученные результаты использованы для адаптации и коррекции математических моделей.

#### Список литературы.

1. Тарасевич Ю.Ф., Ефименко С.П., Юсупов В.С. Литейно-прокатные агрегаты воздействуют на структуру производства и рынок тонколистовой стали // Производства проката, 2000. – № 5. – С. 33-42.
2. Производство проката из слитков с жидкой сердцевиной / В. С. Бойко, Э. Н. Шебаниц, В. Е. Зеленский и др. // Сталь, 2001. – №7. – С. 43-45.
3. Бровман М.Я. Непрерывная разливка металлов. – М.: «ЭКОМЕТ», 2007. – 484 с.
4. Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш., Николаев В.Ал. Совмещенные процессы литья и деформации металлов. – М.: Изд-во МГОУ, 2009. – 212 с.
5. Мазур И.П., Барышев В.В., Седых М.О. Постановка задачи упруго-пластического деформирования непрерывного слитка с жидкой сердцевиной // Известия вузов. Черная металлургия, 2003. – № 1. – С. 29-32.
6. Determination technological capabilities of new processes in deformation of continuously cast blooms at the end of solidification / A. Mynayev, Y. Smirnov, V. Sklyar, A. Zhoga // X Miedzynarodowa konferencja naukowa «Nove technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej», 17- 18 May 2010, Poland, – Czestochowa: Politechnika Czestochowska, 2010. – Nr. 2. – P.62-70.
7. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформация и усилия при обработке металлов давлением. – М.: МАШГИЗ, 1959. – 304 с.
8. Чижиков Ю.М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1970. – 296 с.
9. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
10. Мазур И.П., Лисица А.А., Третьякова Н.З. Применение операции деформирования слябов с жидкой сердцевиной при производстве горячекатаного проката // Известия вузов. Черная металлургия, 2002. – № 9. – С. 35-38.
11. Igor P. Mazur, Tanya I. Cherkashina. Mathematical and Physical Modeling of Soft Cobbing Process of Hot Rolling Steels / The 6th International Conference on Physical & Numerical Simulation of Materials Processing. November 16-19, 2010. Guilin, China. The Oral Presentation F-129.