



*The methods of influence on quality of uninterruptedly-casted slug from the point of view of the axial chemical heterogeneity depression are considered, at the same time high emphasis is placed on use of soft squeezing method.*

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «ПЛАТАН», В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, БИТУ

УДК 621.746

## ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ НА СТЕПЕНЬ ОСЕВОЙ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК. СООБЩЕНИЕ 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И РАСЧЕТА РЕЖИМОВ МЯГКОГО ОБЖАТИЯ

Осевая химическая неоднородность (ОХН) является одним из наиболее распространенных дефектов стальных непрерывнолитых заготовок. В последние годы для исключения этого дефекта получили развитие различные методы: микролегирование расплава [1, 2], введение макрохолодильников (стальной ленты) в затвердевающую заготовку [3, 4] и изменение конструкции МНЛЗ, связанное с применением мягкого обжатия литых заготовок с использованием специализированной секции роликовой проводки [5–12]. Актуальность метода мягкого обжатия обусловлена тем, что оно преследует цель снижения уровня осевой пористости и химической неоднородности – одного из наиболее специфических (по сравнению со слитками обычной выплавки) дефектов непрерывнолитой стали.

В металлургической практике давно подмечено, что эффективность горячей обработки давлением не полностью затвердевших слитков тем выше, чем меньше его поперечное сечение: данный метод наиболее эффективен при производстве стального листа методом непрерывного литья в прокатных валках. Наиболее используемым сечением современных слябовых заготовок является диапазон  $240 \times 2500 - 350 \times 4000$  мм, для блюмовых заготовок достаточно распространен диапазон сечений  $240 \times 320 - 350 \times 450$  мм. Таким образом, диапазон поперечных толщин непрерывнолитых стальных заготовок в несколько раз меньше толщины блюминговых стальных слитков, не говоря уже о группе кузнечных слитков. Отсюда вытекает принципиальная возможность эффективного ис-

пользования обработки давлением непрерывнолитых заготовок с жидкой сердцевиной. Технологический принцип мягкого обжатия заключается в том, что непрерывнолитый слиток в конце затвердевания проходит через зону мягкого обжатия, настроенную на конус; при этом конец зоны затвердевания (конец жидкой лунки) сдавливается и этим компенсируется усадка при затвердевании. Кроме того, при обжатии слитка образуется более мелкая и однородная структура металла, чем без обжатия.

Устройство мягкого обжатия воздействует на непрерывный слиток путем надавливания роликами на твердую корочку, что приводит к деформированию твердой корочки и сжатию двухфазной зоны, имеющей «нулевую» прочность. Полезный эффект производит та часть деформации, которая приводит к сжатию двухфазной зоны. При сжатии двухфазной зоны частично компенсируется усадочный процесс, что приводит к увеличению гидродинамического давления расплава. Задача «мягкого обжатия» заключается не в механическом сжатии пор, образующихся в центре слитка, что практически невыполнимо, а в сближении фронтов кристаллизации двухфазной твердожидкой зоны в конце затвердевания, чем обеспечивается бесперебойное питание кристаллизующегося металла и осуществляется подавление порообразования [5, с. 247].

Эффективность метода мягкого обжатия может быть обеспечена лишь в том случае, если воздействие роликов на оболочку затвердевающей заготовки прилагается на таких горизонтах, где доля

жидкой фазы в двухфазной зоне находится в пределах  $0,3 \leq f_L \leq 0,7$ . В том случае, если  $f_L > 0,7$ , приложение давления к оболочке заготовки приведет к некоторой интенсификации конвективного течения расплава в двухфазной зоне, однако воздействие на процессы в осевой зоне заготовки будет практически нулевым.

В другом крайнем случае при  $f_L < 0,3$  весьма существенно растет сопротивление жесткого скелета дендритов; преодоление этого сопротивления грозит возникновением внутренних трещин в температурном интервале хрупкости. Соблюдение указанного условия требует отслеживания режима кристаллизации непрерывнолитой заготовки и контроля доли жидкой фазы в пределах двухфазной зоны на протяжении всего процесса разливки, что особенно актуально в тех случаях, когда скорость вытягивания заготовки изменяется по ряду технологических причин, что сопровождается изменением глубины жидкой лунки.

К настоящему времени опубликован ряд обзоров истории освоения метода мягкого обжата [6, 8, 9]. В связи с этим приведем лишь краткие сообщения из этих обзоров, акцентируя внимание на достижение положительного эффекта в отношении качества литой стали. Первые попытки использования «мягкого обжата» предприняты по отношению к слябовым стальным заготовкам. Японской фирмой «Nippon Steel Corporation» разработан метод обжата слябовых заготовок с использованием плоских брусков (реек), которые могут перемещаться вдоль поверхности слябов в зависимости от расположения горизонта заготовки, где завершается процесс кристаллизации [13]. Схема расположения оборудования, необходимого для обжата слябов по указанному методу, показана на рис. 1, 2. Плоские рейки прижимаются к поверхности слябовой заготовки с помощью эксцент-

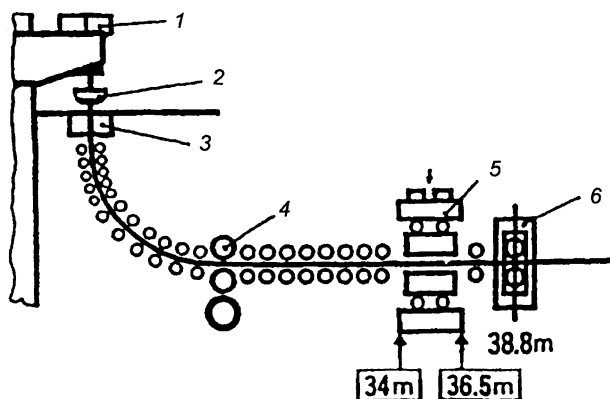


Рис. 1. Схема расположения оборудования при использовании «мягкого обжата» сляба: 1 – стелеразливочный ковш; 2 – промковш; 3 – кристаллизатор; 4 – точка разгиба сляба; 5 – зона обжата; 6 – тянущая клеть

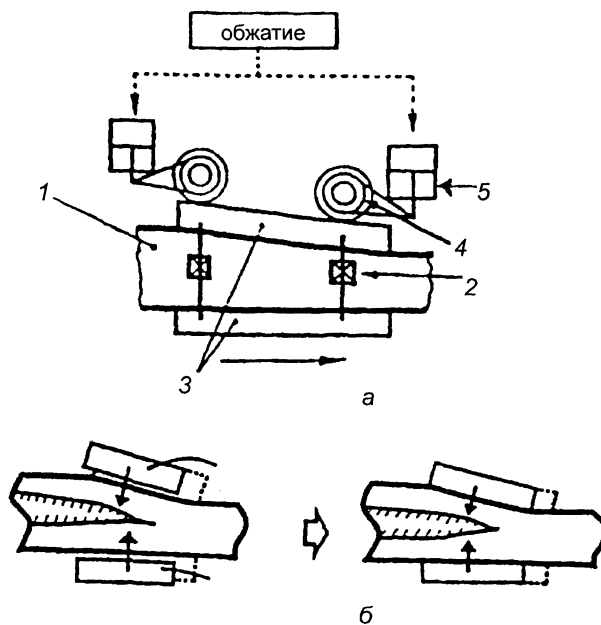


Рис. 2. Схема «мягкого обжата» сляба с использованием плоских реек по данным [13]: а – схема размещения используемых устройств (1 – сляб; 2 – датчики для измерения величины обжата; 3 – плоские рейки; 4 – эксцентрики, обеспечивающие прижатие реек к слябу; 5 – гидроцилиндр); б – схема регулирования обжата сляба в области окончания процесса кристаллизации сляба

триков, приводимых во вращательное движение гидроцилиндрами. Промышленные испытания метода выполняли для слябов поперечным сечением  $280 \times 1800$  мм при скорости литья 1,2–1,3 м/мин, при перегреве металла в промковше над температурой ликвидуса  $10\text{--}35$  °С. Блок устройств по «мягкому обжатию» размещали на расстоянии 35 м от мениска расплава в кристаллизаторе, что соответствовало достижению на данном горизонте МНЛЗ границы выливаемости (80% твердой фазы) затвердевающей стали.

В ходе экспериментов величину обжата варьировали в пределах 0,5–1,2 мм. На рис. 3 представлена полученная в ходе экспериментов зависимость степени осевой сегрегации углерода от величины обжата. Из рисунка видно, что максимальная эффективность данного метода достигается при обжати, равном  $\cong 1$  мм. Отечественный опыт использования метода «мягкого обжата» для повышения качества литой стали описан в [6, 7].

Реализация метода осуществлена на вертикальной МНЛЗ предприятия «Северсталь» при непрерывном литье слябов сечением  $200 \times 1150$  мм из стали марок 09Г2С, 09ГСФ, А36пс, 10ХСНД, 09ХН2МД с использованием тянущеобжимной клетки, снабженной приводными валками с автономными мотор-редукторами и гидроцилиндрами. Данные устройства обеспечивали возможность достижения обжатов слябов в пределах 2–4% от

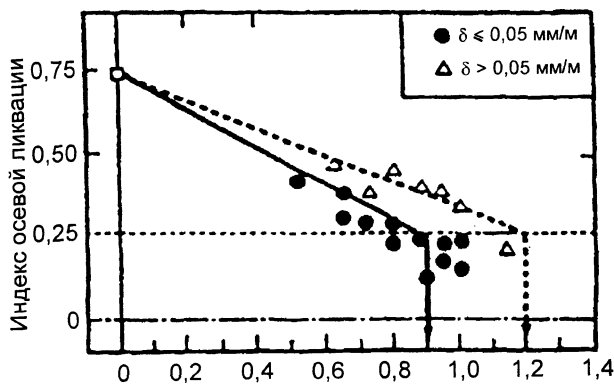


Рис. 3. Зависимость степени ОХН от величины обжатия сляба методом плоских реек [13]

толщины сляба при изменении скорости литья в пределах 0,5–0,7 м/мин.

Эксперименты показали, что использование метода «мягкого обжатия» позволяет сократить зону осевой ликвации слябов и ширину зоны столбчатых кристаллов. Ниже приведены указанные показатели для сталей марок А36пс и 09Г2С по данным [6]:

Марка стали	А36пс	09Г2С
Зона осевой ликвации, мм	20/30	22/28
Зона столбчатых дендритов, мм	40/80	36/78

Числитель – при наличии обжатия, знаменатель – без использования обжатия.

Очевидно, что использование метода «мягкого обжатия» позволило вдвое сократить протяженность зоны столбчатых дендритов и существенно (до 25 – 30%) сократить зону осевой ликвации.

На рис. 4 приведены макроструктуры слябов стали 09Г2С, отлитых с применением «мягкого обжатия» и без него, которые показывают устране-

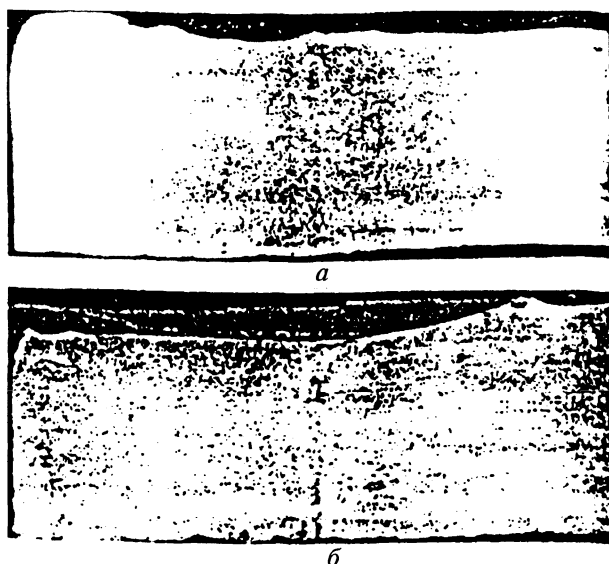


Рис. 4. Макроструктура слябов стали 09Г2С толщиной 200 мм при использовании «мягкого обжатия» (а) и без него (б)

ние дефекта (ОХН) в средней плоскости сляба при использовании «мягкого обжатия».

В последующем блок «мягкого обжатия» на вертикальной МНЛЗ предприятия «Северсталь» был модернизирован за счет установки дополнительной системы калибровочных роликов и увеличения зоны обжатия до 3,5 м. В частности, в мае 2005 г. отлили партию в 1570 т стали 09Г2С на толстый лист (до 40 мм), причем отсортировка, по данным ультразвукового контроля, составила всего 0,4%.

Сопоставительные данные показателей ОХН для указанной стали (в принятых баллах ГОСТ 22727 – самого жесткого в отношении сплошности листа) приведены ниже [7].

Показатель ОХН (в баллах ГОСТ)	Доля плавков:	
	с мягким обжатием	без мягкого обжатия
не более 1 балла	95,8	68,9
не более 1,5 балла	100	96,2

Но данным [6, 7], применение «мягкого обжатия» позволяет увеличить скорость разливки до 15% без ухудшения показателей качества литой стали.

Применение «мягкого обжатия» при непрерывном литье блюмов имеет определенные особенности, связанные с геометрической формой заготовок. Во-первых, твердый каркас затвердевающего блюма имеет значительно большую жесткость, чем сляб, что существенно увеличивает требуемое усилие обжатия. Это, в свою очередь, повышает вероятность образования внутренних трещин по границам дендритов. Во-вторых, приложении обжатия к одной паре граней блюма вызывает выпучивание другой пары граней и может заметно изменить условия распределения примесей в сечении блюма.

Указанные особенности определяют применение специальных технологических приемов при «мягком обжатии» сортовых заготовок прямоугольного и круглого сечения.

На заводе «Сандвик Стал» (Швеция) «мягкое обжатие» применяют при разливке низкоуглеродистой стали в блюмы сечением 265×265 и 265×365 мм на криволинейной МНЛЗ со скоростью литья 0,8–0,9 м/мин. Обжатие осуществляется тремя парами роликов, расположенных на расстоянии 17,7, 19,8 и 22 м от мениска расплава в кристаллизаторе.

Установлено, что при размещении специализированных роликов на указанных горизонтах МНЛЗ осевая пористость заготовок снижается в 1,5–3,0 раза [14]. На заводе «Chita Plant» (Япония) исследовали применение «мягкого обжатия» при непрерывном литье круглых заготовок диаметром 350 мм

из подшипниковой стали. Установлено, что использование «мягкого обжатия» практически полностью подавляет осевую ликвацию углерода: без обжатия в центре заготовок концентрация углерода составляет 0,25–0,35%, при использовании обжатия – 0,05–0,07%. При этом абсолютное значение обжатия составляет 1,6% от диаметра заготовки [15].

В настоящее время на нескольких металлургических заводах Японии и Германии используется модифицированная схема «мягкого обжатия» блюмов. При этом на больших гранях заготовок прямоугольного сечения предусматриваются специальные трапециевидные приливы толщиной 5–12 мм, которые вдавливаются в заготовку в процессе литья.

Альтернативным вариантом реализации данной схемы является использование для «мягкого обжатия» блюмов опорных роликов (валков) с длинной бочки, меньшей ширины грани блюма. К примеру, на заводе «Nippon Socom» (Япония) при «мягком обжати» заготовок сечением 400×520 мм использовали валки с длиной бочки 250–300 мм, что позволило несколько снизить осевую химическую неоднородность литой стали [16].

Обобщая результаты промышленной апробации метода «мягкого обжатия», можно сделать вывод о перспективности его применения. Вместе с тем, для различных геометрических размеров заготовки, разных марок стали и требований к качеству металлопродукции этот метод может быть реализован различными способами. Оптимизация этих способов нуждается в проведении дополнительных исследований, среди которых значительное место должны занять расчетно-теоретические исследования процессов кристаллизации непрерывнолитых заготовок и определения режимов литья, при которых минимизируется дефектность литой стали.

Комплекс физических явлений, сопровождающих процесс «мягкого обжатия» затвердевающих непрерывнолитых заготовок, отличается значительным разнообразием. В настоящее время получили распространение способы описания явлений теплопередачи, возникновения усадочной пористости и внутренних трещин в затвердевающих заготовках. В наибольшей степени разработаны методы расчета поля температур в заготовках, что позволяет контролировать температурное состояние заготовок в ходе непрерывного литья с учетом переходных процессов, когда по технологическим причинам изменяется скорость вытягивания заготовок.

Большое число теоретических исследований посвящено проблеме возникновения усадочной

пористости в затвердевающих отливках и слитках [17–19], а также вопросам макросегрегации компонентов сплава по сечению отливок [20–33].

Проведение полного обзора приведенных публикаций не входит в нашу задачу и в настоящее время представляется преждевременным, поскольку многие детали явлений пористости и сегрегации примесей разработаны в недостаточной степени. В качестве примера приведем краткое изложение математической модели порообразования в непрерывнолитых заготовках, представленной в работах Л. В. Буланова, Н. А. Юровского с соавторами [5, 11, 12], посвященных непосредственно проблеме «мягкого обжатия» заготовок. Исходя из двумерной постановки задачи, авторы [5, 11, 12] используют следующую систему уравнений тепло- и массопереноса:

$$\rho \tilde{r} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \rho L \frac{\partial S}{\partial t} - v_x \frac{\partial T}{\partial x} - v_y \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (SC)}{\partial t} + u \frac{\partial (SC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( DS \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( DS \frac{\partial C}{\partial y} \right) + kC \frac{\partial S}{\partial t} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - v_y \frac{\partial C}{\partial y}, \quad (2)$$

$$v_x = \frac{m}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \delta(P) - \rho g^* \cos \varphi \right) v_y = - \frac{m}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \delta(P), \quad (3)$$

$$\delta(P) = \begin{cases} 1 & \text{при } |P| < P_k, \\ 0 & \text{при } |P| \geq P_k, \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_L} \frac{dS}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad (5)$$

$$Y = \frac{\Delta \rho}{\rho_L} S_k, \quad (6)$$

где  $T$ ,  $P$  и  $C$  – текущие значения температуры, гидродинамического давления и концентрации примеси в сечении отливки;  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $m$ ,  $D$ ,  $L$  – значения коэффициентов массовой плотности, удельной теплоемкости, теплопроводности, динамической вязкости, проницаемости дендритной сетки, диффузии и удельной теплоты плавления сплава;  $Y$  – удельное содержание пор.

Коэффициент проницаемости дендритной сетки  $m$  принят зависящим от размера дендритов  $R$ :

$$m = R^2 S^n / 8, \quad (7)$$

где  $n$  – некий структурный фактор;  $S$  – локальное значение доли жидкой фазы в двухфазной зоне затвердевающей отливки.

Решение системы уравнений (1)–(7) проведено численным методом при задании начальных и граничных условий, соответствующих остыванию слябовой непрерывнолитой заготовки сечением  $250 \times 1250$  мм из стали 14ГС. Результаты решения приведены в работах [5, 11, 12] в виде зависимости гидродинамического давления  $P$  и пористости  $Y$  от ряда технологических параметров процесса непрерывного литья – скорости вытягивания заготовки, интенсивности наружного охлаждения, а также от воздействия приложенного к заготовке мягкого обжатия.

В качестве примера на рис. 5–9 приведены результаты расчетных исследований с использованием уравнений (1–7) по данным [12]. Следует отметить, что при проектировании устройств мягкого обжатия возникает необходимость решения ряда задач, выходящих за пределы теории тепло- и массопереноса. Весьма актуальной является проблема сохранения сплошности материала заготовок в тех случаях, когда усилия обжатия достаточно велики и способствуют процессу образования внутренних трещин в непрерывнолитой заготовке. Заметим, что в статье В. А. Маточкина с соавторами [9] утверждается о разработке математической модели разрушения кристаллизующегося сплава и возможности прогнозирования процесса развития микротрещин в заготовке с использованием концепции непрерывного накопления рассеянных повреждений. Авторы [9] отмечают, что на основе указанной модели рассчитываются требуемые для

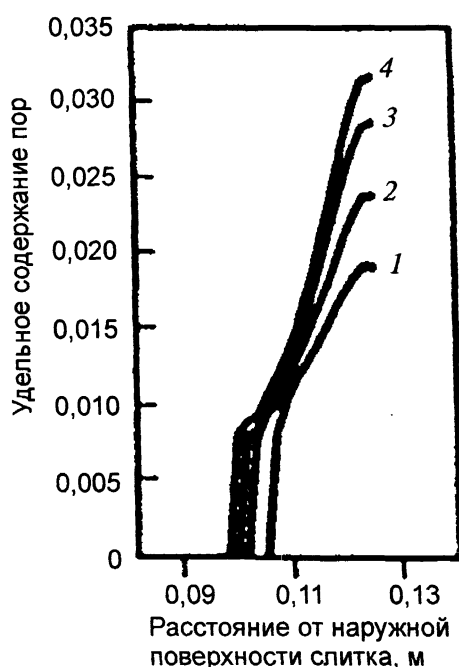


Рис. 5. Распределение удельного содержания пор в центральной части слитка при разных скоростях разливки: 1 – 0,4 м/мин; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,6 м/мин

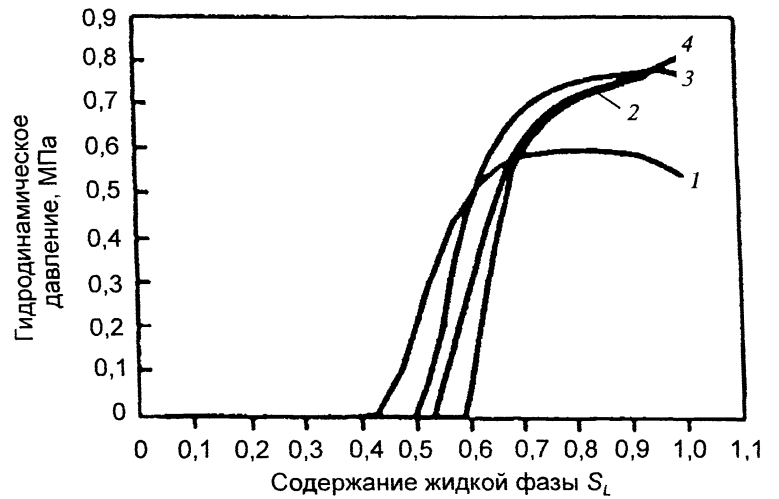


Рис. 6. Зависимость гидродинамического давления от содержания жидкой фазы в двухфазной зоне слитка и скорости разливки: 1 – 0,4 м/мин; 2 – 1,2; 3 – 0,8; 4 – 1,6 м/мин

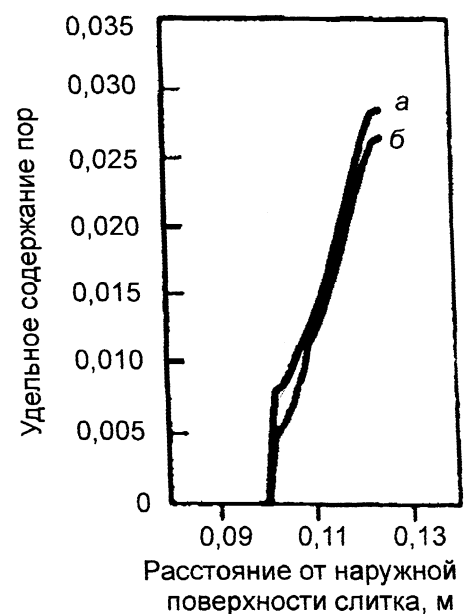


Рис. 7. Удельное содержание пор в центральной части слитка при скорости литья 1,2 м/мин и перегреве металла 15 °С в случае применения мягкого (а) и жесткого (б) режимов охлаждения

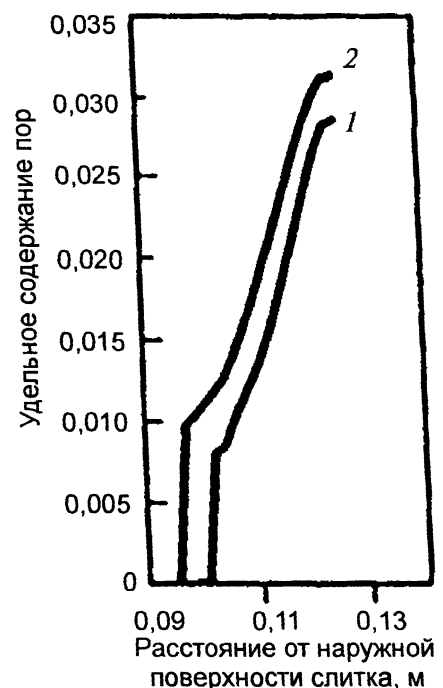


Рис. 8. Удельное содержание пор в центральной части слитка при скорости литья 1,2 м/мин, перегреве металла 15 °С и содержании углерода в стали, равном 0,15% (1) и 0,5% (2)

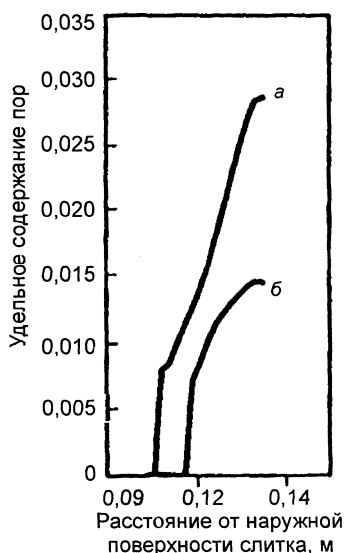


Рис. 9. Удельное содержание пор в центральной части слитка с учетом (а) и без учета (б) мягкого обжатия

обжатия заготовки механические параметры – мощность и усилие прижатия ролика в зоне мягкого обжатия; вместе с тем, никаких сведений о методике расчетов в работе [9] не приводится.

Аналогично в статье А. М. Ламухина с соавторами [6] утверждается об использовании математической модели, позволяющей прогнозировать предельные значения параметров мягкого обжатия, обеспечивающих положительный эффект обжатия без опасений относительно сохранения сплошности литого металла. При этом, аналогично работе [9], какое-либо математическое описание изучаемых явлений либо конкретные значения показателей поля деформаций и напряжений в затвердевающем сплаве в [6] отсутствуют.

В сравнении с отмеченными публикациями изложенная выше математическая модель Буланова–Юровского [11, 12] содержит открытый набор уравнений, при помощи которых определя-

ются поле гидродинамических давлений и степень пористости в полностью затвердевшей отливке.

Вместе с тем, модель Буланова – Юровского отличается некоторой ограниченностью. Для практических целей наиболее важной задачей теоретического анализа является построение физико-математической модели процесса образования осевой химической неоднородности непрерывнолитых стальных заготовок. Промышленные эксперименты показали, что мягкое обжатие позволяет весьма существенно (на десятки процентов) сократить степень ОХН в листовых и сортовых стальных заготовках. В связи с этим представляется необходимым выявить механизм положительного воздействия мягкого обжатия на степень ОХН и на этой базе разрабатывать рекомендации по наиболее рациональным режимам использования метода мягкого обжатия. Между тем, конечный, практически полезный результат модели Буланова – Юровского сводится к оценке степени пористости затвердевающего сплава, что отражено на рис. 5, 7, 9, приведенных из работы [12]. Степень осевой химической неоднородности непрерывнолитых стальных заготовок определенным образом связана со степенью пористости, однако эта взаимосвязь является достаточно сложной и зависит, в частности, от вероятности скопления газов в усадочных порах. К сожалению, анализ взаимосвязи степени ОХН и пористости затвердевшего сплава в работах [11, 12] отсутствует.

Тем не менее, следует признать, что работами [11, 12] в теорию формирования непрерывнолитых заготовок внесен существенный вклад, относящийся к количественной оценке влияния мягкого обжатия на степень пористости полностью затвердевшей стали.

### Литература

1. Бродецкий И. Л., Харчевников В. П., Троцан А. И. и др. Улучшение качества структуры осевой зоны заготовки путем обработки микролигатурами при разливке // Сталь. 2005. № 2. С. 44–46.
2. Носоченко О. В., Исаев О. Б., Лепихов Л. С. и др. Снижение осевой ликвации в непрерывнолитой заготовке путем микролегирования // Металлург. 2003. № 6. С. 45–46.
3. Белый А. П., Исаев О. Б., Матросов Ю. И., Носоченко А. О. Центральная сегрегационная неоднородность в непрерывнолитых листовых заготовках и толстолистовом прокате. М.: Металлургиздат, 2005.
4. Исаев О. Б. Воздействие расходуемых макрохолодильников на снижение осевой сегрегации химических элементов в непрерывнолитых заготовках // Металлург. 2005. № 8. С. 53–57.
5. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. Екатеринбург: Изд-во Марат, 2004.
6. Ламухин А. М., Зиборов А. В., Имгрунт В. Я. и др. Результаты испытания системы мягкого обжатия непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевинной // Сталь. 2002. № 3. С. 57–59.
7. Степанов А. А., Зиборов А. В., Купцов Н. И. и др. Получение толстого листа на вертикальной УНРС с использованием «мягкого обжатия» непрерывнолитых заготовок // Металлург. 2005. № 6. С. 42.
8. Маточкин В. А., Стеблов А. Б., Оленченко А. В. Идея мягкого обжатия как способ управления усадочными и ликвационными процессами при затвердевании непрерывнолитых заготовок // Литье и металлургия. 2003. № 1. С. 37–40.
9. Маточкин В. А., Стеблов А. Б., Айзин Ю. М. и др. Разработка головного образца системы обжатия заготовки на блюмовой МНЛЗ Белорусского металлургического завода // Сталь. 2003. № 5. С. 25–27.

10. Нарци Х., Келлерер С, Штахельбергер К. и др. Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слябов // Черные металлы (пер. с нем.). 2003. Ноябрь. С. 34–38.
11. Буланов Л. В., Юровский Н. А., Химич Т. Г., Масаев М. В. Математическая модель и расчет параметров мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 8. С. 124–131.
12. Юровский Н. А., Буланов Л. В. Расчетный анализ влияния параметров непрерывной разливки на порообразование слитка // Сталь. 2005. № 9. С. 14–16.
13. Hattori W., Nagata S., Ihaba A. et al. New technology to tackle centreline segregation // Steel technology international., 1990/1991. P. 189–193.
14. Sivesson P., Wass S., Rodberg B. Improvement of Center porosity in Continuously Casting Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process // 3-rd European Conf. on Continuous Casting. Madrid (Spain). October 20–23. 1998. P. 213–223.
15. Нагакама С., Шинкай М., Кашима Т. Improvement of Center quality of continuously cast round bloom with soft reduction // 3-rd European Conf. on Continuous Casting. Madrid (Spain). October 20–23. 1998. P. 225–233.
16. Цуцуми К., Фукумура К., Нисиока С. и др. Легкое обжатие непрерывного слитка валками с разной длиной бочки // Новости черной металлургии за рубежом. 1996. № 1. С. 52.
17. Журавлев В. А., Сухих С. М. Машинное моделирование формирования распределенной пористости и усадочной раковины при кристаллизации сплавов в слитки // Металлы. 1981. № 1. С. 80–84.
18. Соболев В. В., Трефилов П. М. Исследование осевой пористости в непрерывных слитках прямоугольного сечения // Изв вузов. Черная металлургия. 1982. № 7. С. 27–31.
19. Журавлев В. А., Колодкин В. М., Бакуменко С. П., Окатьев В. В. О механизме образования пор при кристаллизации сплавов // Металлы. 1986. № 3. С. 61–65.
20. Флемингс М. Процессы затвердевания. М.: Мир. 1977.
21. Matsumiya T., Kajioka H., Mizoguchi S. et al. Mathematical Analysis of Segregation in Continuously-Cast Slabs.: Trans. of the Iron and Steel Inst, of Japan. 1984. Vol. 24. N 11. P. 873–882.
22. Завгородний П. Ф., Мороз Л. П., Недопекин Ф. В. и др. Двухфазная зона при кристаллизации бинарного сплава // ИФЖ. 1978. № 6. Т. 34. С. 1122–1127.
23. Повх И. Л., Завгородний П. Ф., Недопекин Ф. В. и др. Расчет формирования двухфазной зоны в условиях естественного конвективного движения затвердевающего расплава // Металлы. 1980. № 3. С. 86–94.
24. Черепанов А. Н., Рапацкая Т. Х. Влияние термо- и гидродинамических процессов в гетерогенной зоне на макросегрегацию растворимой примеси // Теплофизические процессы при кристаллизации и затвердевании. Новосибирск, 1984. С. 37–36.
25. Piwonka T. S., Flemings M. C. Pore formation in Solidification // Trans. of the Met. Soc. AIME. 1966. Vol. 236. P. 1157–1165.
26. Flemings M. C., Mehrabian R., Nereo G. E. // Macroseggregation. Pt. 2. Trans. of the Met. Soc. AIME. 1968. Vol. 242. P. 41–55.
27. Флемингс М. Моделирование и разработка технологий // Электрошлаковый переплав Киев: Наукова думка, 1984. Вып. 7. С. 90–107.
28. Пойриер Д. Р., Мерабиан Р., Флемингс М. Моделирование макросегрегации слитках ЭСПП // Электрошлаковый переплав Киев: Наукова думка. Вып. 7. 1984. С. 155–178.
29. Ohnaka G., Matsumoto M. Computer Simulation of Macroseggregation in Ingot Тэцу то хаганэ. 1987. Vol. 73. N 14. P. 86–93.
30. Apelian D., Flemings M. C., Mehrabian R. Specific permeability of partially solidified dendrite networks of AL-SI alloys // Met. Trans. 1974. Vol. 5. N 12. P.2533–2537.
31. Mehrabian R., Keane M., Flemings M. C. Interdendritic fluid flow and macroseggregation, influence of gravity // Met. Trans. 1970. Vol. 1. N 5. P.1209–1220.
32. Недопекин Ф. В. Математическое моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в слитках. Ижевск: Изд-во Удмуртского ун-та, 1995.
33. Miya zava K., Schwerdtfeger K. Macroseggregation in continuously cast steel slabs preliminary theoretical investigation on the effect of steady state bulging // Archiv f. d. Eisenhüttenwesen. 1981. N 11. P. 415–422.