



*There is carried out the analysis of the existing technologies of "soft squeezing" in terms of operating machines of continuously casting of slugs. There are intended the ways of reconstruction of MNLZ-3, functioning in conditions of the Belarussian metallurgical works, with the purpose of realization of the dynamic soft squeezing method.*

В. А. МАТОЧКИН, А. Б. СТЕБЛОВ, А. В. ОЛЕНЧЕНКО, РУП «БМЗ»

УДК 621.746

## ИДЕЯ «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ УСАДОЧНЫМИ И ЛИКВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

В последнее время технология мягкого обжатия непрерывнолитой заготовки с незатвердевшей сердцевиной интенсивно развивается. При деформации незатвердевшей сердцевины слитка происходит выдавливание ликватов из междендритного пространства, а также разрушение ветвей дендритов, которые становятся центрами зарождения кристаллов при объемной кристаллизации.

Первые опыты обжатия отдельного слитка в процессе затвердевания были проведены во Франции в 1990 г. Однако применительно к непрерывной разливке стали этот процесс стал использоваться за рубежом во второй половине 90-х годов XX столетия. Например, в Германии фирма «Dillinger Hutter» ввела в эксплуатацию вертикальную МНЛЗ [1] с динамической системой мягкого обжатия слябов с незатвердевшей сердцевиной. Применение этой технологии улучшило внутреннюю структуру сляба. В то же время выяснилось, что качество макроструктуры существенно зависит от химического состава стали, скорости вытягивания сляба, положения конца жидкой фазы, степени деформации. Малая степень обжатия результатов не дает.

Большое значение придается точности настройки и жесткости клетки, чтобы заданная степень обжатия дошла до фронта затвердевания. Фирма «Sumitomo metal industries» завершила разработку технологии мягкого обжатия сляба средней толщины. Криволинейная МНЛЗ снабжена четырьмя роликowymi секциями с гидравлическим приводом, первая, вторая и третья секции служат для разгиба сляба, а четвертая — для мягкого обжатия сляба с жидкой сердцевиной [2]. В целом такой метод «мягкого» обжатия оказывается достаточно эффективным при динамической обработке тонких слябов.

В отечественной практике известно внедрение данной технологии на слябовой машине ОАО «Северсталь» [3].

Кроме слябовой заготовки, мягкому обжатию слитка с жидкой сердцевиной подвергаются блю-

мовые и круглые непрерывнолитые заготовки. Например, научно-исследовательский институт POSCO (Южная Корея) разработал технологию производства блюмов стали для производства металлокорда [4]. Исследованы стали с содержанием 0,7 и 0,8% углерода. На сталях с содержанием углерода 0,7% применение мягкого обжатия позволило снизить степень ликвации (отношение содержания углерода в осевой зоне к среднему содержанию углерода) с 1,6 до 1,05. Экспериментально установлена оптимальная скорость разливки с применением мягкого обжатия для этой стали — 0,75 м/мин. Для стали с содержанием углерода 0,82% при той же степени обжатия оптимальная скорость разливки с применением мягкого обжатия этой стали составила 0,7 м/мин. Степень осевой ликвации углерода уменьшается с увеличением степени обжатия до 6 мм, затем становится постоянной. Вместе с тем при обжатии до 6 мм практически не образуются внутренние трещины в заготовке.

На фирме «Nippon Steel» (Япония) для оптимизации технологии непрерывной разливки блюмов с мягким обжатием приведены исследования ликвации марганца в условиях обжатия для компенсации усадки на модельной установке [5]. В [6] описана работа МНЛЗ для разливки блюмов размером 300x500 мм с легким обжатием дисковыми валками. Деформация производится без затрагивания кромок, которые характеризуются повышенным сопротивлением деформации. Обжатие блюма составляло 3–4 мм. Изучался механизм образования V-образной ликвации. Считается, что ликвация этого вида образуется на стадии кристаллизации, когда доля твердой фазы в осевой зоне составляет 0,15–0,25, и обусловлена периодической деформацией сдвига под воздействием эффекта отсасывания ликватов во время усадки при затвердевании. На заводе «Nippon Steel» в Мураоне проводили эксперименты с интенсивным обжатием непрерывнолитых блюмов размером 220x200 мм с целью вытеснения ликватов [7].

Скорость разливки составляла 0,8–1,3 м/мин. Блюм обжимали два ряда вертикальных и горизонтальных валков с ящичными калибрами. В проведенных экспериментах обнаружено, что степень развития осевой и отрицательной ликвации в центральной зоне зависит от режима обжатия и формы калибров. При редуцировании с большим обжатием исчезла зона равноосных кристаллов со стороны верхней поверхности блюма. Непосредственно под столбчатыми кристаллами у верхней стороны заготовки в зоне обратной ликвации образовалась зона, обогащенная ликвирующими элементами. Эксперименты с остановкой обжатия показали, что по мере выдавливания ливата при большом обжатии заготовки валками формируются траектории (канал) потока жидкой фазы с преимущественным удалением сгущенной жидкой фазы непосредственно под столбчатые кристаллы со стороны верхней части заготовки. Вследствие осаждения равноосных кристаллов на стороне нижней поверхности заготовки поток жидкой фазы имеет в поперечном сечении слитка сплюсненную форму. Если при этом калибры валков имеют неоптимальную форму, то стенки канала течения жидкой фазы не смыкаются полностью и формируется зона захвата сгущенной жидкой фазы, которая проявляется в виде зоны ликвации. В работе [8] рассмотрена вертикальная МНЛЗ фирмы «Daido Steel» с использованием технологии мягкого обжатия слитка с жидкой сердцевинной. Разливается подшипниковая, пружинная и нержавеющая стали в круглую заготовку диаметром 350 мм. Скорость разливки 0,3–0,5 м/мин. Участок обжатия состоит из двух пар приводных роликов диаметром 400 мм. Максимальное давление составляет 50 т/ролик, величина обжатия достигает 30 мм. Одной из причин выбора круглой формы заготовки было стремление осуществить максимальное давление на жидкую сердцевину слитка без образования внутренних трещин.

На заводе «Сандвик Стил» (Швеция) выполнены исследования на нержавеющей хромоникелемолибденовой стали с ультранизким содержанием углерода, разливаемой на блюмы сечением 265x265 или 265x365 мм на криволинейной МНЛЗ [9]. Скорость разливки изменялась в пределах 0,81–0,89 м/мин, а общая величина обжатия – от 4,0 до 7,1 мм. Обжатия осуществляли тремя парами роликов, расположенными на расстоянии 17,7, 19,8 и 22 м от мениска. Установлено, что для выполненных экспериментов существуют определенные оптимальные значения величины обжатия и скорости вытяжки, обеспечивающие максимальное снижение осевой пористости (в 1,5–3,0 раза по разным шкалам). Эти результаты подтверждают тот факт, что определяющим моментом с точки зрения эффективности метода динамического «мягкого» обжатия на подавление осевой

пористости является взаимное положение границы жидкой лунки и места приложения обжатия.

На заводе «Chita Plant» (Япония) выполнены комплексные исследования по изучению влияния динамического «мягкого» обжатия круглых заготовок диаметром 350 мм из подшипниковой стали [10]. В ходе исследования оценивали углеродную ликвацию, угол раскрытия V-образной ликвации, макроструктуру, внутренние трещины как в литом металле, так и в прокатанной сортовой заготовке. Установлено, что мягкое обжатие круглой заготовки практически полностью подавляет осевую углеродную ликвацию: увеличение содержания углерода в центре заготовки составляет 0,05–0,07%, в то время как в заготовке без мягкого обжатия – 0,25–0,35%. Основным условием повышения качества макроструктуры авторы считают обеспечение доли твердой фазы на уровне 0,4–0,45 в зоне обжатия при величине обжатия на уровне 1,6% от диаметра. Увеличение доли твердой фазы свыше указанных пределов приводит к снижению эффекта подавления ликвации. Уменьшение доли твердой фазы менее 0,4 характеризуется формированием внутренних трещин. Что же касается поведения V-образной ликвации при мягком обжатии, то однозначно подтвержден факт ее некоторого подавления при увеличении угла раскрытия на 10–15°.

Положительные результаты по подавлению осевой ликвации при использовании метода мягкого обжатия получены на заводе «Sollac» (Франция) при разливке блюмов сечением 260x320 мм из углеродистой стали [11].

В настоящее время на нескольких металлургических заводах Японии и Германии используется следующая модифицированная схема мягкого обжатия блюмов. Для создания благоприятных условий для приложения усилия и контроля степени обжатия на больших гранях заготовки предусматриваются специальные трапецеидальные приливы толщиной 5–12 мм, которые затем вдавливаются в заготовку в два или три этапа. Вместе с тем такая схема предполагает изменение геометрической формы кристаллизатора, а также геометрических размеров приливов в зависимости от места приложения деформирующего усилия, марки стали, условий охлаждения заготовки, места положения лунки жидкой фазы. Альтернативным вариантом реализации этого метода на практике является использование мягкого обжатия валков с длиной бочки меньшей, чем ширина грани непрерывного слитка. Так, на заводе «Nippon Copen» (Япония) для мягкого обжатия заготовки сечением 400x520 мм использовали валки с длиной бочки 250–300 мм, что позволило ослабить ликвацию и исключить появление внутренних трещин [12].

Анализ опыта работы с технологией мягкого обжатия различных фирм позволяет сделать следующие выводы. Первоначально метод «мягкого» обжатия непрерывнолитой заготовки предполагал деформацию заготовки с помощью роликов в зоне ее выравнивания. С точки зрения простоты реализации данный вариант достаточно привлекателен. Однако, как показали исследования, существует несколько серьезных препятствий для эффективной реализации этой схемы деформирования.

1. Обжатие заготовки происходит в строго фиксированных точках, что требует самого точного контроля температуры разлива и режимов охлаждения, так как в противном случае происходит смещение положения точки окончания зоны жидкой фазы и необходимый эффект не достигается.

2. Обжатие заготовки требует значительных усилий, величина которых резко возрастает с увеличением доли твердой фазы, однако при большой доле жидкой фазы эффект динамического обжатия оказывается крайне незначительным из простого перетекания металла. Это практически полностью исключает подавление осевой ликвации и крайне слабо влияет на уменьшение пористости.

3. Обжатие заготовки с помощью нескольких пар роликов при определенных условиях может вызывать выпучивание заготовки между роликами. Такая деформация заготовки стимулирует развитие осевой ликвации и появление дополнительных ликвационных полос.

Применение метода «мягкого» обжатия для динамического воздействия на внутренние объемы непрерывнолитой заготовки имеет определенные особенности. Это следует связывать прежде всего с геометрической формой заготовки. В первую очередь, твердый каркас затвердевающего бляма имеет значительно большую жесткость, чем у сляба, что существенно увеличивает требуемое усилие обжатия. Это, в свою очередь, повышает вероятность образования внутренних трещин по границам дендритов. С другой стороны, приложение обжатия по двум граням (как было рассмотрено выше) обязательно вызовет выпучивание двух других граней. Это выпучивание в значительной степени может изменить условия движения металла в жидкой сердцевине и снизить до минимума эффект подавления ликвации. Рассмотренные отличия между динамическим мягким обжатием слябов и блюмов предопределяют создание специальных технологических приемов.

Таким образом, практические данные относительно эффективности метода динамического мягкого обжатия непрерывнолитых заготовок свидетельствуют о перспективности его применения. Однако для различных геометрических размеров заготовки, металлургических условий, марок ста-

лей и требований к качеству металлопродукции этот метод может быть реализован разными способами. Оптимизация этих способов еще не произошла из-за ограниченного объема исследований. Между тем предпосылками для успешной обработки заготовки методом «мягкого» обжатия являются:

- наличие данных об оптимальном соотношении твердой и жидкой фазы в месте приложения усилия обжатия применительно к конкретным условиям;
- определение величины оптимальных значений степени обжатия, значений прилагаемых усилий и динамики приложения усилия обжатия;
- наличие системы, способной в реальном масштабе времени определять профиль затвердевания в зависимости от скорости литья, марки сталей, условий первичного и вторичного охлаждения и перегрева металла в проковше;
- наличие системы, позволяющей оперативно корректировать точку приложения усилия обжатия в зависимости от изменения условий разлива.

При разработке концепции конструирования оборудования для МНЛЗ-3 в условиях Белорусского металлургического завода необходимо определить:

- способ приложения деформирующего усилия к поверхности заготовки;
- закон приложения обжатия (обжатие в один или несколько этапов);
- место приложения усилия деформации (соотношение между количеством жидкой и твердой фазы в момент обжатия).

Данная технология в настоящее время проходит теоретическую проработку применительно к МНЛЗ-3 в виде численных расчетов и физического моделирования на экспериментальной установке АО «Корд» (г. Москва).

### Литература

1. Takeuchi Isamu et al. Development of thin slab casting equipment for liquid core reduction // Zaireo to Prosesu. 1996. Vol. 9. N 1. P. 76.
2. Oh K.S., Park J. K., Kwon O. D. et al. Quality improvement of continuously cast blooms for high grade tire cord steel // Iron and Steelmaker. 1996. N 3. P. 65–68.
3. Результаты испытания системы мягкого обжатия непрерывнолитого сляба с жидкой сердцевиной / А. М. Ламухин, А. В. Зибуров, В. Я. Имгрунт и др. // Сталь. 2002. № 3. С. 57–59.
4. Ликвация в слитке, подвергнутого обжатию с неполностью затвердевшей сердцевиной / Х. Мисуми, Т. Касама, Т. Сэки и др. // Дзайре то пуросэсу. 1994. Т. 7, № 4. С. 1212.
5. Регулирование макроликвацией в непрерывнолитом блюме из высокоуглеродистой стали с применением легкого обжатия дисковыми валками / М. Миядзава и др. // Тэцу то хаганэ. 1994. № 9. С. 721–725.
6. Isibe Kohichi. The effect of liquid-core large reduction on internal quality of cast bloom // Zairyu to prosesu - Current Advances in Materials and Processes, 1996. Vol. 9, N 4. P. 845.
7. Hagakava S., Shinkai M. Improvement of Center Quality of Continuos Cast Round Bloom with Solf Reduction // 3-rd European Conferenct on Continuos Casting, P. 925–937.

8. Линдорфер Б., Мервальд К. Технологические модульные узлы для высокоэффективного литья заготовок // *Металлургическое производство и технология металлургических процессов*. Дюссельдорф: Штальвайзен Гмбх, 1999. С. 32–41.

9. Sivesson P., Wass S., Rogberg 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. N 1. P. 213–223.

10. Hayakama S., Shinkai M., Kashima T. Improvement of center quality of continuous cast round bloom with soft reduction // 3-rd European Conf. on Continuous Casting. Madrid-Spain, October 20–23. 1998. N 1. P. 225–233.

11. Chappeller P., Jacquot J.-L., Sosin L. Twin-bloom casting of high carbon steels at SOLLAC: 4 years of continuous improvement // 3-rd European Conf. on Continuous Casting. Madrid-Spain, October 20–23. 1998. N 1. P. 283–293.

12. Легкое обжатие непрерывного слитка валками с разной длиной бочки / К. Цуцуми, К. Фукумура, С. Нисиока и др. // *Новости черной металлургии за рубежом*. 1996. № 1. С. 52.

Белорусское общественное объединение  
литейщиков и металлургов,  
редакция журнала «Литье и металлургия»  
поздравляют

**КОЛЛЕКТИВ РУП «БМЗ»**

с награждением

*Дипломом участника смотра-конкурса  
за работы, представленные на смотр-конкурс  
проектов и рационализаторских  
предложений по энергосбережению и  
автоматизации процессов  
горно-обогатительных  
и металлургических предприятий.*

Желаем дальнейших успехов  
и сохранения своего статуса  
флагмана металлургии в Беларуси.