

УДК 621.746

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЛИЧИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СДВИГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИИ MSR В УСЛОВИЯХ СОРТОВОЙ МНЛЗ

*Смирнов Е.Н.¹, д.т.н., профессор кафедры «Металлургия и металловедение
им. С.П. Угаровой» (en_smirnov@i.ua)*

*Склад В.А.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия и металловедение им. С.П. Угаровой»
Богадевич Д.И.¹, аспирант*

Смирнов А.Н.², д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник

*Белевитин В.А.³, д.т.н. профессор кафедры автомобильной техники, информационных
технологий и методики обучения техническим дисциплинам*

¹ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ «МИСиС»
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

² Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
(03680, Украина, Киев, бульвар Академика Вернадского, 34/1)

³ Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 69)

Аннотация. Помимо электромагнитного перемешивания, разливки стали с низким перегревом, интенсивного теплоотбора в верхней части зоны вторичного охлаждения, технология Mechanical Soft Reduction (MSR) оказалась очень эффективным технологическим приемом, обеспечивающим уменьшение ликвации и осевой пористости в непрерывнолитой заготовке. Реализация технологии MSR при производстве непрерывнолитых сортовых заготовок имеет ряд особенностей, которые обусловлены их квадратной формой. В этом случае особенно перспективным является использование блоков сегментной конструкции, которые получили название pinch-rollsegment. Наличие в линии МНЛЗ блока MSR такой конструкции позволяет реализовать двухстадийную схему деформации. В работе предложена новая двухстадийная схема технологии MSR, которая позволяет реализовать на первой стадии комбинированное деформационное воздействие на основе сжатия в вертикальной плоскости и сдвигового относительного смещения граней, а на второй стадии – деформационное воздействие на основе сжатия в вертикальной плоскости. Такой подход дает возможность дополнительно исправлять деформации поперечного сечения профиля, а именно дефект «ромбовидность». Представлены результаты сопоставительного исследования с использованием методов физического моделирования по оценке вклада в общую эффективность технологии MSR сортовых непрерывнолитых заготовок дополнительного сдвигового относительного смещения граней в горизонтальной плоскости. Использование плоской модели в совокупности с предложенной формой деформирующих валков и сочетания моделирующих материалов позволили достичь хорошего подобия по геометрическому критерию, а также по критерию эквивалентности отношения напряжений, возникающих на границе фронта кристаллизации. Полученные экспериментальные данные дали возможность развить представления о механизмах дополнительных положительных эффектов от приложения сдвигового воздействия. В частности, деформация металла поверхностных и прилегающих к ним слоев заготовки в валках со специальным вышеописанным профилированием будет способствовать повышению их качества за счет возникновения сдвиговых деформаций, интенсифицирующих процесс схлопывания подкорковых пузырей, «залечивания» микротрещин и т.д. В свою очередь, искусственное создание крутящего момента в сечении заготовки будет способствовать возникновению сдвиговых деформаций в закристаллизовавшихся «мостах» осевой жидко-твердой области слитка, тем самым интенсифицируя процесс их разрушения и повышая качество макроструктуры заготовки.

Ключевые слова: сдвиговые деформации, непрерывнолитая заготовка, блок сегментной конструкции, физическая модель, дефекты макроструктуры, критерий подобия, критерий ромбовидности, деформация сжатия, деформация сдвига.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-19-26

ВВЕДЕНИЕ

Для макроструктуры осевой зоны непрерывнолитой сортовой заготовки характерны дефекты, которые обусловлены процессами, происходящими на этапе окончательного затвердевания. В этот момент осевая зона находится в двухфазном состоянии. К таким дефектам относятся осевая ликвация и пори-

стость [1]. Помимо электромагнитного перемешивания, разливки стали с низким перегревом, интенсивного теплоотбора в верхней части зоны вторичного охлаждения и других технологических приемов [2, 3], технология Mechanical Soft Reduction (MSR) оказалась очень эффективным технологическим приемом, обеспечивающим уменьшение ликвации и осевой пористости в непрерывнолитой заготовке [4 – 6].

Основная идея механической деформации непрерывнолитой заготовки в процессе кристаллизации состоит в том, чтобы уменьшить макросегрегацию за счет компенсации усадки, имеющей место в процессе затвердевания, и предотвратить всасывание остатков расплава (содержащего примеси) в двухфазную зону кристаллизующейся заготовки [7 – 9]. Так, по данным работы [10], применительно к условиям разливки рельсовой стали показатели улучшения макроструктуры металла имеют вид: по параметру осевая рыхлость прирост числа непрерывнолитых слитков с баллом ≤ 1 составил 51 %, по параметрам осевая пористость и ликвация с баллом $\leq 0,5 - 22$ и 53 % соответственно.

Наиболее целесообразно использование этого метода при производстве сталей [10], которые из-за трещин и деформации поперечного сечения профиля (разница размеров по диагонали – «ромбовидность», увеличение длины стороны заготовки – «выпучивание») не могут подвергаться интенсивному охлаждению во вторичной зоне (ЗВО) [11 – 13].

Постановка задачи

Реализация технологии MSR при производстве непрерывнолитых сортовых заготовок имеет ряд следующих особенностей, которые обусловлены их квадратной формой.

- Закристаллизовавшая часть поперечного сечения заготовки (твердая оболочка) имеет большую жесткость по сравнению с непрерывнолитым слябом. В этом случае для реализации процесса необходимы большие нагрузки. Однако в этом случае повышается вероятность образования внутренних трещин по границам дендритных кристаллов [14, 15].

- Сформировавшиеся после ЗВО деформации поперечного сечения профиля могут увеличиться в случае приложения внешнего силового воздействия только по двум граням. Как следствие – минимальная эффективность технологии MSR [16].

Все вышеизложенное вызывает необходимость дальнейшего совершенствования схем реализации технологии MSR. Особенно перспективным является использование блоков сегментной конструкции [12].

Этот блок состоит из шести гидравлических сегментов на каждый ручей, которые имеют два отдельно регулируемых ролика, позволяющих передавать усилие в зону затвердевания и, соответственно, влиять на микроструктуру.

Такая конструкция, называемая *pinch-rollsegment*, создает предпосылки для реализации в них технологии MSR по двухстадийной схеме [17, 18]. Двухстадийная схема позволяет осуществить на первой стадии комбинированное деформационное воздействие на основе сжатия в вертикальной плоскости и сдвигового относительного смещения граней, а на второй стадии – деформационное воздействие на основе сжа-

тия в вертикальной плоскости. Такой подход дает возможность с одной стороны дополнительно исправлять деформации поперечного сечения профиля, а именно дефект «ромбовидность» [19], а с другой – уменьшать осевую пористость и ликвации [20] за счет приложения сдвиговой деформации. Положительный эффект от наличия последней доказан в различных процессах ОМД [21 – 27].

В этом случае на поверхности валков будут найдены выступы, которые выполнены по многозаходным винтовым линиям. При выборе винтовой линии необходимо руководствоваться тем, что она должна иметь такой угол подъема, который бы обеспечивал (при заданном диаметре валков) за один оборот необходимое сдвиговое смещение контактирующих граней, которое позволяет исправить начальную (после ЗВО) ромбовидность. Что касается формы выступа на поверхности валка, то с точки зрения процесса получения в итоге непрерывнолитого слитка с ровной поверхностью они должны иметь скругленную форму профиля у вершины и быть сопряжены со смежными впадинами со скругленной формой дна.

При реализации предложенной схемы возможно и общее повышение эффективности технологии MSR [28, 29].

Целью работы является исследование с использованием методов физического моделирования общей эффективности технологии MSR при приложении внешнего комбинированного деформационного воздействия на основе сжатия в вертикальной плоскости и сдвигового относительного смещения граней в горизонтальной плоскости.

Методика исследования

Для проведения исследования в качестве базового сечения был принят квадрат 150×150 мм, который входит в сортамент практически всех вновь построенных в России сортовых МНЛЗ [30]. Для моделирования установлен масштаб, равный 1:1.

Для проведения исследований была взята плоская прозрачная модель, имитирующая, фактически, процессы в элементарном сечении.

В качестве материалов для изготовления физической модели были приняты:

- для имитации закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитой заготовки – листовой вспененный полиэтилен (хорошая пластичность и высокая механическая прочность в зависимости от толщины);
- для имитации осевой области, находящейся в жидко-твердом состоянии, железная форма, получаемая при застывании смеси воды, красителя и желатина.

Вариации толщины листов вспененного полиэтилена и содержания желатина в железной форме позволили достичь подобия к реальному объекту [17, 31] по критерию

$$\left(\frac{\sigma_{s, \text{вн.гр.}}}{P_{\text{вн.гр.}}} \right)_{\text{нат. объект}} = \left(\frac{\sigma_{s, \text{закр.сост.}}}{\sigma_{s, \text{ж-т.сост.}}} \right)_{\text{физ. модель}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{s, \text{вн.гр.}}$ – напряжение течения металла в слоях, примыкающих к внутренней границе закристаллизовавшейся составляющей непрерывнолитого слитка; $P_{\text{вн.гр.}}$ – давление столба жидкого металла на границе фронта кристаллизации; $\sigma_{s, \text{закр.сост.}}$ – напряжение, возникающее в материале физической модели, имитирующей закристаллизовавшуюся составляющую при приложении заданной величины относительного обжатия ε ; $\sigma_{s, \text{ж-т.сост.}}$ – напряжение, возникающее в материале физической модели, имитирующей жидко-твердую осевую составляющую при приложении заданной величины относительного обжатия ε .

В частности, применительно к условиям сортовой МНЛЗ с радиусом изгиба 7,0–9,0 м [30], давление столба жидкого металла в районе блока MSR составляет 0,319–0,445 МПа (высота 5 и 7 м соответственно). Напряжение течения металла в слоях, примыкающих к фронту кристаллизации, по данным различных источников колеблется в пределах 0,87 МПа [32, 33]. Для

вышеназванных условий значение $\left(\frac{\sigma_{s, \text{вн.гр.}}}{P_{\text{вн.гр.}}} \right)_{\text{нат. объект}}$ составляет 1,955–2,728.

Выполненные с использованием созданной лабораторной установки (рис. 1, а) исследования взятых для создания физической модели материалов (рис. 1, б) показали, что в случае применения пары «вспененный полиэтилен – желе» в интервале величин относительного обжатия 2,0–7,0 % возможно получение соотношения

отношения $\left(\frac{\sigma_{s, \text{закр.сост.}}}{\sigma_{s, \text{ж-т.сост.}}} \right)_{\text{физ. модель}}$ в пределах

2,23–2,25, что соответствует, фактически, середине интервала значений, характерных для натурального объекта.

Для получения информации о характере протекания процесса деформирования при различных соотношениях размеров области, имитирующей жидко-твердую фазу F_o , к сечению непрерывнолитого слитка $F_{\text{кв}}$ ($F_o/F_{\text{кв}}$), а также при различных значениях коэффициента ромбовидности K_p , определяемого как отношение большей диагонали d_{max} к меньшей d_{min}

$$K_p = \frac{d_{\text{max}}}{d_{\text{min}}}, \quad (2)$$

были изготовлены три серии моделей:

- первая серия: $K_p = 1,035, F_o/F_{\text{кв}} = 0,05, 0,10, 0,25$;
- вторая серия: $K_p = 1,067, F_o/F_{\text{кв}} = 0,05, 0,10, 0,25$;
- третья серия: $K_p = 1,100, F_o/F_{\text{кв}} = 0,05, 0,10, 0,25$.

Размеры осевой жидко-твердой (не закристаллизовавшейся) области на предполагаемом участке реализации схемы MSR определялись путем расчетов на математической модели [34].

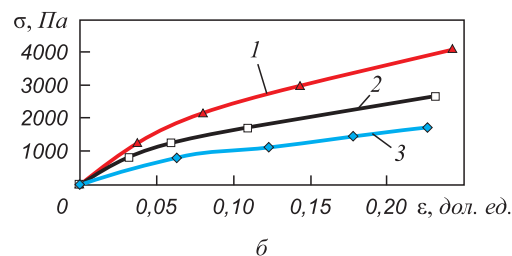
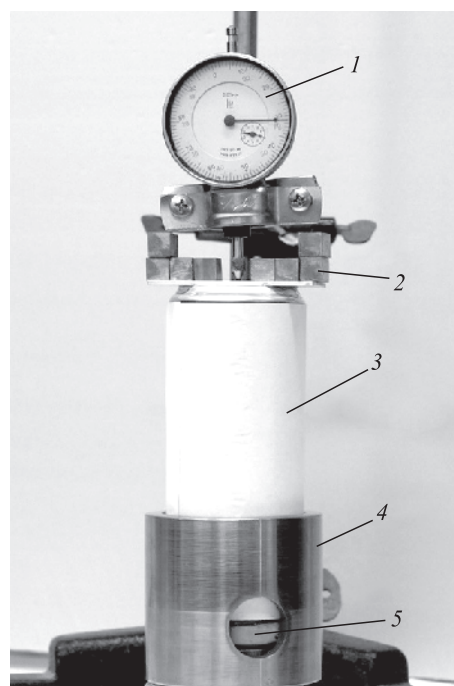


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки (а): 1 – индикатор часового типа; 2 – площадка нагружения; 3 – верхний пуансон; 4 – направляющая обойма с окном и нижний пуансон; 5 – испытываемый образец. Зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ для материалов физической модели (б): 1 – пенополиэтилен; 2 – поролон; 3 – желейная смесь

Fig. 1. Appearance of the laboratory unit (a): 1 – dial indicator; 2 – loading platform; 3 – upper punch; 4 – guide clip with hole and lower punch; 5 – test sample. Dependence $\sigma = f(\varepsilon)$ for the materials of physical model (b): 1 – cellular polyethylene; 2 – foam rubber; 3 – jelly mix

Деформирование модели (степень высотного относительного обжатия ε не превышала 3,3 %) обеспечивалось с помощью двух зубчатых реек. Зубцы были в форме трапеции. Рейки имели возможность перемещаться как в направлении сжатия, так и сдвига L . Относительное смещение зубчатых реек L составляло 5, 10, 15 и 20 мм. Для фиксации характера формоизменения желейной вставки, имитирующей жидко-твердую фазу, внутрь последней строго по координатам вносили пузырьки воздуха объемом примерно 15 мм³ (рис. 2).

Для дифференцирования изменения формы пузырьков по сечению имитирующей вставки она разделялась на зоны, границы которых очерчивались окружностями следующих диаметров: $d_1 = 23$ мм, $d_2 = 37,8$ мм,

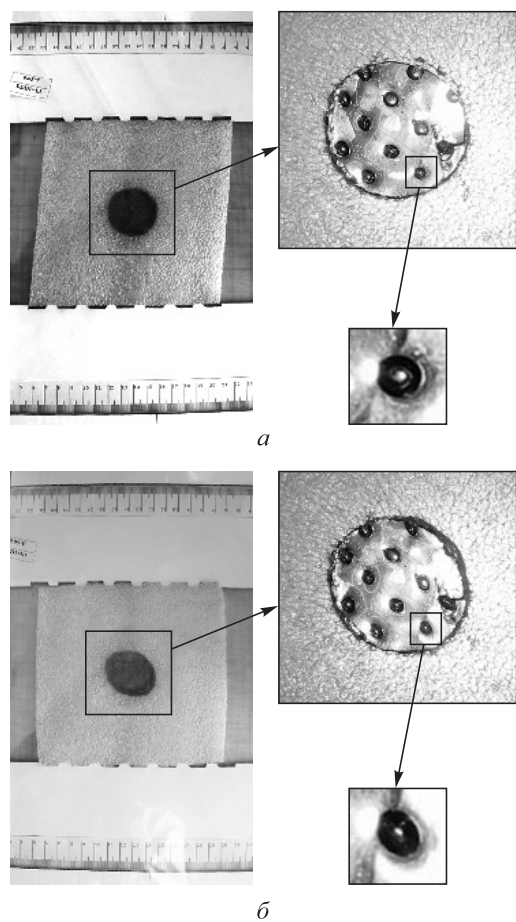


Рис. 2. Формоизменение физической модели с $F_o/F_{кв} = 0,05$ и $K_p = 1,067$:

a – исходное состояние;
б – после обжатия $\varepsilon = 3,3\%$ и сдвига $L = 20$ мм

Fig. 2. Forming of physical model with $F_o/F_{кв} = 0,05$ and $K_p = 1,067$:
a – initial state; *б* – after cobbing $\varepsilon = 3,3\%$ and shear $L = 20$ мм

$d_3 = 53,5$ мм, $d_4 = 84,5$ мм. Число зон разбиения в различных физических моделях составило: $F_o/F_{кв} = 0,25 - 4$ шт.; $F_o/F_{кв} = 0,1 - 3$ шт.; $F_o/F_{кв} = 0,05 - 2$ шт.

При этом у пузырьков круглой формы был измерен начальный диаметр. А у пузырьков, имевших форму эллипса, измеряли длины большой и малой осей и находили коэффициент формы $K_\phi = a/b$, где a – длина большой оси эллипса; b – длина малой оси эллипса.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования однозначно подтвердили правомерность гипотезы о возможности минимизации ромбовидности непрерывнолитой сортовой заготовки при наличии во внешнем деформационном воздействии сдвиговой составляющей. В частности, было установлено, что величина сдвигового смещения в пределах $L \leq 12,5$ мм позволяет минимизировать величину ромбовидности последней до требований, регламентированных нормативными документами [35], а именно $K_p \leq 1,032$. Для случая исходной величины

$K_p = 1,035$ достаточное смещение $L = 7,5$ мм, а для случая $K_p = 1,1$ – достаточное смещение $L = 12,5$ мм.

Результаты измерения формы пузырьков моделей до и после внешнего деформационного воздействия приведены в таблице.

Из приведенных данных видно, что наличие во внешнем деформационном воздействии (при прочих равных условиях) сдвиговой составляющей способствует дальнейшему вытягиванию пузырьков. Поскольку модель имеет плоский характер, то вытягивание пузырьков может служить доказательством наличия в осевой вставке крутящего момента. Можно выдвинуть гипотезу, что вследствие этого в закристаллизовавшихся «мостах» осевой жидко-твердой области слитка также возникнут сдвиговые деформации, интенсифицируя, тем самым, процесс их разрушения и повышая качество макроструктуры заготовки за счет вновь появившейся возможности подпитки пустот.

Результаты выполненной в дальнейшем зональной обработки формоизменения пузырьков представлены на рис. 3.

В целом, обобщенный результат в части повышения эффективности может быть сформулирован в следующем виде: к моменту исправления ромбовидности заготовки с начальной величиной $K_p = 1,035$ до регламентированных нормативными документами требований эффективность внешнего деформационного воздействия дополнительно возрастает на 1,9 – 4,7 %, а для случая $K_p = 1,1$ – на 2,4 – 6,7 %. Следовательно наличие сдвигового воздействия в результирующем внешнем воздействии наиболее целесообразно при формировании в линии МНЛЗ в заготовке существенной ромбовидности. Однако общая эффективность

Изменение коэффициента формы пузырька K_ϕ в зависимости от схемы внешнего деформационного воздействия

Change of bubble shape coefficient K_ϕ depending on the external deformation scheme

Характер внешнего деформационного воздействия	Коэффициент формы пузырька K_ϕ		
	$F_o/F_{кв} = 0,25$	$F_o/F_{кв} = 0,10$	$F_o/F_{кв} = 0,05$
Начальное состояние: $\varepsilon = 0,0\%$, $L = 0,0$ мм	1,034 – 1,211	1,000 – 1,181	1,000 – 1,275
Сжатие: $\varepsilon \leq 3,3\%$, $L = 0,0$ мм	1,042 – 1,296	1,036 – 1,271	1,033 – 1,409
Сжатие + сдвиг граней: $\varepsilon \leq 3,3\%$, $L \leq 12,5$ мм	1,044 – 1,308	1,042 – 1,304	1,045 – 1,443

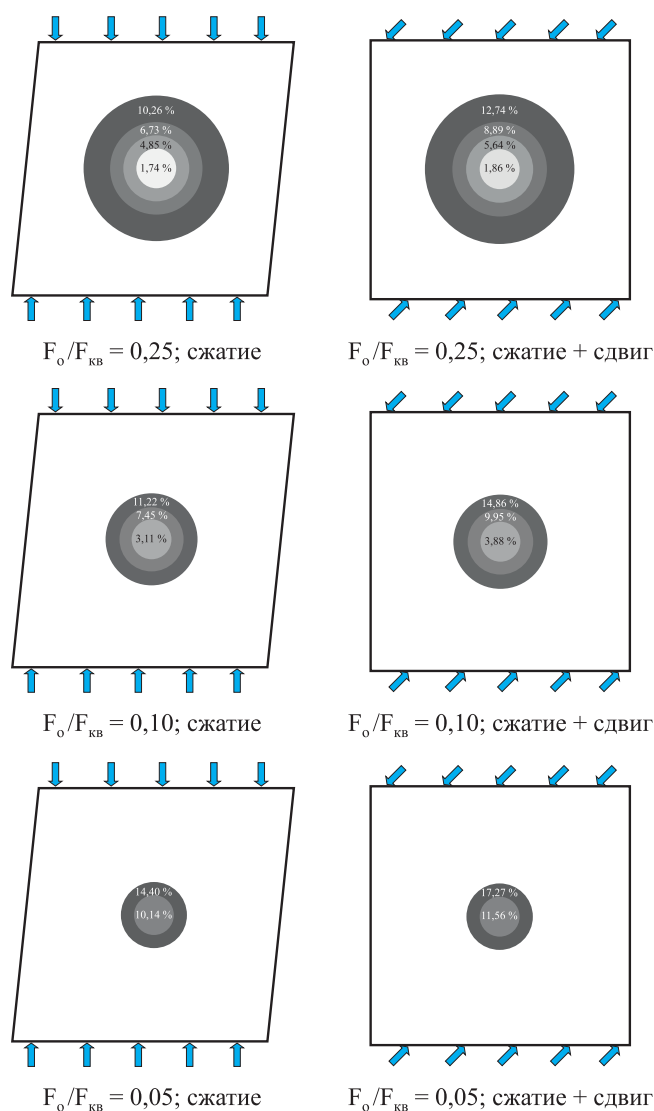


Рис. 3. Динамика изменения эффективности внешнего воздействия в зависимости от прикладываемой схемы деформаций

Fig. 3. Dynamics of changes of external action efficiency depending on the applied deformation scheme

комплексного деформационного воздействия составляет только 9,54 – 11,7 %. Полученный результат хорошо согласуется с данными работ [36 – 38].

Следует также отметить, что к положительным эффектам от приложения внешнего сдвигового воздействия следует отнести и возможное повышение качества контактирующих с валками слоев металла. Деформация металла поверхностных и прилегающих к ним слоев заготовки в валках со специальным вышеописанным профилированием будет способствовать повышению их качества за счет схлопывания подкорковых пузырей, «залечивания» микротрещин, возникших в процессе разлива и т.д. Это те дефекты, которые в дальнейшем вскрываются в процессе прокатки и ускоренного последеформационного охлаждения [39, 40], причем попытки их минимизации в линии МНЛЗ не всегда дают полную гарантию.

Выводы

Представлены результаты сопоставительного исследования с использованием методов физического моделирования по оценке вклада в общую эффективность технологии MSR сортовых непрерывнолитых заготовок дополнительного сдвигового относительно смещения граней в горизонтальной плоскости. Использование плоской модели в совокупности с предложенной формой деформирующих валков и сочетания моделирующих материалов позволили достичь хорошего подобия по геометрическому критерию, а также по критерию эквивалентности отношения напряжений, возникающих на границе фронта кристаллизации. Показано, что наличие сдвигового воздействия в результате внешнего воздействия наиболее целесообразно при формировании в линии МНЛЗ в заготовке существенной ромбовидности, так как к моменту исправления ромбовидности заготовки с начальной величиной $K_p = 1,035$ до регламентированных нормативными документами требований эффективность внешнего деформационного воздействия дополнительно возрастает на 1,9 – 4,7 %, а для случая $K_p = 1,1$ – на 2,4 – 6,7 %. Деформация металла поверхностных и прилегающих к ним слоев заготовки в валках со специальным вышеописанным профилированием будет способствовать повышению их качества за счет возникновения сдвиговых деформаций, интенсифицирующих процесс схлопывания подкорковых пузырей, «залечивания» микротрещин и т.д. В свою очередь, искусственное создание крутящего момента в сечении заготовки будет способствовать возникновению сдвиговых деформаций в закристаллизовавшихся «мостах» осевой жидко-твердой области слитка, интенсифицируя, тем самым, процесс их разрушения и повышая качество макроструктуры заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефимов В.А. Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл // *Сталь*. 1998. № 4. С. 21 – 27.
2. Smirnov A.N., Khobta A.S., Smirnov E.N. etc. Casting of steel from the tundish of a continuous caster with a sliding gate // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012. No. 12. P. 1 – 5.
3. Smirnov A.N., Kuberskii S.V., Smirnov E.N. etc. Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 7. P. 476 – 482.
4. Saiga I., Fukuy K., Punakisiyo. etc. The quality of the ingots obtained by combining continuous casting and rolling // *Tetsu-To-Hagane*. 1974. Vol. 60. No. 7. P. 990 – 999.
5. Zeng J., Chen W., Wang Q. etc. Improving inner quality in continuous casting rectangular billets: comparison between mechanical soft reduction and final electromagnetic stirring // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016. Vol. 69. No. 8. P. 1623 – 1632.
6. Ji C., Luo S., Zhu M.Y. Analysis and application of soft reduction amount for bloom continuous casting process // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. No. 3. P. 504 – 510.
7. DANIELLI Report. 1996. P. 15 – 18.
8. Бровман М.Я. О перспективах развития непрерывного литья металлов // *НМ-Оборудование*. 2004. № 1. С. 49 – 56.

9. Маточкин В.А., Стеблов А.Б., Азин Ю.М. и др. Разработка головного образца системы обжатия заготовки на блюмовой МНЛЗ Белорусского металлургического завода // *Сталь*. 2003. № 5. С. 25 – 27.
10. Li G., Zhang K., Chen Y. etc. SMART/ASTC dynamic soft reduction technology and its application on bloom continuous caster at Pangang // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2006. Vol. 13. No. 2. P. 1 – 4.
11. Лубенец А.Н., Смирнов Е.Н., Щербачев В.В. Опыт производства судовых профилей из непрерывнолитой заготовки // *Сталь*. 2002. № 8. С. 102 – 106.
12. Hanazaki K., Koide M., Murakami T. etc. Continuous casting method and apparatus therefor. Pat. US6102101A (US Grant). 1995.
13. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction in the continuous casting of billets // *Millennium Steel*. 2007. P. 112 – 118.
14. Ludlow V., Normanton A., Anderson A. etc. Strategy to minimise central segregation in high carbon steel grades during billet casting // *Ironmaking and Steelmaking*. 2005. Vol. 32. No. 1. P. 68 – 74.
15. Wang W., Ning L., Bülte R. etc. Formation of internal cracks in steel billets during soft reduction // *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng. ed.)*. 2008. Vol. 15. No. 2. P. 114 – 119.
16. Li X., Ding H., Tang Z. etc. Formation of internal cracks during soft reduction in rectangular bloom continuous casting // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 19. No. 1. P. 21 – 29.
17. Wang B., Zhang J., Yin Y. etc. Study on the reduction efficiency of soft reduction on continuous casting bloom // *Metallurgical Research and Technology*. 2016. Vol. 113. No. 4. P. 86 – 95.
18. Smyrnov Y.N., Sklyar V.A. Features of deformation of partly crystallization blooms at their two-stage soft reduction // *Materials Science Forum*. 2012. Vols. 704 – 705. P. 1 – 5.
19. Smyrnov Y.N., Belevitin V.A., Skliar V.A. etc. Physical and computer modeling of a new soft reduction process of continuously cast blooms // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015. Vol. 50. No. 6. P. 589 – 594.
20. Ботников С.А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла. – Волгоград: Панорама, 2011. – 97 с.
21. Бровман М.Я. О возможности уменьшения пористости при обработке металлов давлением // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2001. № 5. С. 35 – 37.
22. Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитонов Е.А. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки // *Черные металлы*. 2015. № 1. С. 23 – 28.
23. Diez M., Kim H., Serebryany V. etc. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 612. P. 287 – 292.
24. Горбатюк С.М., Шаповал А.А., Мосьпан Д.В. и др. Физические основы технологии производства заготовок периодического профиля вибрационным волочением // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. № 7. С. 479 – 484.
25. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывнолитой заготовки // *Черные металлы*. 2012. № 3. С. 18 – 21.
26. Beygelzimer Y., Prokof'eva O., Efros B. Hardening viscous failure and strain localization during severe plastic deformation // *Materials Science Forum*. 2006. Vols. 503 – 504. P. 551 – 556.
27. Добаткин С.В., Валиев Р.З., Рааб Г.И. и др. Структура и свойства Ст. 3 после теплого равноканального углового прессования // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 9. С. 47 – 51.
28. Ito Y., Yamanaka A., Watanabe T. Internal reduction efficiency of continuously cast strand with liquid core // *La Revue de Métallurgie-CIT*. 2000. Vol. 97. No. 10. P. 1171 – 1176.
29. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting // *ISI International*. 2006. Vol. 46. No. 12. P. 1839 – 1844.
30. Smirnov A.N., Smirnov E.N., Sklyar V.A. etc. Producing structural-steel bar from continuous-cast billet // *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 4. P. 233 – 239.
31. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction of billets in continuous coster SO of Saarstahl AG // *Stahl und Eisen*. 2007. Vol. 127. No. 2. P. 43 – 50.
32. Tseng A., Raudensky M., Horsky J. etc. Experimental study of materials characteristics of steel forming in mushy state // *Materials and Design*. 2006. Vol. 22. No. 2. P. 83 – 92.
33. Миленин А.А., Дья Х., Стеблов А.Б. и др. Математическое моделирование прокатки непрерывного слитка из стали ШХ15 на стадии неполной кристаллизации его сердцевины // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2003. С. 178 – 183.
34. Smyrnov Y.N., Belevitin V.A., Sklyar V.A. Application of numerical model of continuous cast bloom crystallization to improve the efficiency of mechanical soft reduction technology // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 684 – 689.
35. ТУ14-1-3348-2009. Заготовка непрерывнолитая квадратная и прямоугольная для изготовления сортового проката и труб. Действует с 02.12.2009. Держатель подлинника ЦССМ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», 2009. – 7 с.
36. Byrne C., Tercelli C. Mechanical soft reduction in billet casting // *Steel Times Int*. 2002. Vol. 26. No. 9. P. 33.
37. Thome R., Harste K. Study on the design of the soft reduction unit of high-speed billet casters // *Steel Research Int*. 2004. Vol. 75. No. 10. P. 693 – 700.
38. Luo S., Zhu M., Ji C. etc. Characteristics of solute segregation in continuous casting bloom with dynamic soft reduction and determination of soft reduction zone // *Ironmaking and Steelmaking*. 2010. Vol. 37. No. 2. P. 140 – 146.
39. Minaev A.A., Nosanev A.G., Smirnov E.N. etc. Unit for accelerated cooling of reinforcement bars in the line of a 330 mill after deformation // *Metallurgist*. 1990. No. 1. P. 32.
40. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения / В.В. Парусов, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов и др. – Запорожье: ЗГУ, 2000. – 142 с.

Поступила в редакцию 6 февраля 2019 г.

После доработки 3 октября 2019 г.

Принята к публикации 7 октября 2019 г.

ADDITIONAL SHEARING IMPACT ON THE EFFECTIVENESS OF MSR TECHNOLOGY IN CONDITIONS OF BILLET CCM

*E.N. Smirnov¹, V.A. Sklyar¹, D.I. Bogadevich¹,
A.N. Smirnov², V.A. Belevitin³*

¹ Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

² Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

³ South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Aside from electromagnetic stirring, casting with low superheat and intensive cooling of the strand in the upper range of secondary cooling zone, Mechanical Soft Reduction (MSR) has proved, above all, to be very effective in reducing segregation and axial porosity in continuously cast billet. Implementation of MSR technology in the production of continuously cast billets has a number of features that are due to their square shape. In this case, particularly promising is the use of blocks of segment design, so called pinch-roll segment. The presence in CCM line of MSR block of such design allows to implement a two-stage deformation scheme. The paper proposes a new two-stage scheme of MSR technology realizing the combined deformation on the basis of cobbing in vertical plane and shearing relative displacement of the faces at the first stage, and at the second stage – deformation on the basis of cobbing in vertical plane. This approach additionally helps to correct deformations of the profile cross section, namely the rhomboidity defect. We present the results of a comparative study using physical modeling methods to assess the contribution of additional shear relative displacement of faces in the horizontal plane to the overall efficiency of MSR technology of continuous casting. The use of a flat model in conjunction with the proposed form of deforming rolls and a combination of modeling materials allowed to achieve a good similarity in geometric criterion, as well as in the criterion of stress ratio equivalence arising at the interface of crystallization front. The obtained experimental data helps to develop ideas about the mechanisms of additional positive effect from the application of shear action. In particular, the deformation of metal surface and adjacent layers of the billet in the rolls with a special above-described profiling will improve their quality due to the occurrence of shear deformations intensifying the process of collapse of subcortical bubbles, “healing” of microcracks, etc. In turn, the artificial creation of torque effect in cross section of the billet will contribute to the occurrence of shear deformations in the crystallized “bridges” of axial liquid-solid region of the ingot, thereby intensifying the process of their destruction and improving the quality of the billet’s macrostructure.

Keywords: shear deformations, concast billet, block of segmented design, physical model, macrostructure defects, criterion of similarity, criterion of rhomboidity, cobbing deformation, shear deformation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-19-26

REFERENCES

1. Efimov V.A. Influence of external impacts on liquid and crystallizing metal. *Stal'*. 1998, no. 4, pp. 21–27. (In Russ.).
2. Smirnov A.N., Khobta A.S., Smirnov E.N. etc. Casting of steel from the tundish of a continuous caster with a sliding gate. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, no. 12, pp. 1–5.
3. Smirnov A.N., Kuberskii S.V., Smirnov E.N. etc. Influence of meniscus fluctuations in the mold on crust formation in slab casting. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 7, pp. 476–482.
4. Saiga I., Fukuy K., Punakisiy Yo. etc. The quality of the ingots obtained by combining continuous casting and rolling. *Tetsu-To-Hagane*. 1974, vol. 60, no. 7, pp. 990–999.
5. Zeng J., Chen W., Wang Q., etc. Improving inner quality in continuous casting rectangular billets: comparison between mechanical soft reduction and final electromagnetic stirring. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2016, vol. 69, no. 8, pp. 1623–1632.
6. Ji C., Luo S., Zhu M.Y. Analysis and application of soft reduction amount for bloom continuous casting process. *ISIJ International*. 2014, vol. 54, no. 3, pp. 504–510.
7. *DANIELLI Report*. 1996, pp. 15–18.
8. Brovman M.Y. Prospects of development of metals continuous casting. *NM-Oborudovanie*. 2004, no. 1, pp. 49–56. (In Russ.).
9. Matochkin V.A., Steblov A.B., Azin Y.M., Aizin Yu.M., Kuklev A.V., Toptygin A.M., Tinyakov V.V. Prototype strand-reduction system for the bloom continuous-casting machine at Belarus metallurgical plant. *Steel in Translation*. 2003, vol. 33, no. 5, pp. 22–24.
10. Li G., Zhang K., Chen Y. etc. SMART/ASTC dynamic soft reduction technology and its application on bloom continuous caster at Pangang. *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2006, vol. 13, no. 2, pp. 1–4.
11. Lubenet A.N., Smirnov E.N., Shcherbachev V.V. Production of ship sections from concast billets. *Stal'*. 2002, no. 8, pp. 102–106. (In Russ.).
12. Hanazaki K., Koide M., Murakami T. etc. *Continuous casting method and apparatus therefor*. Pat. US6102101A (US Grant). 1995.
13. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction in the continuous casting of billets. *Millennium Steel*. 2007, pp. 112–118.
14. Ludlov V., Normanton A., Anderson A. etc. Strategy to minimize central segregation in high carbon steel grades during billet casting. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 1, pp. 68–74.
15. Wang W., Ning L., Bülte R. etc. Formation of internal cracks in steel billets during soft reduction. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral Metallurgy Materials (Eng. ed.)*. 2008, vol. 15, no. 2, pp. 114–119.
16. Li X., Ding H., Tang Z. etc. Formation of internal cracks during soft reduction in rectangular bloom continuous casting. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012, vol. 19, no. 1, pp. 21–29.
17. Wang B., Zhang J., Yin Y. etc. Study on the reduction efficiency of soft reduction on continuous casting bloom. *Metallurgical Research and Technology*. 2016, vol. 113, no. 4, pp. 86–95.
18. Smirnov Y.N., Sklyar V.A. Features of deformation of partly crystallization blooms at their two-stage soft reduction. *Materials Science Forum*. 2012, vols. 704–705, pp. 1–5.
19. Smirnov Y.N., Belevitin V.A., Skliar V.A. etc. Physical and computer modeling of a new soft reduction process of continuously cast blooms. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 589–594.
20. Botnikov S.A. *Sovremenniy atlas defektov nepreryvnolitoi zagotovki i prichiny vozniknoveniya proryvov kristallizuyushchey korochnki metalla* [Atlas of modern defects of continuous cast billet and the causes of appearance of runoff of crystallized metal crust]. Volgograd: Panorama, 2011, p. 97. (In Russ.).
21. Brovman M.Y. On the possibility of porosity reduction at metal forming. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 5, pp. 35–37. (In Russ.).
22. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Realization of innovative potential of universal method of radial-shearing rolling. *Chernye metally*. 2015, no. 1, pp. 23–28. (In Russ.).

23. Diez M., Kim H., Serebryany V. etc. Improving the mechanical properties of pure magnesium by three-roll planetary milling. *Materials Science and Engineering: A*. 2014, vol. 612, pp. 287–292.
24. Gorbatyuk S.M., Shapoval A.A., Mos'pan D.V. etc. Physical principles of manufacturing of periodic profile bars by vibratory drawing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 7, pp. 479–484. (In Russ.).
25. Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. Development and implementation of production technology of high-quality tubing from continuous cast billets. *Chernye metally*. 2012, no. 3, pp. 18–21. (In Russ.).
26. Beygelzimer Y., Prokof'eva O., Efos B. Hardening viscous failure and strain localization during severe plastic deformation. *Materials Science Forum*. 2006, vols. 503–504, pp. 551–556.
27. Dobatkin S.V., Valiev R.Z., Krasil'nikov N.A., Raab G.I., Konenkova V.N. Structure and properties of steel St3 after hot equal-channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*. 2000, vol. 42, no. 9–10, pp. 366–369.
28. Ito Y., Yamanaka A., Watanabe T. Internal reduction efficiency of continuously cast strand with liquid core. *La Revue de Métallurgie-CIT*. 2000, vol. 97, no. 10, pp. 1171–1176.
29. Thome R., Harste K. Principles of billet soft-reduction and consequences for continuous casting. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 12, pp. 1839–1844.
30. Smirnov A.N., Smirnov E.N., Sklyar V.A. etc. Producing structural-steel bar from continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2018, vol. 48, no. 4, pp. 233–239.
31. Thome R., Ostheimer V., Ney G. etc. Soft reduction of billets in continuous caster SO of Saarstahl AG. *Stahl und Eisen*. 2007, vol. 127, no. 2, pp. 43–50.
32. Tseng A., Raudensky M., Horsky J. etc. Experimental study of materials characteristics of steel forming in mushy state. *Materials and Design*. 2006, vol. 22, no. 2, pp. 83–92.
33. Milenin A.A., Dyja H., Steblou A.B. etc. Mathematical modeling of rolling of a continuous ingot of ShKh15 steel at the stage of incomplete crystallization of its heart. In: *Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobki tiskom v metallurgii i mashinobuduvanni: tematic. zb. nauk. pr.* [Improvement of processes and equipment of pressure treatment in metallurgy and mechanical engineering: Coll. of papers]. Kramators'k: DDMA, 2003, pp. 178–183. (In Ukr.).
34. Smirnov Y.N., Belevitin V.A., Sklyar V.A. Application of numerical model of continuous cast bloom crystallization to improve the efficiency of mechanical soft reduction technology. *Materials Science Forum*. 2019, vol. 946, pp. 684–689.
35. TU14-1-3348-2009. *Zagotovka nepreryvnolitaya kvadratnaya i pryamougol'naya dlya izgotovleniya sortovogo prokata i trub* [Continuous cast square and rectangular billet for production of long products and pipes]. 2009, 7 p. (In Russ.).
36. Byrne C., Tercelli C. Mechanical soft reduction in billet casting. *Steel Times Int*. 2002, vol. 26, no. 9, p. 33.
37. Thome R., Harste K. Study on the design of the soft reduction unit of high-speed billet casters. *Steel Research Int*. 2004, vol. 75, no. 10, pp. 693–700.
38. Luo S., Zhu M., Ji C. etc. Characteristics of solute segregation in continuous casting bloom with dynamic soft reduction and determination of soft reduction zone. *Ironmaking and Steelmaking*. 2010, vol. 37, no. 2, pp. 140–146.
39. Minaev A.A., Nosanev A.G., Smirnov E.N. etc. Unit for accelerated cooling of reinforcement bars in the line of a 330 mill after deformation. *Metallurgist*. 1990, no. 1, p. 32.
40. Parusov V.V., Belitchenko A.K., Bogdanov N.A. etc. *Termomekhanicheskaya obrabotka prokata iz nepreryvnolitoi zagotovki malogo secheniya* [Thermomechanical processing of rolled products from continuous cast billets of small cross-section]. Zaporizhia: ZGU, 2000, 142 p. (In Russ.).

Information about the authors:

E.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova” (en_smirnov@i.ua)

V.A. Sklyar, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova”

D.I. Bogadevich, Postgraduate

A.N. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher

V.A. Belevitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Automotive Technics, Information Technologies and Teaching Methods of Technical Sciences

Received February 6, 2019

Revised October 3, 2019

Accepted October 7, 2019