

УДК 669.02/09

Полещук В. М.
Бровкин В. Л.
Кривченко Ю. С.

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ДЕФОРМАЦИИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА С ЖИДКОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ

Непрерывная разливка заготовок бурно развивалась в последние несколько десятилетий и в настоящее время достигла показателей, дальнейшее улучшение которых требует накопления новых знаний. В частности, достигнута скорость разливки 6,5–7 м/мин, что позволило прийти к разработке и реализации идеи совмещения непрерывной разливки с бесконечной прокаткой (технологии «Luna» и СМС «Arizona» фирмы Danieli; технологии «Arvedi» и «Winlink» фирмы Siemens VAI и др.).

Эволюционное развитие непрерывной разливки и накопление знаний о свойствах стали в области сверхвысоких температур, сделали возможным расширить перечень технологических процессов с использованием приемов обработки металлов давлением [1, 2]. Наиболее значимой тенденцией в непрерывной разливке стал перенос некоторых технологических операций, связанных с деформацией непрерывнолитых слитков из зоны их полной кристаллизации в зону двухфазного (твёрдо-жидкого) состояния [3].

В ГП «Укрگیпромез» разработаны инновационные проекты, в основу которых положены идеи совмещения непрерывной разливки с прокаткой и широко используются приемы деформации непрерывнолитого слитка как на стадии полной кристаллизации, так и на стадии двухфазного его состояния [4].

Реализация таких технологий позволяет сократить продолжительность производственного цикла, выйти на новый уровень материало- и энергосбережения, сократить капитальные и производственные затраты, и, следовательно, повысить конкурентоспособность готовой продукции.

Целью работы является разработка методики определения оптимальных параметров процесса деформирования непрерывнолитого слитка в инновационных проектах, обеспечивающих реализацию энерго- и материалосберегающих технологий.

Краткие сведения о предлагаемых технологиях:

1. Материало- и энергосберегающая технология.

Схема технологической линии приведена на рис. 1. Особенность такой технологии состоит в том, что за правильно-тянущим устройством устанавливается устройство локальной деформации непрерывнолитого слитка, имеющего не закристаллизовавшуюся сердцевину. Локальная деформация торцевых участков заготовки совмещается с резом и отделением заготовки от слитка. В процессе транспортировки заготовки к прокатному стану завершается процесс кристаллизации, а перепад температур по сечению заготовки снижается до допустимого уровня.

В такой технологической схеме исключается нагревательная печь, либо она заменяется термостатом.

Преимущества технологии:

- увеличивается выход годного;
- сокращается расход энергоносителей;
- сокращается производственный цикл;
- снижаются капитальные и производственные расходы.

Объекты реализации: существующие и проектируемые мелкосортные, проволочные, литейно-прокатные комплексы (ЛПК), а так же ЛПК существующих интегрированных заводов. Заготовка: сечение от 100 × 100 мм до 150 × 150 мм, длина 3–14 м.

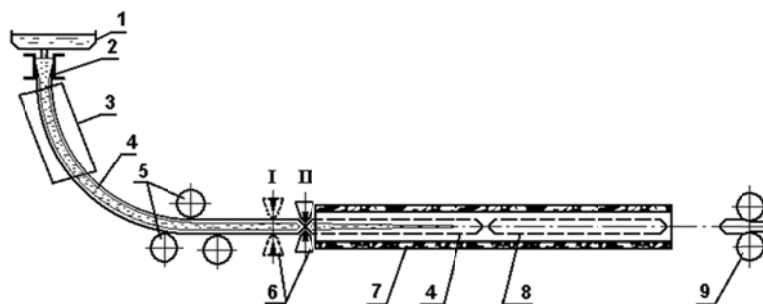


Рис. 1. Основные элементы схемы материало- и энергосберегающей технологии:

1 – промежуточный ковш; 2 – кристаллизатор; 3 – зона вторичного охлаждения (ЗВО); 4 – непрерывнолитой слиток; 5 – тянуще-правильная клеть; 6 – разделитель; 7 – термостат; 8 – заготовка; 9 – первая клеть прокатного стана

2. Бесконечная разливка-прокатка.

Схема технологии приведена на рис. 2.

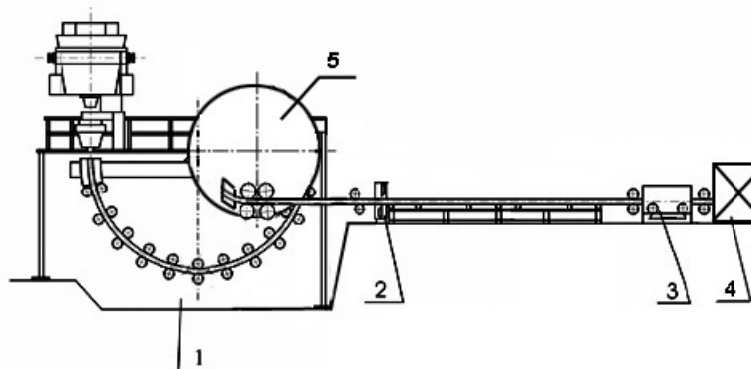


Рис. 2. Основные элементы схемы бесконечной разливки-прокатки:

1 – МНЛЗ; 2 – летучие ножницы; 3 – индуктор; 4 – прокатный стан; 5 – стационарный термостат

Технологическая линия включает в себя одно- или двухручьевую машину непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с высокой скоростью разливки (6–6,5 м/мин), а так же компактный стационарный термостат.

Сечение заготовки от 100 × 100 мм до 125 × 125 мм. Радиальная МНЛЗ с увеличенной кривизной технологической оси. Использование компактного стационарного термостата позволяет существенно сократить расстояние от кристаллизатора МНЛЗ до первой клетки прокатного стана.

Преимущества технологии:

- увеличение выхода годного;
- сокращение расхода энергоносителей;
- сокращение цикла производства;
- сокращение капитальных и производственных затрат.

Авторами настоящей работы была предпринята попытка определить возможную область существования выше перечисленных инновационных технологий с учетом существующих методик и представлений о процессе деформации полностью или частично закристаллизовавшегося непрерывнолитого слитка.

Ключевым параметром в технологиях, где применяется пластическая деформация слитка в двухфазном состоянии, является допустимая степень деформации ε_0 . Для предупреждения нарушения сплошности слитка в процессе его деформации режимы деформации должны быть построены таким образом, чтобы степень деформации не превышала допустимых величин.

Установлено, что область существования технологии с пластической деформацией стали в двухфазном состоянии определяется пластическими свойствами стали в температурном интервале хрупкости (t_{mux}), примерно, от 1350 до 1420 °С. Анализ литературных данных показывает, что степень деформации слоя, находящегося при этих температурных условиях не должна превышать значений, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Предельно допустимая степень деформации ε_0

№ п/п	Источник	Предельно допустимая степень деформации, %
1	В. П. Григорьев и др., стр. 456 [5]	0,15–0,8
2	В. М. Мирсалимов и др., стр. 48 [6]	0,2–0,3
3	Ф.-П. Плешиниц и др., стр. 64 [7]	0,4–0,55
4	В. М. Нисковских и др., стр. 194 [8]	1,0–1,5 (мало- и среднеуглеродистые, а также низколегированные стали); 0,5–1,0 (высокоуглеродистые стали)

Из табл.1 следует, что величина допустимой степени деформации для стали изменяется в достаточно широком диапазоне. Это является свидетельством того, что накопленные на данный момент знания не являются исчерпывающими и требуют дополнительных исследований. Открытым так же остается вопрос использования этих данных. Речь, прежде всего, идет о методиках расчета степени деформации для реальных технологий и сопоставления ее с допустимыми величинами.

В работе [5] приведен расчет траектории выпрямления непрерывнолитого слитка, где вся траектория разбита на равные 16 участков, каждый длиной 1,2 м. В каждом из участков степень деформации принимается равной ε_0 . Если принять во внимания, что слой металла с температурным интервалом хрупкости (ТИХ) может иметь протяженность отличную от произвольно принятого в расчете расстояния между точками правки, то и расчетные величины радиуса кривизны оказываются не связанными с фактической протяженностью слоя ТИХ.

В связи с этим, нами предложен уточненный вариант расчета траектории кривой разгиба непрерывнолитого слитка, где протяженность слоя с ТИХ определяется исходя из координат расчетных изотерм верхней и нижней границ ТИХ в теле непрерывнолитого слитка. Это позволяет рассчитывать оптимальный режим деформации непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевинной.

Схема, поясняющая основы такого расчета, приведена на рис. 3.

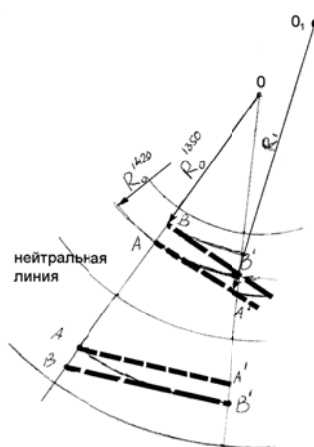


Рис. 3. Схема перемещения зоны температурного интервала хрупкости вглубь слитка

Последовательность расчета технологической кривой разгиба слитка с жидкой сердцевинной следующая:

1. Выполнение теплового расчета процесса кристаллизации непрерывнолитого слитка с определением траектории верхней и нижней границ температурного интервала хрупкости в теле непрерывнолитого слитка;

2. Определение параметра криволинейной части МНЛЗ с учетом заданного базового радиуса (R_0) технологической оси МНЛЗ и ее протяженности от конца зоны вторичного охлаждения (ЗВО) до момента окончания кристаллизации слитка (L_0);

3. Определение времени пребывания каждой точки по сечению слитка в области температурного интервала хрупкости;

4. Расчет степени деформации в слое, находящемся в интервале температур хрупкости;

5. Расчет текущего радиуса кривизны криволинейной части МНЛЗ с учетом допустимой степени деформации.

Пример результатов расчетов кристаллизации слитка и определения времени пребывания каждой точки по сечению слитка в области температурного интервала хрупкости приведен на рис. 4 и 5.

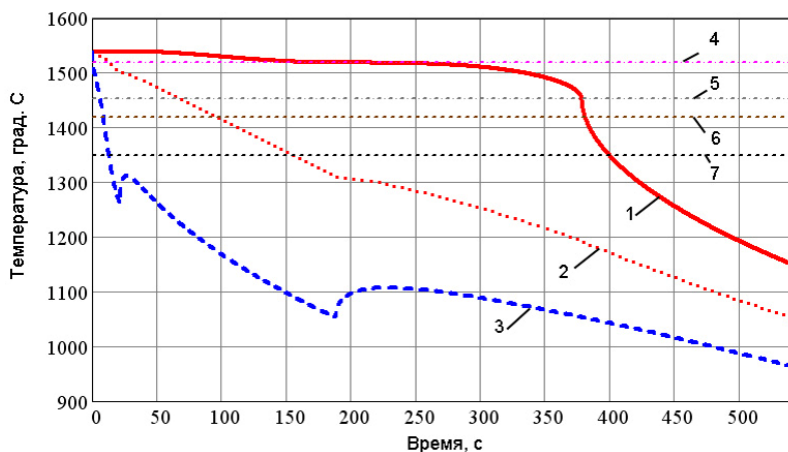


Рис. 4. Температурная диаграмма кристаллизации слитка:

1 – центр; 2 – среднемассовая; 3 – поверхность; 4 – ликвидус; 5 – солидус; 6 – верхний интервал хрупкости; 7 – нижний интервал хрупкости

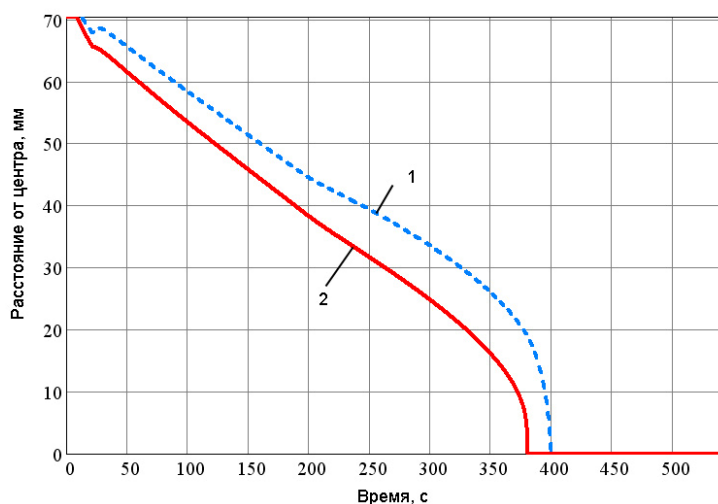


Рис. 5. Характер перемещения по высоте слитка нижней и верхней границ температурного интервала хрупкости в процессе его кристаллизации:

1 – граница нижнего интервала хрупкости; 2 – граница верхнего интервала хрупкости

Не менее важным является вопрос о том, каков характер и условия деформации слитка на всем пути от кристаллизатора до точки, в которой завершается процесс кристаллизации и температурный интервал хрупкости пройден полностью.

Из всех возможных схем непрерывной разливки рассмотрим только наиболее употребительные на практике, а именно включающие в себя радиальные и криволинейные МНЛЗ. На рис. 6 приведены схемы расположения технологических осей указанных выше МНЛЗ [5].

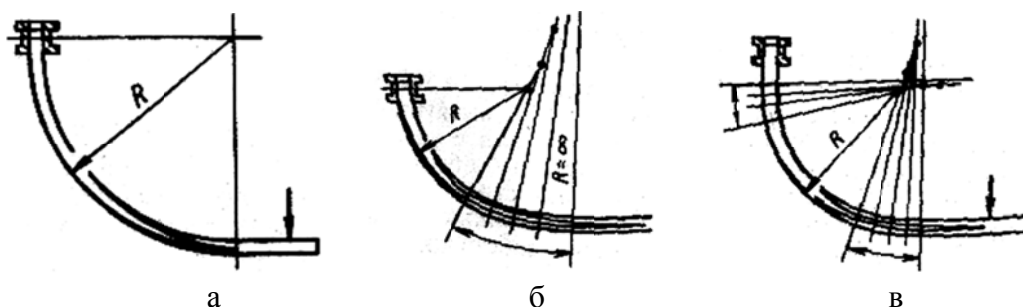


Рис. 6. Схемы расположения технологических осей МНЛЗ:
а – радиальных МНЛЗ; б, в – криволинейных МНЛЗ

Из приведенных схем видно, что в радиальных МНЛЗ непрерывнолитой слиток подвергается деформации изгиба в плоскости технологической оси МНЛЗ вблизи выхода слитка из кристаллизатора и в точке начала выпрямления слитка, где кристаллизация завершена. При этом радиус кривизны машины равен $R = 2 \cdot L / \pi$, где L – металлургическая длина МНЛЗ.

В случае радиальной МНЛЗ наиболее опасной зоной в плане нарушения сплошности металла является участок под кристаллизатором.

Одним из путей интенсификации процесса разливки является переход к возможно более высоким скоростям разливки. Поэтому для высокопроизводительных МНЛЗ разработали и реализовали схему криволинейной МНЛЗ (рис. 6, б–в).

Декларируемые преимущества криволинейных машин в сравнении с радиальными состоят, прежде всего, в том, что переход на криволинейные МНЛЗ позволяет уменьшить ее высоту, что снижает уровень капитальных затрат. Для этой схемы характерно наличие 2-х зон деформации непрерывно литого слитка (верхняя и нижняя). Одна зона (верхняя) непосредственно примыкает к кристаллизатору. Слиток здесь имеет относительно тонкую корочку 20–30 мм и подвергается интенсивной деформации изгиба. Кроме того, большая часть корочки находится в температурном интервале хрупкости (ТИХ), где допустимая степень деформации на весьма низком уровне – $\varepsilon_d = 0,4–0,8\%$.

Вторая (нижняя зона деформации) расположена за зоной вторичного охлаждения, где доля закристаллизовавшейся части сечения 0,5–0,6 от площади сечения слитка и зона температурного интервала хрупкости занимает здесь значительно меньшую площадь, чем в верхней зоне деформации. В нижней зоне слиток в процессе его выравнивания и перевода в горизонтальное положение подвергается деформации изгиба (разгиба). Именно в этой зоне регламентируется степень и скорость деформации непрерывнолитого слитка и используются различные схемы разгиба (постоянство степени деформации; постоянство скорости деформации; выпрямление по клотоиду и др.).

Несложные сопоставления условий деформации в нижней и верхней зоне, на наш взгляд, показывают, что в верхней зоне деформации нарушение сплошности слитка более вероятно, чем в нижней зоне. Однако в подавляющем большинстве работ почему-то регламентируются параметры деформации только в нижней зоне.

Подчеркнем одну принципиально важную особенность криволинейных МНЛЗ. Сопряжения радиальной части технологической оси с криволинейным участком и последующий переход от криволинейного участка к прямолинейному приводят к увеличению высоты МНЛЗ в сравнении с радиальной машиной, имеющей тот же базовый радиус, что и криволинейная.

Таким образом, снизить уровень ферростатического давления и уменьшить конструктивную высоту МНЛЗ, что желательно, на криволинейной МНЛЗ можно только существенно уменьшив базовый радиус радиальной части технологической оси.

Если все же требуется сохранить базовый радиус радиальной части и одновременно уменьшить высоту МНЛЗ, то следует в технологической оси предусмотреть дополнительный участок с большей кривизной и интенсивной деформацией изгиба непрерывнолитого слитка, за которым может последовать участок мягкого (плавного) разгиба (рис. 7) [9]. Этот участок располагается между радиальной частью МНЛЗ и участком разгиба слитка.

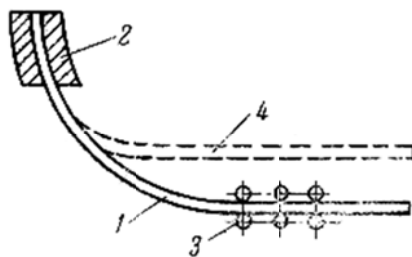


Рис. 7. Схема МНЛЗ с участками загиба и разгиба слитка:

1 – слиток радиальной МНЛЗ; 2 – кристаллизатор; 3 – ролик-правильная машина; 4 – слиток при наличии участков загиба и разгиба

В этом случае расчет на соответствие режимов деформации непрерывнолитого слитка допустимым степени и скорости деформации следует, прежде всего, выполнить именно для этого критичного участка технологической оси с максимально интенсивной деформацией.

Касательно параметров деформации непрерывнолитого слитка, ограничивающих ее интенсивность необходимо сказать следующее. Во многих публикациях [5, 6, 8, 9, 10] отмечается, что наряду со степенью деформации следует еще учитывать и скорость деформации. Вместе с тем, исследования, касающиеся влияния скорости деформации на величину ε_0 разноречивы. В работах [9, 10] подчеркивается, что в зоне высоких температур (1300–1450 °С) пластичность стали увеличивается с ростом скорости деформации.

В работах других авторов утверждается обратное. А именно, что по мере увеличения скорости деформации пластичность стали при высоких температурах падает, а потому «...для уменьшения вероятности образования деформационных трещин необходимо уменьшать скорость деформации внутренних слоев металла путем удлинения участка разгиба» [5].

Аналогичный вывод приведен в работе [8]. Однако простой анализ результатов исследований нескольких российских, японских и других зарубежных фирм в этой же работе дает такие же противоречивые результаты (рис. 8 и 9) [8].

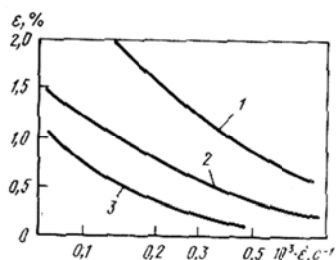


Рис. 8. Зависимость предельной деформации от скорости деформации на нижней границе ТИХ (1370 °С) для углеродистых сталей разного состава:

1 – C = 0,13 %, Mn = 0,51 %, Si = 0,22 %;
2 – C = 0,23 %, Mn = 0,77 %, Si = 0,25 %;
3 – C = 0,47 %, Mn = 0,77 %, Si = 0,29 %

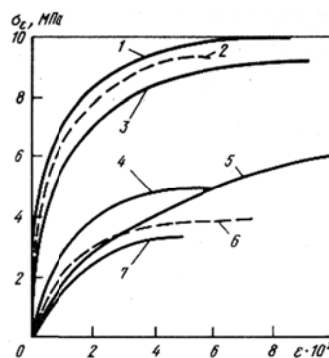


Рис. 9. Кривые растяжения среднеуглеродистой стали при 1400 °С и различных скоростях деформации:

1 – $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; 2 – $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;
3 – $2,78 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; 4 – $2,78 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 5 – $6,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$;
6 – $6,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; 7 – $5,55 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; 1 и 5 – по данным фирмы «Ниппон Стил»; 1 и 6 – ПО «Уралмаш»; 3, 4 и 7 – фирма CRM

Поскольку уровень пластичности стали в диапазоне температур ТИХ прямо влияет на протяженность участка выпрямления непрерывнолитого слитка, на конструктивную высоту МНЛЗ и на качество готовой продукции, то актуальны исследования в части влияния скорости деформации слитков с жидкой сердцевиной на величину предельно допустимых деформаций в диапазоне их реальных значений.

ВЫВОДЫ

Разработана уточненная методика расчета разгиба непрерывнолитого слитка в криволинейной МНЛЗ, обеспечивающая оптимальный режим его деформации. Определены оптимальные параметры процессов деформации в инновационных проектах ГП «Укрспроммет».

Выполнен анализ опубликованных материалов по влиянию скорости деформации на предельную величину степени деформации и показана их разноречивость не только количественная, но и качественная.

Накопленные знания о пластической деформации стали в условиях высоких и сверхвысоких температур нуждаются в углубленном изучении с целью устранения противоречивых результатов либо формулирования исчерпывающих пояснений к ним. Потребность в интенсификации технологического процесса непрерывной разливки и создания более эффективного оборудования МНЛЗ требует новых знаний о процессах обработки металлов давлением.

Видится целесообразность разработки единой терминологии параметров, явлений и процессов, связанных с деформацией металла, находящегося в одно- и двухфазном состоянии (твердое, твердо-жидкое).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьяков В. А. Расчет деформации непрерывнолитого сляба в двухфазном состоянии / В. А. Третьяков, И. П. Мазур, А. А. Лисица // *Сталь*. – 2001. – № 6. – С. 54–56.
2. Мазур И. П. Математическая модель упруго-пластического деформирования непрерывнолитого слитка с жидкой сердцевинкой / И. П. Мазур, В. В. Барышев, М. О. Седых // *Производство проката*. – 2002. – № 9. – С. 2–6.
3. Технологические аспекты совмещения прокатки и непрерывной разливки как основа процесса мягкого обжатия / А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, Ю. Н. Белобров, М. В. Григорьев // *Труды V конгресса прокатчиков, 21–24 октября 2003 г., Череповец*. – М.: Черметинформация, 2004. – С. 43–47.
4. Полещук В. М. Перспективы совершенствования совмещенных процессов разливки-прокатки при производстве длинного проката / В. М. Полещук, В. Л. Бровкин, Ю. С. Кривченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2012. – № 7. – С. 204–205.
5. Конструкции и проектирование агрегатов сталеплавильного производства: учебник для вузов / Григорьев В. П., Нечкин Ю. М., Егоров А. В., Никольский Л. Е. – М.: МИСИ, 1995. – 512 с.
6. Мирсалимов В. М. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка / В. М. Мирсалимов, В. А. Емельянов. – М.: *Металлургия*, 1990. – 151 с.
7. Плещучнигг Ф.-П. Первый мини-завод с технологией производства полосы в линии (I.S.P.) в сопоставлении с другими схемами производства горячекатаной полосы / Ф.-П. Плещучнигг // *МРТ. Металлургическое производство и технология металлургических процессов*. – 1993. – С. 64–83.
8. Нисковских В. М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В. М. Нисковских, С. Е. Кралинский, А. Д. Беренов. – М.: *Металлургия*, 1991. – 272 с.
9. Энергосиловые параметры установок непрерывной разливки стали / М. Я. Бровман [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1969. – 282 с.
10. Лясс А. М. О некоторых факторах, влияющих на образование горячих трещин в стальных отливках / А. М. Лясс, Чжоу-Яо-Хо // *Литейное производство*. – 1958. – № 3. – С. 20–24.

Полещук В. М. – канд. техн. наук, нач. отдела ГП «Укрспроммет»;

Бровкин В. Л. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ;

Кривченко Ю. С. – директор ПИ «Приднепровский Промстройпроект».

ГП «Укрспроммет» – Государственное предприятие «Укрспроммет», г. Днепропетровск.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

ПИ «Приднепровский Промстройпроект» – дочернее предприятие Проектный институт «Приднепровский Промстройпроект», г. Днепропетровск.

E-mail: vladimir6416@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.12.2012 г.