

УДК 621.771.25/.26'74.047

Воробей С. А.
Бадюк С. И.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СОРТОВЫХ ЛИТЕЙНО-ПРОКАТНЫХ АГРЕГАТОВ И КОМПЛЕКСОВ

Одной из важнейших задач, стоящих перед металлургами Украины, является снижение энергоемкости производства проката массового назначения. Основным путем решения данной задачи является переход на использование непрерывнолитой заготовки. При этом наибольшая экономия капитальных и эксплуатационных затрат достигается при объединении непрерывной разливки и прокатки в едином комплексе – литейно-прокатном агрегате (ЛПА) или комплексе (ЛПК). Технология производства сортового проката на совмещенных агрегатах и комплексах находит все большее распространение, успешно вытесняя традиционную несовмещенную технологию. Однако до настоящего времени типовые конструкции ЛПА и ЛПК, рациональные технические характеристики и технологические режимы окончательно не сформированы. Так существуют конструкции ЛПА/ЛПК в которых прокатный стан совмещается с одноручьевого МНЛЗ либо с многоручьевыми МНЛЗ [1–10]. При этом реализуется процесс прямой прокатки без разрезки заготовок либо прокатка заготовок кратной длины, которые подаются к стану через буферное нагревательное устройство. Выбранный режим прокатки в ЛПА/ЛПК определяет скорости прокатки и производительности всего агрегата. Также от числа ручьев МНЛЗ зависит скорость разливки, которая в ЛПА должна обеспечивать производительность равную производительности прокатного стана. В ЛПК производительность МНЛЗ может значительно превышать производительность прокатного стана. МНЛЗ в этом случае одновременно работает на прокатный стан и на склад.

Целью работы является определение основных направлений развития сортовых литейно-прокатных агрегатов и комплексов для производства мелкосортного стального проката.

На сегодняшний день можно выделить следующие основные направления развития сортовых литейно-прокатных агрегатов и комплексов: реализация технологии прямой прокатки; совмещение МНЛЗ и прокатного стана с помощью технологии горячего посада непрерывнолитой заготовки в печь прокатного стана; переход на индукционный нагрев металла; снижение температуры заготовок перед входом в прокатный стан.

В настоящее время основной схемой совмещения МНЛЗ и прокатного стана в сортовых литейно-прокатных агрегатов (ЛПА) и комплексов (ЛПК), предназначенных для производства массовых видов сортового проката, является схема с использованием технологии горячего посада непрерывнолитых заготовок в печь прокатного стана. При этом все технологические агрегаты имеют традиционную конструкцию. Данная схема позволяет использовать хорошо отработанные агрегаты, обладающие высокой надежностью и способные к быстрой перенастройке – сортовые МНЛЗ с гильзовыми кристаллизаторами и многоклетьевые прокатные станы. Кроме того, достоинствами этой схемы являются высокая производительность и технологическая гибкость. Такая схема позволяет отказаться от дорогостоящих высокоскоростных сортовых МНЛЗ.

Производительность таких ЛПА/ЛПК лежит в пределах 300...700 тыс. т/год. МНЛЗ в основном имеет 3–4 ручья. Размеры отливаемых заготовок – от 120 × 120 мм до 200 × 200 мм. Отливка заготовок ведется со скоростями, при которых достигается производительность ручья 25...35 т/час, что соответствует скоростям отливки 2,5...3,5 м/мин. Производительность нагревательных печей находится в пределах 60...120 т/ч. Как правило, печи имеют возможность работы в режимах горячей и холодной загрузки. Прокатные станы ЛПА/ЛПК для производства мелкосортного проката конструктивно не отличаются от обычных прокатных станом, не совмещенных с МНЛЗ. Скорость прокатки сортового проката в прутках достигает 40 м/с при прокатке профилей Ø8–10 мм в одну нитку либо с использованием двухручьевого

прокатки-разделения. При производстве сортового проката со смоткой в бунты максимальная скорость прокатки достигает 35 м/с для сечений $\varnothing 6...8$ мм. Прокатка катанки $\varnothing 5,5$ мм ведется со скоростями, не превышающими 120 м/с. Используется сварка заготовок встык перед прокатным станом, что требует установки сварочных машин в голове прокатного стана и дополнительного пространства перед первой клетью прокатного стана для выравнивания температуры по сечению заготовки. В табл. 1 показаны значения часовой и годовой (при годовом фонде рабочего времени 7500 ч) производительности ЛПК и конечной скорости прокатки в ЛПА/ЛПК различных профилей в зависимости от отливаемого сечения заготовки. Прокатка ведется в бесконечном режиме, т. е. предполагается наличие сварки заготовок перед первой клетью прокатного стана.

Таблица 1

Расчетная производительность ЛПА с многоручьевого МНЛЗ при реализации бесконечной прокатки

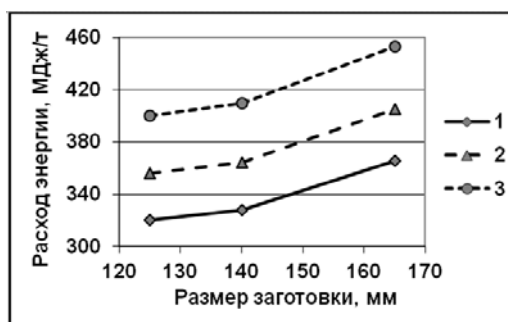
Продукция	Конечная скорость прокатки, м/с	Сечение заготовки, мм	Производительность ЛПА	
			Часовая, т	Годовая, тыс. т
Катанка $\varnothing 5,5$ мм	110	125 × 125, 140 × 140	72	548
		165 × 165	69	518
Круг $\varnothing 12$ мм	30	125 × 125–165 × 165	94	705
Арматура № 12 × 4	15	125 × 125–165 × 165	188	1410

Число ручьев МНЛЗ в ЛПК для прокатки катанки $\varnothing 5,5$ мм и круга $\varnothing 12$ мм соответствует трем. Расчетная производительность ЛПК при прокатке арматуры № 12 × 4 в бесконечном режиме слишком велика и требует высокопроизводительной нагревательной печи и 5-ручьевой МНЛЗ. Поэтому бесконечная прокатка арматурных профилей с использованием 4-ручьевой прокатки-разделения со скоростью 15 м/с нерациональна.

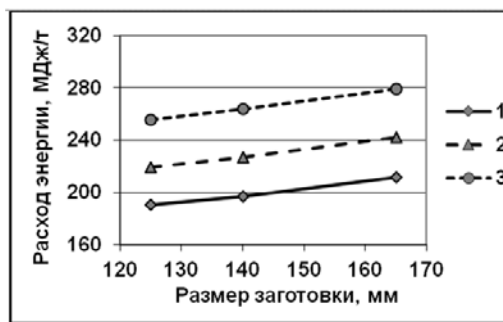
Увеличение размера поперечного сечения исходной заготовки приводит к увеличению расхода энергии на деформацию металла (рис. 1). Однако если при прокатке катанки $\varnothing 5,5$ мм интенсивность роста расхода энергии по мере увеличения поперечного сечения заготовки повышается, то при прокатке круга $\varnothing 12$ мм практически не изменяется, а при прокатке арматуры № 12 × 4 наблюдается тенденция к снижению интенсивности роста расхода энергии.

Годовая производительность ЛПК 400 тыс. т готового проката и 225 тыс. т товарной непрерывнолитой заготовки. ЛПК предназначен для производства круглого, квадратного и арматурного проката, а также уголков и швеллеров из низко- и среднеуглеродистых сталей. ЛПК оснащен 5-ручьевой МНЛЗ. МНЛЗ отливает квадратные заготовки сечением от 130 × 130 до 160 × 160 мм. Прокатный стан имеет производительность 90 т/час при горячем посаде заготовок в печь и 80 т/час при холодном посаде. Конечная скорость прокатки до 15,3 м/с. В голове прокатного стана установлена машина стыковой сварки заготовок.

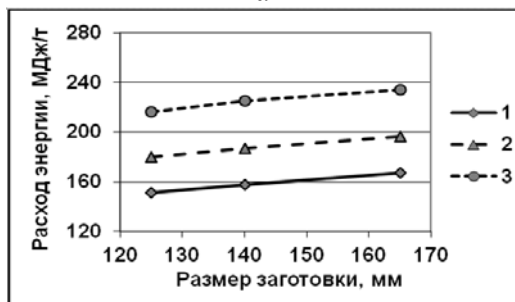
Реализация технологии прямой прокатки без разрезки заготовки стала возможной благодаря использованию современных высокоскоростных сортовых МНЛЗ и увеличению сечения отливаемой заготовки. Скорость разлива на современных высокоскоростных сортах МНЛЗ достигает 7,2 м/мин [7, 8]. Такие скорости достигаются благодаря достижениям в области систем подвески и качания кристаллизатора, охлаждения гильзы кристаллизатора и его профиля. Увеличение размеров поперечного сечения отливаемой заготовки также позволяет повысить производительность ручья, а, следовательно, всего ЛПА, реализующего совмещенный процесс. Для ЛПК, реализующих несомещенный процесс, повышение производительности ручья позволяет сократить количество ручьев МНЛЗ.



а



б



в

Температура заготовки 1200 °С (1),
1100 °С (2) и 1000 °С (3);
а – катанка Ø 5,5 мм;
б – круг Ø 12 мм;
в – арматура № 12 × 4

Рис. 1. Зависимость удельного расхода энергии на деформацию металла от температуры и размера стороны квадратной заготовки

Типичный современный ЛПК, использующий технологию горячего посада заготовок в нагревательную печь, показан на рис. 2 [5].

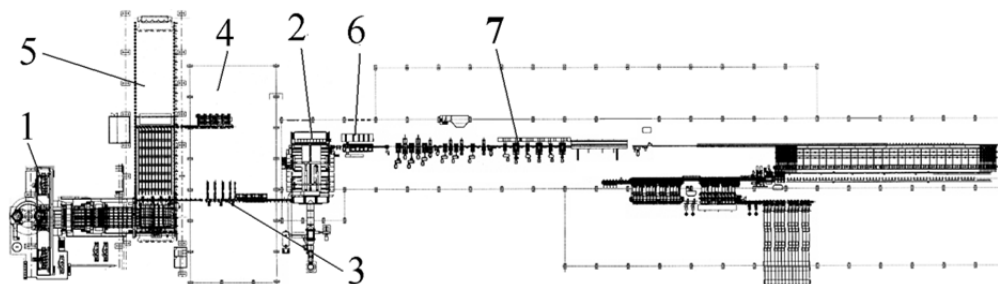


Рис. 2. Схема ЛПК для производства мелкосортного проката компании Sonassid
1 – МНЛЗ; 2 – нагревательная печь; 3 – загрузочная решетка; 4 – склад заготовок; 5 – холодильник заготовок; 6 – машина стыковой сварки; 7 – прокатный стан

На рис. 3 показана зависимость скорости разливки и производительности ручья МНЛЗ от сечения заготовки характерная для высокоскоростных сортовых МНЛЗ.

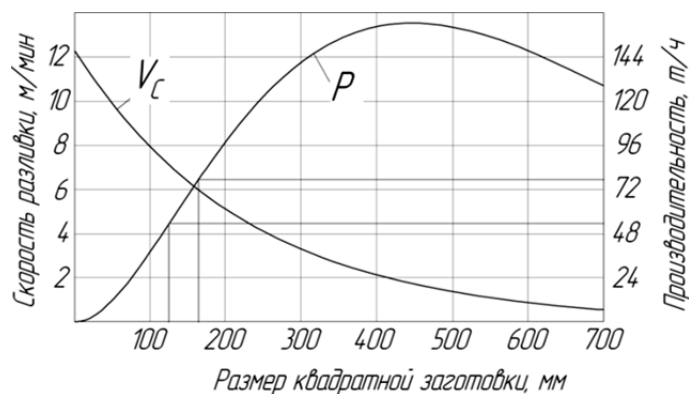


Рис. 3. Зависимость скорости разливки и производительности ручья высокоскоростных МНЛЗ от сечения заготовки

Зависимость скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора от ее размера для высокоскоростных МНЛЗ можно представить следующим образом:

$$V_3 = 12,338 \cdot \exp(-0,0044 \cdot x),$$

где x – размер стороны квадратной заготовки.

Из рис. 3 видно, что при увеличении сечения сортовых заготовок в применяемом в настоящее время диапазоне (125–200 мм) производительность ручья монотонно возрастает. В табл. 2 показаны значения часовой и годовой (при годовом фонде рабочего времени 7500 ч) производительности ручья МНЛЗ и конечной скорости прокатки различных профилей в зависимости от отливаемого сечения заготовки для режима прямой прокатки в ЛПА.

Таблица 2

Расчетная производительность и конечные скорости прокатки на ЛПА при совмещенном процессе

Сечение заготовки, мм	Скорость разливки, м/мин	Производительность ЛПА		Конечная скорость прокатки (м/с) для профилей		
		Часовая, т	Годовая, тыс. т	Катанка Ø5,5 мм	Круг Ø12 мм	Арматура № 12 × 4
125 × 125	7,2	51	382	77,4	16,3	4,1
140 × 140	6,5	58	435	87,7	18,5	4,6
165 × 165	6	73 (69)	548 (518)	110	24,7	6,2

Примечание. В скобках указана производительность ЛПА при производстве катанки Ø5,5 мм.

Производительность ЛПА, реализующих совмещенный процесс, определяется в большинстве случаев производительностью МНЛЗ. Однако в некоторых случаях ограничивающим фактором может быть конечная скорость прокатки. Размер заготовки, при которой достигается максимальная скорость прокатки можно найти из уравнения:

$$V_3 \cdot A_3 = V_{II} \cdot A_{II},$$

где V_3 , V_{II} – соответственно скорость вытягивания заготовки и скорость конца прокатки;

A_3 , A_{II} – соответственно площадь сечения заготовки и проката.

Приняв максимальные конечные скорости прокатки следующими: катанка Ø5,5 мм – 110 м/с, круг Ø12 мм – 30 м/с, арматура № 12 × 4 – 15 м/с, вычислим максимальный размер заготовок. Для катанки Ø5,5 мм максимальный размер заготовки составит 160 мм, которая должна вытягиваться со скоростью 5,62 м/мин. При этом производительность ЛПА ограничиться на уровне 69 т/час. Таким образом, использование заготовок размерами более 160 × 160 мм в ЛПА, предназначенных для прокатки катанки, будет приводить к снижению его производительности. Для круга Ø12 мм максимальный размер заготовки составляет 205 мм. Для арматуры № 12 × 4 максимальный размер заготовки выходит за пределы возможности отливки на сортовой МНЛЗ.

Удельный расход энергии на деформацию в зависимости от размера исходной заготовки и температуры ее нагрева при прокатке различных профилей показан на рис. 1. По сравнению с удельным расходом энергии на деформацию в ЛПА условно-совмещенной схемы затраты энергии увеличивается лишь на 2–3 %.

В настоящее время технология прямой прокатки реализована фирмой Danieli Morgardshammar на мини-заводе в г. Миса (США) (рис. 4). Концепция мини-завода получила название MIDA [7, 8].

Одноручьевая МНЛЗ отливает заготовку размером 130×130 мм со скоростью до 7,2 м/мин. Производительность ручья МНЛЗ может достигать 55 т/час. Среднемассовая температура заготовки на выходе из МНЛЗ составляет около 920 °С. В индукционной нагревательной установке заготовка нагревается до температуры 1150 °С. Конечная скорость прокатки арматурного проката $\varnothing 12,7$ мм составляет 12 м/с.

Недостатком ЛПА с прямым совмещением является то, что в случае продолжительной остановки прокатного стана МНЛЗ может работать только на склад. При этом полученные заготовки в дальнейшем нецелесообразно прокатывать на прокатном стане данного ЛПА, поскольку их нагрев до температуры прокатки займет много времени. Работающая МНЛЗ в это время не сможет обеспечивать заготовкой прокатный стан.

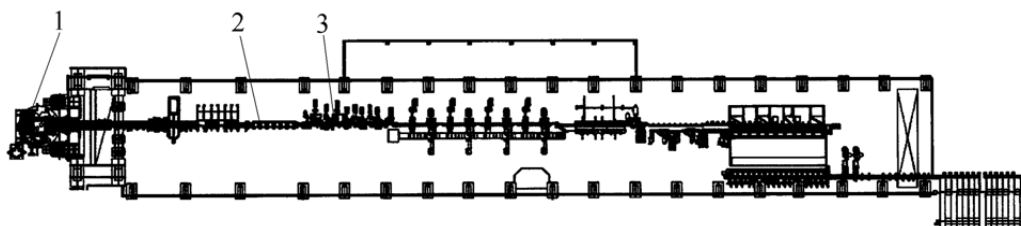


Рис. 4. Схема ЛПА в г. Миса:

1 – МНЛЗ; 2 – индукционная нагревательная установка; 3 – прокатный стан

В последнее время наблюдается отказ от использования пламенных нагревательных печей и переход к индукционному нагреву, обладающим известными достоинствами: высоким КПД, низкой инерционностью, высоким качеством нагрева и низкими потерями металла в окалину. В ЛПА и ЛПК, где заготовка не охлаждается до температуры окружающей среды, эти достоинства проявляются в полной мере.

Недостатком индукционных нагревательных установок можно считать невозможность реализации регламентированных режимов нагрева заготовок из ряда марок стали, например с карбонитридным упрочнением, и их выдержки при определенной температуре. Кроме того, хотя скорость нагрева в индукционных установках намного больше, чем в пламенных печах, ее все равно недостаточно для обеспечения полной загрузки прокатного стана.

Один из ЛПА, в котором предусмотрен только индукционный нагрев заготовок, как говорилось выше, был построен в г. Миса (США) фирмой Danieli Morgardshammar (рис. 4). Индукционные нагревательные установки можно считать единственно возможными к применению в ЛПА с прямым совмещением МНЛЗ и прокатного стана. Другой подобный ЛПК был построен компанией SMS для компании Tung Ho Steel Enterprise Corporation на острове Тайвань [9]. 5-ручьевая МНЛЗ позволяет производить до 1200 тыс. т. непрерывнолитых заготовок в год из которых 600-800 тыс. т. могут тут же перекачиваться на прокатном стане. Производительность одного ручья МНЛЗ составляет 40–45 т/час. Размер отливаемых заготовок 130×130 , 160×160 , 200×200 мм. Прокатный стан предназначен для производства арматурного и круглого проката $\varnothing 9,5$ –43 мм в прутках и бунтах. Прокатка арматуры возможна с использованием технологии двухручьевой прокатки разделения. Конечная скорость прокатки достигает 45 м/с для прутков и 35 м/с для бунтов.

Компания Siemens-VAI разработала аналогичную концепцию ЛПК, получившую название WinLink [10]. ЛПК WinLink может производить до 500 тыс. т заготовок в год, из которых 300–400 тыс. т можно сразу перекачивать на прокатном стане. Число ручьев МНЛЗ может быть два и более. Размер отливаемых заготовок 130×130 и 150×150 мм. Скорость разливки 5,7–7,5 м/мин.

В таких ЛПА/ЛПК отсутствует буфер, в котором могли бы находиться заготовки во время коротких простоев прокатного стана. Возможность реализации такого решения определяется высокой надежностью оборудования прокатного стана и МНЛЗ. Кроме того, высокие скорости разливки и компактное расположение оборудования ЛПА/ЛПК позволяют сохранить высокое теплосодержание заготовки, что сокращает время нагрева заготовки до температуры прокатки.

В настоящее время на всех современных ЛПА и ЛПК реализована технология низко-температурной прокатки, температура нагрева заготовок уменьшена от 1200...1150 °С до 1000...1100 °С в зависимости от марки стали. Это обусловлено стремлением снизить расход энергии на нагрев заготовок и получить высокий комплекс свойств готового проката.

Снижение температуры заготовки закономерно приводит к увеличению расхода энергии на деформацию (см. рис. 1). Однако увеличение расхода энергии неодинаково для профилей различных сечений. Например, если снижение температуры заготовки от 1200 до 1000 °С при прокатке арматуры № 12 × 4 приводит к увеличению расхода энергии в 1,4–1,45 раз, то при прокатке катанки Ø5,5 мм расход энергии увеличивается в 1,25 раз. Это объясняется влиянием деформационного разогрева в последних проходах на напряжение текучести стали.

Снижение температуры нагрева заготовки, несмотря на увеличение расхода энергии на деформацию металла, все равно остается выгодным с позиций экономии суммарной энергии на нагрев и деформацию металла. Это подтверждается расчетными данными, приведенными на рис. 5. В расчетах принята температура заготовки на входе в нагревательное устройство 850 °С; к.п.д. пламенной печи принят 0,6, температура нагрева заготовок в базовом варианте 1200 °С. При использовании индукционного подогрева заготовок экономия энергии из-за большего по сравнению с пламенными печами КПД может составлять 30 % и более.

При снижении температуры нагрева заготовок от 1200 до 1000 °С значения силы и момента прокатки увеличиваются на 50–60 % в первых клетях и на 2–35 % в последних клетях прокатного стана (рис. 6).

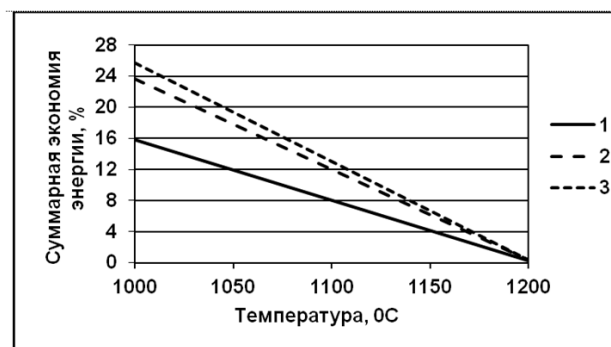


Рис. 5. Снижение суммарного расхода энергии при уменьшении температуры нагрева заготовки от 1200 °С:

1 – катанка Ø5,5 мм; 2 – круг Ø12 мм; 3 – арматура № 12 × 4; сечение заготовки 165 × 165 мм

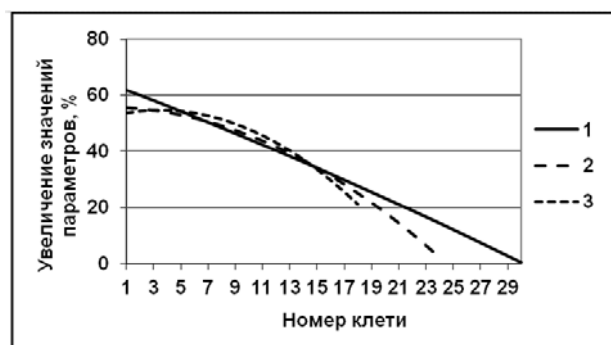


Рис. 6. Зависимость увеличения значений силы и момента прокатки при снижении температуры нагрева заготовок от 1200 °С до 1000 °С:

1 – катанка Ø5,5 мм; 2 – круг Ø12 мм; 3 – арматура № 12 × 4; сечение заготовки 165 × 165 мм

Рост значений силы и момента прокатки в последних клетях наиболее значителен для случая прокатки арматуры № 12 × 4 (на 25–35 %) и наименее значителен для случая прокатки катанки Ø 5,5 мм (на 2–15 %). Влияние увеличения размера сечения заготовки в исследованном интервале (от 125 × 125 до 165 × 165 мм) повышает средние по стану значения силы и момента прокатки не более чем на 10 %.

ВЫВОДЫ

Проанализированы основные направления развития сортовых литейно-прокатных агрегатов и комплексов. В обозримом будущем следует ожидать сосуществования трех принципиальных схем ЛПА/ЛПК: схемы с прямым совмещением МНЛЗ и прокатного стана с использованием индукционных нагревательных установок; условно-совмещенная схема с использованием пламенных печей; условно-совмещенная схема с использованием индукционных нагревательных установок.

Первую схему наиболее целесообразно применять в региональных мини-заводах, предназначенных для производства крупных партий массовых видов проката строительного сортамента. Марочный сортамент стали должен быть представлен рядовыми марками стали, не требующих регламентированных режимов охлаждения и подогрева.

Вторую схему следует использовать для производства проката из легированных и специальных марок стали, требующих регламентированных режимов охлаждения и подогрева и склонных к образованию поверхностных дефектов на заготовках, что в некоторых случаях будет требовать ремонта заготовки. Размер партии производимого проката может быть меньше, чем для первой схемы. Возможна работа на сторонней заготовке.

Третья схема подобна первой, но она может обеспечивать более высокую производительность и позволяет использовать более дешевые МНЛЗ с умеренными скоростями отливки заготовок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов. Сообщение 2. Производство сортового проката* / Ю. В. Коновалов // *Производство проката.* – 2009. – № 10. – С. 36–48.
2. Саломан П. *Успешный ввод в эксплуатацию нового мини-завода фирмы BELGO MINEIRA PIRACICABA* / П. Саломан, Л. Моттес, Д. Сальвадор // *MPT.* – 2006. – № 1. – С. 6–13.
3. *The new superflexible 500.000-tpy rolling mill of Kroman Çelik, Turkey* // *DaNews.* – 2004. – December (140). – P. 19.
4. *Rolling mill starts operation at Southern Steel Corporation (VSC Group), Vietnam* // *DaNews.* – 2005. – September (143). – P. 32.
5. *Minimill plant in Morocco completed: 1.1-Mtpy steelmaking plant started up at Sonasid* // *DaNews.* – 2005. – December (144). – P. 22–23.
6. *SMS, Slovakia: Minimill for bar steel and wire rod ordered* // *SMS group Newsletter.* – 2009. – Vol. 16. – № 3. – P. 114–115.
7. Стеблов А. Б. *Модульный принцип строительства металлургических мини-заводов* / А. Б. Стеблов // *Сталь.* – 2010. – № 12. – С. 50–53.
8. *Leczo T. CMC Steel Arizona – A Micro-Mill With Maximum Potential* / T. Leczo // *Iron & Steel Technology.* – 2012. – № 2. – P. 35–41.
9. *Tung Ho Steel, Taiwan: Minimill sets new standards for rebars* // *SMS group Newsletter.* – 2011. – Vol. 18. – № 1. – P. 146–149.
10. Коломбо Э. *Производство сортового длинномерного проката по технологии WinLink* / Э. Коломбо, У. Занелли // *Сталь.* – 2011. – № 11. – С. 80–82.

Воробей С. А. – зав. отделом ИЧМ НАН Украины;

Бадюк С. И. – аспирант ИЧМ НАН Украины.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: sergey.vorobey@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.10.2012 г.