



*The peculiarities of using of metallized raw material in conditions of steel melting in arc furnaces are shown.*

*В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, ПИИ «ЕВРОСТАЛЬ ЛТД»,  
И. Н. ПЛЮЩЕВСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ*

УДК 669.181

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ МАРОК СТАЛИ. СООБЩЕНИЕ 2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЗОВАННОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

Наличие и возможность разработки собственных запасов железорудного сырья [1–3] обуславливает актуальность решения вопросов, связанных с использованием металлized сырья, в первую очередь металлized окатышей для производства высококачественных сталей в дуговых сталеплавильных печах.

Для условий электродуговых печей возможно несколько вариантов технологий выплавки стали с использованием металлized сырья: выплавка стали с использованием 100% металлized окатышей и выплавка стали с частичным использованием окатышей или горячбрикетированного железа в завалку вместе с металлическим ломом. Кроме того, металлized сырье можно подавать в рабочее пространство в различных режимах: периодически и непрерывно.

Выплавка стали с непрерывной загрузкой металлized окатышей обладает рядом преимуществ по сравнению с бадьевой загрузкой лома, основными из которых являются стабилизация процесса горения дуги; значительное уменьшение фликер-эффекта; отсутствие потерь энергии открытой печью и операций завалки и подвалки. В то же время при непрерывной загрузке можно выделить недостатки технологии: низкая эффективность использования средств интенсификации плавки в виде топливно-кислородных горелок; большие потери через ограждающие конструкции (водоохлаждаемые панели) в связи с тем, что на протя-

жении всей плавки они не экранируются металлошихтой, а время плавки, как правило, больше. Поэтому важным условием высокой эффективности процесса является поддержание шлака во вспененном состоянии.

Поскольку, помимо выплавки в ДСП высококачественных марок стали, значительную долю занимает выплавка рядовых марок стали, то ориентация технологии на выплавку с использованием непрерывной загрузки 100% металлized окатышей нерациональна, так как должна быть обеспечена возможность работы на обычном металлоломе.

На рис. 1 показаны основные отличия технологии выплавки стали при различной доле металлized сырья в отношении загрузки металлошихты и ввода электрической энергии для высококачественной 100-тонной электродуговой печи.

Первой особенностью большой доли использования металлized окатышей является отсутствие операции подвалки, так как окатыши в рабочее пространство печи подают через отверстие в своде непрерывно. Вторая особенность заключается в том, что время доводки расплава уменьшается в сравнении с плавкой при использовании 100% металлического лома. С другой стороны, при увеличении количества металлized окатышей общее время плавки возрастает, так как уменьшается величина мощности электрической энергии в начале плавления и не используются газокислородные горелки, а количество пустой породы увеличивается.

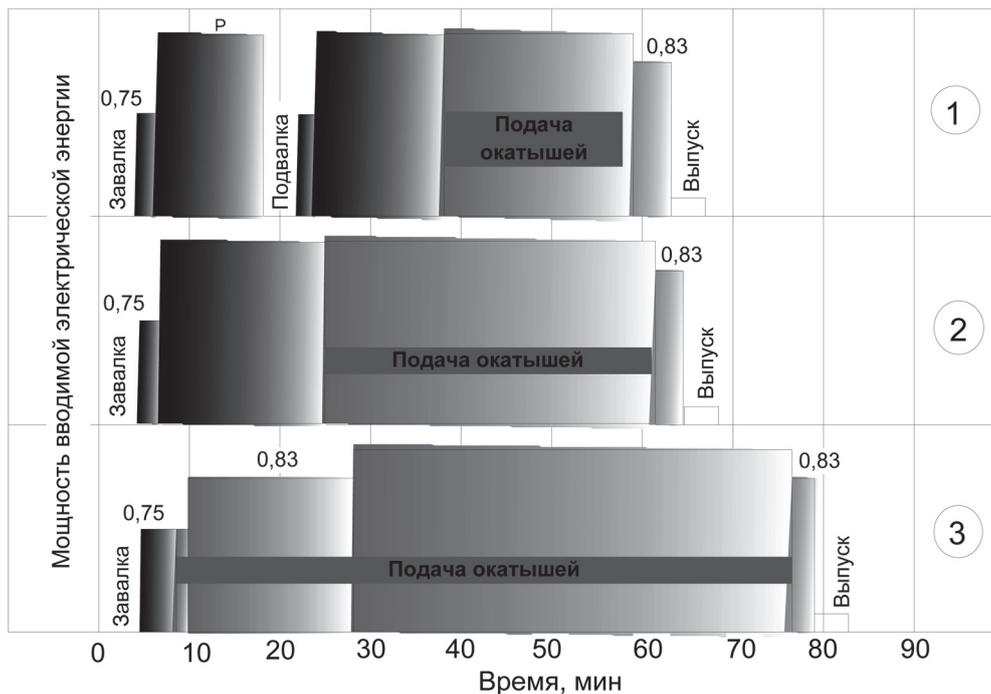


Рис. 1. Диаграмма ввода электрической мощности и подачи металлошихты в рабочее пространство электродуговой печи: 1 – 25% металлизированных окатышей; 2 – 40; 3 – 85%;  $P = 60$  МВт

При непрерывном процессе подачи металлизированных окатышей в рабочее пространство электродуговой печи особенно важным является вопрос обеспечения необходимой скорости подачи металлизированных окатышей в жидкую ванну. При этом возможно несколько вариантов подачи окатышей: скорость подачи равна скорости плавления; скорость подачи больше или меньше скорости плавления. Закономерно, что наиболее эффективным будет режим с равными скоростями подачи и плавления окатышей. Теоретическое обоснование преимущества такого режима с количественной стороны является крайне сложной задачей, поэтому наибольший интерес представляют результаты плавки в условиях действующего производства, на основании которых проверяется достоверность используемых расчетных моделей.

В работе [4] приведены технико-экономические и теплотехнические показатели электроплавки металлизированных окатышей в ванне 150-тонной ДСП. Анализ данных опытных плавки [4] позволяет сделать вывод о том, что согласование скорости загрузки со скоростью плавления является неотъемлемой частью энергоэффективного технологического режима выплавки стали с использованием в завалку преимущественно металлизированного сырья в виде окатышей либо брикетов. Скорость загрузки влияет как на производительность печи, так и на удельный расход электрической энергии, причем при согласованной скорости загрузки окатышей со скоростью их плавления эти показатели

наилучшие (например, при загрузке 72% окатышей от массы металлозавалки время плавки под током составило 83 мин, удельный расход электрической энергии – 550 кВт·ч/т, а производительность печи – 75 т/ч). Скорость плавления окатышей в свою очередь необходимо определять, используя данные теплофизических и геометрических характеристик, текущей температуры ванны, режима продувки ванны и ее обезуглероживания и т. д.

Автором работы [5] рассмотрена другая проблема, возникающая при выплавке стали с использованием металлизированных окатышей, заключающаяся в выборе момента начала подачи окатышей и их расхода при загрузке в начале плавки части металлошихты в виде лома. Исследования были также проведены для 150-тонной электродуговой печи с завалкой 50 т лома и 100 т металлизированных окатышей. На основе расчетных и экспериментальных данных было установлено, что наилучшие показатели по удельному расходу электрической энергии (510–515 кВт·ч/т) и времени плавки (80 мин) достигаются при подаче окатышей в момент расплавления 20–30% загруженного лома с низкой начальной скоростью подачи 300 кг/мин с увеличением в процессе плавки до 1500–1600 кг/мин в конце плавки.

Таким образом, при различных вариантах загрузки основной задачей является обеспечение согласования мощности вводимой электрической энергии и скорости загрузки окатышей, так как не-

Т а б л и ц а 1. Состав пассивированных металлизированных окатышей

| Химический состав                     | Fe <sub>общ</sub> | Fe <sub>мет</sub> | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | MgO  | C   | S     | P     | Cu    |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-------|-------|-------|
| Массовая доля (средний показатель), % | 90,5              | 87                | 3,9              | 0,28                           | 2,0 | 0,26 | 1,7 | 0,004 | 0,011 | 0,006 |

достаточная скорость подачи окатышей приведет к их накоплению и образованию «айсберга», а недостаточная скорость подачи – к перегреву металла и его угару, а также повышенным потерям энергии и снижению производительности.

**Сравнительный анализ показателей выплавки стали с использованием и без использования металлизированного сырья**

Основной показатель, характеризующий эффективность использования сырья, – выход годного. Данный показатель используется и при определении удельных затрат энергии. Для определения выхода годного проведены расчеты материального баланса для случаев выплавки стали в дуговых печах при использовании только металлического лома или металлизированных окатышей, а также при различной доле металлизированного сырья, подавае-

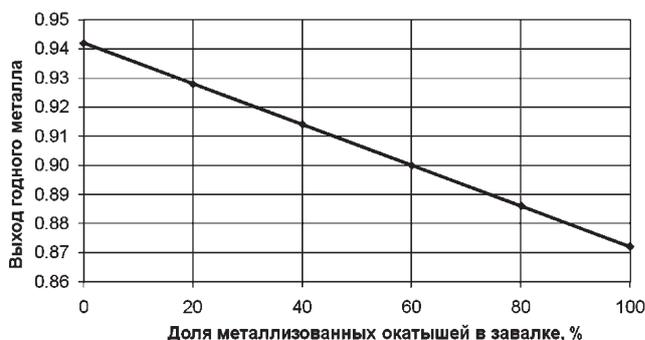


Рис. 2. Выход годного металла при выплавке стали в зависимости от доли металлизированных окатышей в завалке

мого в завалку вместе с металлическим ломом. В расчетах использовали химический состав металлического лома (3А) с 1% мусора в виде SiO<sub>2</sub>. Состав металлизированных окатышей приведен в табл. 1.

Результаты расчета выхода годного приведены на рис. 2.

Т а б л и ц а 2. Тепловой баланс печи при работе с использованием 100% металлолома (на 100 т шихты)

| Приход теплоты                          | ГДж           | %            | Расход теплоты                  | ГДж           | %            |
|---|---------------|--------------|---------------------------------|---------------|--------------|
| Теплота дуг                             | 160,99        | 82,3         | Теплота стали                   | 128,96        | 65,9         |
| Теплота экзотермических реакций         | 34,59         | 17,7         | Теплота шлака                   | 13,76         | 7,0          |
| Теплота шихты                           | 0,00          | 0,0          | Теплота стали в шлаке           | 0,65          | 0,3          |
| Теплота ТКГ                             | 0,00          | 0,0          | Теплота эндотермических реакций | 0,00          | 0,0          |
|   |               |              | Теплота с охлаждением           | 26,46         | 13,5         |
|   |               |              | Теплота с газами                | 22,75         | 11,6         |
|   |               |              | Теплота футеровки               | 3,00          | 1,5          |
| <b>Итого</b>                            | <b>195,58</b> | <b>100,0</b> | <b>Итого</b>                    | <b>195,58</b> | <b>100,0</b> |
| Электроэнергия (КПД 0,93)               | 173,10        |              |                                 |               |              |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | 510,44        |              |                                 |               |              |
| Тепловой КПД, %                         | 65,94         |              |                                 |               |              |

Т а б л и ц а 3. Тепловой баланс при работе с использованием 100% металлизированных окатышей

| Приход теплоты                          | ГДж           | %            | Расход теплоты                  | ГДж           | %            |
|---|---------------|--------------|---------------------------------|---------------|--------------|
| Теплота дуг                             | 179,85        | 83,7         | Теплота стали                   | 119,39        | 55,6         |
| Теплота экзотермических реакций         | 34,92         | 16,3         | Теплота шлака                   | 26,72         | 12,4         |
| Теплота шихты                           | 0,00          | 0,0          | Теплота стали в шлаке           | 0,60          | 0,3          |
| Теплота ТКГ                             | 0,00          | 0,0          | Теплота эндотермических реакций | 6,86          | 3,2          |
|   |               |              | Теплота с охлаждением           | 31,75         | 14,8         |
|   |               |              | Теплота с газами                | 26,45         | 12,3         |
|   |               |              | Теплота футеровки               | 3,00          | 1,4          |
| <b>Итого</b>                            | <b>214,78</b> | <b>100,0</b> | <b>Итого</b>                    | <b>214,78</b> | <b>100,0</b> |
| Электроэнергия (КПД 0,93)               | 193,39        |              |                                 |               |              |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | 615,96        |              |                                 |               |              |
| Тепловой КПД, %                         | 55,59         |              |                                 |               |              |

Т а б л и ц а 4. Тепловой баланс при работе с использованием 100% металлизированных окатышей и их подогревом до 600 °С

| Приход теплоты                          | ГДж    | %     | Расход теплоты                  | ГДж    | %     |
|---|--------|-------|---------------------------------|--------|-------|
| Теплота дуг                             | 134,68 | 63,6  | Теплота стали                   | 119,39 | 56,4  |
| Теплота экзотермических реакций         | 34,92  | 16,5  | Теплота шлака                   | 26,72  | 12,6  |
| Теплота шихты                           | 42,00  | 19,8  | Теплота стали в шлаке           | 0,60   | 0,3   |
| Теплота ТКГ                             | 0,00   | 0,0   | Теплота эндотермических реакций | 6,86   | 3,2   |
|   |        |       | Теплота с охлаждением           | 28,58  | 13,5  |
|   |        |       | Теплота с газами                | 26,45  | 12,5  |
|   |        |       | Теплота кладки                  | 3,00   | 1,4   |
| <b>Итого</b>                            | 211,60 | 100,0 | <b>Итого</b>                    | 211,60 | 100,0 |
| Электроэнергия (КПД 0,93)               | 144,81 |       |                                 |        |       |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | 461,25 |       |                                 |        |       |
| Тепловой КПД,%                          | 56,42  |       |                                 |        |       |

Удельный расход электрической энергии можно определить двумя путями:

1) по среднему значению показаний электрического счетчика за плавку на действующей печи при выплавке стали с использованием и без использования металлизированного сырья, деленному на массу выпускаемой плавки;

2) по расчетам теплового баланса.

Для определения удельного расхода электрической энергии были рассчитаны тепловые балансы работы 100-тонной печи для условий работы с использованием и без использования металлизированного сырья (табл. 2, 3).

Проблему снижения удельного расхода электрической энергии можно решить предварительным подогревом металлизированного сырья теплотой отходящих из печи газов, либо подавая окатыши непосредственно с установки металлизации в печь (производители технологии HYL предусматривают такую опцию с выдачей в транспортную систему окатышей с температурой 700 °С). В табл. 4 приведена структура теплово-

го баланса при использовании подогрева металлизированных окатышей.

На рис. 3 показана зависимость удельного расхода электрической энергии при выключенных топливно-кислородных горелках и различной доле металлизированного сырья, подогретого до температуры 600 °С (температура металлического лома принята равной 20 °С) и без подогрева.

При использовании в завалку неподогретого металлического лома возникает дополнительная возможность эффективно использовать такой источник энергии, как природный газ, эффективность которого при использовании непрерывной подачи металлизированных окатышей крайне низка (поэтому он, как правило, не используется). В табл. 5 приведен тепловой баланс при работе с использованием металлолома и топливно-кислородных горелок (ТКГ).

Отметим, что при выплавке стали с использованием металлического лома производительность печи будет приблизительно на 10% выше (за счет меньшего времени плавки), что отражается на общей прибыли предприятия.

В табл. 6 и 7 приведены основные затраты на выплавку стали с учетом затрат сырья, поставляемого из Украины и России и собственного металлизированного сырья, а также с учетом цены на газ (200 у. е. за 1000 м<sup>3</sup>).

Сравнение основных затрат на выплавку стали при использовании металлического лома и металлизированных окатышей показывает, что стоимость стали, изготовленной из металлизированного сырья, должна быть как минимум на 100 у. е. выше, чем из металлического лома. Для высококачественных сталей разница в цене со сталями обыкновенного качества составляет более 200 у. е., что делает использование металлизированного сырья рентабельным.

Необходимо отметить, что доля стоимости энергоносителей в затратах на выплавку стали

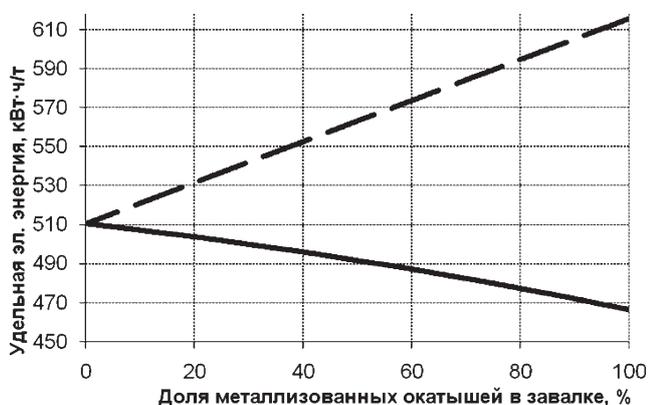


Рис. 3. Удельный расход электрической энергии при использовании металлизированных окатышей (МО) с подогревом их до 600 °С и без подогрева: — — — — — удельный расход электроэнергии без подогрева МО; — — — — — удельный расход электроэнергии с подогревом МО до 600 °С

Т а б л и ц а 5. Тепловой баланс при работе с использованием 100% металлолома и расходом природного газа 6 м<sup>3</sup>/т

| Приход теплоты                          | ГДж    | %     | Расход теплоты                  | ГДж    | %     |
|---|--------|-------|---------------------------------|--------|-------|
| Теплота дуг                             | 140,58 | 71,5  | Теплота стали                   | 128,96 | 65,6  |
| Теплота экзотермических реакций         | 34,59  | 17,6  | Теплота шлака                   | 13,76  | 7,0   |
| Теплота шихты                           | 0,00   | 0,0   | Теплота стали в шлаке           | 0,65   | 0,3   |
| Теплота ТКГ                             | 21,51  | 10,9  | Теплота эндотермических реакций | 0,00   | 0,0   |
|   |        |       | Теплота с охлаждением           | 26,46  | 13,5  |
|   |        |       | Теплота с газами                | 23,85  | 12,1  |
|   |        |       | Теплота кладки                  | 3,00   | 1,5   |
| <b>Итого</b>                            | 196,68 | 100,0 | <b>Итого</b>                    | 196,68 | 100,0 |
| Электроэнергия (КПД 0,93)               | 151,16 |       |                                 |        |       |
| Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т | 445,72 |       |                                 |        |       |
| Тепловой КПД, %                         | 65,57  |       |                                 |        |       |

Т а б л и ц а 6. Основные затраты на выплавку стали при использовании металлического лома и использовании природного газа

| Наименование   | Стоимость единицы, у. е. | Количество единиц на 1 т жидкой стали | у. е./т |
|--|--------------------------|---------------------------------------|---------|
| <i>Металлошихта:</i>   |                          |                                       |         |
| 100% металлического лома (3А), т   | 300                      | 1,062                                 | 318,6   |
| <i>Энергоносители:</i>   |                          |                                       |         |
| электрическая энергия, кВт·ч   | 0,114                    | 456,2                                 | 52      |
| природный газ, м <sup>3</sup>  | 0,2                      | 5,3                                   | 1,06    |
| <i>Добавочные материалы:</i>   |                          |                                       |         |
| известь, кг  | 0,07                     | 35,1                                  | 2,46    |
| Остальное (огнеупоры, кокс, электроды, кислород, техническая вода и т. д.) |                          |                                       | 17      |
| <b>Итого</b>   |                          |                                       | 391,1   |

Т а б л и ц а 7. Основные затраты на выплавку стали при использовании металлизированных окатышей

| Наименование   | Стоимость единицы, у. е. | Количество единиц на 1 т жидкой стали | у. е./т |
|--|--------------------------|---------------------------------------|---------|
| <i>Металлошихта:</i>   |                          |                                       |         |
| 100% металлизированных окатышей, т   | 350                      | 1,148                                 | 401,8   |
| <i>Энергоносители:</i>   |                          |                                       |         |
| электрическая энергия, кВт·ч   | 0,114                    | 616                                   | 70,22   |
| <i>Добавочные материалы:</i>   |                          |                                       |         |
| известь, кг  | 0,07                     | 41                                    | 2,87    |
| Остальное (огнеупоры, кокс, электроды, кислород, техническая вода и т. д.) |                          |                                       | 16      |
| <b>Итого</b>   |                          |                                       | 491     |

в настоящее время составляет меньшую величину (6–14%) в сравнении со стоимостью шихты, поэтому увеличение затрат электроэнергии на выплавку стали при использовании металлизированных окатышей может значительно перекрываться увеличением цены на металлический лом.

Это свидетельствует о том, что использование собственного железорудного сырья позволит не только уменьшить зависимость от зарубежных поставщиков, но и снизить суммарные затраты на выплавку высококачественных марок стали.

Различные варианты использования собственных железорудных концентратов для выплавки стали приведены на рис. 4.

Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки.

Преимущества варианта А: минимальные транспортные расходы, так как все переделы находятся на одной площадке; возможность загрузки в плавильный агрегат металлизированных окатышей с температурой 500–700 °С непосредственно с установки металлизации.

Недостатки варианта А: необходимость организации сталеплавильного и прокатного производств, при том, что существующие мощности РУП «БМЗ» позволяют использовать весь годовой объем производства металлизированного сырья из собственных железных руд.

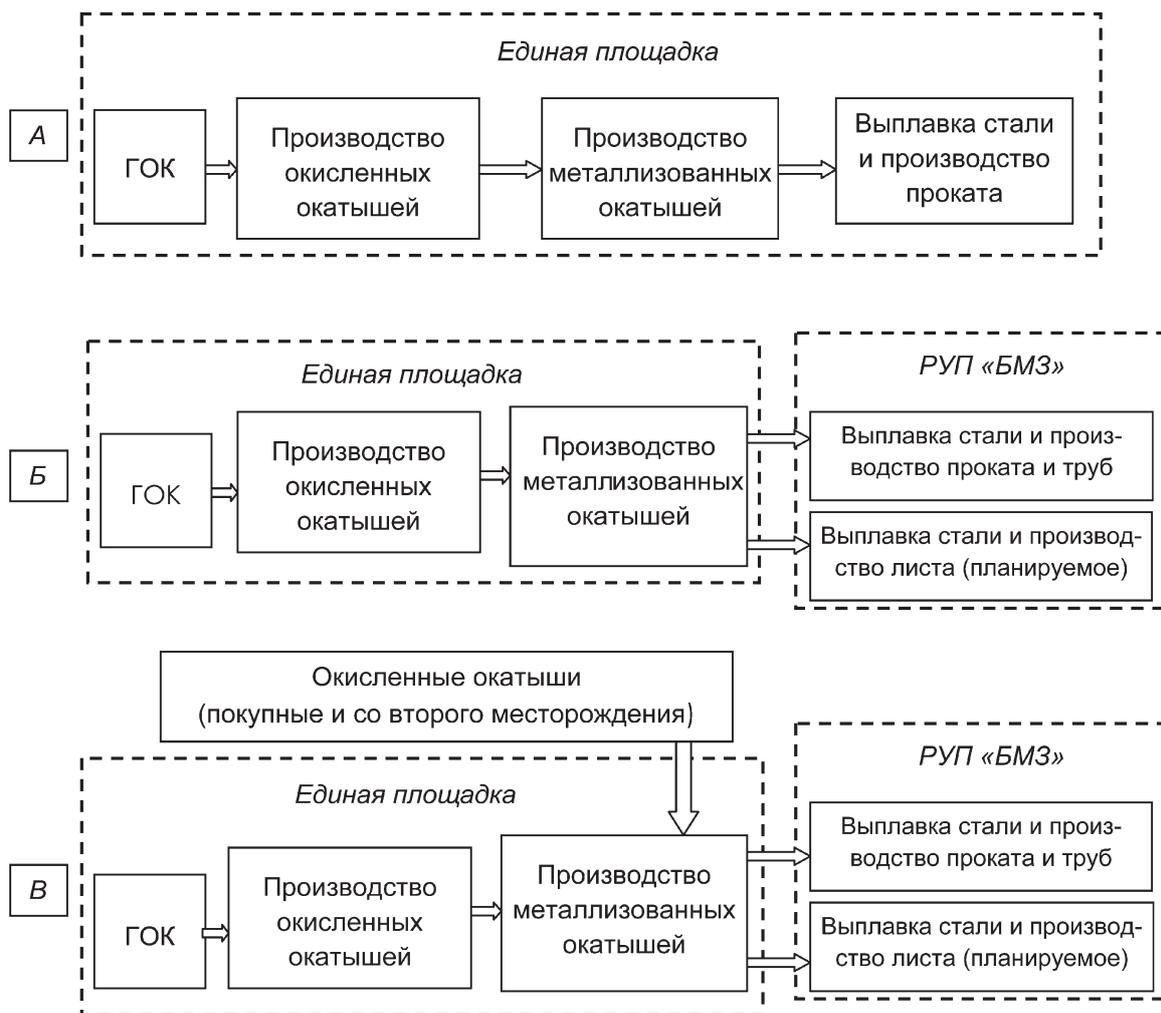


Рис. 4. Варианты использования собственных железорудных концентратов для выплавки стали

По варианту Б отметим отсутствие необходимости в организации сталеплавильного и прокатного производств.

По варианту В имеется возможность организации производства металлizedованного продукта с большей годовой производительностью, которая может быть обеспечена только за счет потребления РУП «БМЗ». Недостатком данного варианта является большая зависимость экономических показателей производства от цен на сырье (окисленные окатыши). Подогрев металлizedованного сырья до 550 °С позволяет минимизировать увеличение потребления электрической энергии при возрастании доли металлizedованного сырья в завалку (экономия может составлять до 5 у. е. на 1 т стали в зависимости от доли металлizedованного сырья), но и сократить время плавки (увеличить производительность). При подогреве металлizedованного сырья особое внимание необходимо уделять конструкции и работе установки подогрева, так как его окисляемость выше, чем у металлического лома. Плавку в электродуговой печи следует проводить с вдуванием углеродсодержащих порошков

под пенистым шлаком, а также использовать продувку ванны кислородом и инертным газом.

### Выводы

1. Анализ технологий производства металлizedованного сырья и его дальнейшего использования для получения высококачественных марок стали показал, что разработка собственной сырьевой базы железорудных концентратов весьма перспективна и позволяет уменьшить зависимость Республики Беларусь от поставок качественного металлического лома.

2. Возрастание потребления электрической энергии на выплавку стали при использовании металлizedованного сырья может быть крайне незначительным, если будут осуществлены оптимальные энерготехнологические режимы, включающие согласованный со скоростью плавления окатышей ввод электрической энергии, оптимальный шлаковый режим и т. д. Значительно уменьшить удельный расход электрической энергии возможно организацией предварительного подогрева металлizedованного сырья, обладающего преимуществами

в постоянстве геометрии и размеров, сыпучести и т. д. перед металлическим ломом.

3. Возрастание потребления электроэнергии при использовании металлizedанного сырья в меньшей степени влияет на экономическую эффективность выплавки стали, чем колебание цен на металлizedанное сырье и металлический лом, так как доля сырья в затратах составляет около 85–90%, а электрической энергии – 6–14%.

4. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в условиях современных электродуговых печей, в которых для интенсификации

процесса плавления и снижения суммарных затрат на выплавку стали используется природный газ, разница в удельном расходе электрической энергии будет более значительной, чем без применения природного газа. Это связано с тем, что при выплавке стали с использованием большей доли металлizedанных окатышей природный газ не используется ввиду высокой температуры ванны, в которой непосредственно плавятся окатыши и отсутствия холодного лома, делающих работу топливно-кислородных горелок малоэффективной.

### Литература

1. Тимошпольский В. И. Развитие металлургического комплекса на базе промышленного освоения железных руд для использования в Республике Беларусь (В порядке обсуждения) // *Литье и металлургия*. 2007. № 2. С. 6–17.
2. Худокормов Д. Н., Королев С. П., Белый О. А., Довнар Г. В., Чепыжев Б. А. Первый белорусский чугун // *Литье и металлургия*. 2008. № 3. С. 140–147.
3. Тимошпольский В. И., Плющевский И. Н., Трусова И. А., Корнеев С. В. Перспективы производства и использования металлizedанного сырья для получения высококачественных марок стали. Сообщение 1. Анализ современных схем получения металлizedанного сырья // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 130–134.
4. Гришин А. А. Исследование режима плавления металлizedанных окатышей с целью интенсификации процесса электроплавки стали: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2006.
5. Острик В. В. Разработка рациональных энергетических режимов плавления лома и металлizedанных окатышей в дуговых сталеплавильных печах: Автореф. дис. ... на канд. техн. наук. М., 2004.