

## Оптимизация режима ведения плавки стали в ДСП

Оптимизация режима ведения плавки стали в дуговой сталеплавильной печи по прибыли предприятия

С.А. Храпко

Проанализирована зависимость эффективности производства сталеплавильного цеха от технологических параметров процесса выплавки стали. Показано, что при различных вариантах технологии, а также в автоматизированных системах управления технологическими процессами выплавки стали и внепечной обработки в качестве целевой функции оптимизации должны использоваться не косвенные показатели работы цеха (производительность агрегата, себестоимость продукции), а конечная цель любого производства - прибыль предприятия.

**Ключевые слова:** технология электроплавки, вдувание кислорода, экзотермические реакции, выход годного, производительность дуговой печи, себестоимость, прибыль предприятия.

Для анализа зависимости прибыли от объема производства (или производительности печи) руководствуются следующими рассуждениями [1]. Затраты предприятия на производство продукции составляют:

$$Z = S \cdot G \quad (1)$$

где  $S$  - затраты на основные материалы и энергоносители на тонну готовой продукции дол. США/т;  $G$  - масса произведенного металла, т/год.

Выручка завода от продажи металла составляет:

$$Y = C \cdot G \quad (2)$$

где  $C$  - цена продукции, дол. США/т.

В результате получаем такую формулу для определения годовой прибыли предприятия:

$$\Pi = Y - Z - Z_* = (C - S)G - Z_* \quad (3)$$

где  $Z_*$  - условно-постоянные расходы (зарплата, налоги, плата за землю, ремонт оборудования - все, за что платит предприятие независимо от производства продукции), дол. США/год.

Из формулы следует, что при производительности менее  $Z_*/(C - S)$  производство становится убыточным. Повышение производительности всегда однозначно приводит к повышению прибыли. Указанную зависимость иллюстрирует графиком, изображенным на рис. 1 [1].

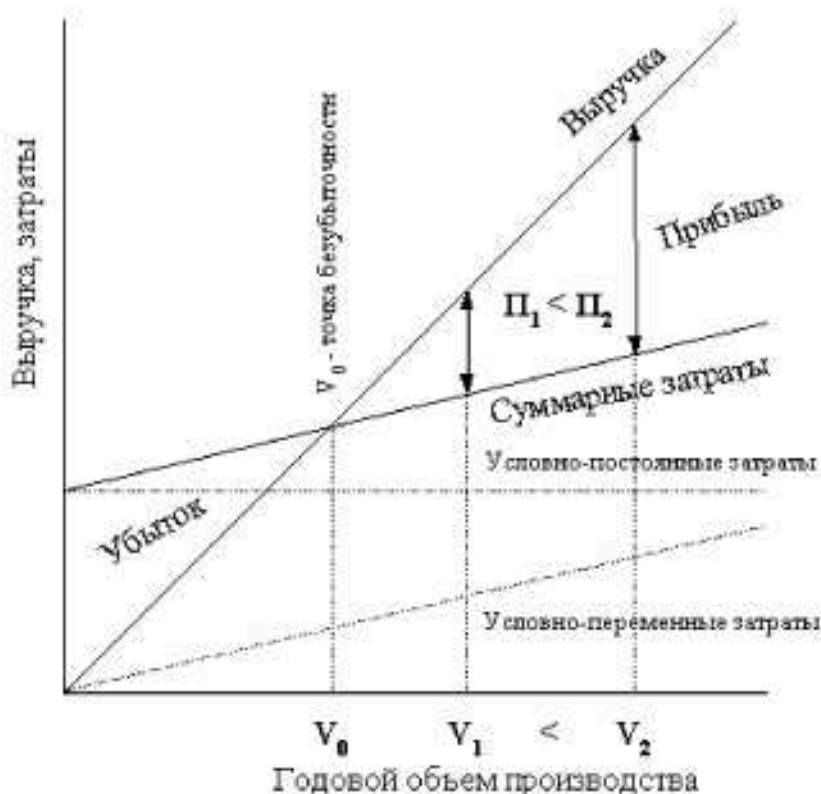


Рис. 1. Зависимость прибыли от объема производства и затрат

В этих рассуждениях имеется один недостаток: считается, что при повышении производительности печи все исходные данные (расходные коэффициенты) остаются неизменными. Такая ситуация соответствует «экстенсивному» пути повышения производительности (увеличение количества печей, их емкости и т.д.). Если же рассматривается способ повышения производительности печи путем изменения технологии плавки (в частности, интенсификации вдувания кислорода), то необходимо учитывать, что в этом случае уменьшается не только продолжительность плавки (за счет дополнительного тепла химических реакций), но и масса жидкого полупродукта на выпуске (за счет повышенного угара железа). При этом затраты на основные материалы и энергоносители на 1 плавку практически не изменяются, что эквивалентно росту всех расходных коэффициентов на 1 т жидкого металла. Таким образом, формула (1) уже не отражает зависимость затрат предприятия от массы произведенного металла и поэтому необходимо считать затраты фиксированными для каждой плавки. Другими словами, если в печь загрузили металлолом определенной стоимости, то последняя никак не зависит от результатов плавки - 10 или 50% металла перейдет в шлак.

В качестве примера рассмотрим два варианта технологии: базовый и сравнительный. Примем, что сравнительный вариант отличается от базового лишь меньшей массой выпущенного металла и продолжительностью плавки, все остальные показатели будем считать неизменными: условно-

постоянные расходы  $Z_r = 12$  млн дол. США/год (ориентировочная оценка; в дальнейшем показано, что эта величина не влияет на результаты сравнения); цена жидкого полупродукта (цена заготовки минус затраты на легирование, прокатку, разливку, транспортировку и т.д.)  $C = 105$  дол. США/т; продолжительность работы

печи за год  $T = 8000$  ч; затраты на основные материалы и энергоносители на одну плавку  $Z_0 = 10500$  дол. США (ориентировочный расчет приведен в табл. 1).

Таблица 1. Расходные коэффициенты (затраты на основные материалы и энергоносители) в базовом варианте при массе выпуска  $M = 125$  т

Наименования ресурса	Цена единицы ресурса, дол. США	Расход ресурса на 1 т стали	Стоимость ресурса на 1 т стали, дол. США	Стоимость ресурса на плавку, дол. США
Лом (т)	50	1,2	60	7500
Электроэнергия (кВт ч)	0,03	400	12	1500
Электроды (кг)	3	3	9	1125

Известь (кг)	0.05	50	2.5	312.5
Природный газ (м <sup>3</sup> )	0.05	10	0.5	62.5
ИТОГО		84		10500

Оценим снижение массы и продолжительности плавки при повышении интенсивности вдувания кислорода. Общий расход тепла на выплавку 1 т металла составляет ориентировочно 540 кВт ч/т или 1944 МДж/т. Для снижения продолжительности плавки на 1 мин (от 60 мин в базовом варианте до 59 мин в сравнительном варианте) необходимо ввести  $1944/60=32.4$  МДж/т тепла за счет окисления железа кислородом продувки. Реакция окисления железа газообразным кислородом имеет тепловой эффект не более 5.9 МДж/кг железа. Следовательно на каждую минуту сокращения продолжительности плавки дополнительный угар железа составит 5.5 кг/т, а при средней массе плавки 125 т снижение массы выпускаемого металла достигнет 0.686 т.

Проанализируем зависимость прибыли в единицу времени от интенсивности вдувания кислорода в дуговую сталеплавильную печь. Изменения показателей при повышении интенсивности продувки приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение показателей

Наименование показателя	Базовый вариант	Сравнительный вариант	Изменение
Длительность плавки $\tau$ , мин	60	59	-1
Масса выпуска $M$ , т	125	124.32	-0.68
Производительность печи $Q = M/\tau$ , т/ч	125	126.43	+1.43
Количество плавов за год $N = T/\tau$	8000	8135	+135
Удельные затраты на основные материалы и энергоносители $S = Z_0/M$ , дол. США/т	84	84.48	+0.48
Объем годового производства $G = QT$ , тыс. т	1000	1011.41	+11.41
Общие затраты за год $Z = Z_0 N$ , тыс. дол. США	84000	85424	+1 424
Выручка завода за год $Y = C \cdot G$ , тыс. дол. США	105000	106199	+1 199
Прибыль за год $\Pi = Y - Z - Z_\tau$ , тыс. дол. США	9000	8775	-225
Прибыль на одной плавке $\Pi/N$ , дол. США	1125.00	1078.60	-46.40
Прибыль в час $\Pi/T$ , дол. США/час	1125.00	1096.88	-28.12

Расчеты показывают, что сравнительный вариант является невыгодным (годовая прибыль снижается на 225 тыс. дол. США), несмотря на повышение производительности производства на 11.4 тыс. т. стали в год. Для упрощения анализа различных вариантов технологии желательно иметь аналитический вид зависимости прибыли от приведенных выше факторов.

Подстановка приведенных в таблице выражений в формулу (3) дает следующий вид зависимости прибыли за год от продолжительности плавки:

$$\Pi = T \frac{C \cdot M - Z_0}{\tau} - Z_\tau \quad (4)$$

Для анализа формулы (4) вычислим производную:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = \frac{T}{\tau^2} \left( C \frac{dM}{d\tau} \tau - (CM - Z_0) \right) = NC \left( \frac{dM}{d\tau} - Q \left( 1 - \frac{S}{C} \right) \right) \quad (5)$$

Снижение продолжительности плавки приводит к повышению прибыли ( $d\Pi/d\tau < 0$ ), если:

$$\frac{dM}{d\tau} < Q \left( 1 - \frac{S}{C} \right) \quad (6)$$

Интересно, что в формуле (6) фигурирует только два показателя: производительность и отношение затрат на материалы к цене полупродукта. Все остальные показатели ( $\tau$ ,  $M$ ,  $T$ ,  $Z_0$ ) не влияют на выгодность технологии. При приведенных выше базовых показателях выгодность интенсификации вдувания кислорода определяется выражением:

$$\frac{dM}{d\tau} < 25 \quad \text{т/час (0.43 т/мин)} \quad (7)$$

т.е. сокращение продолжительности плавки на 1 минуту должно приводить к снижению массы металла не более, чем на 0.43 т (или, другими словами, каждая тонна окислившегося металла должна давать сокращение продолжительности плавки не менее, чем на 2.5 мин). Если масса металла снижается больше, чем на 0.43 т (0.68 т в сравнительном), то выгоднее не увеличивать интенсивность вдувания кислорода, а наоборот, уменьшать. При этом снизится производительность, однако уменьшение стоимости основных материалов и энергоносителей на тонну металла будет преобладающим, что повысит прибыльность производства.

Приведенные расчеты вовсе не отрицают экономическую эффективность интенсификации вдувания кислорода в дуговую печь. Дело в том, что реакции окисления примесей металла (углерод, марганец, кремний) дают в 2...5 раз больше тепла (на килограмм примесей), чем реакция окисления железа. Окисление указанных примесей приводит к снижению массы металла на 0.14...0.34 т (на каждую минуту сокращения продолжительности плавки), что ниже критического значения 0.43 т. В результате прибыльность производства при повышении расхода кислорода растет, но только до тех пор, пока идет преимущественное окисление примесей, а не железа. При дальнейшем повышении расхода кислорода зависимость изменяется на противоположную. Другими словами, углерод, марганец и кремний как источники тепла выгодны, в то время как «оталкивать» печь железом – невыгодно. Поэтому речь идет лишь о том, что существует определенный предел, после которого практически весь вдуваемый кислород расходуется на сжигание железа и дальнейшее увеличение его расхода становится нецелесообразным (рис. 2). Определить этот экстремум позволяют автоматизированные системы управления технологическим процессом выплавки стали, построенные на строгих термодинамических моделях, например система АСУТП ОРАКУЛ [2-4].

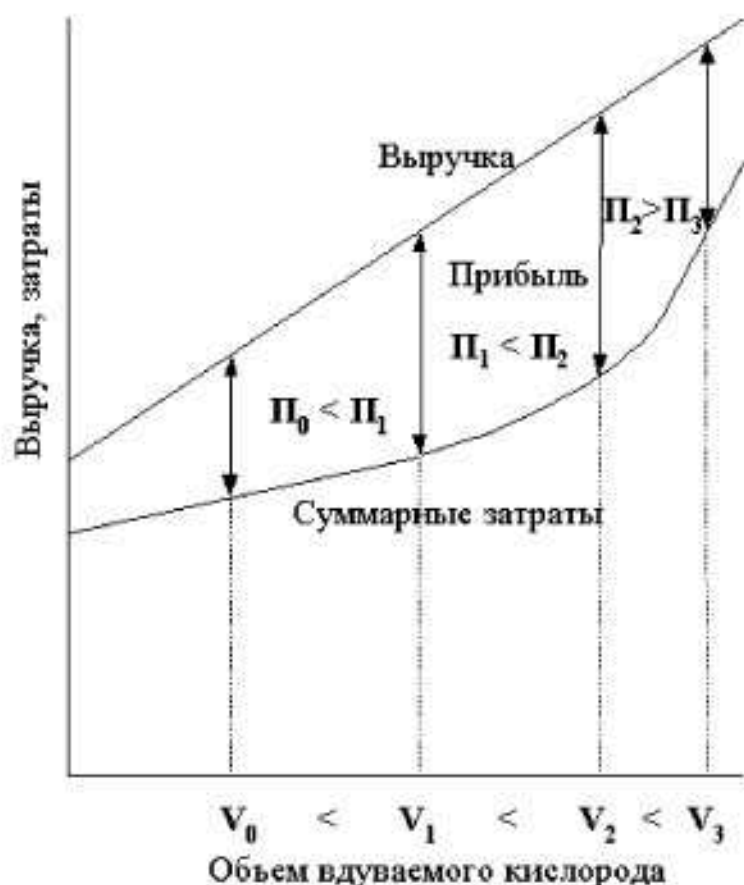


Рис. 2. Зависимость прибыли от интенсивности продувки.

Формула (6) позволяет сделать еще один вывод: экономическая целесообразность сжигания железа (и положение критической точки) определяется в основном отношением затрат на материалы к цене полупродукта. Например, если затраты на материалы и энергоносители составляют менее 67% цены жидкого полупродукта, то «отплавить» печь железом становится выгодным (работа на «дармовом» металлоломе).

В приведенном выше тексте рассмотрены лишь общие принципы («скелет») анализа экономической «состоятельности» технологических вариантов выплавки стали. В частности, в условии (6) рассмотрен лишь один из влияющих факторов, поэтому оно является упрощенным и весьма приблизительным. В системе АСУТП ОРАХУЛ учитываются не только основные, но и многие другие факторы, сопутствующие повышению интенсивности использования кислородной продувки (хотя и влияющие на экономическую эффективность технологии в меньшей степени): снижение расхода электроэнергии за счет дополнительного тепла химических реакций; повышение расхода электродов за счет более интенсивного окисления кислородом; стоимость кислорода; увеличение расхода раскислителей и угара легирующих при легировании на выпуске полупродукта в ковш.

Кроме того, при повышении интенсивности вдувания кислорода учитываются технические возможности устройств для ввода кислорода в металл, наличие резервов для интенсификации получения газообразного кислорода, облегчение технологии обработки на установке печь-ковш сталей с повышенным содержанием углерода и фосфора, ухудшение условий работы футеровки, газоочистки и т.д.

#### Выводы

1. Установлено, что повышение производительности (объема производства) не всегда приводит к увеличению прибыли. Последнее гарантировано только в том случае, если расходные коэффициенты основных материалов и энергоносителей на единицу продукции сохраняются неизменными (или изменяются незначительно).
2. Повышение производительности печи за счет изменения технологии выплавки полупродукта всегда вызывает изменение расходных коэффициентов, поэтому необходим более глубокий анализ выгодности тех или иных изменений технологии (повышается ли в результате прибыль предприятия, а не объем производства стали).

3. Все возможные варианты технологии выплавки стали «просчитываются» при помощи системы АСУТП ОРАКУЛ, которая позволяет выбрать оптимальный способ ведения каждой конкретной плавки с учетом сегодняшних экономических условий и указанных выше дополнительных факторов.

#### Библиографический список

1. Еланский Д.Г. Тенденции развития электросталеплавильного производства. Электromеталлургия, 2001, №5, с. 3-18.
2. Старосоцкий А.В., Керейник А.В., Щербина Т.В., Храпко С.А. Комплексная АСУТП выплавки стали // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». - Москва: МИСиС, 2002 г. - С. 464-465.
3. Храпко С.А., Старосоцкий А.В. Система автоматического управления раскислением и легированием стали // Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии». - Москва: МИСиС, 2002 г. - С. 468-470.
4. Старосоцкий А.В., Бабичев А.К., Деревянченко И.В., Храпко С.А., Синяков Р.В. Создание системы автоматического ведения плавки в ДСП как первый шаг развертывания интеллектуальных систем управления в сталеплавильном производстве // Труды шестого конгресса сталеплавателей. - Москва: ОАО «Черметинформация». - 2001. - С. 300-308.