

## **Заключение**

Представленная модель и результаты расчетов процессов инжекции порошкообразных материалов показывают, что рассмотренные подходы позволяют исследовать характер движения частиц вдуваемого материала и определить наиболее эффективные способы ввода материалов в расплав.

## **Литература**

1. **Launder, B.E.** The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder and D.B. Spalding // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974. – V. 3. – P. 269–289.
2. **Zhang, Z.** Prediction of fluid flow in gas stirred liquid Wood's metal / Z. Zhang, Y. Xie and F. Outers // *Memories et Etudes Scientifiques / Revue de Metallurgie*, 1991. – P. 145–158.
3. **Coulson, J.M.** Particle Technology and Separation Processes / J.M. Coulson and J.F. Richardson // *Chemical Engineering*. – UK: Butterworth-Heinemann, 2002. – Vol. 2. – 788 p.

УДК 621.74

**С.В. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук,  
**В.А. РОЗУМ**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СТАЛИ**

**Введение.** Известно, что себестоимость стали определяется затратами на сырье и на передел. При плавке легированной стали большая доля расходов связана со стоимостью шихты. Очевидно, что чем выше степень легированности шихты и чем дороже ферросплавы и металлы, которыми легируется сталь, тем большая доля расходов относится к шихтовым материалам. Например, шарикоподшипниковая сталь менее легирована, чем нержавеющая или жаропрочная хромоникелевая. Кроме того, шарикоподшипниковая сталь легируется углеродистым феррохромом, а многие марки легируются ферросилицием и другими относительно дешевыми ферро-

сплавами. Нержавеющая сталь и жаропрочная хромоникелевая сталь аустенитного класса легируется дорогостоящими присадками: безуглеродистым феррохромом и никелем. По этим причинам стоимость металлошихты при плавке жаропрочных хромоникелевых сталей значительно выше, чем для многих других марок стали.

Выплавка легированных сталей с содержанием в них ценных легирующих элементов, соответствующих нижнему марочному пределу, позволяет уменьшить расход ферросплавов. Однако это возможно только при обеспечении требуемого качества стали. При плавке нержавеющей и жаропрочных сталей аустенитного класса желательно стремиться к содержанию никеля в соответствии с верхним пределом, так как это повышает пластичность и жаростойкость стали, а, следовательно, и ее эксплуатационные характеристики.

Таким образом, для высоколегированных сталей с содержанием дорогостоящих компонентов расходы по переделу к себестоимости стали составляют незначительную величину, а затраты на шихтовые материалы, наоборот, составляют 80–95 %, что и предопределяет в конечном счете себестоимость продукции. При производстве недорогих (нелегированных и низколегированных) марок стали затраты на их передел составляют более 40 % себестоимости.

Таким образом, для высоколегированных сталей дополнительные способы обработки, позволяющие обеспечить необходимый уровень технологических и эксплуатационных свойств при меньшем содержании легирующих элементов, должны быть экономически целесообразными.

Целью настоящей работы является анализ экономической эффективности проведения рафинирующей и модифицирующей обработки хромоникелевых сталей аустенитного класса.

**Оценка экономической эффективности применения модификаторов.** Экономическую эффективность применения модификаторов можно оценить, используя данные по суммарным затратам на производство отливок из стали с применением и без применения модифицирующей обработки. При этом сравнивали варианты выплавки сталей с аналогичными свойствами.

На основании исследований влияния модифицирования на свойства и структуру жаропрочных хромо-никелевых сталей аустенитного класса было установлено:

- после модифицирующей обработки жаропрочных сталей РЗМ-содержащими присадками и барий-стронциевыми карбонатами повышаются механические и улучшаются литейные свойства, изменяется структура металла;

- изменение структуры металла, связанное с измельчением карбидных включений и равномерным распределением их по объему, и уменьшение размера зерна в комплексе с улучшением литейных и прочностных свойств повышает жаропрочность сталей;

- применение для модифицирования барий-стронциевых карбонатов, за счет одновременного рафинирующего и модифицирующего воздействия, позволяет получить более высокие прочностные и эксплуатационные свойства жаропрочных сплавов;

- модифицирующая обработка барий-стронциевыми карбонатами жаропрочных сталей, содержащих Ni 17 %, Cr 23 %, повышает трещиностойкость до уровня трещиностойкости сталей с содержанием Ni 24 %, Cr 18 %.

Таким образом, как показали предварительные исследования, модифицирующая обработка стали 45X23N17C2Л позволяет получить свойства, дающие возможность заменить ею марку стали 35X18N24C2Л для изготовления печных поддонов и других изделий. При этом уменьшается содержание самого дорогостоящего в шихте для данной стали никеля, что позволяет достичь необходимых свойств стали менее затратным способом.

В таблице 1 представлен расчетный химический состав рассматриваемых сталей.

Таблица 1 – Химический состав рассматриваемых сталей

Сталь	Содержание элементов, масс %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
45X23N17C2Л	0,45	2,0	2,0	23	17	0,02	0,03
35X18N24C2Л	0,3	2,0	2,0	18	24	0,02	0,03

Феррохром (ГОСТ 4757-91) можно присаживать как в предварительно раскисленный металл, так и в нераскисленный. При выплавке стали методом переплава основное количество феррохрома необходимо давать в завалку. Корректировку по хрому следует проводить не позднее, чем за 15 мин до выпуска плавки. Усвоение

хрома составляет 95 %. Никель необходимо вводить в завалку (коэффициент усвоения равен 1). Алюминий (ГОСТ 295-79) применяется для окончательного раскисления стали в ковше, для рассматриваемых условий следует применять в виде кольца, надетого и закрепленного деревянными клиньями на стопоре. Угар марганца составляет 3–5 %.

Расчет необходимого количества ферросплавов (кг) производится по формуле:

$$K = P \cdot \Delta \cdot 100 / (C_s \cdot Y_s),$$

где  $P$  – масса жидкого металла, кг;  $\Delta$  – разность между требуемой концентрацией легирующего элемента и имеющейся в металле, %;  $C_s$  – концентрация легирующего элемента в ферросплаве, %;  $Y_s$  – усвоение легирующего элемента, %.

В таблицах 2, 3 представлены шихтовые материалы для выплавки стали 35X18H24C2Л и 45X23H17C2Л.

Таблица 2 – Шихтовые материалы для выплавки стали 35X18H24C2Л

Материал	Содержание, %
Лом стальной легированный (g16, g17, g18) и лом углеродистый	38
Возврат собственного производства (35X18H24C2Л)	30
Феррохром ФХ001А	14
Никель НП1	16
Ферросилиций ФС75	1
Ферромарганец ФМн70	1

Таблица 3 – Шихтовые материалы для выплавки стали 45X23H17C2Л

Материал	Содержание, %
1	2
Лом стальной легированный (g16, g17, g18) и лом углеродистый	38

1	2
Возврат собственного производства (45X23H17C2Л)	30
Феррохром ФХ001А	19
Никель НП1	11
Ферросилиций ФС75	1
Ферромарганец ФМн70	1

В обоих случаях добавляют раскислитель в виде алюминия (в количестве 0,1 % от массы металла) и раскислитель комплексный смесевой (в количестве 0,35–0,5 %).

Наиболее близким по составу к рассматриваемым маркам является лом g17, однако его количество ограничивается 30 % от массы завалки, так как содержание вольфрама составляет 2–2,8 %, а содержание ниобия – 0,9–1,3 %. В связи с этим в шихтовке используются различные виды легированного лома и небольшое количество углеродистого. Среднее содержание Cr и Ni в ломе составляет, соответственно, 12 и 4 %.

Разница в стоимости шихтовых материалов для двух вариантов составит

$$\mathcal{E} = (M_{Cr1}P_{Cr1} + M_{Ni1}P_{Ni1}) - (M_{Cr2}P_{Cr2} + M_{Ni2}P_{Ni2}),$$

где  $M_{Cr1}, M_{Cr2}$  – масса сплава, содержащего хром по первому и второму варианту, соответственно;  $P_{Cr1}, P_{Cr2}$  – стоимость хромсодержащего сплава по первому и второму варианту;  $M_{Ni1}, M_{Ni2}$  – масса добавляемого никеля;  $P_{Ni}$  – стоимость никеля.

Стоимость феррохрома ФХ001 принимаем равной 4 171 долл. США/т, никеля – 27 040 долл. США/т (по данным за 2008 г.), и 5 300 долл. США/т и 17 300 долл. США/т соответственно по данным на 2012 г.

С учетом того, что стоимость материалов, кроме феррохрома и никеля, для обоих вариантов практически одинакова, экономия составит:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 &= (0,14 \cdot 4171 + 0,16 \cdot 27040) - (0,19 \cdot 4171 + 0,11 \cdot 27040) = \\ &= 1143 \text{ долл. США/т металлошихты (в ценах 2008 г.)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= (0,14 \cdot 5300 + 0,16 \cdot 17300) - (0,19 \cdot 5300 + 0,11 \cdot 17300) = \\ &= 600 \text{ долл. США/т металлошихты (в ценах 2012 г)}. \end{aligned}$$

Таким образом, уменьшение количества дорогостоящего никеля позволяет экономить значительные финансовые средства при обеспечении высоких технологических и эксплуатационных характеристик жаропрочной стали.

**Оценка экономической эффективности различных способов ввода модификаторов.** Стоимость модифицирующей обработки для высоколегированных марок стали составляет в общей себестоимости незначительную величину, однако для повышения эффективности производства необходимо стремиться к выбору наиболее оптимального способа ввода модификатора в расплав. В этой связи рассмотрим такие варианты ввода модификаторов, как ввод при помощи порошковой проволоки и инъекции порошка в расплав металла в струе газа-носителя.

Обработка расплава при помощи порошковой проволоки требует небольших капитальных затрат, однако стоимость самой проволоки в сравнении с порошкообразными материалами достаточно высока. С другой стороны, обработка порошкообразными материалами путем их вдвухания в расплав требует более значительных вложений в оборудование.

Основным фактором при выборе оборудования являются общие расходы, то есть сумма постоянных и переменных затрат, относимых к 1 т обработанной стали.

Рассмотрим три варианта обработки расплава активным элементом, в качестве которого примем кальций в количестве 0,6 кг/т стали по аналогии с методикой, представленной в работе [1].

**Вариант 1.** Кальций подается при помощи проволоки с содержанием 48 % Ca, стоимость 16 долл. США/кг. Стоимость проволоки для обработки 1 т стали составит  $0,6 \cdot 16 / 0,48 = 20$  долл. США. При использовании проволоки из CaSi стоимостью 5,6 дол. США/кг, содержащей 30 % Ca, ее стоимость при обработке 1 т стали составит  $0,6 \cdot 5,6 / 0,3 = 11,2$  дол. США.

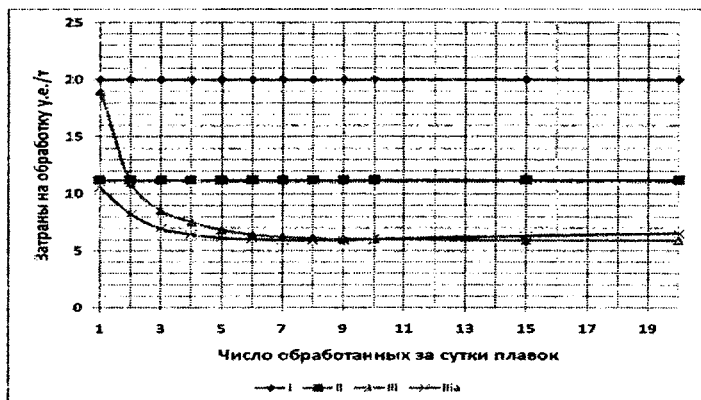
Следует также отметить, что порошковую проволоку с кальцием или силикокальцием выпускает ряд фирм, например, ОАО «Ванадий-Тулачермет», ЗАО «Юпитер Лтд» (Кострома), ЗАО «Ногинский завод порошковых материалов», ЗАО «Тенакс Инжиниринг», ОАО «Чепецкий механический завод», ОАО «Камаз-металлургия», ЗАО «НПП УралМеталлИнвест», ЗАО «Ферросплав» и др.

**Вариант 2.** Обработку стали осуществляют при помощи фурмы путем вдувания порошка CaSi. Для перемещения пневмонагнетателя и фурмы используют мостовой кран, степень автоматизации подачи минимальна. Стоимость порошка, содержащего 30 % Ca, – 2,2 долл. США/кг. Общие заводские расходы составляют 100 тыс. долл. США, при этом стоимость фурмы – 1,2 долл. США/т, порошка CaSi  $0,6 \cdot 2,2 / 0,3 = 4,4$  долл. США/т и аргона 0,32 долл. США/т. Таким образом, переменные расходы, исключая зарплату, составят 5,92 долл. США/т стали.

**Вариант 3.** Обработку стали проводят при помощи стационарного оборудования вдуванием порошка кальция при достаточной степени автоматизации. Капитальные затраты при этом составляют 0,4 млн. долл. США, а переменные затраты аналогичны варианту 2.

Стоимость обработки при вдувании является функцией количества обработанных за сутки плавок.

На рисунке 1 приведена графическая зависимость стоимости обработки стали от числа плавок в сутки при использовании различных вариантов обработки.



I – вариант 1 (кальциевая проволока), II – вариант 1 (силикокальциевая проволока), III – вариант 3 (вдувание порошка силикокальция с высокими капитальными вложениями в оборудование), IIIa – вариант 2 (вдувание порошка с невысокими капитальными вложениями)

Рисунок 1 – Зависимость затрат на модифицирующую обработку расплава от числа плавок, обработанных за сутки

Из анализа рассмотренных вариантов следует, что вдувание порошкособразных материалов предпочтительнее при количестве об-

рабатываемых за сутки плавов, превышающих 5. При низкой степени автоматизации затраты на обработку расплава могут несколько возрастать при увеличении количества обработанных плавов за счет повышения расходов на оплату труда.

**Рекомендации по модифицированию стали.** Анализ технологического модифицирования показал, что максимальная эффективность достигается при вводе присадок методами, позволяющими равномерно распределить их по объему металла и обеспечить минимальный угар в атмосфере воздуха.

Модифицирующая обработка карбонатами щелочно-земельных металлов, направленная в основном на уменьшение количества, формы и размера неметаллических включений, может проводиться в ковше «сэндвич-процессом» или с использованием проволоки через трайб-аппарат.

Для изменения формы дендритов аустенита целесообразно проводить обработку наночастицами. Наиболее высокая эффективность при обработке наночастицами достигается по технологии с использованием композиции, включающей несущую металлическую фракцию 400–500 мкм. Обработку расплавов композициями, содержащими металлическую фракцию с наночастицами, можно проводить различными методами, включая «сэндвич-процесс», вдувание в струю металла и использование трайб-аппаратов.

Ниже приведены рекомендации по повышению эффективности процесса получения отливок из жаропрочных хромоникелевых сталей аустенитного класса.

1. При рациональном подборе шихты и ее подготовке следует также учитывать и экономические аспекты, используя возврат собственного производства и легированный лом, образующийся на территории Республики Беларусь. Наиболее целесообразно использовать лом, содержащий от 13 до 20 % хрома (группы лома по СТБ 2026-2010: g16–g20). Общий объем данных отходов, образующихся в Республике Беларусь, составляет около 20–30 т в год. При расчете шихты содержание легированного лома целесообразно принимать в пределах 20–30 %. При превышении этих пределов возможно увеличение присутствующих в нем присадок бора, вольфрама, кремния, которые могут отрицательно влиять на формирование структуры стали, повышая склонность к росту карбидных включений по границам зерен.



Возврат собственного производства при литье отливок из жаропрочных сталей составляет около 30 %, который полностью используется при шихтовке. Особое внимание необходимо уделить выбору феррохрома. Жаростойкость хромоникелевых сталей сильно зависит от содержания в ней углерода, при этом наиболее оптимальной концентрацией углерода с эксплуатационной и технологической точки зрения считается 0,1–0,3 %. При снижении концентрации углерода менее 0,1 % резко уменьшается жидкотекучесть и повышается склонность к образованию литейных дефектов. Повышение концентрации углерода более 0,3 % увеличивает рост карбидных включений. Поэтому необходимо использовать низкоуглеродистый феррохром марки ФХ001А (ГОСТ 4757-91).

Для подшихтовки и частичного «глубинного» раскисления стали необходимо применять среднеуглеродистый ферромарганец ФМн70, 78 по ГОСТ 4755-91.

Доводку состава стали по содержанию никеля следует проводить чистым никелем НП1. Частично допускается использовать и другие никельсодержащие отходы (нихром и др.), делая поправку при этом на содержание углерода.

2. Формирование структуры и свойств стали начинается в жидком состоянии, что определяется условиями плавки, а именно, футеровкой печи, режимом расплавления и термовременной обработкой жидкого металла.

Наиболее приемлемыми для выплавки жаропрочных хромоникелевых сталей является нейтральная футеровка в виде сухого набивного огнеупора на основе спеченного глинозема. Состав футеровки следующий:  $Al_2O_3$  – 83 %;  $MgO$  – 12 %;  $TiO_2$  – 1,6 %;  $SiO_2$  – 1,2 %;  $CaO$  – 0,4 %;  $Fe_2O_3$  – 0,2 %. Такая футеровка позволяет вести плавки в пределах температур 1510–1680 °С, обеспечивая достаточно высокий перегрев металла над температурой ликвидуса и предотвращая сильное окисление хрома, а также значительно меньшее насыщение расплава кислородом.

Загрузку шихты в печь необходимо проводить в следующей последовательности:

- на дно печи загружается стальной лом и возврат;
- затем загружают феррохром;
- далее загружают никель.

Такая последовательность загрузки обеспечивает более быстрое расплавление феррохрома, который начинает растворяться в уже расплавленной стали.

Ферромарганец и ферросилиций вводятся в печь после определения химического состава.

Температура перегрева жаропрочной стали 20Х25Н19С2Л должна составлять 1630–1650 °С, время выдержки – 20–30 минут. Такие значения обеспечивают для данной марки стали полную гомогенизацию расплава и получение равновесной структуры. При более низкой температуре для получения равновесной структуры необходим длительный период выдержки, который приведет к пересыщению расплава водородом.

3. Глубинное предварительное раскисление хромо-никелевых сталей при выплавке в индукционных печах необходимо проводить алюминием, погружая его при помощи штанги. Расход алюминия должен обеспечивать в расплаве его остаточную концентрацию в пределах 0,025–0,03 %. После раскисления проводится модифицирующая обработка порошкообразным препаратом на основе ниобия и утяжеляющей фракции. Этот материал в виде дисперсного порошка вводится в металлическом контейнере, его расход составляет 0,05–0,1 % от массы расплава.

Обработка расплава в печи мелкодисперсной присадкой и небольшая выдержка расплава с последующим перемешиванием в ковше при сливе обеспечивает получение гомогенной структуры и равномерное распределение частиц по объему. Эта операция обеспечивает формирование сотовой структуры аустенита при кристаллизации и уменьшение размеров зерна.

4. Окончательное раскисление и рафинирование металла производится при его сливе в ковш комплексной присадкой алюминия с барий-стронциевыми карбонатами. Расход алюминия составляет 0,1 %, карбонатов – 0,35–0,55 %.

Окончательная обработка позволяет улучшить технологические свойства стали, жидкотекучесть, уменьшить газосодержание. Температура слива металла из печи должна составлять ориентировочно 1610–1630 °С.

## **Заключение**

Результаты выполненной работы показали, что модифицирующая обработка жаропрочных хромоникелевых сталей аустенитного класса, а также ряда других марок стали, позволяет повысить как технологические, так и эксплуатационные свойства. При этом проведение такой обработки экономически обосновано и дает значительный эффект при ее применении. По результатам исследований выданы рекомендации по проведению модифицирующей обработки, позволяющие повысить ее эффективность.

## **Литература**

**1. Бергман, К.** Выбор инжекционного оборудования, отвечающего требованиям отдельных сталеплавильных заводов / К. Бергман // Инжекционная металлургия 83: сб. трудов конференции. – М.: Металлургия, 1986. – 391 с.

*УДК 621.791.927*

**К.Е. БЕЛЯВИН**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**А.В. СОСНОВСКИЙ**, канд. техн. наук (ОИМ НАН Беларуси)

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ОПЛАВЛЕНИИ**

**Введение.** Для предпосевной обработки почвы используют роторные почвообрабатывающие машины (РПМ), задачей которых является измельчение крупных почвенных пластов. Работа РПМ происходит следующим образом (рисунок 1). Лемех 1 отделяет от массива пласт почвы на глубину, которая задается положением опорно-прикатывающего катка 4, и частично разрушает его. Одновременно активный ротор 2, шарнирно установленный над лемехом 1, пружинными зубьями 5 измельчает почву, перемешивает ее с растительными остатками и направляет на деку с амортизатором 3, отражаясь от которой, почва дополнительно измельчается и укладывается на дно борозды, а расположенный позади деки опорно-