

**ПОТАПОВ АНДРЕЙ ИВАНОВИЧ**

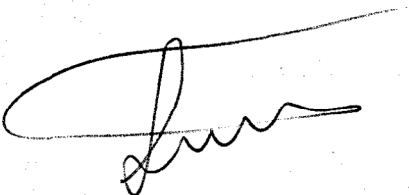
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ БОРОМ С ЦЕЛЬЮ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БОРСОДЕРЖАЩЕЙ  
СТАЛИ**

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2013

Работа выполнена на кафедре «Металлургии стали и ферросплавов» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

**Научный руководитель:**

профессор каф. МСиФ НИТУ «МИСиС»,  
доктор технических наук

**Семин Александр Евгеньевич**

**Официальные оппоненты:**

Профессор «МГВМИ»,  
доктор технических наук

**Смирнов Николай Александрович**

Главный металлург

представительство ООО «Ауроhill Миддл ИСТ ФЗЕ»  
компании AUROHILL Group,  
кандидат технических наук

**Бобылев Михаил Викторович**

**Ведущая организация:**

Учреждение Российской академии наук  
Институт металлургии и  
материаловедения им. А.А. Байкова РАН

Защита диссертации состоится «25» апреля 2013 года в 10<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу:

119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6, корп. 1, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» - <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г.Москва, Ленинский проспект, д.4, Ученый Совет. Копии отзывов можно прислать на e-mail: [potapov525@rambler.ru](mailto:potapov525@rambler.ru).

Автореферат разослан « 22 » марта 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.132.02,  
кандидат технических наук, доцент



**А.В. Колтыгин**

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

На современном этапе развития производства при повсеместном истощении природных ресурсов и ухудшении экологической обстановки наиболее остро встают вопросы разработки ресурсосберегающих технологий получения металлопродукции при одновременном повышении ее качества. В решении этой проблемы ведущая роль принадлежит микролегированным, в том числе борсодержащим, сталям. Хорошо известно положительное влияние микролегирования бором на прокаливаемость и закаливаемость конструкционных сталей. Способность интенсивно измельчать структуру при ускоренном охлаждении делает бор обязательным компонентом многих высокопрочных низколегированных сталей, разработка которых является одним из важнейших направлений в металлургии. Микродобавки бора позволяют экономить такие остродефицитные легирующие элементы как никель, хром и марганец не снижая качества стали. Несмотря на технологические преимущества борсодержащих сталей, их внедрение в массовое производство сопряжено с определенными трудностями, к числу которых относятся сложности металлургического характера (необходимость получения строго нормированных концентраций бора в процессе выплавки стали, поддержание на заданном уровне содержания азота, титана и алюминия) и ограничения научно-обоснованных рекомендаций по выбору режима легирования стали бором в зависимости от технологических особенностей производства. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал, характеризующий поведение бора в сталях и особенности их (сталей) применения. Тем не менее, такие важные аспекты, как влияние технологии металлургического производства и параметров термической обработки борсодержащих сталей на прокаливаемость, не нашли однозначного толкования. Механизм влияния бора на прокаливаемость, термодинамические условия образования сегрегаций бора и присутствие его в растворе в несвязанном состоянии раскрыты не полностью, и требуют дальнейшего изучения.

## **Задачи исследования**

1. Исследование процесса взаимодействия бора с компонентами металлического расплава с целью определения приоритетных соединений бора в стали и установление предельных концентраций элементов, влияющих на долю «эффективного» бора.

2. Разработка математической модели, позволяющей прогнозировать долю «эффективного» бора в металле в зависимости от состава стали.

3. Анализ промышленных плавок борсодержащих марок стали с целью определения основных факторов, влияющих на долю «эффективного» бора и механические свойства стали.

4. Разработка рекомендаций по совершенствованию технологии выплавки борсодержащих марок стали.

## **Научная новизна**

1. На основании результатов исследования взаимодействия бора с компонентами расплава показано, что приоритетными соединениями являются нитриды, сульфиды и оксиды. Они оказывают основное влияние на величину «эффективного» бора в металле, причем роль азота является определяющей для всего класса сталей (20Г2Р, 18ХГР, 35ГР и т.д.). Установлена зависимость между содержанием титана, алюминия и азота, обеспечивающая получение необходимой концентрации несвязанного в нитриды бора.

2. Предложена математическая модель, позволяющая оценить долю «эффективного» бора в расплаве в зависимости от содержания легирующих и наиболее активных по отношению к нему элементов, что требует управления режимами десульфурации, раскисления и деазотации, для получения заданного содержания «эффективного» бора.

3. Установлено влияние технологических факторов на усвоение бора - получение его заданного содержания в несвязанном виде: последовательность и количество вводимых в металл алюминия, кальция, титана и время выдержки ванны после введения указанных элементов в сталь.

## **Практическая значимость**

1. Результаты работы использованы при регламентировании состава в части оптимизации расхода легирующих материалов, борсодержащих сталей и включены в нормативно - техническую документацию по выплавке металла.

2. Обосновано использование порошковой проволоки с наполнителем - ферробор взамен кусковых материалов. С учетом выполненного исследования выданы рекомендации по использованию порошковой проволоки для производства борсодержащих марок стали.

3. Результаты работы использовались при оптимизации технологии производства в условиях ОАО «ОЭМК» стали типа 20Г2Р.

4. Предложена и опробована в условиях предприятия (ОАО «ОЭМК») математическая модель для прогнозирования содержания «эффективного» бора и расчета необходимого количества присаживаемого ферробора, исходя из химического состава стали.

## **Апробация работы**

Материалы диссертации доложены на двенадцатом Конгрессе сталеплавильщиков (Выкса, 2012 г.), а также технических совещаниях в ОАО «ОЭМК» (г. Старый Оскол, 2009 – 2010 гг.)

## **Публикации**

По материалам диссертационной работы опубликованы 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

## **Структура и объем**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и приложения, изложена на 116 страницах машинописного текста и содержит 42 рисунка, 47 формул и 19 таблиц. Список литературы включает 101 источник.

## **Достоверность научных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методик исследования (HSC Chemistry<sup>®</sup> 6.0 и других компьютерных программ) и аттестованных измерительных установок и приборов. Текст диссертации и автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации. Изложены цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** проанализированы требования к современной легированной бором стали, технологические особенности и приемы, позволяющие обеспечивать требуемые свойства стали. Представлено сравнение механических свойств стали, легированной бором, марганцем, хромом и никелем.

Стремление к повышению качества высокопрочных сложнопрофильных деталей автомобиля без дополнительных затрат на их производство выдвигает в число первоочередных задач расширение выпускаемого сортамента и применение экономнолегированных сталей, в том числе за счет микролегирования металла бором. Особенности борсодержащей стали являются их высокая технологическая пластичность, благоприятное соотношение прочностных и пластических свойств в отожженном и термоупрочнённом состояниях. Высокий уровень характеристик прокаливаемости при значительно меньшем, чем в легированных сталях, содержании легирующих элементов (рис. 1), о чем свидетельствуют работы Е.М. Гринберга, Н.П. Лякишева, М.В. Бобылева, и при меньшем, чем в среднеуглеродистых сталях, уровне закаливаемости, позволяет применять стали легированные бором при производстве деталей, в том числе крепежа, для современных автомобилей. Применение этого класса сталей позволяет снижать расход легирующих элементов при сохранении требуемых прочностных характеристик металла.

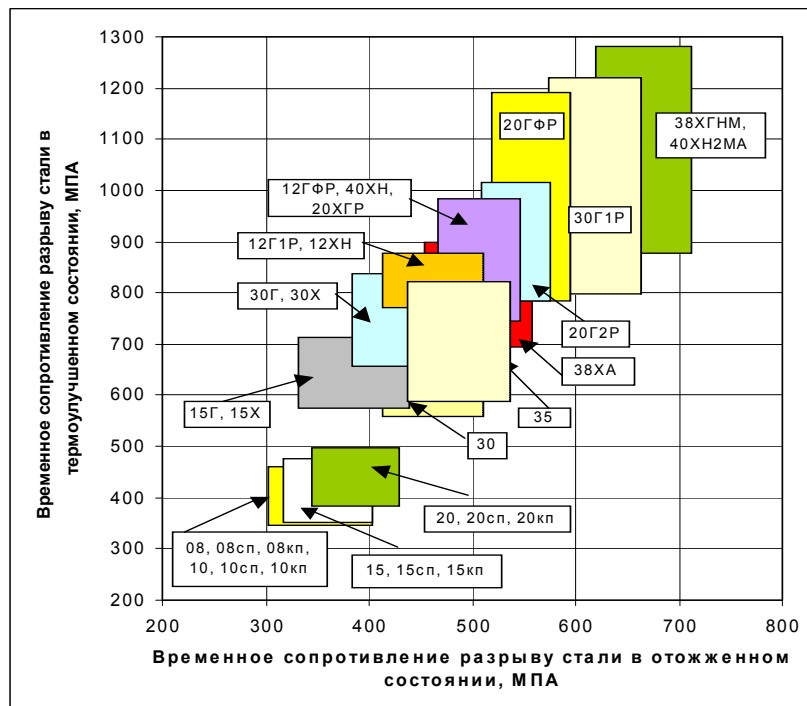


Рисунок – 1 Соотношение прочностных характеристик различных марок стали для холодной объемной штамповки

В отечественной практике разработаны и нашли широкое применение бор-содержащие марки стали следующих систем легирования: С-Mn-B, С-Mn-Cr-B, С-Mn-Cr-Ni-B. Однако, несмотря на видимые преимущества борсодержащей стали, её внедрение в массовое производство сдерживается рядом в основном чисто технологических трудностей, к числу которых следует отнести - необходимость подготовки расплава перед введением бора по таким примесям как кислород и азот с целью максимального сокращения возможности связывания бора с этими элементами. Это обусловлено тем, что только «свободный» бор оказывает влияние на прокаливаемость. При этом в случае борсодержащих марок стали традиционные термины, такие как «общее содержание легирующих элементов в стали», отступают на второй план, уступая место таким терминам, как «форма присутствия элементов в стали»; пренебрежение которыми приводит к возникновению нестабильности свойств. Этим, как правило, объясняется достаточно низкая доля потребления борсодержащей стали отечественными заводами, производителями нормалей (не более 45 %), в то время как на европейских и американских заводах доля потребления этой стали значительно выше.

Несмотря на длительный, начиная с 1970 г., период исследования и производства борсодержащей стали за рубежом, в литературе ограничены сведения о влиянии на закаливаемость и прокаливаемость борсодержащих марок стали, технологических особенностей их производства: типа процесса выплавки стали (кислый, основной), характеристик используемых шихтовых материалов, агрегата (конвертер, электродуговая печь). Практически отсутствуют данные о влиянии продолжительности отдельных периодов плавки, последовательности введения легирующих и раскислителей, температурного режима плавки, условий разливки и скорости кристаллизации.

Показано, что по всем рассмотренным аспектам о влиянии микролегирования бором и параметров термической обработки на закономерности структурообразования и свойства низколегированных конструкционных борсодержащих марок стали, сохраняются не однозначные мнения, как при экспериментальных исследованиях, так и в объяснении физической природы высокой эффективности этого элемента.

**Во второй главе** рассмотрено образование приоритетных соединений бора, разработана методика и приведены данные по лабораторным плавкам борсодержащей стали, представлена математическая модель взаимодействия бора с металлическим расплавом, позволяющая прогнозировать содержание «эффективного» бора в стали.

Как известно, на прокаливаемость стали влияет «свободный» или «эффективный» бор, т.е. бор, не связанный в различные соединения. Соединения бора образуются преимущественно в процессе кристаллизации стали, поэтому требуются определенные воздействия на расплав, чтобы обеспечить его состав по кислороду, сере и азоту за счет рафинирования либо микролегирования, позволяющие достичь определенного уровня (конкретную долю) «эффективного» бора в металле после кристаллизации. Как правило, долю «эффективного» бора определяли по разности между данными анализов общего бора (методом раз-



ложения концентрированной фосфорной кислотой) и нерастворимого бора (методом растворения в йод-метаноле).

В данной же работе «эффективный» бор оценивали на основе анализа термодинамического равновесия системы Fe – Al – Ti – B – N. Для расчета содержания «эффективного» бора, то есть растворенного в стали, необходимо оценить количество бора, связанного в соединения. Наибольшее сродство бор имеет к кислороду, углероду и азоту. Выполненный термодинамический анализ показал, что по используемой технологической схеме, когда окончательное раскисление осуществляется алюминием, достигаемые значения по остаточному кислороду и сере весьма низкие (менее 10 – 20 ppm и 50 ppm соответственно), и эти элементы не оказывают определяющего влияния на долю «эффективного» бора. На основании чего было принято считать, что основным элементом, оказывающим ключевое влияние на величину «эффективного» бора, является азот. Соответственно, предложенная математическая модель должна позволить определять долю «эффективного» бора исходя из азота и нитридообразующих элементов в стали (титана и алюминия).

Следовательно, встает задача оценить распределение азота между нитридообразующими элементами расплава присутствие которых возможно в металле, а именно бор, титан и алюминий.

Реакция образования нитридов указанных элементов в аустените в общем виде имеет вид:

$$[R]_{\gamma-Fe} + [N]_{\gamma-Fe} = RN_{ms} \quad (1)$$

Для низколегированных марок стали равновесные условия образования нитридов в аустените можно определить, используя константы равновесия реакции образования данного соединения либо эмпирически установленные уравнения, описывающие произведения их растворимости.

$$\lg[\%B] \cdot [\%N] = -\frac{5700}{T} + 5,24 \quad (2)$$

$$\lg[\%Ti] \cdot [\%N] = -\frac{10475}{T} + 5,33 \quad (3)$$

$$\lg[\%Al] \cdot [\%N] = -\frac{7300}{T} + 1,5 \quad (4)$$

Чтобы рассчитать содержание «эффективного» бора, т.е. растворенного в стали, необходимо предварительно оценить количество бора, связанного в соединения. Возникла необходимость расчета количества связавшегося в нитриды азота в присутствии нескольких нитридообразующих элементов (бор, титан и алюминий). При решении этой задачи в качестве основы был принят подход из ранее опубликованных работ, использованный авторами для жидкой стали. Развитие методики предлагалось с целью оценки процессов нитридообразования в твердом металле в аустените.

Для формализации задачи были приняты следующие ограничения и допущения:

- расчет проводится с учетом существования двух фаз: металлического раствора и твердой нитридной фазы;
- каждый нитрид выделяется в самостоятельную фазу, активность нитрида в этой фазе равна единице.

Для решения задачи по расчету взаимодействия отдельных микролегирующих элементов с азотом уравнения равновесия необходимо дополнить уравнением баланса масс, расписанным в соответствии со стехиометрией образующихся нитридов, отражающем факт снижения концентрации азота в растворе с расходом микролегирующих на образование соответствующих нитридов.

$$\left\{ \begin{array}{l} ([M]_0 - [M]) = ([B]_0 - [B]) \cdot 14/A_B + ([Ti]_0 - [Ti]) \cdot 14/A_{Ti} + ([Al]_0 - [Al]) \cdot 14/A_{Al} \\ \lg [\%B] \cdot [\%N] = -\frac{5700}{T} + 5,24 \\ \lg [\%Ti] \cdot [\%N] = -\frac{10475}{T} + 5,33 \\ \lg [\%Al] \cdot [\%N] = -\frac{7300}{T} + 1,5 \end{array} \right. \quad (5)$$

Исходными данными для расчета приняты начальные концентрации азота, бора, титана и алюминия, а также шаг изменения концентрации ведущего элемента (задается пользователем) и температуры.

Расчет начинается с определения констант равновесия всех реакций образования нитридов. Далее производится расчет равновесной концентрации азота

для каждого из нитридообразующих элементов. После сравнения полученных равновесных  $[N]_{min}$  концентраций азота с начальной фактической концентрацией азота в металле и выполнения условия  $[N]_{min} < [N]_{факт}$ , производится новый цикл расчетов.

Одним из допущений предлагаемой модели является введение понятия «ведущий» элемент. Под «ведущим» понимается нитридообразующий элемент, который на данном этапе расчета обладает наибольшим химическим сродством к азоту и образует соответствующий нитрид.

Далее программа производит поиск минимального  $[N]_{min}$  соответствующего микролегирующему элементу с номером  $i$  требующий для образования нитрида минимальной равновесной концентрации азота и является «ведущим» элементом. Таким образом, при данной температуре расчет позволяет определить ведущий элемент  $R$ , содержание которого в расплаве за один цикл расчета снижается на величину шага  $\Delta$ . Соответствующее снижение содержания азота определяется путем умножения величины  $\Delta[R]$  на стехиометрический коэффициент  $(14 / A_r)$ , где  $A_r$  - относительная атомная масса  $i$  – го элемента.

$$[R]_i = [R]_{i-1} - \Delta[R], \quad (6)$$

$$[N]_i^0 = [N]_{i-1}^0 - 14 \cdot \Delta[R] \quad (7)$$

После изменения концентрации азота и микролегирующих элементов в стали выполняется следующий цикл расчетов. Расчеты при данной температуре проводятся до тех пор, пока равновесная с каждым из нитридов величина  $[N]_{min}$  не будет равна текущей фактической  $[N]_{факт}$ . После этого расчет при данной температуре  $T$  прекращают и промежуточные результаты выводятся в результирующий файл.

При продолжении расчетов температура уменьшается  $T = T - \Delta T$  на величину шага расчета  $\Delta T$ , и для новой текущей температуры проводится весь комплекс ранее изложенных итерационных расчетов.

Таким образом, пользователь в результате расчета получает файл с данными о существовании и количестве нитридов элементов, входящих в сталь в заданном температурном интервале. Эти данные позволяют определить температуру начала выделения каждого нитрида в данной стали при заданных условиях, а также распределение азота между образовавшимися нитридными фазами и динамику выделения нитридов при охлаждении расплава данного состава.

На рисунке 2 приведена блок – схема расчетов образования нитридов.

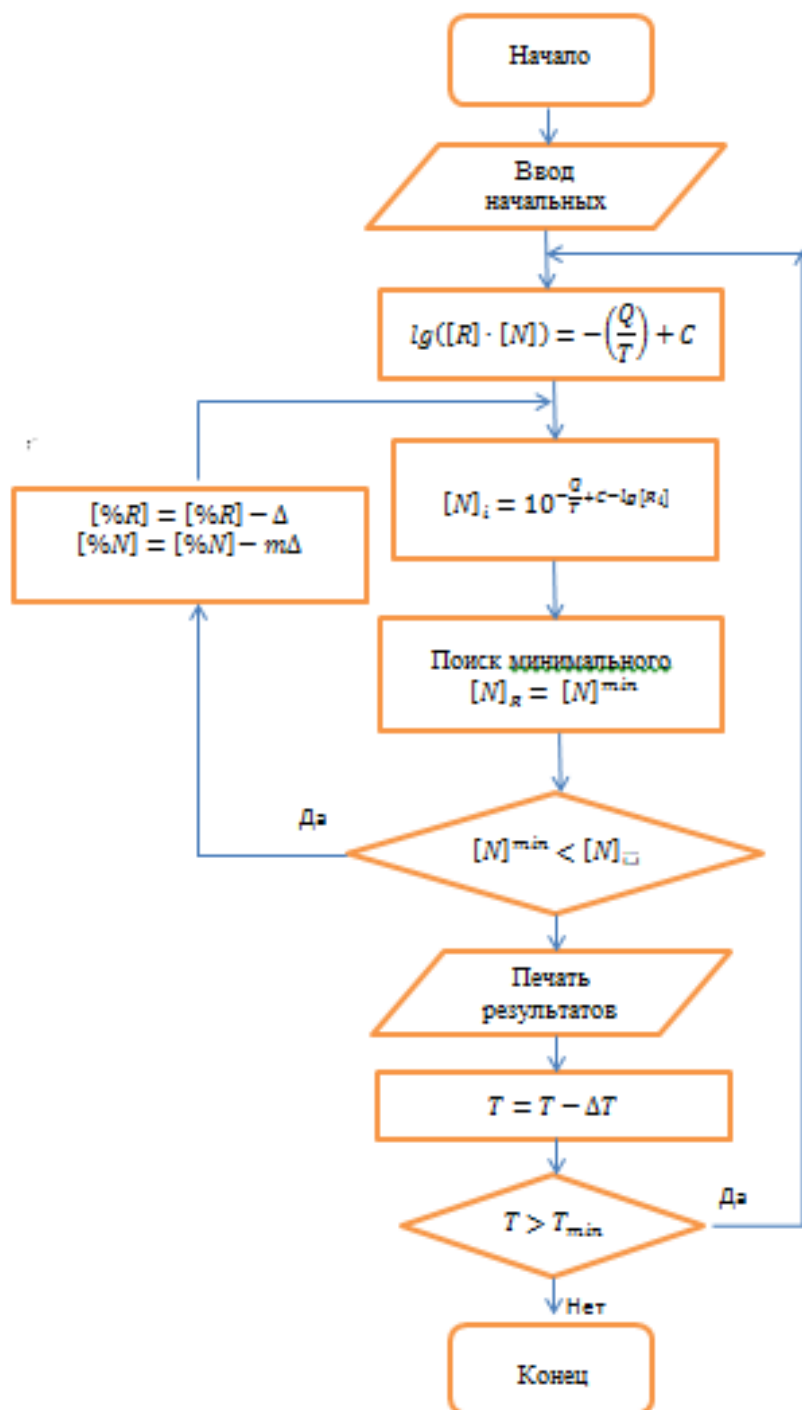


Рисунок – 2 Блок – схема расчета условий совместного нитридообразования

Ниже приведены результаты расчетов в виде графиков, зависимости «эффективного» бора от содержания титана, построенных с использованием предлагаемой модели. На основании предложенной термодинамической модели в работе оценено влияние титана (при вариациях на пяти уровнях – 0,01; 0,015; 0,02; 0,025 и 0,03 %) бора (при вариациях на двух уровнях – 0,0025 и 0,004 %) и азота (при вариациях на двух уровнях – 0,008, и 0,01 %) алюминия (на трех уровнях 0,03; 0,04 и 0,05 %) на величину «эффективного» бора при кристаллизации непрерывнолитого слитка борсодержащей стали). Результаты расчетов приведены на рисунках 3 - 6.

На рисунке 3 представлен график зависимости содержания «эффективного» бора от содержания титана при трех различных содержаниях алюминия, построенный с использованием результатов расчета по разработанной модели. Расчет выполнен для общего содержания в стали бора 0,0025 % и азота 0,008 %. Из графика следует, что для получения «эффективного» бора 0,001 % (минимальное значение для повышения механических свойств) требуется введение 0,002% титана, если в металле содержится 0,05% алюминия. При снижении алюминия до 0,03% потребность в титане несколько увеличивается до 0,022 % (показано стрелками на рис. 3).

Кроме того, график показывает содержание «эффективного» бора. Так по графику видно, что при содержании титана 0,025 % только 0,002 % бора будет не связано в нитриды при общем его содержании 0,0025 %.

Аналогично объясняются результаты расчета по модели проведенные для стали содержащей  $[N]_0=0,008$  %;  $[B]_0=0,004$  %;  $[N]_0=0,010$  %;  $[B]_0=0,0025$  %;  $[N]_0=0,010$  %;  $[B]_0=0,004$  %, на рисунках 4 – 6.

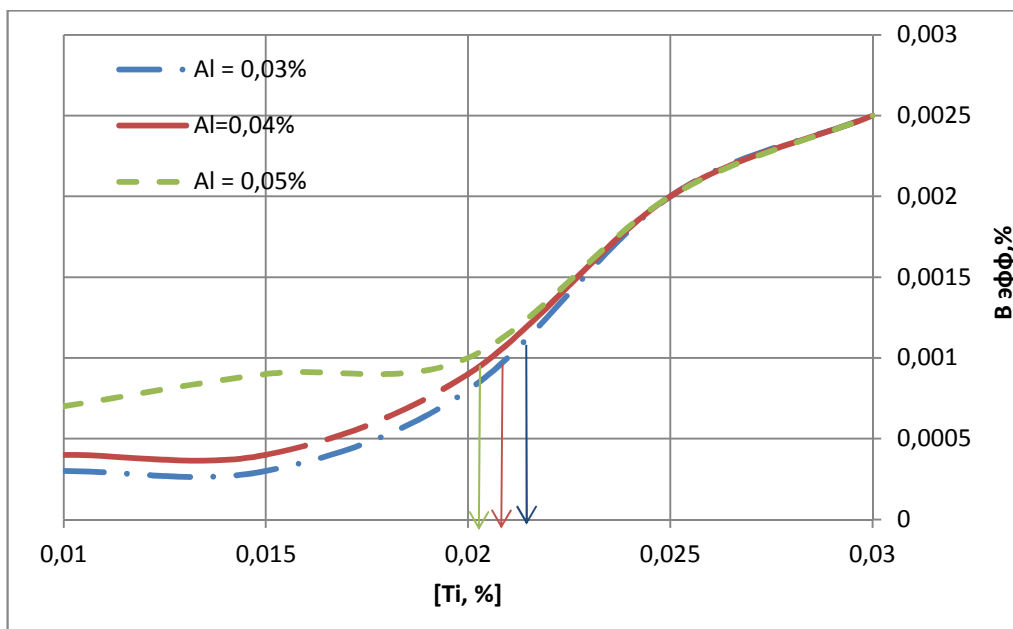


Рисунок – 3 Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0.008 \%$ ;  $[B]_0 = 0.0025 \%$

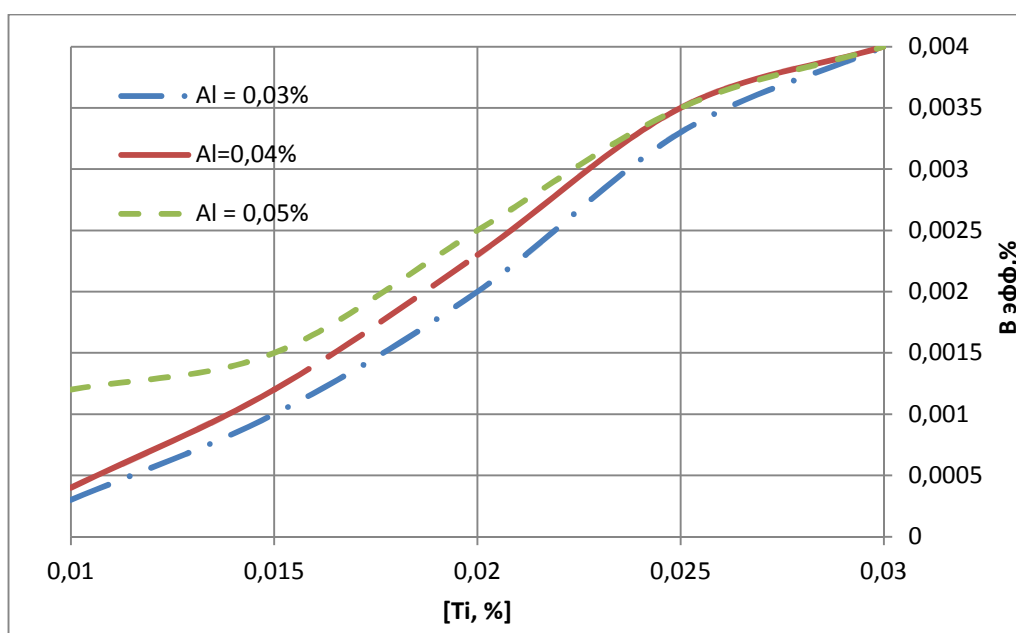


Рисунок – 4 Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0.008 \%$ ;  $[B]_0 = 0.004 \%$

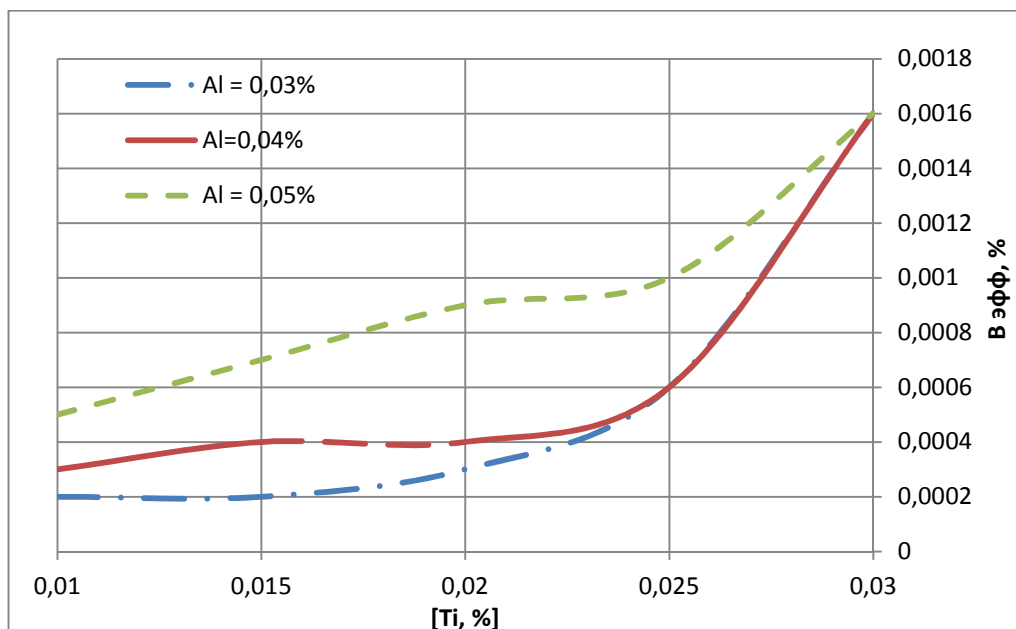


Рисунок – 5 Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0=0,010\%$ ;  $[B]_0=0,0025\%$

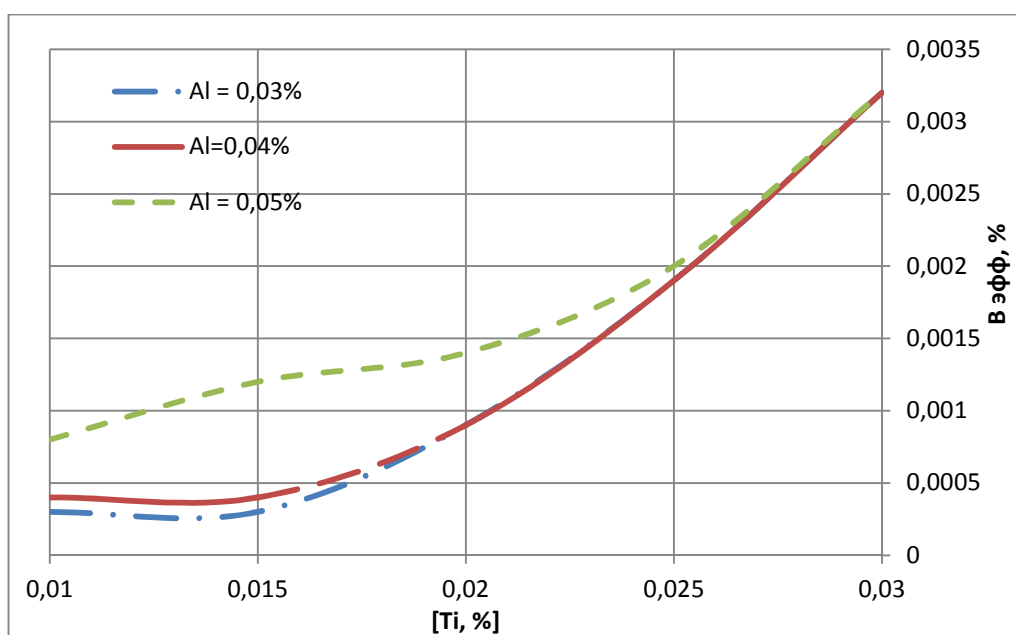


Рисунок – 6 Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0=0,010\%$ ;  $[B]_0=0,004\%$

Разработанная математическая модель позволит производить расчета «эффективного» бора в зависимости от химического состава стали.

## Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности предлагаемой модели было проведено сравнение с формулой расчета бора «эффективного», предложенной Karadia и другими авторами (рис. 7, 8).

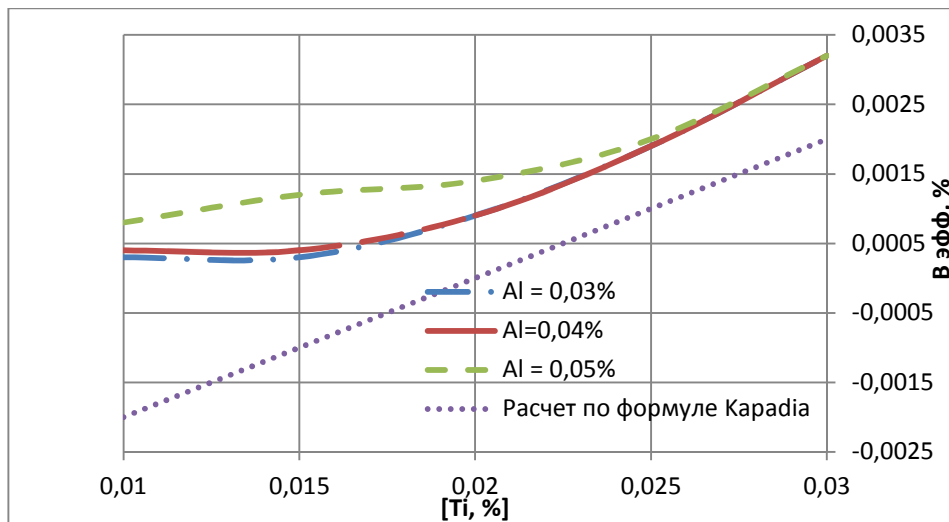


Рисунок 7 – Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от начальной концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0,010 \%$ ;  $[B]_0 = 0,004 \%$  в сравнении с формулой предложенной Karadia и др.

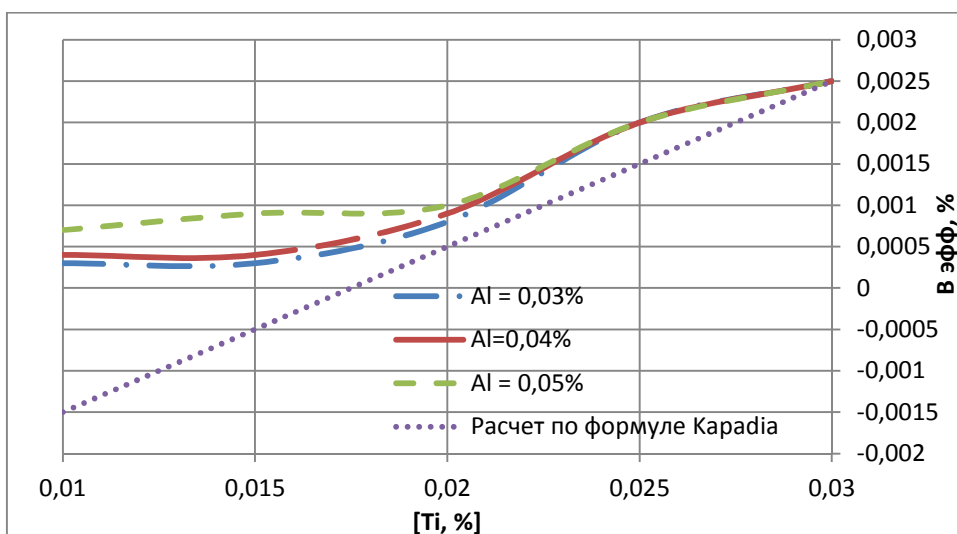


Рисунок 8 – Зависимость содержания «эффективного» бора в стали от начальной концентрации азота, титана, алюминия и бора при  $[N]_0 = 0,008 \%$ ;  $[B]_0 = 0,025 \%$  в сравнении с формулой предложенной Karadia и др.

Как видно из представленных графиков, формула, предлагаемая Karadia и др., при содержании титана в стали меньше 0,02 % прогнозирует содержание бора эффективного в отрицательной области, что лишено физического смысла.



**В третьей главе** изучены особенности технологии производства борсодержащей стали в условиях электросталеплавильного цеха ОАО «ОЭМК». Рассмотрены различные технологические схемы производства этого класса стали. Проведен анализ различных вариантов присадки ферробора в металл: в виде кускового материала и порошковой проволоки.

В соответствии с принятой технологией проволоку с наполнителем «ферробор» вводили на АКОО (агрегат комплексной обработки стали) после присадки всех материалов. Обработка плавки на АКОО производилась в соответствии с действующими технологическими инструкциями со следующими особенностями:

- раскисление шлака гранулированным алюминием в количестве 50 кг;
- за 12 – 15 минут до передачи плавки на УНРС (установка непрерывной разливки стали) при этом температура металла в стальковше на 8 – 12 °С выше регламентируемой температуры отдачи на УНРС производили корректировку по содержанию алюминия;
- через 1 минуту после ввода алюминия осуществляли обработку металла силикокальцием;
- через 3 минуты после ввода силикокальция для получения температуры в стальковше на 4 – 8 °С выше температуры передачи на УНРС, при необходимости производили нагрев или продолжали продувку ванны аргоном без изменения интенсивности;
- при необходимости вводили порошковую проволоку с ферротитаном;
- через 1 минуту, вводили порошковую проволоку с ферробором;

В условиях ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» было проведено сравнение двух технологий легирования металла бором: кусковым ферросплавом и порошковой проволокой с наполнителем «ферробор». Испытания проводились по базовой технологии производства борсодержащей стали марок 40Г1Р и 20Г2Р.

На плавках бор вводили после вакуумной обработки металла. Данные о технологических параметрах представлены в таблице 1 (опыт – с использованием порошковой проволоки, база – с применением кусковых ферросплавов)

Таблица – 1 Сравнение технических показателей при использовании порошковой проволоки и кусковых материалов

		марка стали	
		40Г1Р	20Г2Р
Количество плавов	опыт	9	25
	база	14	42
Количество бора в чистом элементе, кг.	опыт	4,26	4,09
	база	4,49	5,07
Содержание бора в маркировочной пробе, %	опыт	0,0023	0,0022
	база	0,0022	0,0024
Усвоение бора по маркировочной пробе, %	опыт	83.8	85.9
	база	73.3	72.3

Основная задача при производстве стали, легированной бором, состоит в следующем - получить стабильное содержание «эффективного» бора в расплаве. Полученные данные позволяют определить при какой технологической схеме проще осуществить обеспечение стабильного содержания активного бора. По старой технологической схеме с использованием кускового материала усвоение бора составляет 73 – 75 %, по новой схеме (с использованием порошковой проволоки) усвоение достигает 84 – 86 %. (Рис. 9).

Потери бора связаны со сложностью соблюдения оптимальных технологических параметров – кусковой борсодержащий материал подается сверху, при этом шлаковая фаза может оказывать влияние на усвоение бора металлом. По второй схеме роль шлака сводится к минимуму. В этом случае на усвоение бора основное влияние оказывают параметры металлического расплава, а также содержание элементов, имеющих повышенное сродство к бору. Основная роль при этом отводится азоту. Результаты заводских плавов подтверждают расчеты, выполненные с использованием разработанной модели о влиянии содержания азота в стали на величину «эффективного» бора в металле.

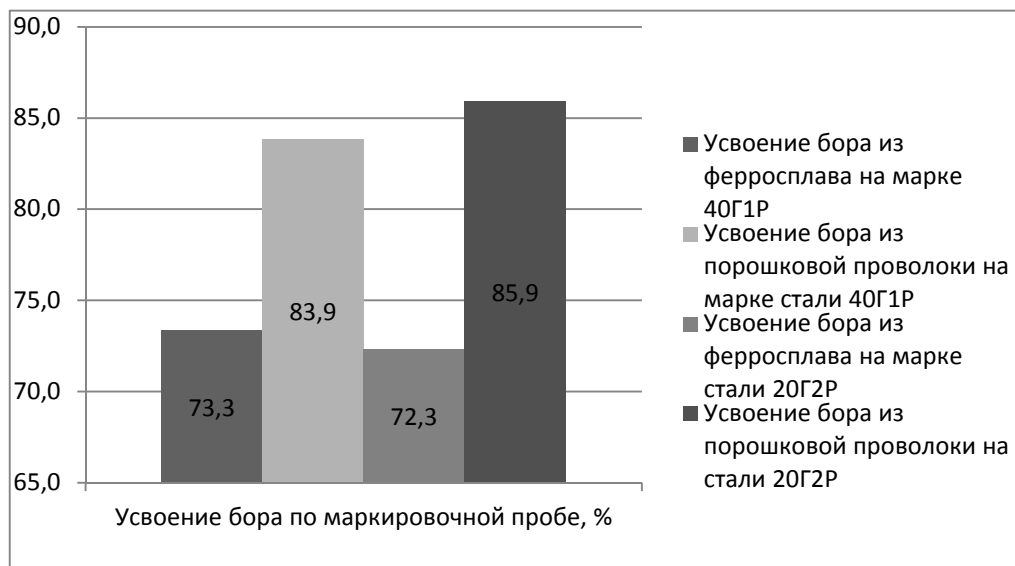


Рисунок – 9 Усвоение бора из порошковой проволоки и кускового ферробора

Наряду с вышеизложенным, проведено сравнение механических свойств металлопроката стали 20Г2Р (состав представлен в таблице 2), изготовленной по технологии с использованием вакуумной обработки и без вакуумирования.

Таблица – 2 Химический состав стали 20Г2Р (ТУ 14-1-5490-2004).

Химический состав, %											
С	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N	B
0,23	1,19	0,14	0,006	0,005	0,26	0,02	0,04	0,03	0,019	0,005	0,0038

Стоит отметить, что в остальном технология производства была идентична. Расчетное значения «эффективного» бора при вакуумной обработке стали составляет порядка 95 – 98 % от общего содержания бора, в то время как для металла, не прошедшего вакуумную обработку этот показатель не превышает 70 – 80 %. Повышение содержания азота с 50 – 70 до 80 – 100 ppm приводит к снижению твердости образцов на 2 – 3 единицы HRC и увеличению разброса данных.

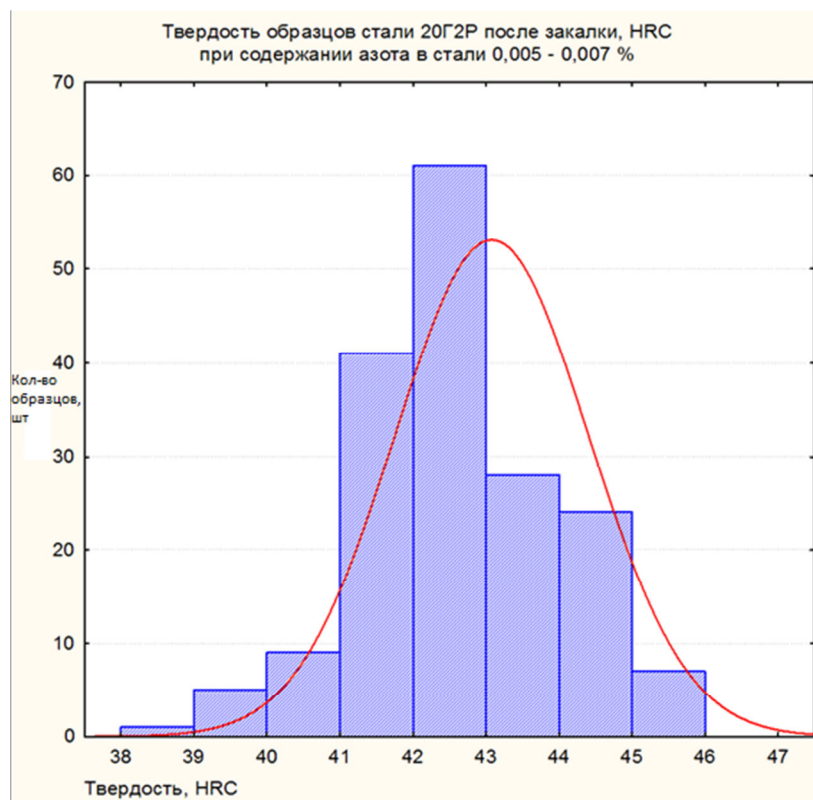


Рисунок – 10 Диаграмма распределения твердости образцов стали 20Г2Р после закалки при содержании азота 50 – 70 ppm

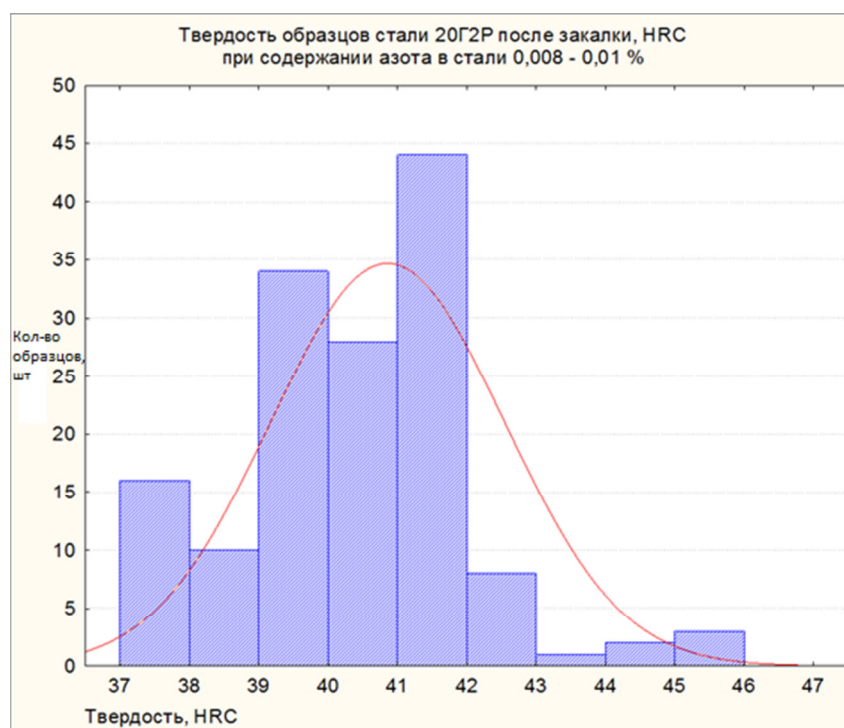


Рисунок – 11 Диаграмма распределения твердости образцов стали 20Г2Р после закалки при содержании азота 80 – 100 ppm

В сталях, произведенных без вакуумной обработки, содержание азота достигает 80 – 100 ppm, что на 40 – 60 % выше по сравнению с металлом прошедшим вакуумную обработку. Как видно из примера на рисунках 10 и 11, на плавках с вакуумной обработкой прочностные свойства стали увеличиваются на 10 – 15 %. Что особенно важно, доля плавков с твердостью от 41 до 42 единиц HRC составляет около 65 %.

В четвертой главе был проведен анализ заводских данных о производстве борсодержащей стали. Были обработаны более 100 паспортов плавков борсодержащей стали 20Г2Р. По данным паспортов были определены коэффициенты усвоения бора из ферросплава ФБ19 (табл. 3). Результаты представлены на рисунке 12.

Таблица – 3 Химический состав ферробора ФБ19 по ГОСТ 14848-69, %

	B	Si	Al	C	S	P	Cu
ФБ 19	>=19	3	5	0,20	0,02	0,03	0,1

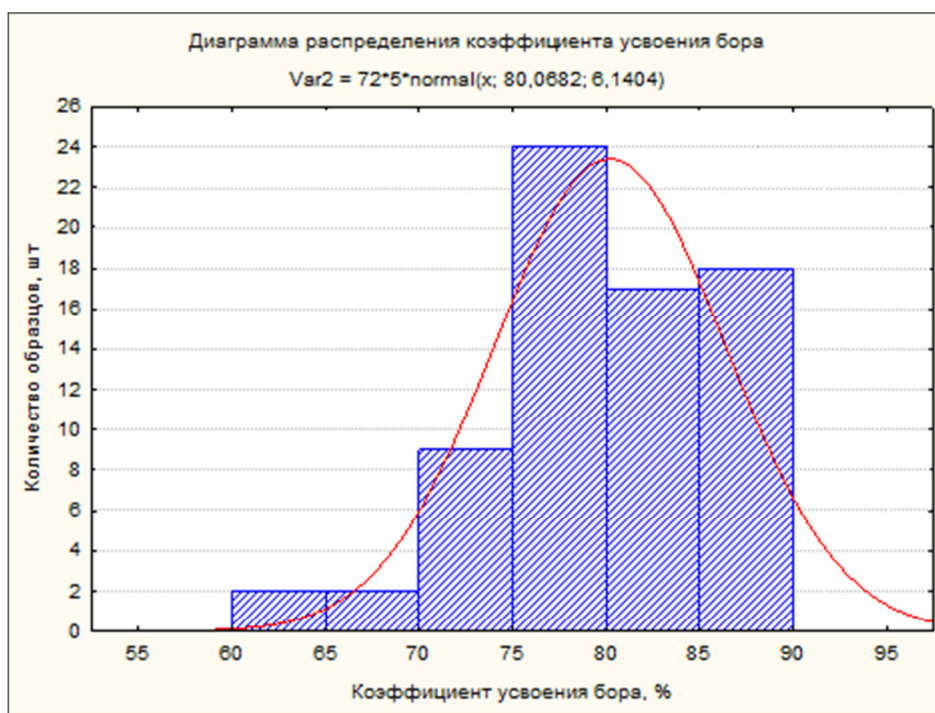


Рисунок – 12 Диаграмма распределения коэффициента усвоения бора

Видно (рис. 12), что коэффициент усвоения бора варьируется в довольно широких пределах с максимумом при нормальном распределении между 75 и

80%. Определение причин разброса данных по усвоению бора и их устранение - одна из задач представленной работы. Так как концентрация бора в стали весьма мала, а оптимальное значение «эффективного» бора колеблется в узких пределах, такой разброс коэффициентов усвоения может отрицательно сказаться на свойствах готового продукта. Следует сократить интервал коэффициентов усвоения за счет использования более эффективных ферросплавов, содержащих бор и нитридообразующие элементы, например, "Грейнал-79", "Грейнал-СС" и «BATS», что обеспечивается более тщательной подготовкой металлического расплава по элементам, вступающим во взаимодействие с бором, корректировкой технологических периодов (операций).

На рисунке 13 показано влияние времени выдержки металла после присадки бора на его усвоение. Как видно, наблюдается плавное снижение коэффициента усвоения бора от 90 до 70 % при увеличении времени выдержки с 10 до 25 минут. Это может объясняться несколькими причинами, а именно: увеличением доли азота в металле (это было обнаружено на ряде плавов); увеличением окисленности ванны за счет шлака и футеровки ковша.

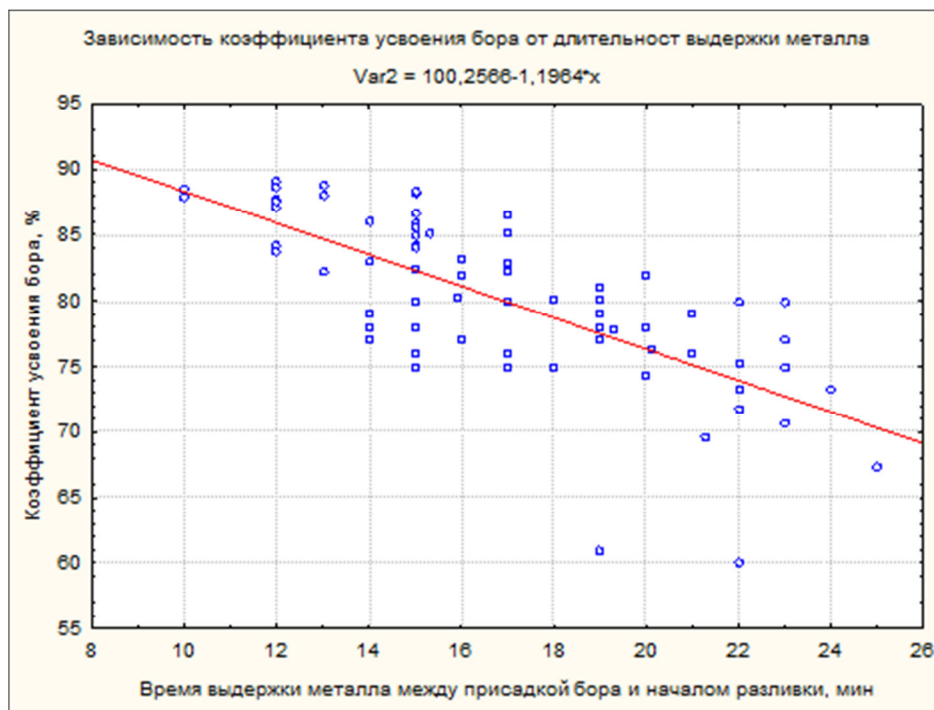


Рисунок – 13 Зависимость коэффициента усвоения бора от длительности выдержки металла

Однако, на основании выше приведенных данных по термодинамической оценке влияния различных элементов на уровень «эффективного» бора, определяющая роль может быть отведена азоту. В любом случае время выдержки металла после присадки борсодержащих материалов должно быть ограничено. В дальнейших исследованиях полезно этому моменту стоит уделить больше внимания, в том числе, тщательному анализу футеровки, шлакового режима, чистоты аргона и других параметров процесса.

Анализ плавов также показал, что при выплавке не всегда соблюдаются требования технологических инструкции, например, легирование стали бором осуществляется одним и тем же количеством порошковой проволоки с наполнителем «ферробор», но масса обрабатываемого расплава часто не одинакова. Это влечет за собой низкое усвоение бора и получение содержания общего бора в металле ниже рекомендованного.

## **Выводы**

1. Разработана математическая модель, позволяющая оценить долю «эффективного» бора в расплаве в зависимости от содержания легирующих и наиболее активных по отношению к бору элементов. Используемая модель позволяет рассчитывать предельные концентрации легирующих элементов, влияющих на величину «эффективного» бора и позволяет прогнозировать требования, предъявляемые к химическому составу металла перед присадкой борсодержащих материалов. При этом режимы раскисления, десульфурации, деазотации должны подбираться для конкретных марок стали.

2. Осуществлена проверка адекватности предлагаемой модели. Выполнено сравнение с формулой для расчета содержания «эффективного» бора, разработанной другими исследователями.

3. На основании исследования взаимодействия бора с компонентами расплава показано, что приоритетными соединениями являются нитриды, сульфиды и оксиды, которые оказывают основное влияние на величину «эффектив-

ного» бора в металле, причем роль азота относится к определяющей для целого класса марок стали.

4. Предложенная термодинамическая модель может быть рекомендована для освоения новых видов борсодержащей стали в условиях ОАО «ОЭМК» с химическим составом, отличным от стали 20Г2Р. Использование модели позволит снизить брак при освоении новой продукции и просчитать содержание «эффективного» бора при заданном химическом составе стали. А также при необходимости проводить корректировку содержания различных элементов в стали.

5. Проведен анализ заводских плавок борсодержащих марок стали. Установлено, что усвоение бора изменялось от 72 до 90 %. Показано, что на этот показатель может влиять степень подготовленности расплава по кислороду, уровень азота в металле, длительность перемешивания расплава после присадки бора. Рекомендовано обеспечивать раскисление расплава до содержания кислорода не более 20 ppm, а присадку бора осуществлять после ввода силикокальция. При этом длительность перемешивания ванны после присадки ферробора не должна превышать 5 – 6 минут при интенсивной подаче аргона без оголения металла. Анализ заводской технологии производства стали 20Г2Р показал её высокую стабильность и возможность получать продукцию требуемого качества с минимальным уровнем брака.

6. Установлены преимущества технологии вакуумирования при производстве борсодержащей стали. Показано влияние содержания азота и «эффективного» бора в металле на механические свойства борсодержащей стали.

7. Предложено использование порошковой проволоки с наполнителем «ферробор» вместо кускового материала. На основании выполненного исследования сформулирована рекомендация использовать порошковую проволоку, расход которой необходимо рассчитывать, исходя из химического состава расплава.



### **Публикации по теме диссертации**

1. Потапов А.И., Маликов И.Т., Уразов В.И., Семин А.Е. Влияние химического состава и режима аустенизации на прокаливаемость стали 35ГР // Электromеталлургия № 11, 2009
2. Потапов А.И., Семин А.Е. Технологические особенности легирования стали бором // Известия высших учебных заведений Черная металлургия № 9, 2012
3. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Кузнецов М.С., Потапов А.И. Улучшение технологии внепечной обработки стали силикокальцием в ОАО «Уральская Сталь» // Электromеталлургия № 4, 2009