**УДК 669**

# ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ДИФФУЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**Б. Д. Лыгденов [1, 2], В. А. Бутуханов [2], Ну Янь [1], Н. М. Хохлов [3]**
[1] Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай
[2] Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия
[3] ООО Инженерно-консультационный центр «Энергис», г. Улан-Удэ, Россия

В работе приведены результаты исследований фазового состава диффузионного слоя, полученного с использованием электронно-лучевой обработки. Подробно описан механизм формирования диффузионного слоя в условиях высокого градиента температур при нагреве и охлаждении.

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, электронно-лучевая обработка, фазовый состав диффузионного слоя, сталь, рентгеноспектральный анализ

# EFFECT OF ELECTRON BEAM TREATMENT ON THE FORMATION OF THE PHASE COMPOSITION OF DIFFUSION COATINGS DURING THE BORIDING

**B. D. Lygdenov [1, 2], V. A. Butukhanov [2], Nu Yan [1], N. M. Khokhlov [3]**
[1] Wuhan Textile University, Wuhan, China
[2] East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia
[3] Engineering advice center «Energis», Ulan-Ude, Russia

The paper presents the results of investigations of phase composition of the diffusion layer, obtained using electron-beam processing. Described in detail the mechanism of formation of the diffusion layer under high temperature gradient during heating and cooling.

**Ключевые слова:** chemical heat treatment, electron beam treatment, the phase composition of the diffusion layer, steel, x-ray spectral analysis

**Введение**

Метод упрочнения поверхности борированием привлекает специалистов различных отраслей промышленности. Единственным ограничением, препятствующим его широкому распространению является, является низкая пластичность борированного слоя, которая затрудняет применение борирования для упрочнения поверхности деталей, работающих в условиях знакопеременного нагружения, а также работающих в условиях динамических и термических ударов [10].

Эффективным и экономичным путем повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, контактной усталости и истирания, является создание на их поверхностях прочных, долговечных и коррозионно-стойких слоев. Известно много традиционных способов создания поверхностных слоев (нанесением и модифицированием) с целью повышения служебных свойств деталей машин. Наиболее широкое применение нашли методы поверхностной закалки, различные химико-термические способы обработки (ХТО), наплавки, гальванические методы осаждения покрытий и т. д. Возможности этих методов в значительной мере уже исчерпаны [16]. В связи с этим в последнее время интенсивно расширяется применение электронно-лучевых (пучковых) технологий упрочнения деталей. Применение электронного пучка позволяет существенно сократить время формирования боридного слоя по сравнению с длительностью тради-

ционного борирования [17].

В настоящей работе исследованы структура и свойства слоев на основе боридов железа на углеродистых сталях под воздействием электронного пучка в вакууме.

**Методика проведения исследования**

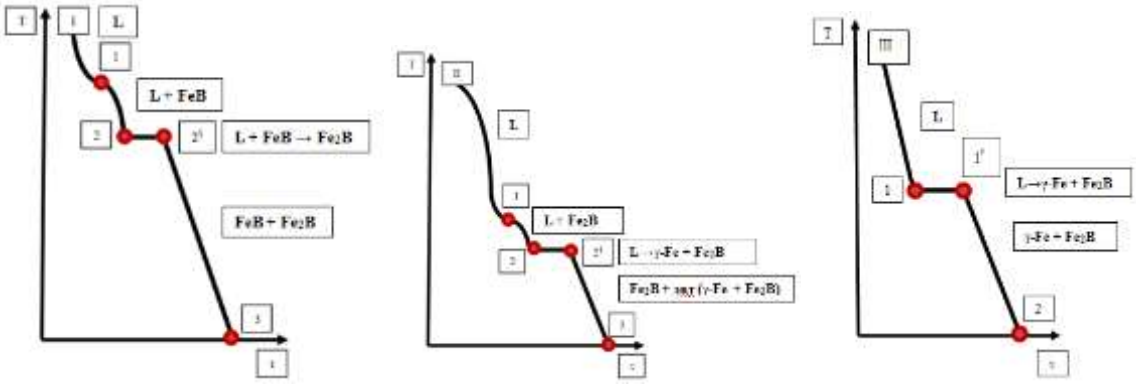
Исследования проводили на образцах из углеродистых сталей 20 и У12. На предварительно подготовленную поверхность образцов наносили обмазку, содержащую карбид бора. Насыщение из обмазок обеспечивает экономный расход смеси и возможность получения в зоне упрочнения большой концентрации вводимого элемента. Высокотемпературный электронный нагрев проводили с помощью установки электронно-лучевой наплавки на базе ЭЛУ-5. На основании предварительно проведенных экспериментов процесс осуществляли по следующему режиму: сила тока пучка электронов I = 60 mA, скорость перемещения заготовки относительно электронного луча V = 3 мм/сек. Микротвердость сформированных покрытий определяли на микротвердомере ПМТ-3. Нагрузка на алмазную пирамиду составляла 0,5 Н. Микроструктуру образцов исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-21». Рентгеноспектральный микроанализ проводили в Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВПО «ВСГУТУ» на растровом электронном микроскопе «JSM-6510LV, JEOL» с микроанализитором «INCA Energy 350, Oxford Instruments».

**Результаты исследований и обсуждение**

При указанных режимах обработки обмазка переходила в расплавленное состояние вместе с поверхностным слоем стальных образцов. Сформированы градиентные слои со структурой гетерофазного типа. Толщина слоев на исследуемых сталях составляет более 1 мм. В обоих случаях видна четкая граница между слоем и основным металлом. Переходная зона не наблюдается.

Известно, что при традиционном борировании после насыщения α- или γ-твердых растворов железа атомы бора и железа образуют первые участки боридного слоя ($Fe_2B$). При температуре ХТО вследствие постоянной активности насыщающей среды и накопления атомов бора их концентрация в местах флуктуаций оказывается достаточной для образования борида FeB. [10].

Согласно авторов [4], соответствие превращений диаграммам состояния возможно только при бесконечно малых скоростях охлаждения. Так, в неравновесных условиях нагрева и охлаждения при воздействии концентрированных потоков энергии происходит формирование принципиально иной структуры диффузионного слоя, нежели в случае традиционной ХТО.




а) б) в)

Рисунок 1 – Кривые охлаждения сплавов I-III системы Fe-B

Высокая скорость протекающих при электронно-лучевой обработке процессов и кратковременность пребывания металла в расплавленном состоянии приводят к тому, что концентрация бора снижается от облучаемой поверхности к сердцевине образцов. В верхних зонах обрабатываемого материала происходит кристаллизация по кривой охлаждения сплава I (рисунок 1а). В точке 1 из жидкости выпадают первичные кристаллы FeB. В точках 2-2` в результате взаимодействия жидкости и моноборида железа FeB происходит перитектическое превращение L + FeB → $Fe_2B$, вследствие которого происходит образование борида $Fe_2B$ [15]. По мере снижения концентрации бора дальнейшая кристаллизация соответствует кривой охлаждения сплава II (рисунок 1б). В точках 2-2`

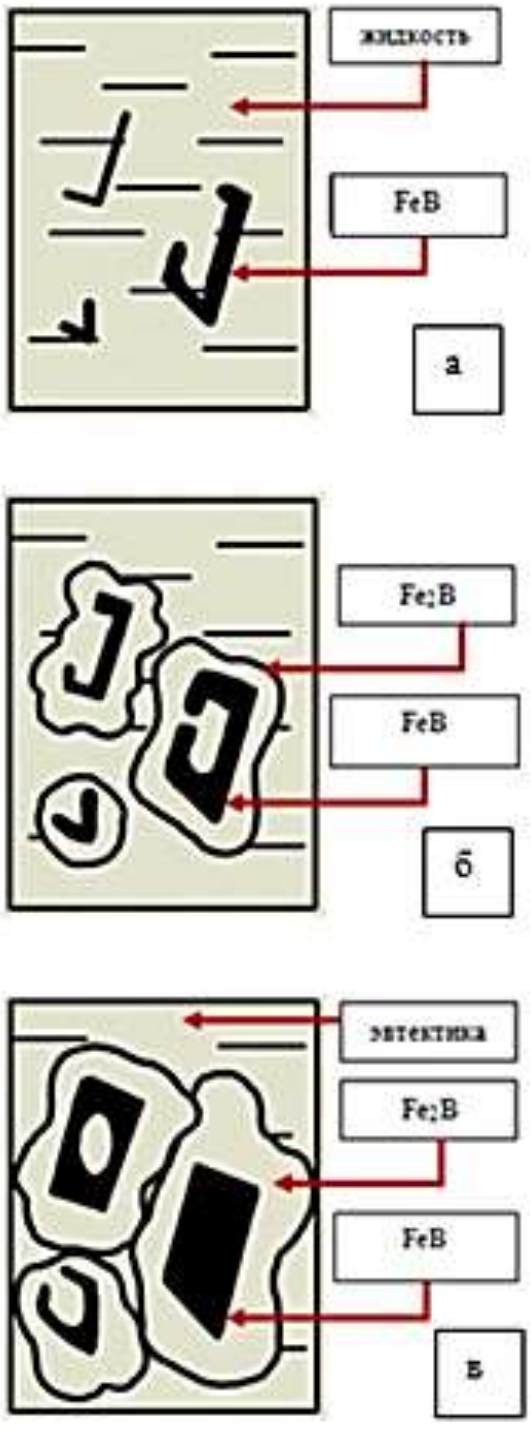



Рисунок 2 – Схема кристаллизации: а) выделение первичных кристаллов FeB; б) образование ободков $Fe_2B$ вокруг кристаллов FeB; в) Конечная структура: кристаллы FeB правильной формы, кристаллы $Fe_2B$ округлой формы и эвтектика

наступает эвтектическая реакция. Кроме первичных кристаллов боридов, выделившихся при охлаждении (кривая охлаждения сплава I), образуется еще эвтектика. Такая структура является структурой заэвтектического типа. Структура эвтектического типа формируется при дальнейшем снижении концентрации бора в соответствии с кривой охлаждения сплава III (рисунок 1в). Эвтектика в данной системе представляет собой механическую смесь кристаллов γ-фазы (при охлаждении преобразующейся в α-фазу) и боридов $Fe_2B$.

Схема процесса кристаллизации слоя при электронно-лучевом борировании представлена на рисунке 2.

Процессу затвердевания предшествует выделение одной из фаз в виде первичных кристаллов (рисунок 2а). Согласно А.А. Бочвара [2], в процессе кристаллизации происходит сначала преимущественное выделение одной из фаз, а затем отложение другой. Базовой должна быть фаза, обладающая более сложной кристаллохимической природой. Поверхностное натяжение на границе такой фазы с расплавом велико, что и предопределяет возможность зарождения и роста на этой фазе второй фазы. Таким образом, моноборид железа с наличием высокопрочных связей ковалентного типа кристаллохимически более сложен, чем фаза $Fe_2B$, для которой характерна большая металлизация межатомных связей. Первичные кристаллы успевают вырасти до известной величины, прежде чем на их поверхности образуется дендритная оболочка второй фазы (рисунок 2б). Форма кристаллов также связана со скоростью охлаждения [18]. Затвердевание при малой скорости охлаждения приводит к формированию кристаллов в виде ромбоэдров, и в сечениях плоскости шлифа они представлены призмами или искаженными ромбами. С увеличением переохлаждения и вследствие того, что теплоотвод происходит в сторону сердцевины образца, начинают преобладать округлые формы роста. Моноборид железа FeB кристаллизуется в виде полиэдров, на которых зарождается $Fe_2B$ в виде округлых дендритов. Кристалл FeB оказывается заключенным в оболочку $Fe_2B$. Остатки жидкости при охлаждении кристаллизуется в виде эвтектики (рисунок 3в).

Зарождающей фазой является моноборид железа FeB (в отличие от традиционного борирования). Структурными составляющими являются бориды (FeB, $Fe_2B$) и эвтектика пластинчатого типа (α-фаза+$Fe_2B$). Схемы

слоев, сформированных на сталях У12 и 20, изображены на рисунках 3, 4.

В обоих случаях в слоях в направлении от поверхности образцов образуются следующие зоны: А) зона боридов правильной формы и боридов округлой формы; Б) зона заэвтектического состава; В) зона эвтектического состава; Г) зона основного металла.

В зоне А бориды имеют различную форму. Геометрическая форма округлых кристаллов $Fe_2B$ может быть определена как неправильная. Правильные кристаллы FeB с формой параллелограмма ориентированы в одном направлении. Некоторые из них представляют собой пустотелые каркасы (рисунок 5а). Причиной этого является малая концентрация бора. Бор расходуется на построение образующегося по перитектической реакции борида $Fe_2B$. При недостатке бора кристалл FeB не успевает вырасти монолитным. В зависимости от количества недостающего бора встречаются бориды П-образной и Г-образной формы. Содержание бора колеблется от 8 до 9 мас. %. На стали У12 формируется зона сплошных округлых боридов $Fe_2B$ с содержанием бора около 3 – 4 мас. %. В результате роста боридов в формируемом слое происходят их столкновения друг с другом. Однако, на стали 20 формируется структура с отсутствием слоя сплошных боридов. Округлые бориды $Fe_2B$ располагаются разрозненно и содержат 5 – 6 мас. % бора. В промежутках между ними располагается эвтектика с содержанием 3 – 4 мас. % бора. Отсутствие сплошного слоя округлых боридов обусловлено тем, что бор был израсходован на формирование боридов правильной формы. Так, бориды правильной формы в слое на стали 20 имеют повышенное по сравнению со сталью У12 содержание бора – 10 – 11 мас. %. Этим объясняется их законченная геометрическая форма без признаков наличия пустотелых построений (рисунок 5б).

В зоне Б в связи со снижением концентрации бора объемная доля боридов снижается. Кристаллы выделяются в виде крупных дендритов с осями первого порядка или с осями первого и второго порядков (рисунок 6). Содержание бора в указанных дендритах на стали У12 составляет 3 – 4 мас. %, на стали 20 – 5 – 6 мас. %.

К основному металлу (зона В) примыкает зона, в которой бориды отсутствуют, в ней наблюдается эвтектика пластинчатого типа с содержанием бора 1 – 2 мас. % (рисунок 7).

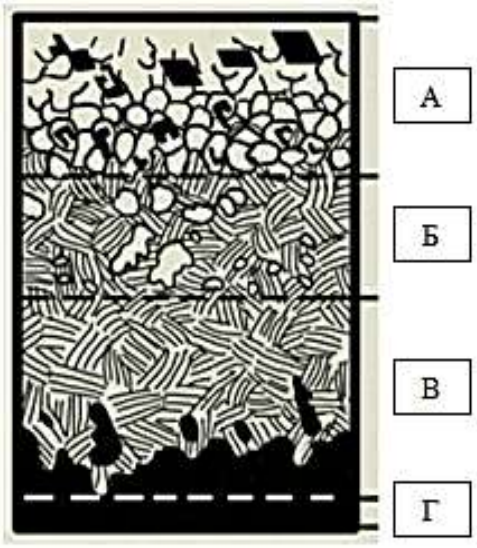



Рисунок 3 – схема борированного слоя на стали У12, полученного после электронно-лучевой наплавкой в вакууме: А – зона округлых боридов и боридов правильной формы; Б – зона заэвтектического состава; В – зона эвтектического состава; Г – зона основного металла

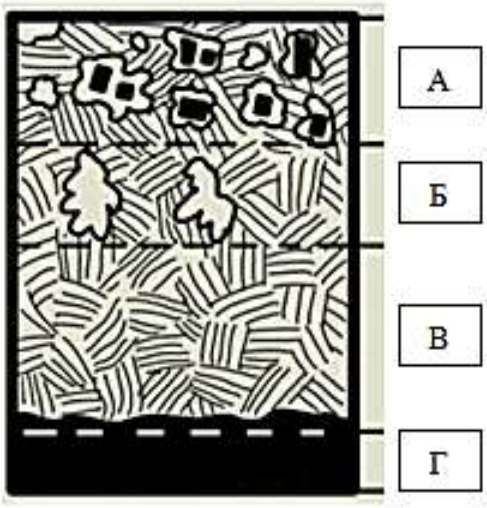
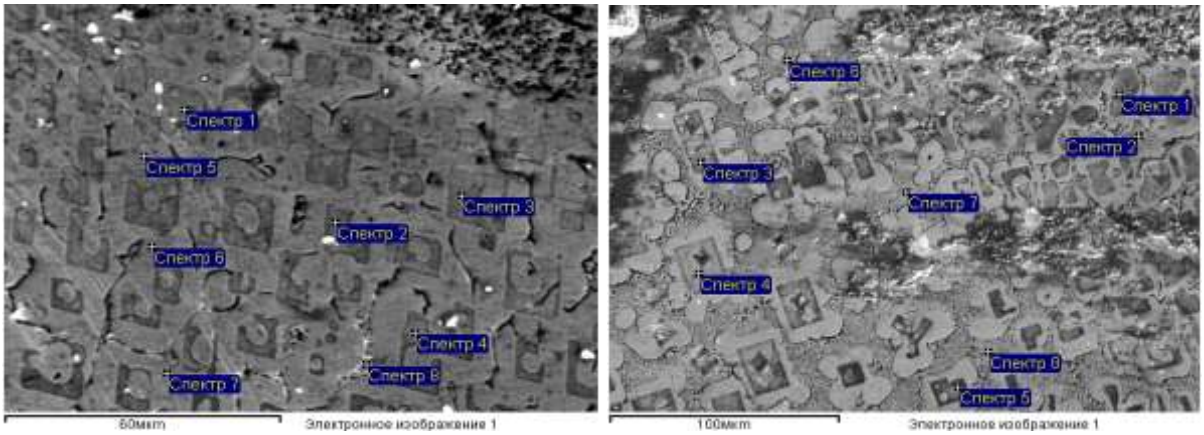
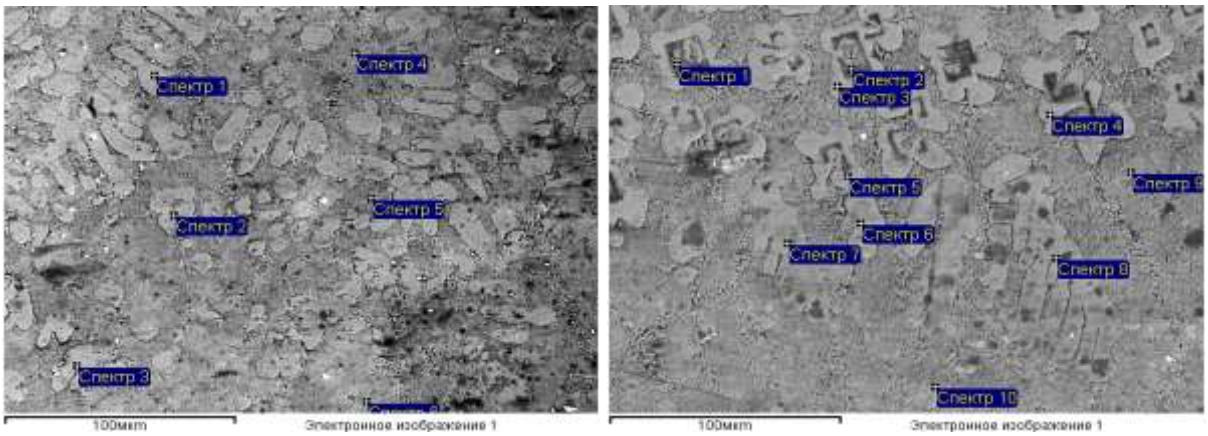



Рисунок 4 – схема борированного слоя на стали 20, полученного после электронно-лучевой наплавкой в вакууме: А – зона округлых боридов и боридов правильной формы; Б – зона заэвтектического состава; В – зона эвтектического состава; Г – зона основного металла



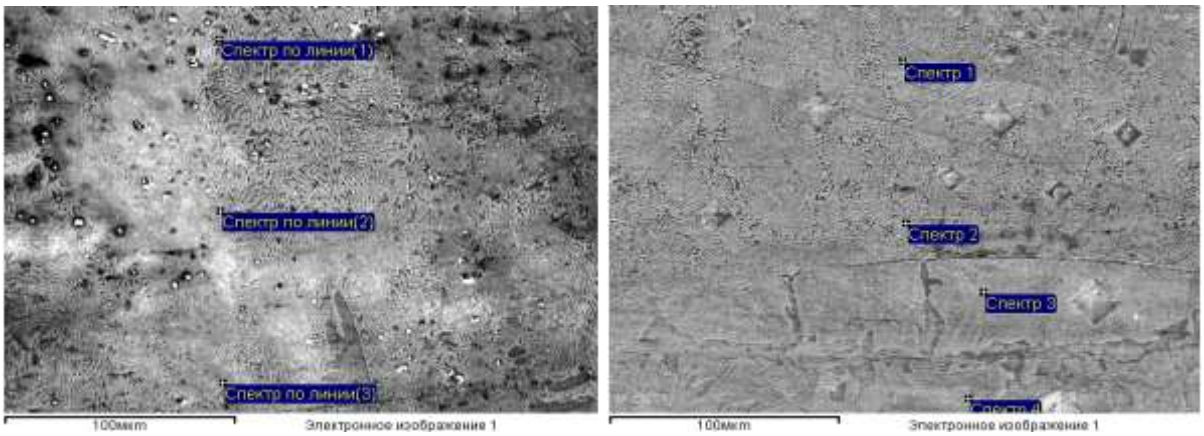

а) б)

Рисунок 5 – Тонкое строение зоны боридов правильной формы, зафиксированное методом растровой электронной микроскопии: а) сталь У12; б) сталь 20




а) б)

Рисунок 6 – Тонкое строение зоны заэвтектического состава, зафиксированное методом растровой электронной микроскопии: а) сталь У12; б) сталь 20




а) б)

Рисунок 7 – Тонкое строение зоны эвтектического состава, зафиксированное методом растровой электронной микроскопии: а) сталь У12; б) сталь 20

**Выводы**

Боридные слои, полученные с использованием электронно-лучевой обработки в вакууме, имеют толщину многократно превышающую толщину покрытий, полученных традиционными методами борирования. При наплавке карбида бора с силой тока 60 mA толщина упрочненного слоя на стали У12 составляет 600 мкм, на стали 20 – 800 мкм.

Фазы в поверхностном слое, формируемом при электронно-лучевом борировании, образуются в соответствии с диаграммой состояния Fe-B [5 – 9].

Микроструктура при электронно-лучевом борировании имеет явные преимущества перед микроструктурой слоя, полученного традиционным диффузионным борированием, имеющего ярко выраженное слоистое строение: вверху сплошной слой из моноборида FeB и расположенный под ним слой $Fe_2B$. Такое строение обусловливает ряд существенных недостатков, основным из которых является то, что твердость по слою меняется ступенчато, вследствие чего происходит скол высокотвердой и хрупкой фазы FeB в процессе эксплуатации изделия. Согласно принципу Шарпи, наиболее твердые структурные составляющие должны залегать в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие – образовывать сплошную матрицу. Формирование слоев, удовлетворяющих данному требованию, возможно при применении электронно-лучевого борирования, обеспечивающем равномерное распределение боридов по толщине диффузионного слоя.

Одним из факторов, сдерживающих широкое применение борирования, является высокая хрупкость покрытий, обусловленная наличием высокотвердой фазы FeB [3, 12 – 14]. Кроме того, из литературы известно [10, 11, 16, 17, 19, 20], что при традиционном борировании FeB в сочетании с $Fe_2B$ образует концентраторы остаточных механических напряжений, вызывая при эксплуатации изделия растрескивание диффузионного слоя. Таким образом, присутствие фазы FeB в борированных сталях следует ограничивать.

**Список литературы**

1. Банных, О. А. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / О. А. Банных, П. Б. Будберг, С. П. Алисова [и др.]. - М.: Металлургия, 1986. - 440 с.

2. Бочвар, А.А. Металловедение - М.: Изд. ГНТИ «Черная металлургия», 1956. - 496 с.

3. Бутуханов, В.А. Диффузионное упрочнение сталей в насыщающей среде V+AL+B 4C / В.А. Бутуханов, Н.Г. Суханов, Б.Д. Лыгденов [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2013. - Т. 10. - № 1. - С. 146-148.

4. Голиков, И.Н. Дендритная ликвация в стали / И.Н. Голиков – М.: Металлургиздат, 1958. - 207 с.

5. Гурьев, А.М. Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, О.А. Власова // Фундаментальные исследования. - 2008. - № 8. - С. 10.

6. Гурьев, А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, С.Г. Иванов [и др.] // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 84-85

7. Гурьев, А.М. Исследование процессов диффузии в стали при циклическом тепловом воздействии / А.М. Гурьев, Ю.П. Хараев, О.А. Гурьева [и др.]. // Современные проблемы науки и образования. - 2006. - № 3. - С. 65-66.

8. Гурьев, А.М. Распределение атомов бора и углерода в диффузионном слое после борирования стали 08КП / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, В.И. Мосоров [и др.] // Современные наукоемкие технологии. - 2006. - № 5. - С. 35-36

9. Гурьев, А.М. Циклическое тепловое воздействие при термической и химико-термической обработке инструментальных сталей / А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин, Ю.П. Хараев [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2005. - Т. 2. - № 3. - С. 37-45.

10.Крукович, М.Г. Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: Физматлит, 2010. - С. 235.

11.Лыгденов, Б.Д. Прогрессивные диффузионные покрытия / Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев, В.И. Мосоров [и др.]. - Lulu Press, Inc. Raleigh, North Carolina, USA. - 2015. - С. 131

12.Лыгденов, Б.Д. Термоциклирование. Структура и свойства / Б.Д. Лыгденов, Ю.П. Хараев, А.Д. Грешилов [и др.]. - Барнаул, 2014. - С. 252.

13. Лыгденов, Б.Д. Исследование фазового состава и дефектного состояния градиентных структур борированных сталей 20Л, 45, 55 И 5ХНВ / Б.Д. Лыгденов, И.А. Гармаева, Н.А. Попова [и др.]. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. - 2012. - Т. 9. - № 4-2. - С. 681-689.

14.Лыгденов, Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: дисс. … канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2004. – С. 234.

15.Лякишев, Н.П. Боросодержащие стали и сплавы. / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лаппо - М.: «Металлургия», 1986. – С. 106.

16.Семенов, А.П. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергий / А.П. Семенов, И.Б. Ковш, И.М. Петрова [и др.] - М.: Наука, 1992.

17.Сизов, И.Г. Особенности электронно-лучевого борирования сталей [Текст] / И.Г. Сизов,

Н.Н. Смирнягина, А.П. Семенов. // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1999. - №12. - С. 11.

18.Таран, Ю.Н. Структура эвтектических сплавов / Ю.Н. Таран, В.И. Мазур. - М.: Металлургия, 1978. - 312с.

19.Гурьев, А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов., С.Г. Иванов, О.А. Власова, И.А. Гармаева, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев. // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 84-85

20.Гурьев, А.М Интенсификация процессов химико-термической обработки металлов и сплавов / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, О.А. Власова // Фундаментальные исследования. - № 8. 2008. - С. 10.

***Лыгденов Бурьял Дондокович*** [1, 2] *– д. т. н., доцент[2], заведующий кафедрой «Металловедение и технологии обработки материалов»[2], профессор[1]*

***Бутуханов Вячеслав Александрович*** [2] *– инженер ЦКП*

***Ну Янь*** [1] *– PhD, профессор, декан факультета «Машиностроение и автоматизация»*

***Хохлов Николай Митрофанович*** [3] *– директор*

[1] *Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай*

[2] *ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ВСГУТУ), г. Улан-Удэ, Россия*

[3] *ООО Инженерно-консультационный центр «Энергис», г. Улан-Удэ, Россия*