

УДК 669.1:[546.27+546.56]

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА СТАЛИ 20 ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАСЫЩЕНИИ БОРОМ И МЕДЬЮ**¹Лысых С.А., ¹Хараев Ю.П., ²Корнопольцев В.Н., ¹Бутуханов В.А.**¹*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, e-mail: kharaev@inbox.ru;*²*Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, e-mail: kompo@mail.ru*

Одним из распространенных и эффективных методов повышения эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента является химико-термическая обработка (ХТО), позволяющая существенно изменять физико-механические свойства поверхностных слоев стальных изделий. Большое внимание исследователей уделяется таким методам поверхностного упрочнения, как борирование, титанирование, силицирование, которые дают возможность формировать особые свойства на поверхности обычных марок стали. Данный подход содержит безусловный потенциал с точки зрения технологичности и экономической эффективности, поскольку позволяет ставить вопрос о сокращении использования дорогостоящих высоколегированных сталей. Одним из актуальных направлений является комплексное диффузионное насыщение бором совместно с другими элементами. Целью данной работы является исследование влияния одновременного насыщения бором и медью на формирование диффузионных слоев на поверхности стали 20. Процесс диффузионного насыщения проводился в порошковой среде. Для одновременного насыщения бором и медью использовались порошковые смеси, содержащие оксид меди. В качестве поставщика бора использовали обезвоженную борную кислоту, которая восстанавливается в процессе термообработки. Показано, что с увеличением содержания оксида меди в насыщающей смеси, происходит увеличение размера диффузионного слоя. Установлено, что при одновременном насыщении поверхности стали 20 бором и медью наибольшая толщина диффузионного слоя достигается при содержании в составе насыщающей смеси 7% CuO.

Ключевые слова: бор, медь, насыщающая смесь, металлографические исследования, диффузионный слой**THE STUDY OF FORMATION OF DIFFUSION LAYERS ON STEEL 20 WITH THE SIMULTANEOUS SATURATION WITH BORON AND COPPER****¹Lysykh S.A., ¹Kharaev Yu.P., ²Kornopoltsev V.N., ¹Butukhanov V.A.**¹*East-Siberian State University of Technologies and Management, Ulan-Ude, e-mail: kharaev@inbox.ru;*²*Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences, Ulan-Ude, e-mail: kompo@mail.ru*

One of the most common and effective methods for improving the operational properties of machine parts and tools is chemical-thermal processing, which allows to significantly change the physical and mechanical properties of the surface layers of steel products. The great attention of the researchers is paid to such methods of surface hardening as borating, titration, silicification, which enable to form special properties on the surface of conventional steel grades. This approach contains an unconditional potential in terms of manufacturability and cost-effectiveness, since it allows us to raise the issue of reducing the use of expensive high-alloy steels. One of the topical areas is the complex diffusion saturation with boron together with other elements. The aim of this work is to study the effect of simultaneous saturation with boron and copper on the formation of diffusion layers on the surface of steel 20. The diffusion saturation process was carried out in a powdered medium. For the simultaneous saturation with boron and copper, powder mixtures containing copper oxide were used. As a boron supplier, dehydrated boric acid was used, which is recovered during the heat treatment. It is shown that with an increase in the content of copper oxide in the saturating mixture, the size of the diffusion layer increases. It was found that with simultaneous saturation of the steel 20 surface with boron and copper, the maximum thickness of the diffusion layer is reached when the content of the saturating mixture is 7% CuO.

Keywords: boron, copper, saturating the mixture, metallographic studies, diffusion layer

Химико-термическая обработка (ХТО) на сегодня является одним из перспективных и эффективных методов улучшения эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента, позволяющим существенно изменять физико-механические свойства поверхностных слоев стальных изделий. Увеличивается количество исследований, посвященных таким методам поверхностного упрочнения, как борирование, титанирование, силицирование, которые дают возможность формировать особые свойства на поверхности обычных марок стали [1–3]. Данный подход содержит безусловный потенциал с точки зрения технологичности и экономи-

ческой эффективности, поскольку позволяет ставить вопрос о сокращении использования дорогостоящих высоколегированных сталей. Особый интерес представляют исследования диффузионного упрочнения поверхностей ответственных деталей машин, предполагающих высокие требования к качеству поверхностного слоя и размерной точности [4]. В этой связи представляют интерес исследования, ориентированные на изучение возможности совмещения борирования с другими элементами, направленные на преодоление такого недостатка как хрупкость боридных слоев, а также исследования возможности финишной механической обра-

ботки упрочненной поверхности для попадания в поле допуска на размер.

Более широкое распространение данных методов сдерживается недостаточными сведениями о процессах формирования функционально-градиентных поверхностей, что обуславливает актуальность исследований, направленных на создание таких поверхностей. Одним из таких актуальных направлений является диффузионное насыщение бором совместно с другими элементами. Целью данной работы является исследование влияния одновременного насыщения бором и медью на формирование диффузионных слоев на поверхности стали 20.

Материалы и методы исследования

Процесс диффузионного насыщения проводился в порошковой среде. Для одновременного насыщения бором и медью использовались порошковые смеси, содержащие оксид меди. В качестве поставщика бора использовали обезвоженную борную кислоту, которая восстанавливается в процессе термообработки. Подготовленные образцы из стали погружали в металлический контейнер и засыпали насыщающей смесью. Алюминий вводился как инертный наполнитель, для предотвращения сплавления и спекания насыщающей смеси. В качестве активатора процесса использовался фтористый натрий. Для герметизации в качестве плавкого затвора применяли жидкое стекло. Процесс диффузионного насыщения протекал при температуре 950 °С (1223 К) с выдержкой в камерной печи в течении 4 ч. После контейнеры извлекались, охлаждались на воздухе, образцы очищались от насыщающей смеси путём промывки под струёй воды и производилась подготовка шлифов с последующим травлением для металлографических исследований. Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе «Neophot-21».

Результаты исследования и их обсуждение

Борирование – это достаточно универсальный и эффективный способ химико-термического воздействия на поверхность железоуглеродистых сплавов, позволяющий получать стабильные диффузионные слои с целью повышения эксплуатационных свойств. Наиболее значительно повышается твердость, что приводит к росту износостойкости [5, 6]. Борированию могут подвергаться углеродистые и легированные стали перлитного, ферритного и аустенитного классов. В настоящее время вопросы, связанные с совместным насыщением поверхности различными элементами, привлекают внимание все большего числа исследователей. Проведенные исследования были направлены на поиск оптимального содержания оксида меди в составе насыщающей смеси при одновременном насыщении поверхности стали 20 бором и медью. При химико-термической обработке толщина диффузионного слоя во многом

зависит от технологических факторов и не в последнюю очередь от температуры процесса. На основании литературных данных, посвященных проблемам химико-термической обработки, была определена температура процесса насыщения равная 950 °С, при которой в сталях происходит аустенитное превращение, однако значительного роста зерна не наблюдается. Известно, что медь относится к числу элементов, которые способствуют снижению температуры $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения железа, тем самым интенсифицируют диффузию, что в конечном счете приводит к увеличению размеров получаемых диффузионных слоев. Для исследования процесса формирования диффузионных слоев при одновременном насыщении бором и медью использовались порошковые смеси, в которых варьировалось содержание оксида меди в соответствии с таблицей.

Содержание CuO в составе насыщающей смеси

Состав 1	3% CuO
Состав 2	5% CuO
Состав 3	7% CuO

На рис. 1–3 представлены микрофотографии структуры диффузионных слоев, полученных на образцах из стали 20 при использовании различных составов насыщающих смесей, указанных в таблице.

На рис. 1 показана фотография микроструктуры диффузионного слоя на поверхности стали 20, сформированного после химико-термической обработки с использованием насыщающей смеси, содержащей оксид меди в количестве 3%.

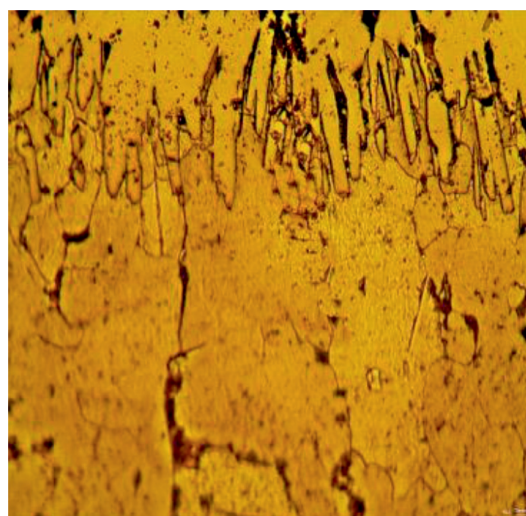


Рис. 1. Микроструктура диффузионного слоя стали 20 при использовании насыщающей смеси состава 1

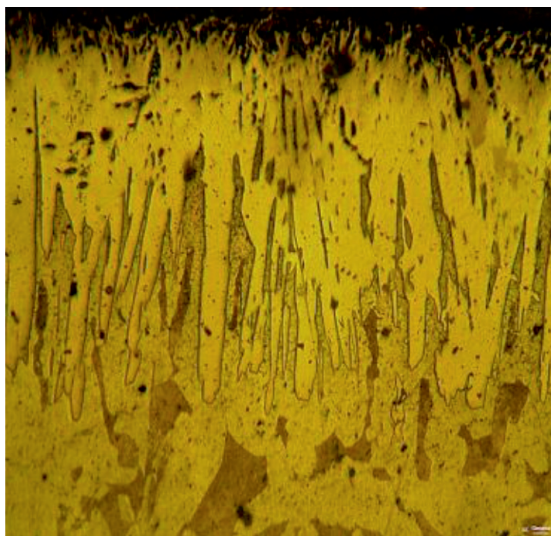


Рис. 2. Микроструктура диффузионного слоя стали 20 при использовании насыщающей смеси состава 2

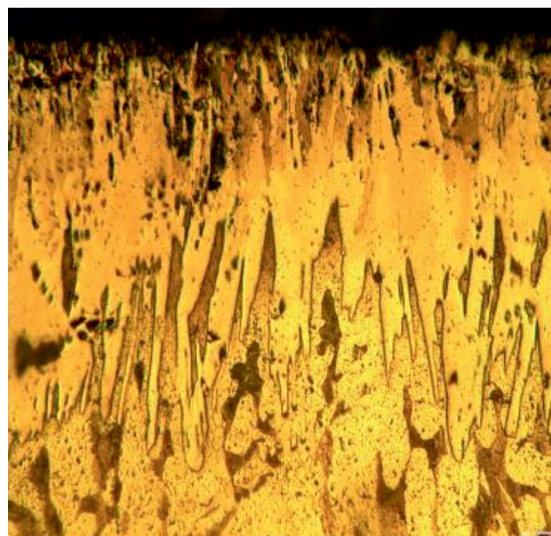


Рис. 3. Микроструктура диффузионного слоя стали 20 при использовании насыщающей смеси состава 3

Во всем наблюдаемом диапазоне структура диффузионного слоя имеет вид равномерных и хорошо сформированных покрытий, нижняя часть которых трансформируется в форму игол, направленных в глубь стального образца. Измеренная величина диффузионного слоя находится в пределах 123...127 мкм.

На рис. 2 показана микроструктура диффузионного слоя, сформированного с использованием насыщающей смеси, содержащей 5% оксида меди. Величина диффузионного слоя составила 160–170 мкм. Анализ фотографий микроструктуры показывает увеличение размера боридных игол, т.е. рост столбчатых кристаллов боридов, особенно по отношению к сплошному слою боридов.

Микроструктура образца стали 20, подвергнутого насыщению с использованием насыщающей смеси состав 3, показана на рис. 3. Содержание оксида меди в насыщающей смеси составило 7%. Величина сформированного диффузионного слоя в пределах 198–205 мкм. Наблюдается заметное увеличение размера диффузионного слоя, как сплошной зоны, так и игол.

По литературным данным все боридные слои предложено разделять на 3 типа:

– 1 тип – самый распространенный вид, острые, растущие перпендикулярно поверхности раздела иглы, состоящие, как правило, из боридов железа состава Fe_2B ;

– 2 тип – менее распространенный, но все же довольно часто встречаемый – иглы, расположенные перпендикулярно поверхности, но имеющие закругленный конец.

Что, как правило, является результатом действия углерода и сильных карбидообразующих легирующих элементов, таких как Cr, Nb, Ti, V, Mo и т.д.;

– 3 тип – редко встречающиеся, но наиболее благоприятные с точки зрения прочности сцепления диффузионного слоя с основной иглы, расположенные под углом к поверхности раздела. Как правило, такие иглы располагаются по границам зерен или растут в теле зерна по местам больших скоплений дислокаций, имеющих большую протяженность.

Полученные боридные слои, как видно из представленных на рис. 1–3 фотографий структур, соответствуют 1 типу. На всех исследованных образцах наблюдается четко выраженный диффузионный слой с характерными иглами присущими боридным слоям. Структура боридного слоя состоит из столбчатых кристаллов, ориентируемых нормально к насыщаемой поверхности, в основании у поверхности они срастаются, образуя сплошной слой. Иглы боридов глубоко врезаются в основной металл. Глубина зоны сплошных боридов заметно отличается от общей глубины диффузионного слоя. Игольчатое строение может быть следствием более свободной подвижности атомов бора в каком-то одном направлении. При этом зародыши боридов так ориентируются к поверхности образца, что кристаллографические расположены нормально к фронту диффузии, что и вызывает быстрый преимущественный рост фазы в направлении к сердцевине. При этом не-

обходимо отметить отсутствие переходного слоя, наличие которого наблюдается при использовании легированных сталей с более сложным химическим составом. Под диффузионным слоем располагается основной металл, имеющий равновесную структуру без видимых следов фазовых превращений.

Наблюдаемая структура сформированных диффузионных слоев на всех исследуемых образцах и во всем диапазоне изменений состава смеси демонстрирует стабильность диффузионных процессов и позволяет говорить об эффективности используемых насыщающих смесей. Присутствие в составе насыщающей смеси оксида меди позволяет получать активные атомы меди за счет химических реакций между компонентами смеси. При этом создаются условия для благоприятного протекания процессов адсорбции и диффузии атомов меди и бора в стальную поверхность. Морфология структуры диффузионного слоя в виде игл и их размеры показывают активность и направленность диффузионных процессов. Известно, что глубина и строение диффузионного слоя при борировании в одинаковых условиях насыщения зависит от содержания углерода в стали, его присутствие затрудняет диффузию бора. Сталь 20, как известно, по классификации относится к низкоуглеродистым сталям, препятствий для диффузии бора по сравнению с высокоуглеродистыми сталями меньше и, вследствие этого, хорошо подвергается диффузионному борированию. Максимальная возможная толщина слоя боридов зависит от температуры процесса насыщения и марки стали (т.е. ее элементного состава) – чем больше легирующих элементов содержит сталь, тем меньшей максимальной толщины диффузионный слой может на ней сформироваться.

Качественной и количественной характеристикой диффузионного насыщения являются толщина (величина) диффузионного слоя. На рис. 4 показана гистограмма зависимости величины диффузионного слоя от количества оксида меди в составе насыщающей смеси.

Анализ гистограммы позволяет утверждать, что при повышении содержания оксида меди в составе насыщающей смеси наблюдается стабильное увеличение диффузионного слоя. В частности, при повышении содержания CuO от 3% до 7% зафиксировано увеличение размера диффузионного слоя от 125 до 200 мкм. Увеличивается как зона сплошных боридов, так и боридных игл. Росту диффузионного слоя способствует тот факт, что медь не образует химических и термически устойчивых соединений с бором, это приводит к обогащению состава как бором, так и медью и, как следствие, к увеличению насыщающей способности смеси. Высокая интенсивность роста столбчатых кристаллов боридов, наблюдаемых в виде игл, является следствием активизации процесса диффузии бора, направленного в глубь металла. Наличие меди в стальных заготовках, как известно, приводит к улучшению обрабатываемости. Стабильное получение на стальных поверхностях диффузионных боридных слоев легированных медью толщиной в пределах 200 мкм и более, позволяет ставить вопрос о возможности применения финишной обработки поверхности глубиной до 100–150 мкм, что не является проблемой на современном станочном оборудовании. Такая возможность открывает перспективу более широкого применения химико-термической обработки, в частности борирования, для ответственных деталей машин, имеющих высокие требования по размерной точности и качеству поверхности.

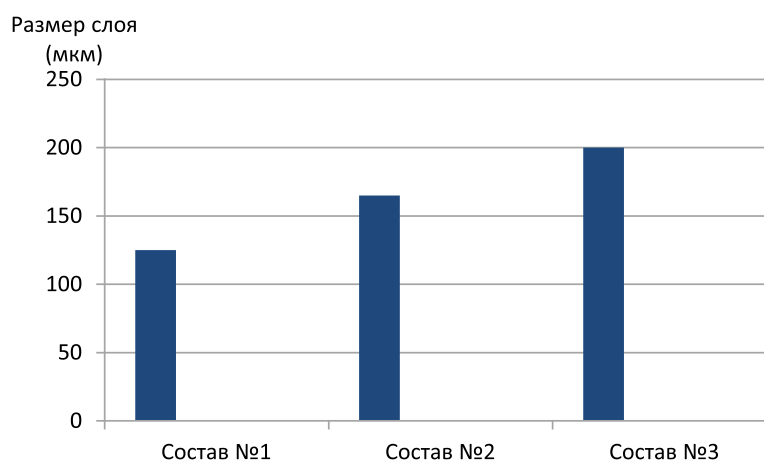


Рис. 4. Гистограмма зависимости величины диффузионного слоя от количества оксида меди в составе насыщающей смеси

Выводы

Показано, что с увеличением содержания оксида меди в насыщающей смеси происходит увеличение размера диффузионного слоя. Установлено, что при одновременном насыщении поверхности стали бором и медью наибольшая толщина диффузионного слоя достигается при содержании в составе насыщающей смеси 7% CuO.

Список литературы

1. Кошелева Е.А. Разработка технологии диффузионного упрочнения поверхности сталей бором и хромом: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. Барнаул, 2009. 165 с.
2. Мосоров В.И. Двухкомпонентное диффузионное упрочнение поверхности литых деталей машин диссертация: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09. Барнаул, 2011. 137 с.
3. Иванова Т.Г. Изучение диффузии бора в углеродистых и легированных сталях: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Барнаул, 2015. 150 с.
4. Корнопольцев В.Н. Разработка технологии борирования в порошковой среде, содержащей борную кислоту // Обработка металлов. 2011. № 2. С. 40–43.
5. Корнопольцев В.Н. Интенсификация процессов борирования углеродистых сталей порошковыми смесями // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 2. С. 266–271.
6. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гармаева И.А. Диффузионные покрытия сталей и сплавов. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. 221 с.