

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ТЕРМОДИФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук

Белорусский национальный технический университет,

Ю.С. УШЕРЕНКО, канд. техн. наук

Институт повышения квалификации и переподготовки кадров БНТУ

Исследованы особенности структурообразования диффузионных слоев, полученных по технологии, включающей предварительную обработку поверхности стальных изделий и последующее термодиффузионное борирование. Предварительная обработка заключалась в модификации поверхности способом сверхглубокого проникновения порошковой композицией на основе SiC. В результате повышается толщина диффузионного слоя и снижается его хрупкость.

Ключевые слова: диффузионные слои, особенности структурообразования, комплексная технология, способ сверхглубокого проникновения порошковой композиции.

SURFACE MODIFICATION FOR FOLLOWING THERMODIFFUSION BORING OF STRUCTURAL STEELS

V.G. DASHKEVICH, Ph. D in Technical Science

Belarusian National Technical University

YU.S. USHERENKO, Ph. D in Technical Science

Institute for Personnel Development and Professional Development BNTU

The features of the structure formation of diffusion layers obtained by the technology, including preliminary surface treatment of steel products and subsequent thermal diffusion boring, have been investigated. The pretreatment consisted of surface modification by the superdeep penetration method with a powder composition based on SiC. As a result, the thickness of the diffusion layer increases and its fragility decreases.

Keywords: diffusion layers, peculiarities of structure formation, complex technology, method of superdeep penetration of powder composition.

Введение. Более века ученые и инженеры применяют различные способы борирования, т.е. разновидность химико-термической обработки (ХТО) для защиты стальных изделий от механического изнашивания. Даже в современных условиях, когда перечень всевозможных высокотвердых покрытий и слоев огромен, боридные слои, имеющие чрезвычайно высокую твердость (по некоторым данным до 22 000 МПа) и износостойкость, показывают свою эффективность [1–3].

Термодиффузионное борирование в порошковых средах менее распространенный процесс, но имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими способами, такими как электролизный, в растворах электролитов. Для выбора конкретного способа принимается во внимание характер обрабатываемых изделий, условия их работы, серийность производства и т.д. В большинстве случаев наиболее выигрышным является борирование в жидких средах. Но если рассматривать борирование в рамках комплексной технологии, то акценты могут смещаться. Например, если проводится предварительная обработка поверхности, ее модификация способами пластической деформации, активацией сверхглубоким проникновением (СПП) порошковых частиц в металлическое тело, электроискровой обработкой, то обработка в порошковых средах становится более эффективным способом борирования. Из-за своей универсальности и широким варьированием состава порошковой среды появляется возможность максимально точно подобрать состав, который с учетом предварительной обработки позволит подобрать оптимальный вариант упрочнения.

В работе рассматривался процесс предварительной активации сверхглубоким проникновением порошковых частиц в стальную матрицу из стали У8 и последующее термодиффузионное низкотемпературное и высокотемпературное борирование в порошковых средах, а также выполнена оценка фактора хрупкости и адгезионных свойств полученных слоев. Углеродистая инструментальная сталь с эвтектоидной структурой, упрочненная борированием, представляет интерес для изготовления, например, деталей золотниковой группы гидрораспределителей, различных накатных роликов, дисковых и продольных пил и т.д. Повышенная хрупкость и опасность скалывания диффузионного слоя на таких сталях является наиболее острой проблемой, сдерживающей активное применение упрочнения. Ос-

новные причины – упругие свойства боридов, плохая адгезия, иглоподобная морфология термодиффузионного слоя, внутренние напряжения.

Материалы и методика исследований. Термодиффузионное борирование проводили в порошковой среде при печном нагреве в герметичном контейнере с плавким затвором. Режим обработки: низкотемпературное борирование – температура 650 °С, время – 4 ч; высокотемпературное – температура 920 °С, время – 4 ч. Для проведения процесса использована шахтная электрическая печь с селитровыми нагревателями.

Активацию проводили динамической обработкой в режиме сверхглубокого проникновения на специальном пушечном ускорителе, позволяющем обрабатывать образцы цилиндрической формы. Обработка проводилась порошковой композицией SiC+Al+ПГ10Н04 при скорости частиц порядка 300–1000 м/с.

В качестве насыщающей смеси для борирования использовали порошковую среду, разработанную сотрудниками научно-исследовательской лаборатории упрочнения стальных изделий филиала БНТУ «НИПИ», полученную металлургическим способом (торговая марка «Besto-Bor»). В состав смеси в качестве основного компонента входил оксид бора и восстановитель (порошок алюминия). Восстановленную смесь размалывали, просеивали, обеспечивая требуемый гранулометрический состав (0,3–0,5 мм), и для дальнейшего использования при термодиффузионном насыщении добавляли активатор AlF_3 .

Результаты исследований. Повышение адгезионной связи и снижение хрупкости являются ключевыми задачами повышения функциональных возможностей диффузионных боридных слоев на углеродистых сталях, в исследуемом случае марки У8. Известно, что борированные слои могут самопроизвольно «шелушиться» под действием термических напряжений, отделяясь фрагментарно, чешуйками по межфазной границе (рисунок 1) или полностью всем диффузионным слоем.

В общем случае адгезия может быть оценена механическими методами, такими как испытание при вдавливании индентером на твердомере Роквелла (шкала С), склерометрией, микроиндентированием, испытанием на ударную вязкость, склонностью к отслаиванию при определении относительного удлинения. Хрупкость боридных

слоев исследуется часто тоже на основе измерения микротвердости и твердости по методу Виккерса алмазной пирамидой, по бальной шкале. Наиболее распространенной и достоверной методикой определения хрупкости боридных диффузионных слоев является методика, основанная на определении напряжения скола, т.е. минимального напряжения в образце, вызывающего скол диффузионного слоя [2].



Рисунок 1 – Внешний вид участков разрушения борированного изделия (керна) за счет термических и структурных напряжений

Исследование адгезии с использованием твердомера вызывает повреждение слоя, прилегающего к месту отпечатка. По площади разрушения, плотности трещин характеризуют хрупкость слоя и, косвенно, адгезионную составляющую.

Известно, что при борировании реализуется, прежде всего, зернограничная диффузия, т.е. бор выступает как горофильный элемент. Структура традиционного слоя иглоподобная, состоящая из зон низкобористой (Fe_2B) и высокобористой (FeB) фаз. В таком слое характерным является присутствие пористости, как правило, на межфазной границе, что способствует описанной ранее высокой хрупкости и низкой адгезии (рисунок 2, *а*). Природа этой пористости – это вакансионный механизм диффузии и затруднительная встречная диффузия железа [2, 3].

Формирующиеся при процессах активации каналные зоны в результате процесса активации являются ничем иным как дефектом кристаллической структуры, которые способны интенсифицировать диффузию по телу зерна, т.е. развить объемную диффузию, что приводит к формированию более компактного слоя (рисунок 2, *б*). Для низкотемпературного борирования, в случае предварительной мо-

дификации, установлено снижение пористости, прирост толщины слоя и снижение хрупкости. Площадь зоны трещинообразования при формировании отпечатка от вдавливания на твердомере Роквелла снизилась на 25–40 %. Как уже отмечалось ранее, такие показатели косвенно свидетельствуют об увеличении адгезионных сил. Если предполагать, что полученные активацией каналы (рисунок 3) в стальной матрице имеют глубину проникновения больше чем толщина слоя, то формирующиеся в процессе термодиффузионного борирования в этих каналах кристаллы обеспечивают более высокую адгезию слоя, поскольку фрагментарно входят в матричный материал на значительно большую глубину, чем сам основной слой.

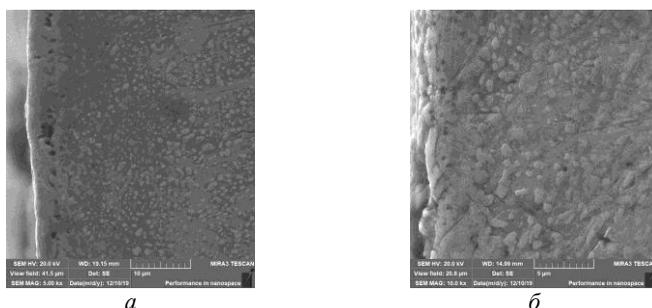


Рисунок 2 – Микроструктура образцов стали У8 после низкотемпературного борирования в порошковой среде Besto-Vor (*а* – без активации; *б* – с активацией)

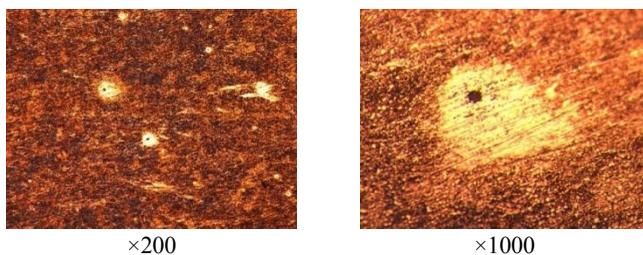


Рисунок 3 – Зоны активации, каналы в стальной матрице

Вокруг каналов, имеющих размер преимущественно около 5–10 мкм, существует зона пониженной травимости, обусловленная присутствием в порошковой композиции никеля, который изменяет

коррозионную стойкость участков микрошлифа и позволяет тем самым более точно определить зоны активации и их распределение. Сами зоны пониженной травимости, по нашему мнению, близки к размеру частиц, которые перемещались в матричном материале. После прохождения частицы порошковой композиции каналы практически полностью схлопываются, что подтверждают данные и других исследований [4].

При анализе результатов высокотемпературного борирования в порошковой среде Besto-Vor с предварительной модификацией СПГ подтверждаются практически все те же выводы, что и для низкотемпературного борирования.

Однако, поскольку при более высокой температуре образуется большая толщина слоя, соответственно более развитая структура слоя, зафиксированы более подробно ее изменения. В частности, изменилась морфология слоя, иглоподобность практически исчезла (рисунок 4, б, в), изменилось соотношение высокобористой и низкобористой фаз, что четко видно на микроструктуре (рисунок 4, а): более темный участок от поверхности микрошлифа – высокобористая фаза FeB, а светлый участок ниже – низкобористая фаза Fe₂B. МикродюрOMETРИЧЕСКИЙ анализ такой вывод полностью подтверждает (рисунок 5).

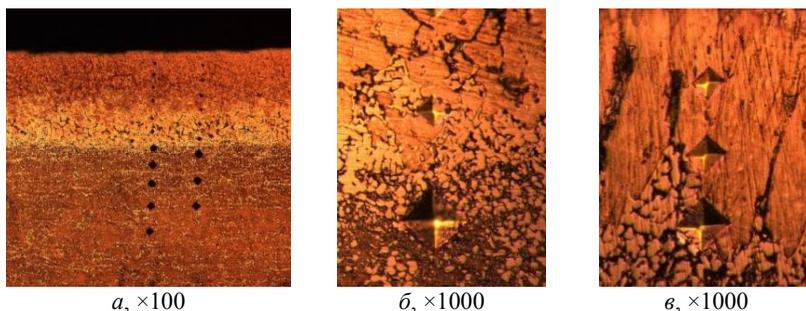
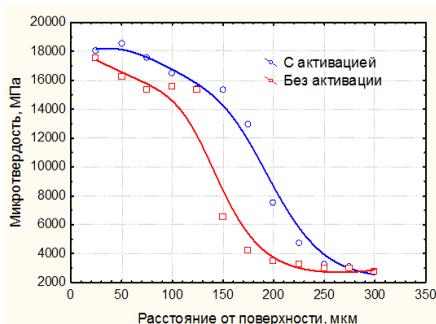
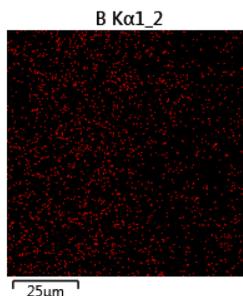


Рисунок 4 – Микроструктура образцов стали У8 после высокотемпературного борирования в порошковой среде Besto-Vor с предварительной активацией динамической прошивкой (а, б) и без предварительной активации (в)



а



б

Рисунок 5 – Распределение микротвердости после высокотемпературного борирования с предварительной активацией динамической прошивкой (а); изображение в характеристическом излучении, карта распределения бора (б)

Выводы. В результате выполненной работы исследованы особенности структурообразования диффузионных слоев, полученных по комплексной технологии, включающей термодиффузионное низкотемпературное и высокотемпературное борирование с предварительной обработкой, заключающейся в динамической прошивке порошковой композицией поверхности образца. В обоих вариантах борирования при предварительной модификации СПГ порошковой композицией происходит прирост толщины слоя на 20–50 %, слой получается более компактный с меньшим количеством пор в подборидной зоне, снижается хрупкость и повышается адгезия, определенная по отпечатку от вдавливания алмазного наконечника твердомера. Площадь зоны трещинообразования при формировании отпечатка от вдавливания на твердомере Роквелла снижается на 25–40 %.

Список литературы

1. **Eric J. Mittemeijer.** Thermochemical surface engineering of steels / Eric J. Mittemeijer, Marcel A. J. Somers // Woodhead publishing series in metals and surface engineering: Number 62. – Elsevier. 2015. – 792 p.
2. **Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.

3. M. Kulka. Current trends in boriding: Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019. – 282 c.

4. The physics of superdeep penetration phenomenon / J. Owsik, K. Jach, S. Usherenko [and other] // *Jornal of Technical Physics, J. Tech. Phys.*, 2008. – Vol. 49. – № 1. – P. 3–25.

References

1. Eric J. Mittemeijer. Thermochemical surface engineering of steels / Eric J. Mittemeijer, Marcel A. J. Somers // Woodhead publishing series in metals and surface engineering: Number 62. – Elsevier. 2015. – 792 p.

2. Krukovich, M.G. *Plastichnost' borirovannyh sloev* [Plasticity of borated layers] / M.G. Krukovich, B.A. Prusakov, I.G. Sizov. – Moscow: FIZMATLIT Publ., 2010. – 384 p.

3. M. Kulka. Current trends in boriding: Techniques: Springer Nature, Switzerland, 2019. – 282 c.

4. The physics of superdeep penetration phenomenon / J. Owsik, K. Jach, S. Usherenko [and other] // *Jornal of Technical Physics, J. Tech. Phys.*, 2008. – Vol. 49. – № 1. – P. 3–25.

Поступила 28.08.2020

Received 28.08.2020