

УДК 621.647

А. А. Брежнев, к.т.н., **Л. Г. Петрова**, д.т.н., проф., **В. А. Александров**, к.т.н., доц., Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ)

Повышение механических характеристик стальных изделий комбинированными методами борирования

В работе исследованы процессы борирования сталей в условиях лазерного нагрева, шликерным методом и комбинированные процессы многокомпонентного насыщения, в том числе процессы шликерноборирования в сочетании с азотированием.

Ключевые слова: борирование, азотирование, модифицированный слой, легирование, упрочнение, фазовый состав, структура.

A. A. Brezhnev, L. G. Petrova, V. A. Alexandrov

Improving Mechanical Properties of Steel Products Combined Methods Boriding

We studied the processes boriding steels in terms of laser heating, slip by and combined multicomponent saturation processes, including processes slip boriding combined with nitriding.

Keywords: boriding, nitriding, modified layer, alloying, hardening, phase composition, structure.

На настоящем этапе развития техники все более актуальной становится задача развития эффективных методов упрочнения металлов и сплавов для обеспечения качественно новых высоких свойств. Обеспечение заданных эксплуатационных свойств изделий различного назначения в большой степени определяется составом и строением их поверхностного слоя, так как в подавляющем большинстве случаев именно поверхность испытывает повышенные нагрузки: подвергается износу, контактными воздействиям, в наибольшей степени разрушается вследствие коррозии.

Одним из наиболее эффективных способов ХТО для получения износостойких и коррозионностойких слоев на металлах является диффузионное борирование – насыщение поверхностного слоя металлов бором при нагревании в боросодержащей среде [1, 2]. Существуют различные способы насыщения металлов бором: борирование проводят в порошковых смесях, в расплавах солей и окислов, в газовых средах и из паст.

Простым и эффективным способом является *шликерный метод*, который заключается в насыщении поверхности из суспензий (паст), состоящих из жидкой и твердой фаз. Твердая фаза содержит порошок легирующего элемента или химических соединений, в качестве жидкой фазы используется органическое связующее вещество. Данный метод позволяет осуществлять многокомпонентное борирование в сочетании с другими элементами [3].

Лазерный нагрев существенно ускоряет диффузионные процессы, поскольку производится, как правило, в режиме локального оплавления. Однако формирование легированных зон на поверхности происходит дискретно, как при импульсном, так и при непрерывном режимах обработки [4, 5]. Показано [6], что для некоторых изделий из низко- и среднеуглеродистых сталей структура поверхности с дискретно упрочненными зонами лазерного легирования при их оптимальном распределении обеспечивает повышение износостойкости по принципу Шарпи. Предприняты попытки получения более однородных легированных слоев путем последующего диффузионного отжига лазерно-легированных изделий [7]. При этом снижается суммарная длительность процесса для достижения заданной концентрации элемента в поверхностном слое.

Методика проведения исследований

В настоящей работе исследовали процессы борирования сталей в условиях лазерного нагрева, шликерным методом и комбинированные процессы многокомпонентного насыщения, в том числе процессы шликерного борирования в сочетании с азотированием.

Исследования проводили на сталях 20, 40, 40Х и У8, в качестве модельного материала исследовали армко-железо.

Лазерное легирование опытных образцов проводили на импульсном лазере «Квант 15» с энергией импульса до 20 Дж в защитной атмосфере аргона. Легирование осуществляли из суспензии, состоящей из порошка легирующего элемента (аморфного бора), чистого углерода и связующего вещества. Количество суспензии, наносимой на поверхность образцов, контролировали весовым методом.

Основными параметрами поверхностного легирования с использованием лазерного нагрева являются энергия импульса лазерного излучения, степень его расфокусированности и количество наносимой насыщающей обмазки. Эти параметры определяют строение и геометрию зон упрочнения, а также их свойства [5].

При борировании шликерным методом используется боросодержащий порошок твердой фазы шликера: при однофазном борировании - порошок буры и оксида бора $60\% \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 40\% \text{B}_2\text{O}_3$, при боросилицировании – смесь $60\% \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 40\% \text{SiC}$, при бороалитировании – смесь $98\% [70\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% (40\% \text{B}_2\text{O}_3 + 60\% \text{Al})] + 2\% \text{NaF}$. Исследовали также

многокомпонентное насыщение сталей бором и углеродом из обмазок карбида бора (96% по массе) с добавлением активаторов Na_2CO_3 и CaCO_3 (по 2% каждого). Борирование проводили при температуре 1000°C и времени насыщения 6ч.

Результаты и их обсуждение

В армко-железе при лазерном борировании при увеличении концентрации бора принципиально возможно образование структур нескольких типов (табл. 1), различающихся, соответственно, фазовым составом и твердостью, как показателем упрочнения.

Таблица 1

Фазовый состав участков борированного слоя и их микротвердость

п/п	Фазовый состав	Тип структуры	Твердость, Н, МПа
	$\text{Fe}_\alpha(\text{B})$	Крупные равноосные зерна	3700
I	$\text{Fe}_\alpha(\text{B})+\text{Fe}_3\text{B}$	Мелкие равноосные зерна	4300
II	Эвтектика $[\text{Fe}_\alpha(\text{B})+\text{Fe}_3\text{B}]$	Дендритная	16000...16800
V	Однофазная Fe_2B	Столбчатая	14500
	Двухфазная $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$	Дендритная	16800...18900
I	Однофазная FeB	Столбчатая	18900...20100

Для достижения более равномерного распределения бора в поверхностном слое может быть применен отжиг лазерно-легированного образца (дополнительное радиационное борирование). При этом сохраняется боридная зона со структурами столбчатых боридов Fe_2B и дендритами $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ толщиной 150 мкм, образуется переходная зона толщиной 50 мкм и происходит отпуск мартенсита. Это является предпосылками устранения возможной хрупкости слоя.

Исследования процессов борирования с использованием лазерного нагрева позволили установить, что путем варьирования вариантов, режимов обработки и толщины обмазки можно получать легированные слои с различным фазовым составом и структурой, а, следовательно, и с различными свойствами. Для повышения износостойкости целесообразно проводить обработку без перекрытия, что создает морфологию поверхности, удовлетворяющую принципу Шарпи. Для достижения коррозионной стойкости поверхностного слоя необходимо проводить обработку с перекрытием, что связано с дополнительными временными и энергетическими затратами и не всегда экономически оправдано.

Для получения коррозионностойких покрытий эффективным является проведение борированияшликерным методом, поскольку в результате такой обработки получается равномерный слой по всей поверхности.

Лазерное борирование также позволяет повысить стойкость поверхности стали 40Х к истиранию в различных условиях. Наилучшая износостойкость наблюдается при образовании двухфазной структуры $Fe_2B + FeB$. Показатели износостойкости зависят от площади упрочненной поверхности. Так, наилучшей стойкостью к задиру обладают образцы с 60% относительной упрочненной площадью. При испытании неупрочненного образца заедание происходило при давлении в сопряжении 5,5 МПа, тогда как в результате лазерного легирования бором эта величина возросла до 10,5 МПа. При этом трещин и скалывания упрочненных зон не наблюдалось. Дальнейшее увеличение относительной упрочненной площади приводит к снижению несущей способности поверхности.

Лазерное легирование бором позволяет уменьшить скорость изнашивания в процессе стабилизированного трения. Так, при 75%-ном упрочнении поверхности, при давлении в сопряжении 2,79 МПа и скорости скольжения 1,35 м/с скорость установившегося изнашивания составляла $0,93 \cdot 10^{-4}$ мкм/м, что в 1,6 раз ниже по сравнению со скоростью изнашивания неупрочненного образца ($1,5 \cdot 10^{-4}$ мкм/м).

Многокомпонентное борирование из обмазок позволяет получить слои с принципиально новыми свойствами. Так, боросилицированные слои на стали, полученные шликерным методом, обладают наивысшей стойкостью в условиях гидроабразивного износа по сравнению с многими другими одно- и многокомпонентными покрытиями.

С точки зрения повышения коррозионной стойкости является предпочтительным получение на поверхности сплошного слоя боридов толщиной более 100 мкм. Однако сплошной боридный слой наряду с высокой твердостью обладает хрупкостью. Проблема снижения хрупкости борированного слоя может быть решена при сочетании борирования с легированием другими элементами, такими как, хром, титан, никель, азот и др.

При азотировании боридных слоев в активизирующих обмазках можно добиться формирования тройного соединения бора, углерода и азота, так называемый, технический карбонитрид бора. Его структура состоит из тонких зерен карбида и нитрида, разделенных пленками карбонитрида, что придает этому материалу свойства, отличные от свойств карбида и нитрида бора.

Выводы

1. Лазерное легирование бором увеличивает многообразие возможных структур борированного слоя по сравнению с традиционными способами борирования. Фазовым составом слоя можно управлять путем регулирования трех основных параметров обработки: значением энергии

импульса лазерного излучения, количеством наносимой боросодержащей обмазки и степенью расфокусированности лазерного луча.

2. Лазерное борирование приводит к существенному упрочнению модифицированного слоя, при этом твердость зон легирования определяется, главным образом, твердостью самих боридов. При лазерной обработке поверхности без перекрытия зон легирования наблюдается повышение износостойкости углеродистой и низколегированной сталей в соответствии с принципом Шарпи.

3. Хрупкость высокопрочных зон лазерного легирования можно уменьшить путем нагрева борированных сталей (радиационное борирование), который выравнивает и увеличивает площадь упрочненной поверхности.

4. Шликерное борирование из обмазок позволяет регулировать фазовый состав боридного слоя и переходной зоны, микротвердость и ее распределение путем варьирования состава насыщающей смеси.

5. При комбинированной обработке, включающей шликерное борирование и азотирование, а также при многокомпонентном легировании из обмазок формируются модифицированные слои, обладающие коррозионной стойкостью в ряде кислот, а также стойкостью к образованию солевых отложений.

Список литературы

1. **Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.** Химико-термическая обработка металлов. – М.: Металлургия. –1985. – 256 с.

2. **Ворошнин Л.Г.** Борирование промышленных сталей и чугунов: справочное пособие. – Мн.: «Беларусь», –1981. – 205 с.

3. **Петрова Л.Г., Александров В.А., Жаров Г.М.** Поверхностное упрочнение сталей методами химико-термической обработки в многокомпонентных средах// Упрочняющие технологии и покрытия, №6, – 2012, – С. 18-22.

4. **Рыкалин Н.Н.** Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник./ Н.Н. Рыкалин Н.Н и др. – М.: Машиностроение.–1985. – 496 с.

5. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. / А.Г. Григорьянц – М.: Машиностроение, –1989. – 304 с.

6. **Чудина О.В., Брежнев А.А.** Поверхностное легирование углеродистых сталей при лазерном нагреве, Упрочняющие технологии и покрытия, № 4, – 2010, – С. 10-16.

7. **Чудина О.В., Александров В.А., Брежнев А.А.** Разработка двухстадийной технологии металлизации конструкционных сталей с использованием лазерного и печного нагрева// Упрочняющие технологии и покрытия, №6, – 2012, – С. 32-36.