

Дмитрий Амирович Ишмаматов^{1,2*}, Алла Сергеевна Помельникова¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва, Россия

²Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», г. Москва, Россия

*ishmametv@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ОКСИДОВ РЗЭ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА БОРИРОВАННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТАЛИ ВКС-5

Исследовано влияние оксидов редкоземельных элементов (лантана, иттрия, скандия) на свойства борированных слоев стали ВКС-5. Установлено, что добавки увеличивают глубину слоев, снижают микротвердость и хрупкость. Оксид лантана усиливает зернограничную диффузию, оксид скандия уменьшает дисперсность боридов в переходном слое. Полученные результаты подтверждают эффективность использования РЗЭ для улучшения функциональных характеристик борированных слоев.

Ключевые слова: борирование, редкоземельные элементы, микроструктура, функциональные свойства, оксид лантана, оксид иттрия, оксид скандия, диффузия, борированные слои.

Dmitry A. Ishmametov, Alla S. Pomelnikova

INFLUENCE OF RARE EARTH OXIDE ADDITIVES ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF BORIDED LAYERS OBTAINED ON VKS-5 STEEL

The influence of rare earth oxides (lanthanum, yttrium, scandium) on the properties of borided layers of VKS-5 steel has been investigated. It was found that these additives increase the depth of the layers and reduce microhardness and brittleness. Lanthanum oxide enhances grain boundary diffusion, while scandium oxide decreases the dispersity of borides in the transition layer. The results confirm the effectiveness of rare earth oxides in improving the functional characteristics of borided layers.

Key words: boriding, rare earth elements, microstructure, functional properties, lanthanum oxide, yttrium oxide, scandium oxide, diffusion, borided layers.

Борирование — перспективный метод химико-термической обработки, позволяющий получать слои с высокой твердостью. Однако их высокая хрупкость существенно ограничивает применение этого метода [1]. Одним из

наиболее эффективных способов снижения хрупкости является введение в расплав дополнительных элементов, что позволяет избежать дорогостоящих операций, таких как лазерная или электронно-лучевая обработка [2,3].

Исследования влияния редкоземельных элементов (РЗЭ) и их соединений на процесс борирования в литературе представлены недостаточно. Известно, что добавки РЗЭ, такие как лантан, церий и неодим, способны существенно интенсифицировать процесс борирования, увеличивая глубину слоев и снижая их хрупкость [4,5].

Работы [6-8] показывают, что добавка оксида лантана или иттрия в расплав при жидкостном борировании повышает глубину борированных слоев и уменьшает их хрупкость, а в некоторых случаях изменяет фазовый состав. Аналогичные результаты были получены для оксида церия при порошковом борировании, что подтверждает его положительное влияние на морфологию и свойства слоев, особенно на стали Н13 [9].

Целью данного исследования является изучение влияния добавок оксидов РЗЭ (лантана, иттрия, скандия) на функциональные свойства борированных слоев, полученных на стали ВКС-5.

Выбор оксидов редкоземельных элементов обусловлен их способностью влиять на процесс диффузии и формировать более глубокие и менее хрупкие борированные слои. Эти элементы также обладают высокой термической стабильностью и химической инертностью, что способствует оптимизации фазового состава и механических свойств борированных слоев.

Сталь ВКС-5 выбрана в качестве объекта исследования благодаря её высокой прочности и жаростойкости, что делает её перспективной для использования в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред. Изучение воздействия оксидов РЗЭ на борированные слои, полученные на стали ВКС-5, позволит выявить возможности её модификации для повышения эксплуатационных характеристик.

Образцы исследуемых сталей подвергались жидкостному безэлектролизному борированию в расплаве на основе тетрабората натрия и карбида бора с добавками оксидов РЗЭ в количестве 5% масс. Борирование проводилось при температуре 1000 °С в течение 8 ч. После борирования образцы охлаждали на воздухе.

Исследование микроструктуры образцов проводилось на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-iSP100. Исследование распределения микротвердости по сечению образцов проводилось на микротвердомере EMCO-Test DuraScan 20 при нагрузке 0,981 Н.

На рис. 1 представлены изображения микроструктур борированных слоев, полученных с помощью электронной микроскопии в расплаве без добавок оксидов РЗЭ и с добавками в количестве 5 % масс.

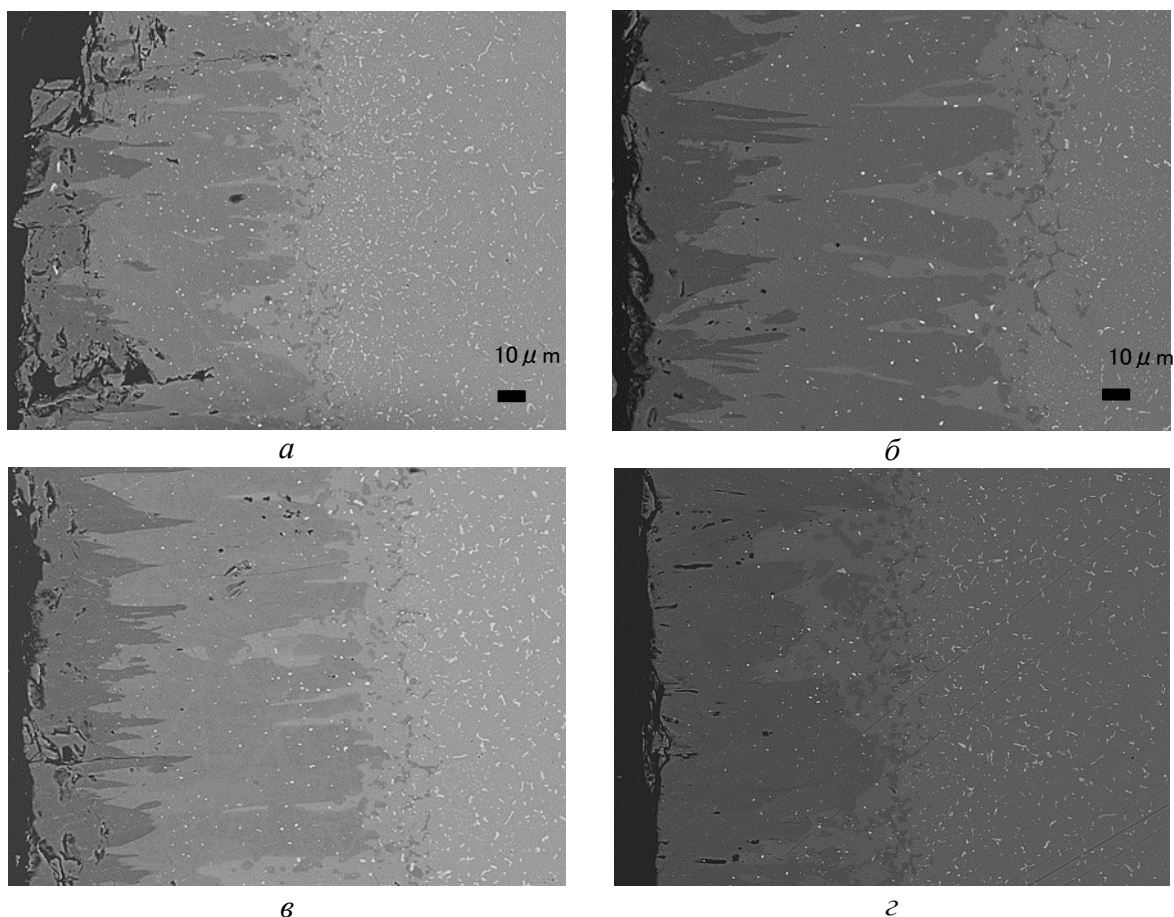


Рис. 1. Электронно-микроскопическое исследование микроструктуры борированных слоев на стали ВКС-5: *а* – без добавления оксидов РЗЭ, *б* – с добавлением 5 % масс. оксида лантана, *в* – с добавлением 5 % масс. оксида иттрия, *г* – с добавлением 5 % масс. оксида скандия

Анализируя данные, представленные на рис. 1, можно сделать вывод, что во всех случаях образуются компактные борированные слои. Однако морфология слоев значительно варьируется в зависимости от состава расплава. Борированные слои, полученные на стали ВКС-5 без добавок оксидов РЗЭ, демонстрируют большое количество сколов и трещин, свидетельствующих о повышенной хрупкости. Добавление оксидов РЗЭ существенно улучшает структурные характеристики: количество дефектов заметно снижается.

В частности, оксиды лантана и иттрия формируют характерное игольчатое строение борированных слоев. В то же время добавка оксида скандия приводит к размытию игольчатой структуры, делая её менее выраженной. Кроме того, лантан и иттрий значительно увеличивают глубину борированных слоев, тогда как при добавлении скандия этот параметр остается практически неизменным.

Наиболее значимый эффект наблюдается при добавлении оксида лантана: процесс зернограничной диффузии бора становится ярко выраженным, с формированием сетки боридной фазы по границам зерен в переходной зоне. Это свидетельствует о заметном ускорении диффузии бора вглубь стали под воздействием РЗЭ. В то же время добавление оксида скандия

снижает дисперсность боридов, что может быть полезным для формирования более однородной структуры в переходном слое.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения микротвердости по сечению образцов стали ВКС-5.

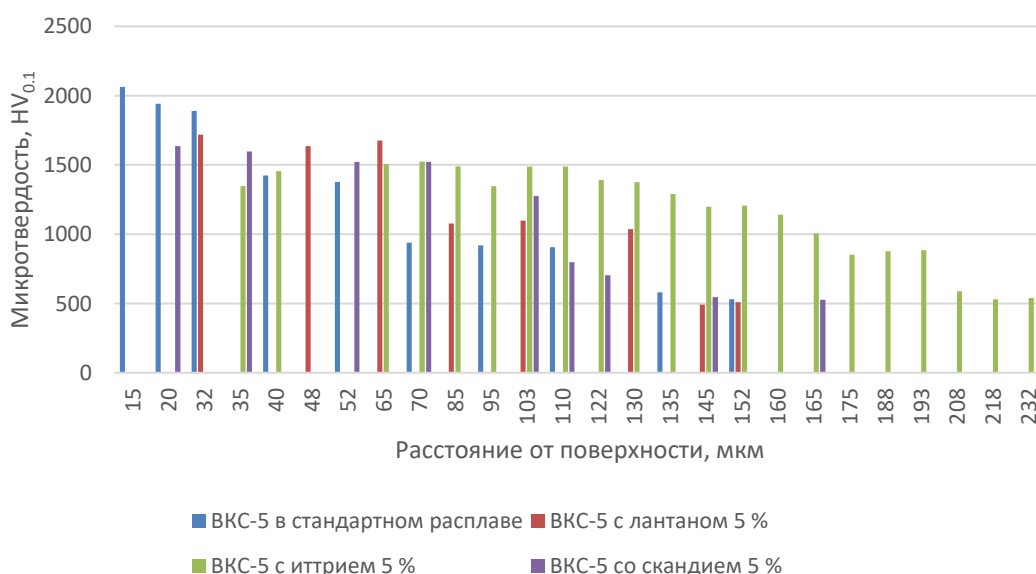


Рис. 2. Гистограмма распределения микротвердости по сечению образцов стали ВКС-5

Анализ рис. 2 показал, что добавление оксидов РЗЭ во всех случаях приводит к снижению микротвердости. Значения микротвердости для борированных слоев, полученных в расплаве без добавок оксидов РЗЭ, составили порядка 1900-2100 HV0.1. Добавка оксида лантана позволила снизить микротвердость до значений порядка 1600-1700 HV0.1, добавка оксида иттрия – до 1450-1500 HV0.1, добавка оксида скандия – до 1550-1650 HV0.1. Подобное снижение микротвердости позволяет значительно снизить микрохрупкость борированных слоев, при сохранении значений микротвердости на уровне выше 1500 HV0.1, что превосходит распространенные методы химико-термической обработки.

Добавки оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ) существенно влияют на функциональные свойства борированных слоев, полученных на стали ВКС-5.

Введение оксидов лантана и иттрия в расплав для борирования увеличивает глубину борированных слоев, в то время как оксид скандия оказывает незначительное влияние на данный параметр.

Использование оксида лантана способствует ярко выраженной зернограницной диффузии бора. Добавка оксида скандия снижает дисперсность боридов в переходной зоне, что способствует формированию более однородной структуры.

Применение оксидов РЗЭ позволяет снизить микротвердость борированных слоев, сохраняя их высокие эксплуатационные характеристики, что способствует уменьшению хрупкости слоев.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования оксидов РЗЭ для модификации борированных слоев, что может расширить их применение в условиях высоких нагрузок и агрессивных сред.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крукович М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. М.: Физматлит, 2010. 240 с.
2. Mei S. Compound boronizing and its kinetics analysis for H13 steel with rare earth CeO_2 and Cr_2O_3 / S. Mei, Y. Zhang, Q. Zheng, Y. Fan, B. Lygdenov, A. Guryev // Applied Sciences (Switzerland). 2022. V. 12, № 7. P. 3636. DOI: 10.3390/app12073636.
3. Yuan K. A study on RE boronizing process in a titanium alloy / Yuan K. // Journal of Thermal Spray Technology. 2021. V. 30. № 4. P. 977–986. DOI: 10.1007/s11666-021-01157-3.
4. Состав для борирования стальных изделий из расплава: пат. SU 1617046 А СССР. № 1093727 / Дозморов С. В., Бахмат В. В., Антипов И. А., Лозморова Е. В., Брынский А. А., Копачев В. Я.; заявл. 20.06.88; опубл. 30.12.90. Бюл. № 48.
5. Расплав для борирования стальных изделий: пат. SU 1093727 А СССР. № 533671 / Ковалевский А. В., Присмотров Е. П., Савельев Ю. Д., Сорока В. В.; заявл. 20.10.82; опубл. 23.05.84. Бюл. № 19.
6. Ишмаметов Д. А. Изучение структуры и свойств борированных слоев, полученных на разнолегированных сталях методом жидкостного безэлектролизного борирования в расплаве с добавкой оксида иттрия / Д. А. Ишмаметов, А. С. Помельникова // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 11. С. 511–520.
7. Ишмаметов Д. А. Влияние оксида лантана на структуру и свойства борированных слоев, полученных на низкоуглеродистой сложнолегированной стали / Д. А. Ишмаметов, А. С. Помельникова, С. Б. Румянцева // Технология металлов. 2024. № 5. С. 2–9.
8. Ишмаметов Д. А. Исследование влияния оксида лантана на кинетику, морфологию и свойства борированных слоев, полученных жидкостным методом на сталях с разным содержанием углерода стали / Д. А. Ишмаметов, А. С. Помельникова, С. Б. Румянцева // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 4. С. 174–180.
9. Zhang Y.W. Effects of CeO_2 content, boronizing temperature and time on the microstructure and properties of boronizing layer of H13 steel / Y.W. Zhang, Q. Zheng, Y. Fan, S.Q. Mei, B. Lygenov, A. Guryev // Mechanical and Corrosion Properties. Series A, Key Engineering Materials. 2021. V. 45. P. 22. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.45.22.

REFERENCES

1. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of Borided Layers. Moscow: Fizmatlit, 2010. 240 p.

2. Mei S. Compound boronizing and its kinetics analysis for H13 steel with rare earth CeO_2 and Cr_2O_3 / S. Mei, Y. Zhang, Q. Zheng, Y. Fan, B. Lygdenov, A. Guryev // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. V. 12, № 7. P. 3636. DOI: 10.3390/app12073636.
3. Yuan K. A study on RE boronizing process in a titanium alloy / Yuan K. // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. V. 30. № 4. P. 977–986. DOI: 10.1007/s11666-021-01157-3.
4. Composition for boriding of steel products from melt: pat. SU 1617046 A SSSR. No. 1093727 / Dozmorov S. V. V., Bakhmat V. V., Antipov I. A., Lozmorova E. V., Brynskiy A. A. V. V., Brynskiy A. A., Kopachev V. Ya.; avt. 20.06.88; published 30.12.90. Bulletin No. 48.
5. Melt for boriding of steel products: pat. SU 1093727 A SSSR. No. 533671 / Kovalevsky A. V., Priscmorov E. P., Saveliev Yu. P., Saveliev Yu. D., Soroka V. V.; applic. 20.10.82; published 23.05.84. Bulletin No. 19.
6. Ishmametov, D. A. Study of structure and properties of borated layers obtained on multi-alloyed steels by liquid electrolysis-free boriding in the melt with the addition of yttrium oxide / D. A. Ishmametov, A. S. Pomelnikova // *Blanks in mechanical engineering*. 2023. T. 21, № 11. C. 511-520.
7. Ishmametov, D. A. Influence of lanthanum oxide on the structure and properties of borated layers obtained on low-carbon complex-alloyed steel / D. A. Ishmametov, A. S. Pomelnikova, S. B. Rumyantseva // *Metal Technology*. 2024. № 5. C. 2-9.
8. Ishmametov, D. A. Investigation of the influence of lanthanum oxide on the kinetics, morphology and properties of borated layers obtained by liquid method on steels with different steel carbon content / D. A. Ishmametov, A. S. Pomelnikova, S. B. Rumyantseva // *Strengthening technologies and coatings*. 2024. T. 20, № 4. C. 174-180.
9. Zhang Y.W. Effects of CeO_2 content, boronizing temperature and time on the microstructure and properties of boronizing layer of H13 steel / Y.W. Zhang, Q. Zheng, Y. Fan, S.Q. Mei, B. Lygenov, A. Guryev // *Mechanical and Corrosion Properties. Series A, Key Engineering Materials*. 2021. V. 45. P. 22. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.45.22.