

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТОЯНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ФАЗ В Cr-Mn-Ni-Si-B СТАЛИ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА

Описан характер изменения микроструктуры высоколегированной Cr-Mn-Ni-Si-B стали ледебуритного класса при плазменной обработке с частичным оплавлением поверхности. Установлено, что плазменное оплавление оказывает благоприятное модифицирующее воздействие, приводя к существенному диспергированию карбидных фаз и росту микротвердости эвтектики.

Ключевые слова: плазма, оплавление, карбиды, бориды, эвтектика, микротвердость.

Введение

Стали ледебуритного класса находят широкое применение в качестве материала для изготовления инструмента и деталей, подвергающихся интенсивному изнашиванию [1]. Эти стали отличаются присутствием в своей структуре карбидной эвтектики, что делает их схожими с белыми чугунами [2, 3]. Наличие в сталях эвтектики при относительно невысоком содержании углерода обусловлено введением значительного количества хрома (стали типа X12) или вольфрама (молибдена) (быстрорежущие стали P18, P6M5 и др.), что смещает точку E диаграммы Fe-C в сторону меньшей концентрации углерода. Как правило, ледебуритные стали применяются в состоянии объемной термической обработки, протекающей по многостадийным схемам. Для инструмента из низколегированных сталей достаточно успешно используется упрочняющая поверхностная обработка высококонцентрированными источниками нагрева (лазерный и электронный лучи, плазма), приводящая к повышению износостойкости за счет структурного модифицирования поверхностных слоев [4–8]. В тоже время, применение методов поверхностной инженерии к высоколегированным сталям ледебуритного класса остается мало изученным.

Целью данной работы являлось исследование структурных превращений в сложнотермической Cr-Mn-Ni-Si-B стали ледебуритного класса под влиянием поверхностной закалки плазменной струей постоянного действия.

Материал и методики исследований

В качестве материала исследований использовали литую сталь, химический состав которой приведен в табл. 1.

Таблица 1 – Химический состав исследованной стали

Содержание, масс. %					
C	Cr	Mn	Si	Ni	B
1,70	12,98	3,29	3,95	1,00	1,22

Сталь была выплавлена в индукционной 20-кг печи и залита в металлическую изложницу. Порезку слитка осуществляли анодно-механическим способом, доводку образцов до конечных размеров – шлифовкой. Образцы размерами 5×12×25 мм подвергли плазменной обработке поверхности с применением плазмотрона косвенного действия [3] при следующих параметрах: диаметр сопла генератора – 6 мм, длина дуги – 150 мм, плазмообразующий газ – аргон (расход 2 м³/ч), питание постоянным током 230–250 А при рабочем напряжении 55–60 В. Плазменную обработку проводили при скорости перемещения плазменной струи 0,25 м/мин, что при указанных выше параметрах обеспечивает нагрев поверхности до 1500–1550 °С [9].

В работе применен металлографический анализ с помощью оптического микроскопа (ОМ) Nikon Eclipse M200 и электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) JSM-6510 LV, оснащенного энергодисперсионным микроанализатором INCA PentaFET X3 (Oxford Instruments Ltd). Фазовый состав определяли с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku с Cu-K_α-излучением. Микротвердость структурных составляющих измеряли на твердомере «Shimadzu HNV-2» при нагрузке 50 г с усреднением значений 5–7 замеров, выполненных в конкретной области образца.

Экспериментальная часть и анализ полученных результатов

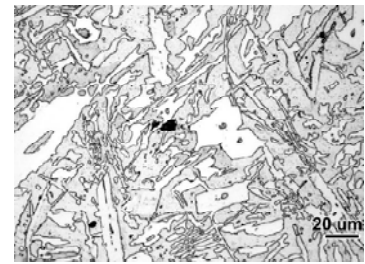
В литом состоянии микроструктура стали представляла собой эвтектику и крупные первичные включения двух типов – неправильной гексагональной и прямоугольной форм (рис. 1 а). Гексагональные включения имеют в сечении 10...40 мкм, в длину – до 170 мкм; сторона прямоугольных сечений – 8...30 мкм. Эвтектические включения имеют вытянутую форму при следующих размерах: толщина – 2...5 мкм, длина – до 30 мкм.

Идентификация фаз с помощью рентгеноструктурного анализа показала наличие в стали карбидов M₇C₃,

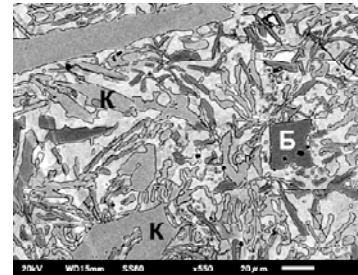
боридов Cr_5B_6 , а также альфа- и гамма-твердых растворов железа (рис. 2). Судя по интенсивности пиков на рентгенограмме, среди включений преобладают карбиды M_7C_3 . Анализ микроструктуры с помощью СЭМ в режиме back-scattered (BEC) (рис. 1 б) позволил выявить неоднородность эвтектических и первичных включений по химическому составу, что визуально выразилось в различной окраске включений. Более светлыми являются включения, обогащенные химическими элементами с большим атомным номером (железо, хром), а более темными – включения, содержащие «легкие» элементы с малым атомным номером (в частности, бор). С учетом этого можно полагать, что светлые включения гексагональной формы являются первичными карбидами хрома M_7C_3 , а темные прямоугольные включения – первичными боридами хрома Cr_5B_6 . Как следует из рис. 1 б, среди эвтектических включений определенная часть имеет более темную окраску, т. е. они обогащены бором. Следовательно, сталь содержит эвтектику двух типов – «аустенит + M_7C_3 » и «аустенит + Cr_5B_6 ». Микротвердость первичных карбидов хрома колеблется от 1245 до 1738 HV_{50} (средн. 1469,4 HV_{50}), микротвердость эвтектики – 398...687 HV_{50} (средн. 540,3 HV_{50}).

Плазменная обработка привела к частичному оплавлению поверхности образца на глубину до 250...300 мкм (рис. 3). По сравнению с литым состоянием на рентгенограмме оплавленного образца появилось большее количество пиков карбида M_7C_3 и борида Cr_5B_6 ; также появился пик, который можно отнести к бориду железа FeB .

В результате плазменной обработки у поверхности сформировался модифицированный слой, резко отличающийся по своему строению от основной структуры. В этом слое сохранились отдельные крупные первичные карбиды и бориды, однако произошло их частичное оплавление с округлением граней (рис. 4, а).



а



б

Рис. 1. Микроструктура стали в литом состоянии:

а – ОМ-изображение, б – СЭМ-изображение в BEC-режиме (К – карбид, Б – борид)

Кроме того, в структуре возникли мелкие первичные карбиды (показаны на рис. 3, б стрелками); их размер составил: в сечении – 2...6 мкм, в длину – не более 30 мкм. Изменилось строение эвтектики: она стала намного дисперснее, резко возросла плотность карбидных (боридных) включений в пределах эвтектических колоний, а размеры включений уменьшились на порядок относительно литого состояния: их толщина составила 0,15...0,30 мкм, длина – 2...4 мкм. Произошла резкая дифференциация эвтектических участков по степени травимости на светлые и темные участки (рис. 4).

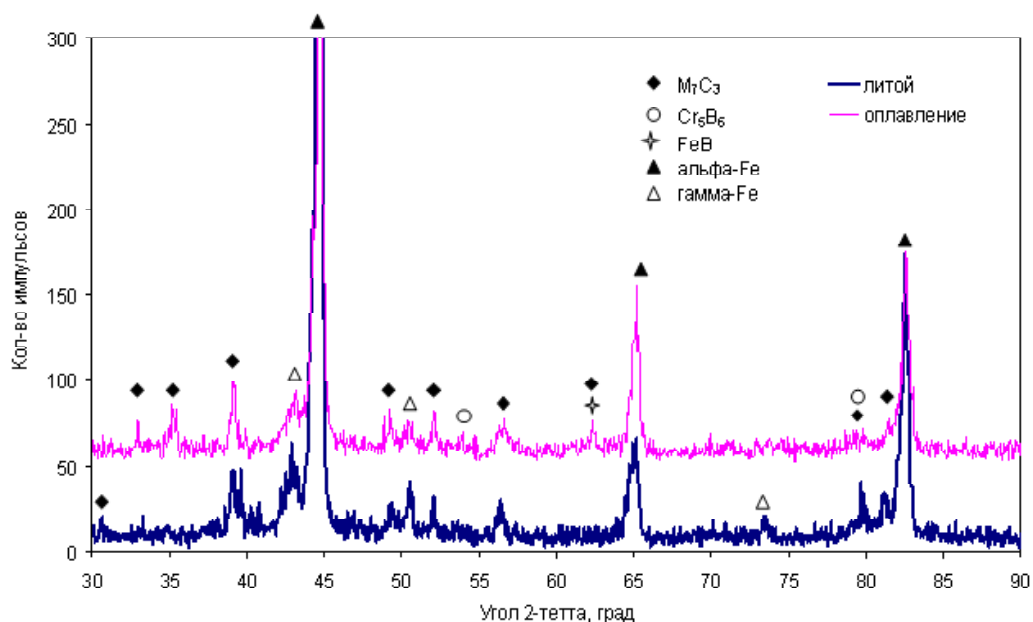
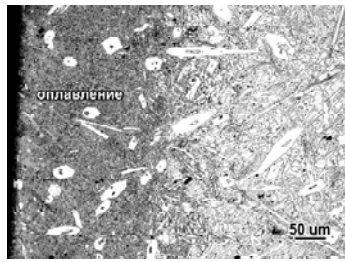
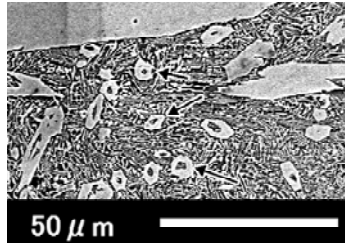


Рис. 2. Дифрактограммы исследованной стали в литом и оплавленном состояниях



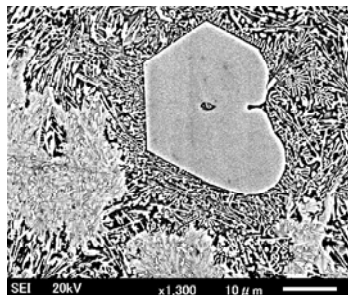
a



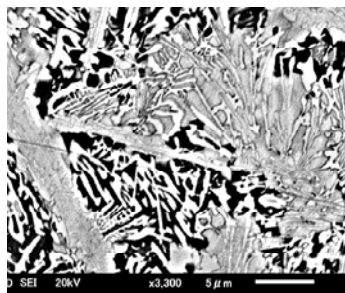
б

Рис. 3. Микроструктура оплавленного поверхностного слоя:

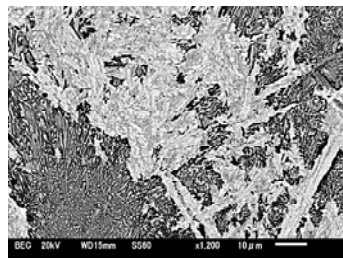
a – общий вид оплавленной зоны и исходной структуры;
б – мелкие первичные карбиды, возникшие после оплавления



a



б



в

Рис. 4. Строение карбидной эвтектики в пределах оплавленного слоя:

a, б – SEI-изображения, *в* – BEC-изображение

Изображение во вторичных электронах (SEI) показывает, что в светлых участках карбиды имеют вытянутое веерообразное, а в темных – скелетообразное строение (рис. 4 *a, б*). В первом случае матрица практически не травится, во втором – наблюдается ее сильное растравливание, вследствие чего она приобретает темный оттенок. Исследование этих же участков в отраженных электронах (BEC-режим) позволяет видеть, что светлые участки (сохраняющие светлую окраску и на BEC-изображениях) обогащены элементами, имеющими более высокий атомный номер. В свою очередь, темные участки обогащены элементами с меньшим атомным номером. Предположительно, в темных участках преимущественно сконцентрировался кремний ($Z = 14$) и бор ($Z = 5$), а в светлых – никель ($Z = 28$), железо ($Z = 26$) и хром ($Z = 24$). Формированию двух типов эвтектики в оплавленной зоне, очевидно, предшествовало расслоение жидкости по химическому составу, вызванное исходным неравномерным распределением элементов в карбидах и матрице, и, возможно, процессами гидродинамического давления со стороны плазменной струи.

Микротвердость «светлой» эвтектики составила 568...848 HV_{50} (среднее значение – 698,9 HV_{50}), «темной» – 649-822 HV_{50} (среднее значение – 731,3 HV_{50}). Таким образом, произошло существенное повышение микротвердости эвтектической составляющей по сравнению с исходной структурой. Это может быть связано как с диспергированием эвтектических карбидов, так и с увеличением их количества, что обогатило матрицу по C, Cr и Mn и облегчило протекание мартенситного превращения в эвтектическом аустените при охлаждении из оплавленного состояния.

Таким образом, плазменная обработка исследованной стали, сопровождавшаяся частичным оплавлением поверхности, привела к существенным изменениям в ее микроструктуре и твердости. Главным образом, это выражается в повышении однородности структуры, уменьшении количества и сфероидизации крупных первичных карбидов и боридов, повышении дисперсности и микротвердости карбидной (боридной) эвтектики. Это может положительно отразиться на сопротивлении разрушению поверхностных слоев стали в условиях изнашивания, ударов или контактных нагрузок.

Выводы

1. Плазменная обработка Cr-Mn-Ni-Si-B стали ледобуритного класса с частичным оплавлением на глубину до 300 мкм привела к модифицированию поверхностного слоя, что выразилось в повышении однородности структуры и уменьшении количества крупных первичных карбидов M_7C_3 и боридов Cr_3B_6 .

2. В оплавленной зоне сформировались мелкие первичные карбиды, а также образовалась эвтектика двух типов, различающаяся по содержанию легирующих

элементов. Микротвердсть эвтектик возросла на 150...200 HV₅₀, а размеры эвтектических карбидов уменьшились на порядок по сравнению с исходным литым состоянием.

Список литературы

1. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – М. : Металлургия, 1985. – 408 с.
2. Цыпин И. И. Белые износостойкие чугуны: Структура и свойства / И. И. Цыпин. – М. : Металлургия, 1983. – 176 с.
3. The Charpy-Bochvar Principle: white and stable-mottled wear resistant / [A. A. Zhukov, G. I. Silman, L. I. Agapova, B. B. Pani] // Indian Foundry Journal. – 1996. – Feb. – P. 11–27.
4. Effects of thermal plasma jet heat flux characteristics on surface hardening / [Yong Xiang, Deping Yu, Qingtao Li, Huabei Peng and etc.] // J. Mater. Process. Technol. 226 (2015) 238-246.
5. The influence of plasma surface modification process on the structure and phase composition of cutting-tool hardmetals / [S. S. Samotugin, V. I. Lavrinenko, E. V. Kudinova, Yu. S. Samotugina] // Journal of Superhard Materials. 33 (2011). – P. 200–207.
6. Semboshi S. Surface hardening of age-hardenable Cu–Ti alloy by plasma carburization / S. Semboshi, A. Iwase, T. Takasugi, // Surf. Coat. Technol. 283 (2015) 262–267.
7. Efremenko V. G. Pulsed plasma deposition of Fe-C-Cr-W coating on high-Cr-cast iron: Effect of layered morphology and heat treatment on the microstructure and hardness / [V. G. Efremenko, Yu. G. Chabak, A. Lekatou and etc.] // Surface and Coatings Technology. – 2016. – 304. – P. 293–305.
8. Ismail M.I.S. Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes / Mohd Idris Shah Ismail, Zahari Taha // International Journal of Technology. – 2014. – 1. – P. 79–87.
9. Самотугин С. С. Моделирование тепловых процессов при плазменном поверхностном упрочнении тонколезвийного почвообрабатывающего инструмента / С. С. Самотугин, В. А. Мазур, Д. С. Литвиненко // Вісник СевНТУ. Серія : Машиноприладобудування та транспорт. – 2012. – Вып. 129. – С. 194–198.

Одержано 28.04.2016

Чабак Ю.Г. Вплив плазмової обробки на стан зміцнювальних фаз у Cr-Mn-Ni-Si-B сталі ледебуритного класу

Описано характер зміни мікроструктури високолегованої Cr-Mn-Ni-Si-B сталі ледебуритного класу при плазмовій обробці з частковим оплавленням поверхні. Встановлено, що плазмове оплавлення справляє сприятливий модифікуючий вплив, призводячи до істотного диспергування зміцнювальних фаз сталі і зростання мікротвердості евтектики.

Ключові слова: плазма, оплавлення, карбіди, бориди, евтектика, мікротвердість.

Chabak Yu. Influence of plasma treatment on state of strengthening phases in Cr-Mn-Ni-Si-B ledeburite steel grade

The microstructure changes of high-alloyed Cr-Mn-Ni-Si-B steel of ledeburite class under plasma treatment with partial surface melting is described. It is found that the plasma melting has a favorable modifying effect, resulting in a significant dispersion of the strengthening phases and the growth of micro-hardness of the eutectic.

Key words: plasma, melting, carbides, borides, eutectics, microhardness.