

Е. Н. Еремин, д-р техн. наук; А. С. Лосев; Д. Г. Кноль, Омск, Россия

## НАПЛАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

*Наведено результати дослідження експлуатаційних властивостей мартенситно-старіючої сталі Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al з композиційною структурою, яка містить сполуки бору. Показано вплив боридів на теплостійкість композиційного матеріалу. Проаналізовано роль боридів в підвищенні термостійкості та зносостійкості наплавленого металу.*

*Приведены результаты исследования эксплуатационных свойств мартенситно-старяющей стали Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al с композиционной структурой, содержащей соединения бора. Показано влияние боридов на теплостойкость композиционного материала. Проанализирована роль боридов в повышении термостойкости и износостойкости наплавленного металла.*

*The results of analysis of operational properties of maraging steel of Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al type alloy with composite structure, hardened by boron compounds are demonstrated. Influence of borides on heat-resistance of a composite material is shown. The role of carbides in increase of thermal stability and wear resistance of deposited metal is analysed.*

С усложнением условий деформирования, в частности, в связи с более широким применением различных технологий выдавливания, накатки, вытяжки и вырубки более твердых металлов, протекающих в условиях повышенных давлений и нагрева, значительно возросли требования, предъявляемые к работоспособности штампового инструмента [1].

В процессе горячего объемного деформирования металл гравюры штампа подвергается циклическому температурно-силовому воздействию. Оно вызывает упругую и упруго-пластические деформации материала штампа, оказывает прямое влияние на характер и интенсивность физико-химических процессов, протекающих в приконтактных объемах инструмента и ускоряющих его износ. Основными видами износа штампового инструмента являются: износ истиранием, износ под действием термических напряжений (разгарные трещины) и износ за счет пластической деформации (смятие).

Повышение стойкости штампового инструмента за счет изготовления его из износостойких сталей с точки зрения экономической целесообразности почти исчерпало свои потенциальные возможности. Известно, что доля изнашиваемого металла в массе всего инструмента составляет обычно не более 3... 10 %. Поэтому очевидно, что наиболее перспективны биметаллические инструменты, для рабочих частей которых применяют высокопрочные материалы, а в качестве основы используют недорогие конструкционные или низколегированные теплостойкие стали. Для получения такого инструмента используется наплавка. Процессы наплавки позволяют изготавливать не только новые штампы, но и дают возможность многократно ремонтировать изношенные инструменты при минимальных материальных затратах [2].

В настоящее время наиболее перспективными являются наплавочные материалы с эффектом вторичного твердения (в частности, мартенситно-старееющие стали), которые в состоянии после наплавки имеют невысокую твердость, что позволяет легко выполнить механическую обработку наплавленного металла даже при сложной гравюре штампа. После соответствующей термической обработки (старения) у металла повышаются прочностные характеристики за счет выделения в нем ультрадисперсных интерметаллидов. Эксплуатационные свойства таких наплавочных материалов значительно превосходят свойства известных инструментальных сталей. В тоже время, в большинстве случаев данные материалы легированы дефицитными дорогостоящими элементами (кобальтом, вольфрамом), общее содержание которых может достигать 20%, что обуславливает их высокую стоимость и ограничивает применение [3].

Новые перспективы для разработки износостойких наплавочных материалов, в которых удачно сочетаются прочность, износостойкость и термостойкость, открывает переход к получению наплавленного металла с композиционной структурой, состоящего из относительно мягкой матрицы (основы) и высокопрочных волокон, армирующих матрицу [4].

Установлено, что введение в мартенситно-старееющую сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ тугоплавких соединений бора ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $CrB_2$ ) способствует получению композиционной структуры, состоящей из железоникелевого мартенсита и карбоборидной эвтектики, образованной на базе карбоборида  $(Fe, Ti, Mo)_3(C, B)$  и располагающейся в виде каркаса («скелета») [5].

Данная сталь в состоянии после наплавки обладает микротвердостью 460-495 HV, что позволяет удовлетворительно обрабатывать ее режущим инструментом не проводя операцию отжига. После отпуска при 500 °С в течение 1-2 часов происходит повышение микротвердости до 670-714 HV, за счет выделения мелкодисперсных интерметаллидных фаз Лавеса  $(Fe, V, Si)_2(Mo, Ti)$  и высокопрочных труднорастворимых карбоборидных фаз  $(Ti, Mo, Fe, V)_{23}(C, B)_6$  и  $(Cr, Fe, Mo, Ti)_7(C, B)_3$ .

В данной работе приведены результаты исследования теплостойкости, износостойкости при трении металла о металл и стойкость против образования трещин разгара (термостойкости) наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с соединения бора ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ). Для сравнения также определялась теплостойкость, износостойкость и термостойкость наплавленного металла полученного порошковой проволокой MAR 250 (0Н18К9М5ТЮ) фирмы LINCOLN ELECTRIC, штамповой стали 50ХНМ по ГОСТу 5950-73 и быстрорежущей стали P18 по ГОСТу 19265-73.

Результаты испытаний на теплостойкость, за критерий которой принимали отношение твердости металла после отпуска при температурах 450, 550, 650 и 750 °С к твердости после термической обработки на оптимальное упрочнение (ТООУ), приведены в таблице. Перед испытанием образцы из

штамповой стали 50XHM термически обрабатывались – закалка от 925 °С в масло, отпуск при 500 °С – 1 час. Термическая обработка образцов из быстрорежущей стали P18 включала: закалку от 1230 °С до 550 °С в смеси 50% CaCl<sub>2</sub> + 50% NaCl, а далее – на воздухе, и последующий трехкратный отпуск при 560 °С – 1 час. Образцы из мартенситно-старееющей стали отпускались при температуре 500 °С – 2 часа.

Таблица – Результаты испытаний на теплостойкость

| Сталь                      | Твердость стали HRC после отпуска при температуре, °С |  |  |  |
|----------------------------|---|--|--|--|
|                            | 450   | 550                                    | 650                                    | 750                                    |
| P18                        | 64  | 62                                     | 54                                     | 34                                     |
| 50XHM                      | 44  | 38                                     | 33                                     | 30                                     |
| MAR 250                    | 54  | 52                                     | 43                                     | 35                                     |
| 0Н13М5Х4ФСТЮ<br>с боридами | 56  | 55                                     | 50                                     | 45                                     |
| Сталь                      | Степень разупрочнения                                 |  |  |  |
|                            | $\frac{HRC\ 450\ ^\circ C}{HRC\ TOOU}$                | $\frac{HRC\ 550\ ^\circ C}{HRC\ TOOU}$ | $\frac{HRC\ 650\ ^\circ C}{HRC\ TOOU}$ | $\frac{HRC\ 750\ ^\circ C}{HRC\ TOOU}$ |
| P18                        | 1,00  | 0,97                                   | 0,84                                   | 0,53                                   |
| 50XHM                      | 0,96  | 0,83                                   | 0,72                                   | 0,65                                   |
| MAR 250                    | 1,00  | 0,96                                   | 0,80                                   | 0,65                                   |
| 0Н13М5Х4ФСТЮ<br>с боридами | 1,00  | 0,98                                   | 0,89                                   | 0,80                                   |

Как показали исследования, наплавленный металл 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами по теплостойкости не уступает быстрорежущей стали P18 при температурах до 600 °С, а при более высоких температурах значительно превосходит как сталь P18, так и мартенситно-старееющую кобальтсодержащую сталь MAR 250 по данному показателю.

Такие значения теплостойкости исследуемых сталей можно связать с их различием в составе и характере упрочняющих фаз, а также предельной температурой фазовых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  – превращений. Низкие значения теплостойкости штамповой стали 50XHM можно объяснить тем, что упрочнение данной стали происходит за счет карбида цементитного типа Me<sub>3</sub>C, который обладает низкотемпературной стабильностью. Упрочнение быстрорежущей стали P18 происходит специальными труднорастворимыми карбидами Me<sub>2</sub>C и Me<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, что и предопределяет ее высокую теплостойкость при температурах до 600 °С. При более высоких температурах в данной стали происходит стабилизация аустенита, приводящая ее к резкому снижению твердости. Мартенситно-старееющая сталь MAR 250 упрочняется за счет интерметаллидных фаз Ni<sub>3</sub>(Al, Ti) и (Fe, Co)<sub>2</sub>Mo. При нагреве данной стали свыше температур оптимального старения (500 °С) происходит коагуляция упрочняющих интерметаллидных фаз за счет растворения более мелких частиц и стабилизация остаточного аустенита. Упрочнение стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами, в отли-

чие от обычных мартенситно-старееющих сталей, происходит за счет эффектов как интерметаллидного, так и дисперсионного упрочнения. Кроме этого введение боридов в данную сталь приводит к образованию карбоборидной эвтектики, имеющей скелетообразный характер и зернограничное расположение, и труднорастворимых карбоборидных фаз, которые повышают температуру рекристаллизации и замедляют диффузионные процессы при высоких температурах, тем самым значительно повышают теплостойкость.

Для испытаний на термостойкость была разработана методика, согласно которой из металла изготавливался испытуемый образец размером  $20 \times 10 \times 10$  мм и фиксировался в специальной оправке, соприкасающейся непосредственно с головкой термопары. Чередование циклов нагрев – охлаждение осуществляли поворотом оправки с образцом на соответствующую позицию. Нагрев образцов осуществлялся пропановой горелкой до температуры  $725 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а охлаждение – водой посредством ее распыления из форсунки до температуры  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Температура разогрева образцов фиксировалась потенциометром Термодат – 10К3/1УВ/2Р. За критерий оценки термостойкости принималось число теплосмен до появления первой видимой трещины. При этом определяли число циклов до трещинообразования по среднему значению для трех образцов одного состава. Кроме этого изучалась поверхность образцов после 50 теплосмен для установления характера развития термических трещин. Перед испытанием образцы из исследуемых сталей термически обрабатывались аналогично как перед испытанием на теплостойкость.

В результате испытаний на термостойкость образцы из сталей P18 и 50XHM выдержали 1 и 4 теплосмены соответственно. Характер трещин на образцах из данных сталей – глубокие трещины, проходящие через всю плоскость образца (рис. 1). Низкая термостойкость сталей P18 и 50XHM, объясняется тем, что на термические напряжения накладываются структурные напряжения, которые достигают значительной величины из-за высокого содержания углерода.

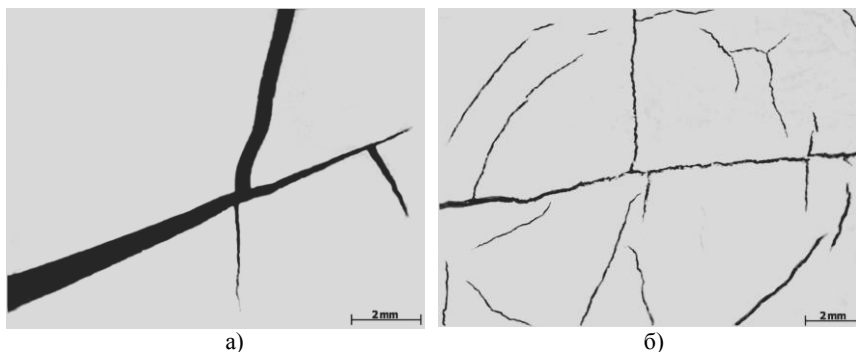


Рисунок 1 – Поверхность образцов после 5 теплосмен:  
а) быстрорежущая сталь P18; б) штамповая сталь 50XHM

В результате испытаний на термостойкость образцы из наплавленного металла MAR 250 и 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами выдержали, соответственно, 25 и 34 теплосмены. Необходимо отметить, что на образцах из наплавленного металла MAR 250 после 4-7 теплосмен после появления первой разгарной трещины, начинает развиваться сетка разгара, которая после 50 теплосмен охватывает всю поверхность образцов (рис. 2, а). Разгарные трещины на этих образцах характеризуются большими размерами и глубиной залегания. На поверхности образцов из наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами даже после 50 теплосмен отсутствует сетка разгара, а разгарные трещины характеризуются относительно небольшой протяженностью (рис. 2, б).

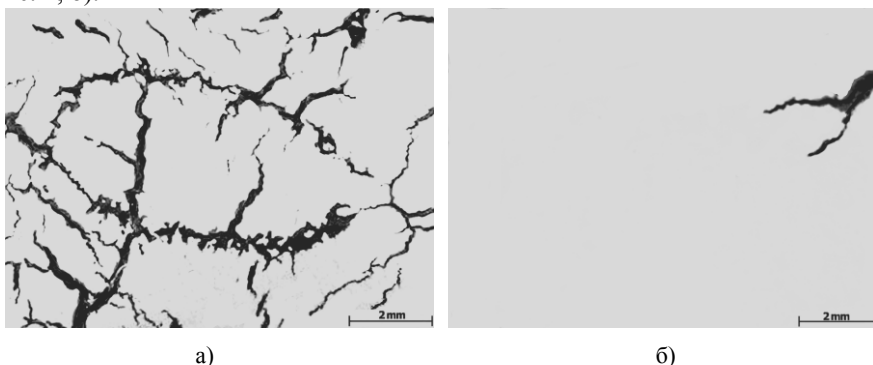


Рисунок 2 – Поверхность образцов из наплавленного металла после 50 теплосмен:  
а) MAR 250; б) 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами

Высокую термостойкость образцов из мартенситно-старееющей стали по сравнению со штамповой сталью 50ХНМ можно объяснить тем, что при охлаждении данных образцов в них возникают структурные напряжения, значительно меньшие по величине, так как в данном случае образуется безуглеродистый никелевый мартенсит с небольшой степенью тетрагональности.

Для выявления различий в термостойкости исследуемых образцов из мартенситно-старееющих сталей проведены металлографические и дюрOMETрические исследования. Проведенные исследования показали, что у наплавленного металла MAR 250 после испытания на термостойкость микротвердость снижается до  $305 \div 334$  НВ, а структура металла представляет собой тростомартенсит с включениями  $\delta$ -феррита и остаточного аустенита. Такие изменения структуры и твердости можно объяснить тем, что в условиях циклически изменяющейся температуры от 50 до 725 °С, происходит коагуляция упрочняющих интерметаллидных фаз за счет растворения более мелких частиц, что приводит к расслоению твердого раствора с образованием зон  $\delta$ -феррита и стабилизации остаточного аустенита.

Для наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами после испытания на термостойкость так же характерно снижение микротвердости до 447÷463 НV. Снижение твердости стали с боридами можно связать с упрочнением железо-никелевой матрицы, а именно с процессами коагуляции упрочняющих фаз. Однако в этом случае диффузионные процессы, вследствие присутствия труднорастворимых карбоборидных фаз и карбоборидной эвтектики, протекают значительно медленнее, и твердость композиционного материала остается на достаточно высоком уровне. Кроме того, замкнутый характер карбоборидной эвтектики ограничивает развитие разгарных трещин, что и определяет высокую термостойкость наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами.

Износостойкость сталей определяли на машине трения ИИ 5018 при сухом трении по схеме «диск – колодка» (материал диска – сталь У7, твердость 63 HRC; нагрузка на образец 600 Н, скорость вращения диска 0,26 м/с). Весовой износ образцов регистрировался после каждых 6 мин. испытаний (100 м) на общем пути трения 400-420 м. Измерение величины износа образцов осуществлялось весовым методом с использованием аналитических весов А&D HR-200. Погрешность измерения массы образца составляла 0,5 мг.

Как показали эксперименты, наплавленный металл 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами в состоянии после наплавки превосходит по износостойкости 50ХНМ в 14 раз и MAR 250 в 8 раз. После старения мартенситно-старяющаяся сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами не уступает по износостойкости быстрорежущей стали Р18, значительно превосходит 50ХНМ и MAR 250 (рис. 3).

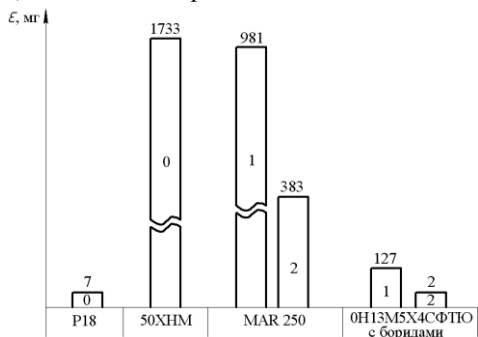


Рисунок 3 – Износостойкость сталей:

0 – после закалки и отпуска; 1 – после наплавки; 2 – после старения (при 500 °С – 2 ч.)

Изучение топографии поверхностей образцов после испытания на износостойкость с помощью оптического интерферометра Zygo NewView TM 7300 показало, что преобладающий механизм их изнашивания – преимущественно абразивный. Отличительной чертой профилограмм поверхности износа образцов из наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами является наименьшее значение среднеквадратичная величина шероховатости (rms) по сравнению с образцами и других сталей (рис. 4).

Высокую износостойкость и характер поверхности износа образцов из мартенситно-старееющей стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами можно объяснить тем, что в наплавленном металле карбоборидная эвтектика, которая, располагаясь в виде каркаса между кристаллами железоникелевого мартенсита, воспринимает часть нагрузки от удельных давлений и контактного взаимодействия и рассредоточивает ее на большую площадь поверхности. Кроме того, при трении бориды играют роль твердой смазки, что увеличивает стойкость наплавленного металла против задираания, работающего в условиях истирания.

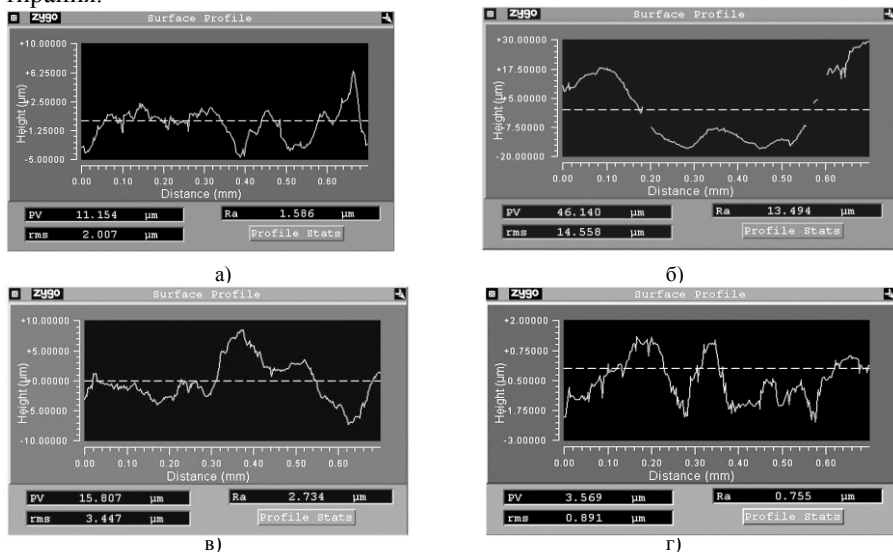


Рисунок 4 – Профилограммы поверхности износа:

а) P18; б) 50ХНМ; в) MAR 250; г) 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами

Таким образом, введение боридов (В4С, TiB2, ZrB2) в мартенситно-старееющую сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ, обеспечивает значительное повышение ее теплостойкости, износостойкости и термостойкости. Применение данной стали, в качестве наплавочного материала, позволит существенно повысить работоспособность штамповой оснастки и узлов металлургического оборудования, работающих в условиях многократно изменяющихся температур.

**Список использованных источников:** 1. Гурьев, А. М. Новые материалы и технологии для литых штампов / А. М. Гурьев. – Барнаул : Изд-во АлГТУ, 2000. – 216 с.; 2. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолГТУ, 2005. – 284 с.; Еремин, Е. Н. Повышение износостойкости ножей для поперечной разрезки горячего металла / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, А. Е. Еремин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – №10. – С. 37–39; 4. Геллер, Ю. А. Инструментальные мартенситностарееющие стали системы Fe-Ni-Co-Mo / Ю. А. Геллер, Л. С. Кремнев, В. А. Линник // МиТОМ. – 1976. – №5. – С. 11–14; 5. Уманский, А. П. Композиционный материал на основе карбонитрида титана со связкой железо – хром / А. П. Уманский // Порошковая металлургия. – 2001. – № 11–12. – С. 113–117.; 6. Лосев, А. С. Исследование влияния боридов на структуру и свойства мартенситно-старееющей стали / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. – 2011. – № 1. – С. 29–33.

Поступила в редколлегию 15.06.2012