

Структура и свойства металла системы Fe-Cr-Mo-Si полученного наплавкой порошковой проволокой легированной комплексом боридных соединений

Е. Н. Еремин, А.С. Лосев, С. А. Бородихин, А. Е. Маталасова,  
И. А. Пономарев, М. Ю. Филиппов  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

*Приведены результаты исследования эксплуатационных свойств мартенситно-старееющей Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al стали с композиционной структурой, наплавленной порошковой проволокой содержащей соединения бора. Показано влияние комплекса  $B_4C-TiB_2-ZrB_2$  на теплостойкость композиционного материала. Предложена порошковая проволока позволяющая существенно повысить работоспособность штамповой оснастки, работающей в условиях многократно изменяющихся температур.*

*Ключевые слова: порошковая проволока; наплавленный металл; мартенситно-старееющая сталь; бориды; теплостойкость; твердость*

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

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 [1].

Некоторое применение для наплавки штампового инструмента нашли мартенситно-старееющие стали [2, 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 частиц, армирующих матрицу [4].

В работах [5, 6] установлено, что введение в мартенситно-старееющую сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ тугоплавких соединений бора ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ) спо-

способствует получению композиционной структуры, состоящей из железоникелевого мартенсита и карбоборидной эвтектики, образованной на базе карбоборида  $(Fe, Ti, Mo)_3(C, B)$  и располагающуюся в виде каркаса («скелета»). Данная сталь в состоянии после наплавки обладает микротвердостью 460-495 HV, что позволяет удовлетворительно обрабатывать её 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  $(Cr, Fe, Mo, Ti)_7(C, B)_3$  [6]. Однако теплостойкость такого металла изучена недостаточно.

В данной работе приведены результаты исследования теплостойкости наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ легированного комплексом соединений бора ( $B_4C, TiB_2, ZrB_2$ ). Для сравнения также определялась теплостойкость серийно выпускающихся наплавочных материалов компании Castolin-Eutectic, применяемых для упрочнения штамповой оснастки: Castolin 6 (C = 0,8%; Mo = 10%; Cr = 5%; W = 1,5%; V = 1,5%; Si = 0,5%); Castolin XHD 6806 (C = 0,35%; Cr = 2,5%; W = 7,5%; V = 0,6%; Si = 0,5% Mn = 0,6%); CastoMag 45355 (C = 0,35%; Ni = 18%; Co = 12%; Mo = 4%; Ti = 0,8%; Si = 0,4%).

Результаты испытания на теплостойкость, за критерий которой принимали изменение твердости наплавленного металла после отпуска в интервале температур от 450 до 750 °С при выдержке 2 часа, приведены в табл 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на теплостойкость

Наплавочный материал	Твердость наплав. металла перед испытанием, HRC	Твердость наплав. металла HRC после отпуска при температуре, °С			
		450	550	650	750
Castolin 6	61	61	60	52	34
Castolin XHD 6806	50	46	43	36	32
CastoMag 45355	54	54	52	43	35
0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами	56	56	55	50	45

Как показали исследования, наплавленный металл 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами по теплостойкости не уступает Castolin 6 при температурах до 600 °С, а при более высоких температурах значительно превосходит исследуемые наплавочные материалы по данному показателю.

Такие значения теплостойкости исследуемых наплавочных материалов можно связать с их различием в составе и характере упрочняющих фаз, а также предельной температурой фазовых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  – превращений. Наплавленный металл Castolin XHD 6806 имеет мартенситную структуру упрочненную карбидами  $Me_6C$  и  $MeC$  (рис. 1, а). Низкие значения теплостойкости данного материала можно объ-

яснить тем, карбидные фазы  $Me_6C$  и  $MeC$  обладают низкой стойкостью к коагуляции при высоких температурах (рис. 1, б).

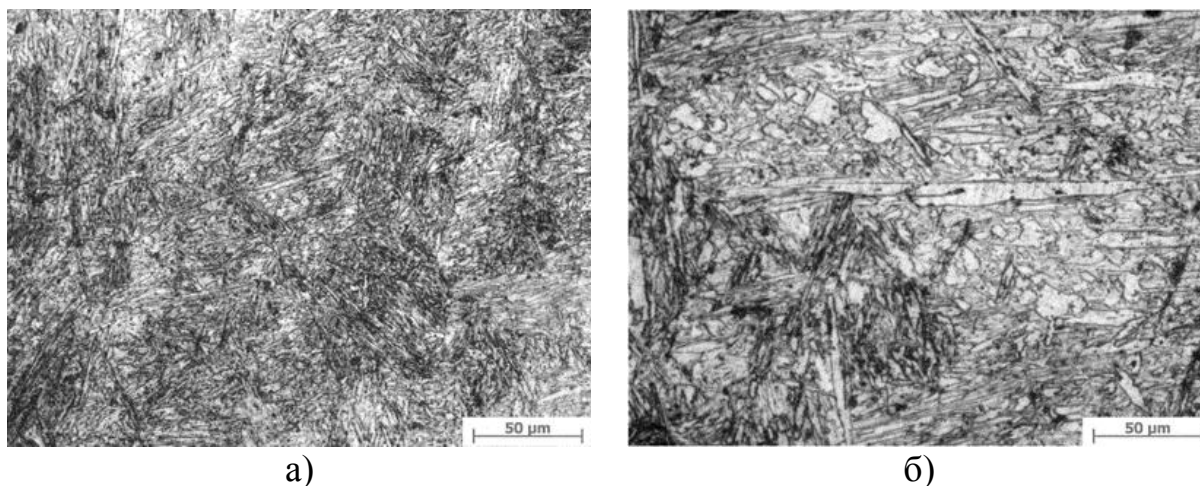


Рисунок 1 – Микроструктура наплавленного металла Castolin XHD 6806: а) до испытания на теплостойкость; б) после отпуска при  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 2 часа

Наплавленный металл Castolin б относится к классу быстрорежущих сталей, упрочнение которого происходит специальными труднорастворимыми карбидами  $Me_2C$  и  $Me_{23}C_6$  (рис. 2, а), что и предопределяет её высокую теплостойкость при температурах до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При более высоких температурах в данном металле происходит стабилизация аустенита приводящее к резкому снижению твердости (рис. 2, б).

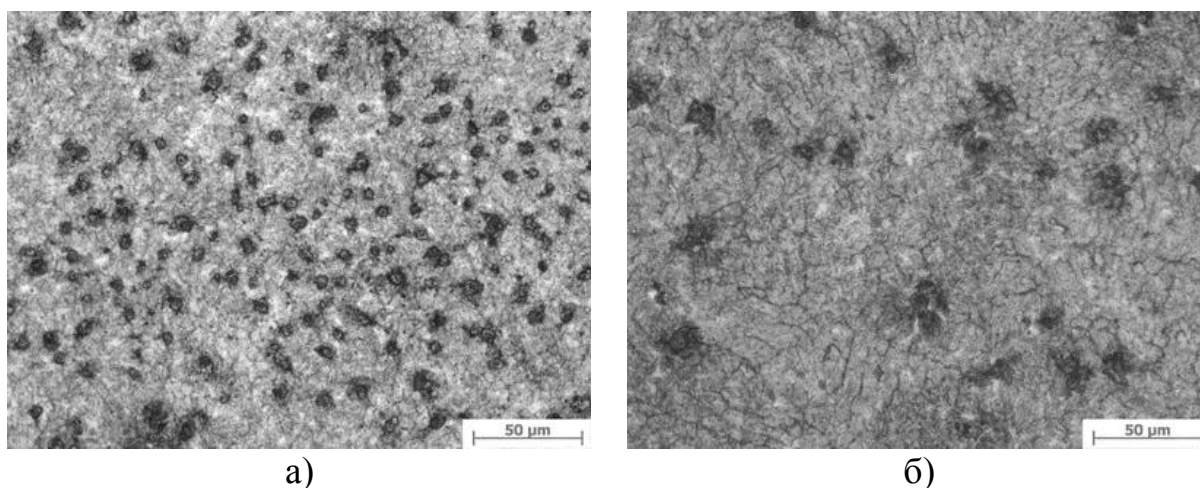
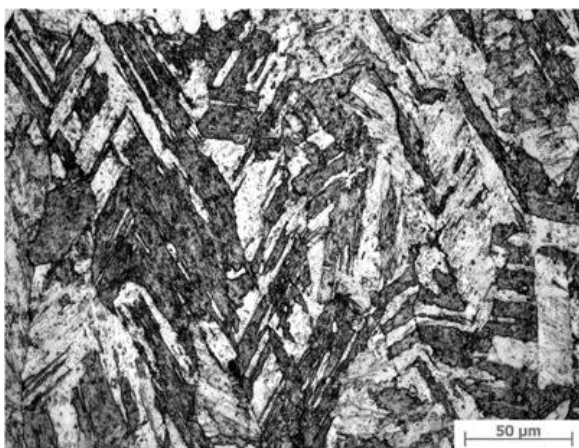
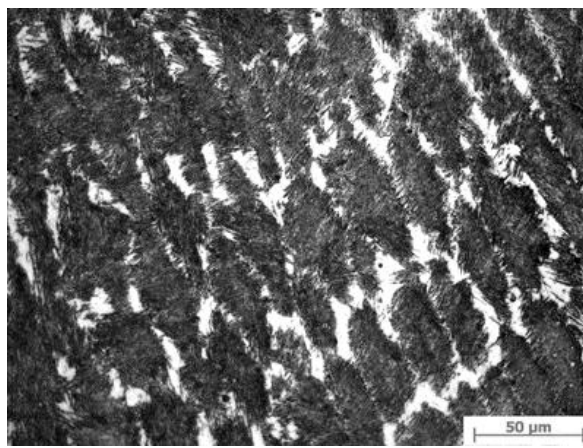


Рисунок 2 – Микроструктура наплавленного металла Castolin б: а) до испытания на теплостойкость; б) после отпуска при  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 2 часа

Мартенситно-старееющий металл CastoMag 45355 имеет структуру безуглеродистого никелевого мартенсита упрочнение которого происходит за счет выделения интерметаллидных фаз  $Ni_3Ti$  и  $(Fe, Co)_2Mo$  (рис. 3, а). При нагреве данного металла свыше температур оптимального старения ( $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) происходит коагуляция упрочняющих интерметаллидных фаз за счет растворения более мелких частиц и стабилизация остаточного аустенита (рис. 3, б).



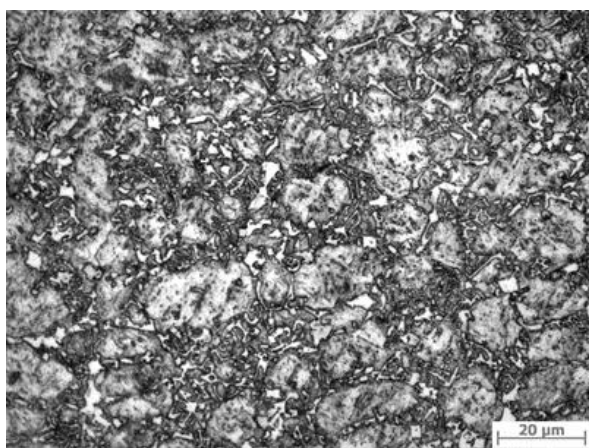
а)



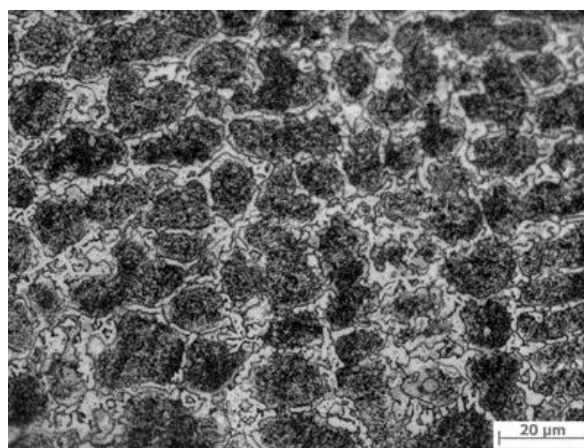
б)

Рисунок 3 – Микроструктура наплавленного металла CastoMag 45355: а) до испытания на теплостойкость; б) после отпуска при 750 °С – 2 часа

Упрочение наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами, в отличие от обычных мартенситно-старееющих сталей, происходит за счет эффектов как интерметаллидного, так и дисперсионного упрочнения (рис. 4, а). Кроме этого введение боридов в данный металл 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 (рис. 4, б).



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура наплавленного металла 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами: а) до испытания на теплостойкость; б) после отпуска при 750 °С – 2 часа

Таким образом, введение боридов ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ) в состав порошковой проволоки на основе мартенситно-старееющей стали 0Н13М5Х4ФСТЮ, позволяют значительно повысить ее теплостойкость до 750 °С. Применение данной проволоки, в качестве наплавочного материала, позволит существенно повы-

сить работоспособность штамповой оснастки и узлов металлургического оборудования, работающих в условиях многократно изменяющихся температур.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01224).*

### **Библиографический список**

1. Соколов, Г. Н. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей / Г. Н. Соколов, В. И. Лысак. – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 284 с.
2. Кальянов, В. Н. Мартенситно-старяющие стали для наплавки штампов / В. Н. Кальянов, В. А. Багров // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 35–37.
3. Кондратьев, И. А. Порошковая проволока для наплавки слоя мартенситно-старяющей стали / И. А. Кондратьев, И. А. Рябцев, Я. П. Черняк // Автоматическая сварка. – 2006. – № 4. – С. 50–53.
4. Артемьев, А. А. Влияние микрочастиц диборида титана и наночастиц карбонитрида титана на структуру и свойства наплавленного металла / А. А. Артемьев, Г. Н. Соколов, В. И. Лысак // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2011. – № 12 (678). – С. 32–37.
5. Еремин, Е. Н. Применение боридных соединений в порошковой проволоке для наплавки мартенситно-старяющей стали / Е. Н. Еремин, А. С. Лосев // Сварочное производство. – 2011. – № 10. – С. 12–15.
6. Лосев, А. С. Исследование влияния боридов на структуру и свойства мартенситно-старяющей стали / А. С. Лосев, Е. Н. Еремин // Омский научный вестник. – 2011. – № 1. – С. 29–33.