

3. Barglik J, Arendarska J., Dolega D., Smagor A. Numerical modeling of induction hardening of steel bodies // Int. Sci. Collog.: Model. for Electromagn. Proc., Hannover, Oct. 27–29, 2008. – P. 111–116.
4. Greenberg D. P., Cohen M. F., Torrance K. E. Radiosity: a method for computing global illumination // The Visual Computer. – 1986. – N 2. – P. 291–297.
5. Colomer G., Costa M., Consul R., Oliva A. Three-dimensional numerical simulation of convec and radiation in a differentially heated cavity using discrete ordinates method// Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2004. – N 47. – P. 257–269.
6. Тимошпольский В. И., Герман М. Л., Гринчук П. С., Андрианов Д. Н. Расчет характеристик переноса теплового излучения в рабочем пространстве кольцевой печи// Инж.-физ. ж. – 2005. – 78. – № 3. – С. 3–14.
7. Самсонов Г. В., Винницкий И. М. Тугоплавкие соединения: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
8. Физико-химические свойства окислов: справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с.
9. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В. П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.
10. Єлізаров М. О., Журав В. В. Вплив механічного складу і вологості ґрунту на його електропровідність // Вісн. Кременчуцьк. нац. ун-ту. – 2010. – Вип. 6. – Ч. 1. – С. 182–185.

Надійшла 11.04.12

УДК 621.791.92.04

**Е. Н. Еремин, В. В. Шалай**, доктора технических наук; **А. С. Лосев**

*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

### **ВЛИЯНИЕ БОРИДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ**

*Приведены результаты исследования механических свойств и термической стойкости инструментальной мартенситно-стареющей стали Fe–Ni–Mo–Cr–V–Si–Ti–Al с композиционной структурой, содержащей соединения бора. Показано влияние боридов на характер упрочнения композиционного материала. Проанализирована роль боридов в повышении термостойкости стали, предназначенной для изготовления металлообрабатывающего инструмента.*

**Ключевые слова:** *мартенситно-стареющая сталь, бориды, прочность, термостойкость.*

Методы горячей пластической деформации для изготовления деталей широко применяют в крупносерийном и массовом производстве. Это обусловлено, прежде всего рациональным использованием металла заготовки, чем в случае механической обработки, а также высокой производительностью процесса вследствие автоматизации, что в конечном итоге способствует снижению себестоимости изделия. С усложнением условий деформирования, в частности, более широким применением различных технологий выдавливания, накатки, вытяжки и вырубки более твердых металлов в условиях повышенного давления и нагрева, значительно ужесточились требования к работоспособности инструментальной оснастки. К важнейшим показателям, определяющим срок службы штампов и оснастки для горячей обработки металлов

давлением, относятся высокая механическая прочность и термическая стойкость, или стойкость к образованию трещин разгара [1].

Повышение стойкости металлообрабатывающего инструмента за счет изготовления его из износостойких сталей, с позиций экономической целесообразности, исчерпало почти все потенциальные возможности. Известно, что доля изнашиваемого металла в массе инструмента обычно не превышает 3–10%. В этой связи очевидно, что наиболее перспективны биметаллические инструменты, для рабочих частей которых применяют высокопрочные материалы, а в качестве основы используют дешевые конструкционные или низколегированные теплостойкие стали. Для изготовления такого инструмента используют наплавку [2].

В настоящее время наиболее перспективны наплавочные материалы с эффектом вторичного твердения (мартенситно-стареющие и дисперсионно-твердеющие стали). Эксплуатационные свойства таких наплавочных материалов значительно превосходят свойства известных инструментальных сталей. В то же время в большинстве случаев эти материалы легированы дефицитными дорогостоящими элементами (кобальтом, вольфрамом), общее содержание которых достигает 20%, что обуславливает их высокую стоимость и ограничивает применение [3–5].

Новые перспективы для разработки износостойких наплавочных материалов, где удачно сочетаются прочность, износостойкость и термостойкость, открывает переход к изготовлению наплавленного металла с композиционной структурой, состоящего из относительно мягкой матрицы (основы) и высокопрочных волокон, армирующих матрицу [6, 7].

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния тугоплавких соединений бора ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ) на механические свойства и термическую стойкость мартенситно-стареющей стали 0Н13М5Х4ФСТЮ полученной наплавкой.

Механические испытания на растяжение проводили со скоростью 1 мм/мин при комнатной температуре с помощью машины Instron-3369. Испытывали образцы рабочего диаметра 5 мм и длиной 25 мм. Ударную вязкость КСУ наплавленного металла определяли в соответствии с ГОСТ 9454-78 с помощью маятникового копра Metro Com 06103300. Поверхность разрушения наплавленного металла исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP.

Для оценки влияния боридов на термостойкость мартенситно-стареющей стали разработали специальную методику. Согласно этой методике из металла изготовили испытуемый образец размером 20×10×10 мм и фиксировали его в специальной оправке, соприкасающейся непосредственно с головкой термопары. Чередовали циклы нагрева – охлаждения поворотом оправки с образцом в соответствующую позицию. Нагревали образцы пропановой горелкой до температуры  $725 \pm 25$  °С, а охлаждали водой посредством распыления из форсунки до температуры  $50 \pm 10$  °С. Температуру разогревания образцов фиксировали потенциометром Термодат–10К3/1УВ/2Р. Для сравнения определяли также термостойкость наплавленного металла, полученного из порошковой проволоки MAR 250 (0Н18К9М5ТЮ) фирмы «LINCORN ELECTRIC», и штамповой стали 50ХНМ по ГОСТ 5950-73. В качестве критерия оценки термостойкости приняли количество теплосмен до появления первой видимой трещины. При этом определяли количество циклов до трещинообразования по среднему значению для трех образцов одного состава. Кроме того, изучали поверхность образцов после 50 теплосмен для установления характера развития термических трещин. Перед испытанием образцы из штамповой стали 50ХНМ термически обрабатывали до твердости 42–44 HRC (закалка в масле – от 925 °С, отпуск при температуре 500 °С – 2 ч). Образцы из мартенситно-стареющей стали отпускали при температуре 500 °С в течение 2 ч.

В результате механических испытаний выявили, что после закалки сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ без боридов имеет высокую прочность ( $\sigma_{0,2} = 940$  МПа,  $\sigma_b = 1080$  МПа; 385–410 HV) при ударной вязкости КСУ – 1,53 МДж/м<sup>2</sup>. В результате изучения фрактограмм изломов стали выявили вязкий механизм разрушения, который осуществляется путем

зарождения, увеличения размеров и слияния микропор, оставляющих позади себя на поверхности разрушения «чашечный узор» (рис. 1, а).

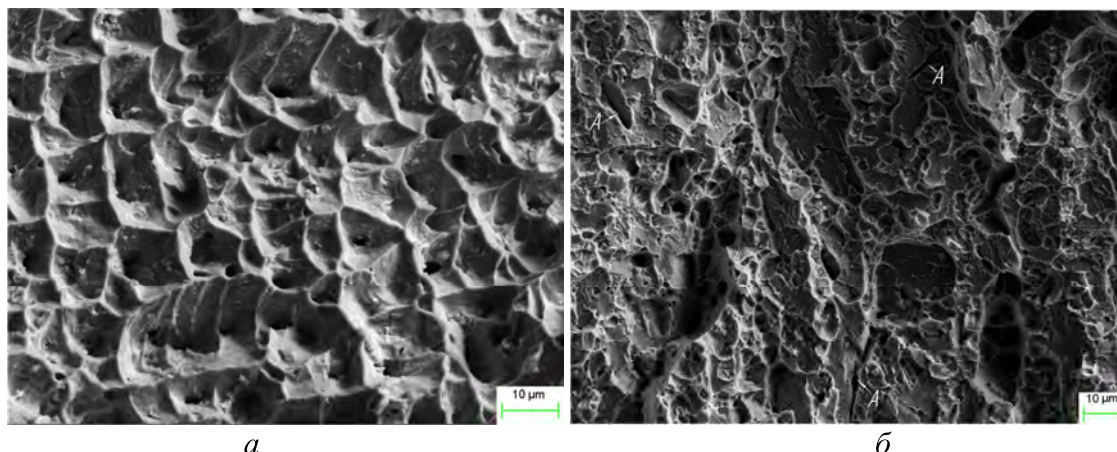


Рис. 1. Фрактограммы изломов стали 0Н13М5Х4ФСТЮ: а – после закалки; б – после старения при 500 °С, 2 ч

Старение исследуемой стали при температуре 500 °С в течение 2 ч приводит к значительному повышению прочности ( $\sigma_{0,2} = 1780$  МПа;  $\sigma_B = 1830$  МПа; HV 510–524) и снижению ударной вязкости до КСУ 0,62 МДж/м<sup>2</sup>. На фрактограммах изломов видно, что разрушение происходит по механизму образования и слияния микропор, в результате чего поверхность разрушения покрывается множеством ямок различного размера, наложенных на сетку межзеренных фасеток (рис 1, б). Также на поверхности разрушения наблюдается множество небольших по размеру вторичных межзеренных трещин (точки А на рис. 1, б).

Сталь 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами после закалки имеет более высокую прочность ( $\sigma_{0,2} = 1270$  МПа;  $\sigma_B = 1320$  МПа; HV 445÷476) при ударной вязкости КСУ – 0,84 МДж/м<sup>2</sup>. На фрактограммах изломов видно, что поверхность разрушения покрыта множеством ямок, зародившихся на границе раздела между матрицей и частицами карбоборидов (рис. 2, а), и имеет участок хрупкого разрушения (участок А на рис. 2, а), от которого в разные стороны отходят небольшие по размерам вторичные трещины (точки Б на рис. 2, а).

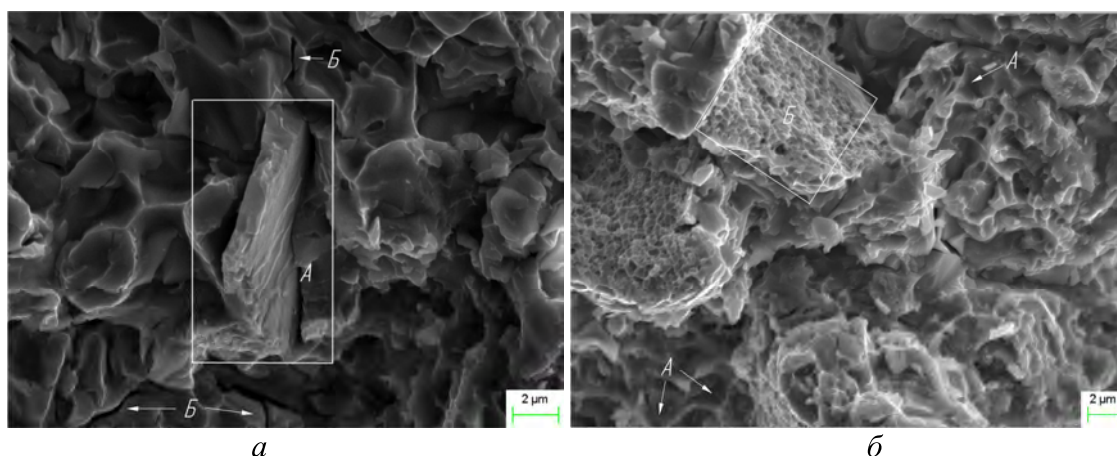


Рис. 2. Фрактограммы изломов стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами: а – после закалки; б – после старения при 500 °С, 2 ч

Старение стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами при температуре 500 °С в течение 2 ч сопровождается такими же изменениями механических характеристик ( $\sigma_{0,2} = 2550$  Мпа;  $\sigma_B = 2610$  Мпа; HV 694÷719) при ударной вязкости КСУ – 0,41 МДж/м<sup>2</sup>, как и для обычных



мартенситно-стареющих сталей. На фрактограммах изломов видно, что на поверхности образца находятся фасетки квазискола (рис. 2, б), соединенные гребнями отрыва и неглубокими ямками (точки А на рис 2, б), а также участки вязкого разрушения, образовавшиеся вследствие слияния микропор (участок Б на рис 2, б).

В процессе испытания на термостойкость образцы из стали 50ХНМ выдержали четыре теплосмены. Характер трещин на образцах из высокоуглеродистой штамповой стали 50ХНМ выявлен следующий: глубокие трещины через всю плоскость образца (рис. 3, а). Низкая термостойкость штамповой стали обусловлена тем, что на термическое напряжение накладывается значительное структурное из-за высокого содержания углерода.

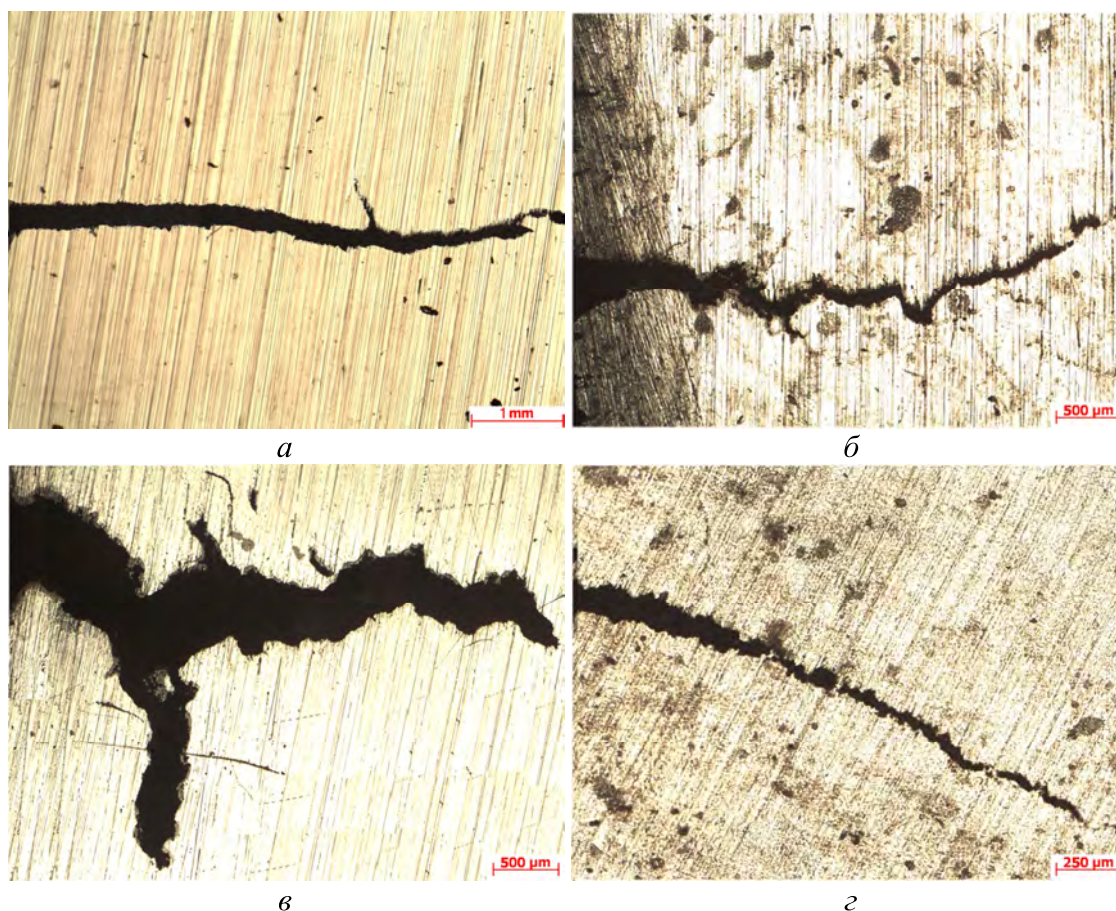


Рис. 3. Глубина залегания и форма трещин в образцах: а – 50ХНМ после 4 теплосмен; б – MAR 250 после 50 теплосмен; в – 0Н13М5Х4ФСТЮ без боридов после 50 теплосмен; г – 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами после 50 теплосмен

Образцы из стали MAR 250 в процессе испытания на термостойкость выдержали 25 теплосмен, из стали 0Н13М5Х4ФСТЮ без боридов и с боридами соответственно – 20 и 34 теплосмены. Необходимо отметить, что на образцах стали 0Н13М5Х4ФСТЮ и MAR 250 после четырех – семи теплосмен после появления первой разгарной трещины начинает развиваться сетка разгара, которая после 50 теплосмен покрывает всю поверхность образцов. Как видим, разгарные трещины на этих образцах характеризуются большими размерами и глубиной залегания (рис. 3, б и в). На поверхности образцов из стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами даже после 50 теплосмен отсутствует сетка разгара, а разгарные трещины характеризуются относительно небольшой протяженностью (рис. 3, г).

Высокая термостойкость образцов из мартенситно-стареющей стали по сравнению с образцами штамповой стали 50ХНМ обусловлена тем, что при охлаждении в образцах

возникают значительно меньшие структурные напряжения, так как в этом случае образуется безуглеродистый никелевый мартенсит небольшой степени тетрагональности.

В целях выявления различия теплостойкости исследуемых образцов из мартенситно-старееющих сталей провели металлографические и дюрOMETрические исследования, результаты которых показали, что вследствие испытания на термостойкость микротвердость сталей MAR 250 и 0Н13М5Х4ФСТЮ снизилась соответственно до HV 305–334 и HV 251–273, структура металла представляет собой тростомартенсит с включениями  $\delta$ -феррита и остаточного аустенита. Такие изменения структуры и твердости обусловлены тем, что в условиях циклически изменяющегося температурного диапазона 50–725 °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. Помимо процесса коагуляции упрочняющих фаз увеличивается среднее расстояние между частицами, нарушается их когерентная связь с матрицей, что в общем случае приводит к снижению прочности и твердости сталей. По-видимому, одной из главных причин резкого снижения сопротивляемости образованию и развитию трещин разгара сталей MAR 250 и 0Н13М5Х4ФСТЮ после 20 теплосмен является появление включений  $\delta$ -феррита и остаточного аустенита на границах мартенситной матрицы.

Микротвердость стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами после испытания на термостойкость также снижается до HV 447–463. Это связано с разупрочнением 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 высокой. Кроме того, замкнутый характер карбоборидной эвтектики ограничивает развитие разгарных трещин, что и определяет высокую термостойкость стали 0Н13М5Х4ФСТЮ с боридами.

Таким образом, введение боридов ( $B_4C$ ,  $TiB_2$ ,  $ZrB_2$ ) в мартенситно-старееющую сталь 0Н13Х4М5ФСТЮ позволяет значительно повысить ее прочность после старения до прочности высокопрочных сталей, не вызывая охрупчивания. При этом значительно повышается сопротивляемость стали к образованию и развитию трещин разгара. Применение такой стали в качестве конструкционного материала позволит существенно повысить работоспособность металлообрабатывающего инструмента, работающего в условиях циклически изменяющихся динамических нагрузок и температуры.

*Наведено результати дослідження механічних властивостей і термічної стійкості інструментальної мартенситно-старіючої сталі Fe-Ni-Mo-Cr-V-Si-Ti-Al з композиційною структурою, яка містить сполуки бору. Показано вплив боридів на характер зміцнення композиційного матеріалу. Проаналізовано роль боридів в підвищенні термостійкості сталі, призначеної для виготовлення металообробного інструменту.*

**Ключові слова:** мартенситно-старіюча сталь, бориди, міцність, термостійкість.

*The results of analysis of mechanical properties and thermal stability of tool 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 character of hardening of a composite material is shown. The role of borides in increase of thermal stability of the steel intended for manufacturing of the metalcutting tool is analysed.*

**Key words:** maraging steel, boride, hardness, thermal stability.

#### Литература

1. Гурьев А. М. Новые материалы и технологии для литых штампов. – Барнаул : АлГТУ, 2000. – 216 с.

2. Соколов Г. Н., Лысак В. И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей – Волгоград : ВолгГТУ, 2005. – 284 с.
3. Кальянов В. Н., Багров В. А. Мартенситно-старееющие стали для наплавки штампов // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 35–37.
4. Геллер Ю. А., Кремнев Л. С., Линник В. А. Инструментальные мартенситностарееющие стали системы Fe-Ni-Co-Mo // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1976. – № 5. – С. 11–14.
5. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката / Е. Н. Еремин, Ю. О. Филиппов, Д. Г. Покровский и др. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 17–19.
6. Лосев А. С., Еремин Е. Н., Филиппов Ю. О. Исследование влияния боридов на упрочнение мартенситно-старееющей стали // Омский научный вестник. – 2010. – № 2. – С. 131–134.
7. Лосев А. С., Еремин Е. Н. Исследование влияния боридов на структуру и свойства мартенситно-старееющей стали // Омский научный вестник. – 2011. – № 1. – С. 29–33.

Поступила 05.06.12

УДК 621.81

**В.С. Панов**, д-р техн. наук; **В.Н. Шуменко**, канд. техн. наук

*ФГОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
г. Москва, Россия*

### **ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ НИТРИДОМ КРЕМНИЯ**

*Приведены результаты стойкостных испытаний при резании твердосплавных пластин марок ВК6 и ТТ10К8Б с покрытием. Полученные результаты подтверждены испытаниями на Камском автозаводе. Установлено, что покрытие из  $Si_3N_4$  позволяет увеличить стойкость инструмента в 2–4 раза по сравнению с инструментом без покрытия и в 1,7–1,8 раза по сравнению с пластинами с покрытием TiC.*

**Ключевые слова:** *сплав, режущий инструмент, многогранные неперетачиваемые пластины, стойкость при резании, свойства, покрытие, режим.*

Одним из основных путей развития и совершенствования твердосплавного режущего инструмента являются многогранные неперетачиваемые пластины (МНП) с износостойким покрытием.

Несмотря на то что в настоящее время более 90% режущего инструмента выпускается с покрытиями, до сих пор не разработаны единые требования к свойствам используемого для покрытия материала. В связи с тем, что ни один из используемых материалов не отвечает предъявляемым требованиям, работы в этом направлении весьма актуальны.

В настоящем исследовании в качестве покрытия был выбран нитрид кремния, который отвечает основным свойствам материала покрытия [1, 2].

В работе изучали эксплуатационные свойства твердосплавного режущего инструмента с покрытием из нитрида кремния, полученного газофазным осаждением на инструмент [3, 4]. Оптимальный режим нанесения покрытия установили следующий: температура  $1000 \pm 20$  °С; соотношение  $SiCl_4 : NH_3 = 8 : 1$ ; разрежение в реакционной камере  $0,1\text{--}4,0 \pm 0,06$  кПа; расход газовой смеси –  $100\text{--}400 \pm 10$  л/ч; скорость потока газовой смеси