

The results of investigations of the structure and characteristics of the surface coatings of structural and tool steels, subjected to borosilicating at temperatures 900-950 °C and low-temperature HTO (450-550 °C) in the system carbon-nitrogen-boron in powder mixtures and coverings without special equipment, are considered. The data on production testings of different types of details, which prove that due to diffuse hardening the increase of resistance in 2-10 times is provided depending on types of details and conditions of their working, are presented.

М. В. СИТКЕВИЧ, БНТУ

УДК 621.785.5

## ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ДЕФОРМИРУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ, РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ И МАШИН В РЕЗУЛЬТАТЕ БОРОСИЛИЦИРОВАНИЯ И БОРОКАРБОАЗОТИРОВАНИЯ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ И ОБМАЗКАХ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для повышения свойств поверхностных слоев стальных деталей могут быть использованы различные методы химико-термической обработки (ХТО). Применительно к производственным условиям многих предприятий наибольший интерес представляют процессы, протекающие в условиях нагрева в обычных камерных печах с окислительной атмосферой без применения специального оборудования и устройств. При этом целесообразно применение диффузионно-активных сред, которые могут быть нанесены на рабочие поверхности деталей тонким слоем, обеспечивая наряду с химико-термической обработкой и защиту поверхностных слоев от окисления и обезуглероживания.

В настоящее время на кафедре «Материаловедение в машиностроении» БНТУ разработаны порошковые смеси и обмазки для получения диффузионных покрытий с различными показателями свойств. В случае деталей, работающих в парах трения или в контакте с абразивным материалом, когда имеет место преимущественное изнашивание их поверхностных слоев, наиболее рационально использование смесей для получения диффузионных покрытий на основе высокотвердых фаз. Такие диффузионные покрытия на стальных изделиях формируются в результате процессов химико-термической обработки с использованием в качестве насыщающих компонентов химических элементов в системе бор-азот-углерод-кремний. Причем ре-

зультаты исследований показывают, что одновременное комплексное насыщение несколькими компонентами более эффективно, чем однокомпонентное. В связи с изложенным выше в настоящей работе использовали такие комплексные процессы ХТО, как боросилицирование и борокарбоазотирование.

Процесс боросилицирования проводили при температурах 900–950 °C, борокарбоазотирования – при 450–550 °C в специально разработанных порошковых смесях, которые после засыпки мелкогабаритных деталей или образцов эффективно функционируют в окислительной воздушной печной среде без использования каких-либо защитных средств, и в обмазках, которые наносятся тонким слоем только на рабочую часть крупногабаритных деталей (см. рисунок).

В условиях длительного нагрева в атмосфере камерных печей для термической обработки металлических изделий разработанные диффузионно-активные борированные и боросилицирующие смеси и обмазки на основе карбида бора ( $B_4C$ ), оксида кремния ( $SiO_2$ ), фтористого натрия ( $NaF$ ) эффективно функционируют в присутствии кис-

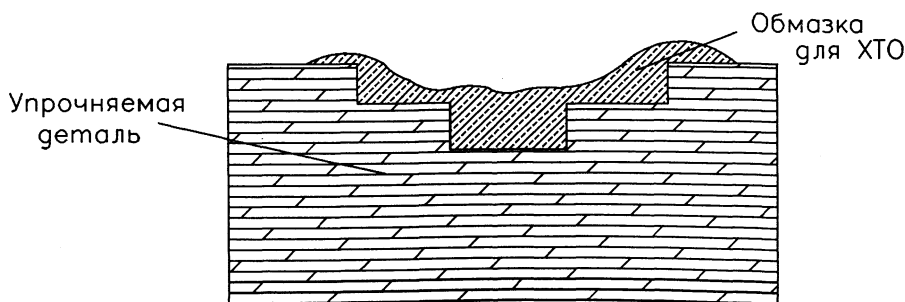


Схема ХТО рабочих поверхностей крупногабаритных деталей

лорода печной среды, обеспечивая высокую скорость формирования диффузионных слоев. Более того, наличие кислорода, от которого стараются изолировать изделие при термической и химико-термической обработке, даже обязательно при протекании ряда химических реакций, необходимых для выполнения смесью и обмазкой диффузионно-активной и защитной функции. Именно в результате взаимодействия кислорода и карбида бора на поверхности обмазки появляется стеклообразная оболочка из борного ангидрида, герметизирующего основную массу диффузионно-активной обмазки, создавая в ней давления газовой фазы [1].

Таким образом, кислород является обязательным компонентом печной атмосферы, без которого осуществлять химико-термическую обработку смесей и обмазок невозможно. Поэтому подбор компонентов должен быть таким, чтобы в результате образования легкоплавкой оболочки при взаимодействии кислорода с поверхностным слоем диффузионно-активная среда была надежна защищена от атмосферы печи и функционировала подобно герметичному контейнеру.

Основные требования создания обмазок для осуществления химико-термической обработки при длительном нагреве в печной среде без использования специального оборудования заключаются в следующем:

1) в обмазке должны протекать химические реакции с образованием газовой фазы, диссоциация и диспропорционирование которых обеспечивают создание на насыщаемой поверхности активных атомов диффундирующих элементов;

2) основной объем газовой фазы должен оставаться в обмазке, создавая избыточное давление, в результате которого затрудняется проникновение кислорода в насыщающую среду и обес-

печивается интенсивной подвод активных атомов к насыщаемой поверхности;

3) на поверхности должна образоваться тонкая стеклообразная оболочка, изолирующая основную массу обмазки от внешней среды, поддерживающая постоянно избыточное давление, позволяющая выходить из смеси и обмазки небольшим объемам газовой фазы, но препятствующая проникновению в нее газов печной среды;

4) в атмосфере печи должны присутствовать составляющие, взаимодействие которых с поверхностью обмазки вызывает образование защитной оболочки. Такой составляющей является кислород, ряд соединений которого ( $B_2O_3$ ,  $Na_2O_3$ ,  $SiO_2$  и др.) может выполнять функции защитной оболочки на поверхности обмазки.

При осуществлении ХТО с использованием разработанных порошковых смесей и обмазок в качестве исследуемых образцов были выбраны как сравнительно дешевые стали 45, 40X, так и легированные стали 5ХНМ, Х12М, 5ХЗВЗМФС, Р6М5 и др., которые могут быть использованы при изготовлении некоторых деталей инструмента и технологической оснастки.

Установлено, что в структуре боросилицированных слоев углеродистых и низколегированных сталей типа 45, 40X, 5ХНМ присутствует преимущественно фаза  $Fe_2B$  с небольшим количеством фаз  $Fe_3Si$  и  $FeB$ . Практика эксплуатации деталей, упрочненных высокотвердыми боридными фазами, показывает, что наиболее эффективная толщина боридных слоев 90–110 мкм. При существенном увеличении размеров зон боридного упрочнения весьма вероятно их скалывание в процессе изнашивания. Исследования показывают, что на сталях 40X, 45 при температуре ХТО 920 °С боросилицированные слои указанной толщины формируются за 5–7 ч (табл. 1).

Таблица 1

Марка стали, процесс ХТО	Температура ХТО, °С	Толщина диффузионного слоя, мкм, за время ХТО, ч			
		4	5	7	8
Сталь 45, В-Si	920	80	90	105	110
40X, В-Si	920	70	80	90	100
Сталь 45, В-C-N	550	145	160	190	205
40X, В-C-N	550	140	155	185	200

Результаты исследований микротвердости, коррозионной стойкости, износостойкости образцов сталей 45, 40X, Х12М после боросилицирования при 920 °С в течение 7 ч приведены в табл. 2. Микротвердость измеряли на изготовленных микрошлифах с помощью прибора ПМТ-3 путем вдавливания в исследуемую поверхность алмазной пирамиды при нагрузке 0,49 Н.

Износостойкость определяли в условиях трения скольжения образцов исследуемых сталей по

контртелу из нормализованной стали 45 при давлении 20 МПа на пути трения 1 км. Износостойкость оценивали по изменению массы (износу) образцов, которые взвешивали до и после испытаний. При этом изменение массы делили на площадь поверхности трения. Коррозионную стойкость оценивали по потере массы на единицу площади исследуемых образцов после выдержки в водопроводной воде в течение 100 ч.

Таблица 2

Процесс упрочняющей обработки	Марка стали	Твердость поверхностных слоев, ГПа	Износ, мг/см <sup>2</sup>	Потеря массы в воде, мг/дм <sup>2</sup>
B-Si, 920 <sup>0</sup> C, 7 ч	45	14,1	102	42
B-Si, 920 <sup>0</sup> C, 7 ч	40X	13,8	105	44
B-Si, 920 <sup>0</sup> C, 7 ч	X12M	13,5		
B-C-N, 550 <sup>0</sup> C, 8 ч	45	5,9	285	11
B-C-N, 550 <sup>0</sup> C, 8 ч	40X	8,4	165	10
B-C-N, 550 <sup>0</sup> C, 8 ч	X12M	13,2		
B-C-N, 550 <sup>0</sup> C, 1 ч	P6M5	14,4		
Закалка + отпуск 550 °C	45	1,9	675	68
Закалка + отпуск 550 °C	40X	2,7	583	65
Закалка + отпуск 550 °C	X12M	5,1		
Закалка + отпуск 550 °C	P6M5	7,9		

Из таблицы видно, что микротвердость боросилицированного слоя на сталях 40X и 45 составляла 13,8–14,1 ГПа. Несколько меньше она на высокохромистой стали X12M. В то же время на образцах без ХТО на сталях 40X и 45 микротвердость составляла 2,7 и 1,9 ГПа соответственно, что более чем в 5 раз ниже. Вследствие высокой твердости боросилицированных слоев износостойкость образцов после этого процесса возрастает примерно в 6 раз. После боросилицирования повышается также и коррозионная стойкость в воде, правда, не столь существенно – всего в 1,5 раза.

Как видно из приведенных данных, в результате боросилицирования существенно повышаются показатели твердости и износостойкости поверхностных слоев стальных деталей. Однако использование подобных высокотемпературных методов ХТО требует для повышения свойств сердцевины изделий последующей их закалки, что неизбежно вызывает изменения размеров, а следовательно, приводит к необходимости окончательной механической обработки рабочих поверхностей. Это частично или полностью устраняет эффект от формирующихся при ХТО износостойких диффузионных покрытий и, кроме того, затрудняет, а иногда делает и невозможной механическую доводку.

В связи с указанными недостатками высокотемпературных процессов ХТО заслуживают внимание процессы, осуществляемые при температурах, которые не превышают температуры общепринятого для большинства деталей из высоколегированных инструментальных сталей отпуска. В этом случае низкотемпературной химико-термической обработке подвергаются изготовленные в окончательный размер детали, включая шлифовку и даже полировку. В результате такой ХТО размеры и чистота поверхности практически не

изменяются, а твердость и износостойкость существенно возрастают. Кроме того, так как температура ХТО не превышает температуры отпуска, сохраняются структура и свойства сердцевины изделия.

Известные процессы низкотемпературной ХТО (газовые азотирование и нитроцементация, жидкостные цианирование и карбонитрация) требуют использования специального оборудования, отдельных площадей и помещений, квалифицированного обслуживающего персонала. Выпускаемое для этих процессов оборудование предназначено для ХТО сравнительно больших партий (более тысячи штук) мелкогабаритных деталей. В то же время упрочнять многие виды деталей, изготавливаемых в небольших количествах (десятки, сотни штук), представляется нецелесообразным, так как это связано с большим перерасходом энергозатрат и насыщающих материалов при недогрузках оборудования. При этом невозможно также упрочнять крупногабаритные изделия, например, кузнечные штампы, масса которых в некоторых случаях может быть более 1 т.

В настоящей работе исследованы возможности использования для повышения долговечности различных видов быстроизнашивающихся деталей разработанных технологических процессов низкотемпературного многокомпонентного диффузионного упрочнения бором, азотом, углеродом (борокарбозазотирование) в порошковых смесях и обмазках, не требующих применения специального оборудования.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что в случае ХТО изделий, работающих в условиях длительного изнашивания (детали оборудования из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей типа 45, 40X, матрицы и пуансоны штампов холодного деформирования металлов из сталей типа X12Ф1, X12M, металло-

формы для горячей обработки материалов из сталей типа 3Х3М3Ф, 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС, 4Х5МФС), целесообразно получать диффузионные слои, толщина которых должна достигать максимально возможных значений. При этом следует учитывать, что так как температура процесса ХТО в данном случае относительно мала (450–600 °С), скорость образования диффузионных слоев находится на низком уровне. Длительность же диффузионного насыщения увеличивает толщину диффузионных слоев с допустимым уровнем погрешности пропорционально корню квадратному от времени ХТО, что не позволяет использовать данный параметр для существенного наращивания зоны упрочнения. В связи со сказанным применительно к различным углеродистым и легированным сталям наиболее приемлемой толщиной диффузионных слоев при низкотемпературном насыщении следует считать 150–200 мкм. Результаты исследований показывают, что в случае сталей 45, 40Х, Х12Ф1, 3Х3М3Ф, 4Х5МФС при температуре ХТО 520–550 °С такую толщину слоя можно получить за 6–10 ч.

В случае режущего инструмента (метчики, развертки, зенкеры сверла, фрезы, прошивки и др.), изготавливаемого из быстрорежущих сталей типа Р6М5, Р18, Р9, Р3М3, как показывают испытания, оптимальная толщина диффузионного слоя составляет 30–50 мкм. При температуре ХТО 550 °С получить диффузионные слои такой толщины можно за 50–80 мин.

Следует отметить, что микротвердость борокарбозитированных слоев в отличие от боросилицированных плавно уменьшается по мере удаления от поверхности к сердцевине, что обеспечивает прочное их сцепление с металлической основой и предотвращает скалывание даже при относительно высоких динамических нагрузках.

Исследования показывают, что структура борокарбозитированных слоев кардинально отличается от боросилицированных. Так, вблизи поверхности исследуемых сталей 45 и 40Х находится светлая полоска  $\epsilon$ -фазы. Эта фаза состава  $Fe_{2-3}(N,C,V)$  с гексагональной решеткой. Под ней располагается зона гетерогенного строения, в которой наряду со структурными составляющими основного материала присутствуют включения борокарбонитридов железа, их концентрация плавно снижается по мере удаления от поверхности, что вызывает уменьшение микротвердости. Установлено, что в случае присутствия в составе сталей таких легирующих элементов, как хром, вольфрам, ванадий, титан и других наряду с борокарбонитридами железа в структуре диффузионного слоя появляются и борокарбонитриды указанных элементов. Их микротвердость существенно превышает твердость борокарбонитридов железа, что приводит к повышению микротвердости всего диффузионного слоя. Причем чем

больше легирующих элементов в стали, тем выше твердость. Из табл. 2 видно, что вблизи поверхности после борокарбозитирования стали 45 микротвердость достигает 5,9 ГПа, в случае стали 40Х с 1% хрома микротвердость уже 8,4 ГПа, а при повышении содержания хрома до 12% (сталь Х12М) микротвердость уже 13,2 ГПа. В случае стали Р6М5 микротвердость повышается еще в большей степени – 14,4 ГПа. В то же время без ХТО твердость сталей 45 и 40Х всего составляет 2,0–2,5 ГПа.

Повышение твердости поверхностных слоев после борокарбозитирования сталей 45 и 40Х приводит к росту износостойкости в 2,5–3,0 раза, что ниже, чем в случае боросилицированных образцов (табл. 2), однако коррозионная стойкость после борокарбозитирования увеличивается примерно в 6 раз, что превышает подобный показатель после боросилицирования.

После выполненных процессов ХТО были проведены исследования состояния шероховатости поверхности, которые показывают, что после процесса боросилицирования шероховатость поверхности не изменяется, если исходная шероховатость ( $R_a$  до ХТО) не менее 0,8 мкм. Если до боросилицирования шероховатость менее чем 0,8 мкм, то после ХТО она может подняться до 0,8 мкм. Следует отметить, что после боросилицирования на поверхности деталей остаются отдельные точечные частицы порошковой смеси, которые полностью растворяются после выдержки деталей в горячей воде. Если растворившиеся частицы недостаточно хорошо удалены с поверхности, профилометр может давать значения  $R_a$  до 0,9–1,0 мкм. Для получения уровня шероховатости менее 0,8–1,0 мкм можно использовать в качестве доводочных материалов пасты на основе мелкодисперсных порошков оксида хрома (используется для приготовления микрошлифов), карбида бора, а также алмазную пасту и др. После процесса борокарбозитирования шероховатость поверхности не изменяется, если исходная шероховатость ( $R_a$ ) не менее чем 0,5 мкм.

Приведем некоторые конкретные данные производственных испытаний различных видов инструмента и технологической оснастки.

Например, на Минском автозаводе в цехе редуторов механосборочного производства испытаны сверла диаметром 17 мм из стали Р6М5 при сверлении отверстий в детали из стали 40Х твердостью 156–229 НВ. Сверлами, прошедшими ХТО, обрабатывалось 250–300 деталей каждым, серийными сверлами, не имеющими диффузионных покрытий, обрабатывалось 120–150 деталей. В этом же цехе испытаны развертки при обработке отверстий диаметром 15 мм в детали из стали 20ХН3А твердостью 156–229 НВ. Одновременно обрабатывали четыре отверстия. Установлено, что при работе диффузионно-упрочненными разверт-

ками выход размера развернутого отверстия за пределы допуска происходил после обработки 300–330 деталей. Серийными развертками, которые не имели диффузионных покрытий, обрабатывалось 120–150 деталей. В цехе нормалей механосборочного производства испытаны метчики 1/8 дюйма, изготовленные из стали Р6М5. Резьба нарезалась в детали из стали 35. Испытания показали, что стойкость метчиков, прошедших новую химико-термическую обработку, повышается в 7–10 раз по сравнению с серийными метчиками, не имеющими диффузионных покрытий. В цехе мелких штампов испытаны пуансоны штампов холодной высадки муфты. В серийном варианте их “изготавливают из стали Р6М5 с последующей термообработкой по общепринятым режимам и нанесением покрытий на основе нитрида титана. Испытания показали, что стойкость диффузионно-упрочненных пуансонов – 70 тыс. деталей, стойкость серийных пуансонов с покрытием на основе нитрида титана – 5–10 тыс. деталей.

На Минском мотовелозаводе после диффузионного упрочнения фрезы диаметром 26 мм при обработке отливок из стали Х23Н18Т обеспечивают повышение стойкости в 6–8 раз; сверла диаметром 5,1 мм для глубокого сверления деталей из стали 12ХНЗА – в 2,0–2,2 раза; комбинированные сверла при сверлении тормозных колодок – в 10–12 раз.

На Минском тракторном заводе диффузионно-упрочненные по предложенной технологии запрессовочные, распрессовочные и осадочные штамповые вставки, применяемые при сборке шарнирных соединений, обеспечивают более чем в 3 раза высокую стойкость по сравнению со штампами без ХТО. После ХТО фильеры для протягивания металлопроката круглого сечения и шестигранника сечением 50 мм также показывают увеличение стойкости не менее чем в 3 раза.

На Барановическом автоагрегатном заводе диффузионно-упрочненные матрицы и пуансоны из сталей Х12М, Х12Ф1 для холодного выдавливания деталей обеспечили повышение стойкости в 8–10 раз, а формы для литья под давлением алюминиевых сплавов более чем в 2 раза по сравнению с аналогичной оснасткой, не подвергнутой ХТО.

Приведенные данные производственных испытаний показывают, что стойкость различных

типов деталей, подвергнутых химико-термической обработке в разработанных новых видах порошковых смесей и обмазок, значительно выше, чем у аналогичных изделий без специальных покрытий.

Таким образом, в настоящей работе исследованы два процесса ХТО – боросилицирование и борокарбозотирование. Каждый из этих процессов имеет свои специфические особенности и в плане выполнения температурных параметров технологических операций и по получаемым после ХТО свойствам поверхностных слоев упрочняемых деталей. Так, процесс боросилицирования проводится при температурах 900–950 °С и требует существенных энергозатрат, но на углеродистых и низколегированных сталях формируются диффузионные слои повышенной твердости (выше 13 ГПа), вследствие чего износостойкость при определенных параметрах испытаний возрастает более чем в 6 раз. Процесс борокарбозотирования более энергосберегающий, так как проводится при температурах 450–600 °С, но на углеродистых и низколегированных сталях типа 45, 40Х формируются диффузионные слои микротвердостью до 8,0–8,5 ГПа, что хотя и значительно выше, чем в сталях 40Х и 45 без ХТО (около 2–3 ГПа), но ниже, чем в случае боросилицирования. Следует отметить, что если твердость после низкотемпературной обработки выше 12 ГПа, можно использовать стали повышенной легированности типа Х12М, Р6М5, 4Х5МФС, 38Х2МЮА и др. При этом важной особенностью этого процесса, проведенного при определенных параметрах, является значительная коррозионная стойкость поверхностных слоев деталей во влажной среде (увеличивается более чем в 6 раз). Таким образом, процесс борокарбозотирования можно рекомендовать к использованию как для повышения долговечности деталей машин и оборудования, эксплуатирующихся в условиях изнашивания, в том числе и во влажной среде, так и для повышения стойкости металлообрабатывающего инструмента из быстрорежущих сталей типа Р6М5 (сверла, метчики, фрезы, развертки, зенкеры и др.), деформирующей оснастки из легированных штамповых сталей и других видов деталей.

#### Литература

1. Ситкевич М.В., Бельский Е.И. Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок. Мн.: Выш. шк., 1987.