

УДК 621.7

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ  
ПОСЛЕ БОРИРОВАНИЯ И БОРОСИЛИЦИРОВАНИЯ  
НА СТОЙКОСТЬ ШТАМПОВЫХ ВСТАВОК  
ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ШАРНИРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

**М. В. СИТКЕВИЧ**, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет

*В статье рассматривается технология диффузионного упрочнения без использования специального оборудования. Технология основана на применении новых видов диффузионноактивных смесей и обмазок для борирования и боросилицирования, которыми покрываются готовые изготовленные в окончательный размер изделия. Процесс проводится в обычных печах с воздушной атмосферой. Обеспечивается увеличение долговечности изделий за счет повышения твердости, износостойкости поверхностных слоев. Технология предназначена для упрочнения быстроизнашивающихся деталей штамповой оснастки, инструмента, оборудования.*

**Ключевые слова:** технология диффузионного упрочнения, смеси, обмазки, борирование, боросилицирование, повышенная твердость поверхностных слоев, быстроизнашивающиеся детали штамповой оснастки.

**THE INFLUENCE OF STRUCTURAL FACTORS  
AFTER BORATION AND BOROSILICATION  
ON THE DURABILITY OF DIE INSERTS FOR PRESSING  
HINGE JOINTS IN PRODUCTION CONDITIONS**

**M. V. SITKEVICH**, Dr. of Engineering Sciences

Belarusian National Technical University

*The article discusses the technology of diffusion hardening without the use of special equipment. The technology is based on the use of new types of diffusion-active mixtures and coatings for boration and borosilication, which are covered with finished products made in the final size. The process is carried out*

*in conventional furnaces with an air atmosphere. An increase in the durability of products is provided by increasing the hardness, wear resistance of the surface layers. The technology is designed for hardening of wear-resistant parts of die tooling, tools, equipment.*

**Keywords:** *diffusion hardening technology, mixtures, coatings, boration, borosilication, increased hardness of surface layers, wear-resistant parts of dies tooling.*

Для изготовления шарнирных соединений транспортных средств необходимо использование различных видов запрессовочных, распрессовочных и осадочных штамповых вставок. В условиях ОАО «Минский тракторный завод» (ОАО «МТЗ») при производстве этого вида штамповой оснастки используются преимущественно стали 5ХНМ и 5ХНВ. Основной причиной выхода из строя штамповых вставок для сборки шарнирных соединений является изнашивание их рабочих поверхностей. Для повышения свойств поверхностных слоев изделий из этих сталей могут быть выполнены различные методы химико-термической обработки (ХТО). При этом наибольший интерес представляют процессы, протекающие в условиях нагрева в обычных камерных печах с окислительной атмосферой без использования специального оборудования и устройств.

В работе представлены результаты исследований образцов сталей 5ХНМ и 5ХНВ. Указанные горячештамповые стали наиболее широко используются для изготовления как сравнительно мелкогабаритных, так и крупногабаритных деталей штамповой оснастки. Такая инструментальная оснастка работает в условиях изнашивания рабочих поверхностей, зачастую сопровождающегося динамическими воздействиями. Для повышения стойкости оснастки целесообразно создавать на их рабочих поверхностях высокотвердые фазы, обеспечивающие повышенную износостойкость в сочетании с приемлемым сопротивлением хрупкому растрескиванию в процессе штамповки. В этом плане в первую очередь заслуживают внимания процессы боридного упрочнения, которые проводятся при температурах, сопоставимых с температурами нагрева под закалку штамповой оснастки. Наиболее существенные структурные изменения в поверхностных слоях стальных деталей можно обеспечить процес-

сами диффузионного насыщения бором и кремнием (борирование, боросилицирование).

В случае ХТО мелкогабаритных деталей горячих штампов целесообразно использование особого типа борирующих и боросилицирующих порошковых смесей, которые после засыпки ими изделий в негерметизируемых контейнерах эффективно функционируют в окислительной воздушной печной среде без использования каких-либо защитных средств. В случае крупногабаритных деталей штамповой оснастки наиболее рационально использование специально разработанных обмазок, которые наносятся тонким слоем только на рабочую часть крупногабаритных деталей (рисунок 1).

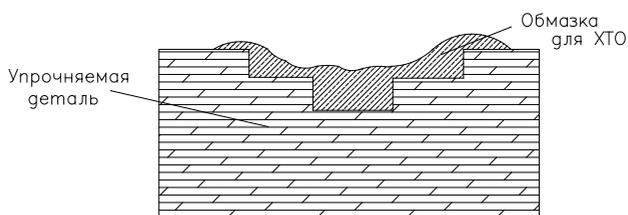


Рисунок 1 – Схема упрочнения крупногабаритных деталей с использованием обмазок

В условиях длительного нагрева в воздушной атмосфере камерных термических электрических печей специально разработанные диффузионноактивные смеси и обмазки эффективно функционируют в присутствии кислорода 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 смеси и обмазкой диффузионноактивной и защитной функций. Именно в результате взаимодействия кислорода и отдельных компонентов, входящих в порошковую среду, на поверхности обмазки появляется легкоплавкая стеклообразная оболочка, герметизирующая основную массу диффузионноактивной обмазки, создавая в ней избыточное давления газовой фазы. Таким образом, кислород является обязательным компонентом печной атмосферы, без которого осуществлять химико-термическую обработку с использо-

ванием разработанных специальных смесей и обмазок невозможно. Поэтому и подбор компонентов должен быть таким, чтобы в результате образования легкоплавкой оболочки, при взаимодействии кислорода с поверхностным слоем диффузионноактивная среда была надежно защищена от атмосферы печи и функционировала подобно герметичному мини-контейнеру [1].

В работе представлены результаты исследований образцов сталей 5ХНМ и 5ХНВ после борирования и боросилицирования в порошковых смесях и обмазках, в которых присутствовал комплекс компонентов, обеспечивающий надежное удержание обмазки при ХТО на в значительной степени наклоненных и даже на вертикальных поверхностях и хорошее отделение смесей от упрочняемых поверхностей после ХТО. Поставщиком активных атомов бора в борлирующих и боросилицирующих смесях и обмазках являлся карбид бора, поставщиками атомов кремния в боросилицирующих смесях и обмазках – компоненты на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SiC}$ , в качестве газогенерирующего активатора использовался фтористый натрий. Кроме того в диффузионноактивных смесях и обмазках обязательно присутствие компонентов, препятствующих спеканию и хорошему отделению смесей и обмазок от насыщаемой поверхности. В обмазках также должны присутствовать составляющие, обеспечивающие хорошую кроющую способность, позволяющие наносить обмазку даже на вертикальные поверхности и не сваливаться ей с упрочняемых деталей как до ХТО, так и во время высокотемпературной выдержки.

Типовые структурные изменения в зависимости от параметров и видов ХТО, существенно сказывающиеся на свойствах, четко проявляются на примере сталей 5ХНМ и 5ХНВ, использующихся для изготовления штамповых вставок для прессования шарнирных соединений на ОАО «МТЗ».

При насыщении в течение 1 ч в борлирующей смеси при 880 °С на сталях 5ХНМ и 5ХНВ формируются слои толщиной 45–50 мкм. При насыщении в течение 1 ч в борлирующей обмазке формируются диффузионные слои чуть меньшей толщины (уменьшение толщины не превышает 3 мкм). Увеличение времени насыщения до 4 ч дает увеличение толщины борированного слоя на сталях 5ХНМ и 5ХНВ до 95–100 мкм при насыщении в смеси, а при ХТО в борлирующей обмазке толщина слоя уменьшается до 90–95 мкм. Борированные

слои, полученные как в порошковых смесях, так и в обмазках, имеют характерное игольчатое строение.

Боросилицирование образцов сталей 5ХНМ и 5ХНВ при температуре 880 °С приводит к формированию диффузионных слоев, которые по толщине заметно меньше, чем борированные. Результаты исследований показывают, что при температуре 880 °С за 4 ч в смесях на сталях 5ХНМ и 5ХНВ образуются боросилицированные слои толщиной порядка 75–80 мкм. При этом толщина диффузионных боросилицированных слоев, полученных в обмазках, на 3–4 мкм меньше, чем в случае ХТО в порошковой смеси.

В структуре борированных слоев рентгеноструктурным анализом обнаружены фазы FeВ и Fe<sub>2</sub>В. В отличие от борированных слоев в структуре боросилицированных слоев рентгеноструктурным анализом фиксируются фазы Fe<sub>2</sub>В, Fe<sub>3</sub>Si и не обнаружена фаза FeВ. По микроструктуре боросилицированные слои, полученные при 880 °С, похожи на борированные, они имеют игольчатое строение, но иглы боридов несколько более узкие, чем в случае борирования и между ними просматривается небольшая доля включений фаз типа Fe<sub>3</sub>Si.

Структурные изменения, имеющие место в результате борирования и боросилицирования при различных параметрах ХТО, существенно сказываются на показателях микротвердости и микрохрупкости диффузионных слоев.

На рисунке 2 приведены результаты исследований микротвердости образцов сталей 5ХНМ и 5ХНВ после ХТО при температуре 880 °С в течение 4-х ч.

Наиболее высокие показатели микротвердости имеют место в случае борирования сталей. Причем высокая микротвердость поверхности (17,5–18,5 ГПа) отмечается как в случае борирования в обмазках, так и порошковых смесях. Следует отметить, что такая твердость характерна находящейся вблизи поверхности фазе FeВ, которая образуется в борированных слоях как при температуре 880 °С, так при более высоких температурах. Под слоем фазы FeВ располагается зона фазы Fe<sub>2</sub>В, твердость которой несколько ниже – на уровне 13–13,5 ГПа. В случае боросилицирования при температуре 880 °С микротвердость поверхности как раз и соответствует микротвердости фазы Fe<sub>2</sub>В. При этом ХТО как в обмазках, так и

порошковых смесях в не герметизируемых контейнерах дает практически аналогичные результаты.

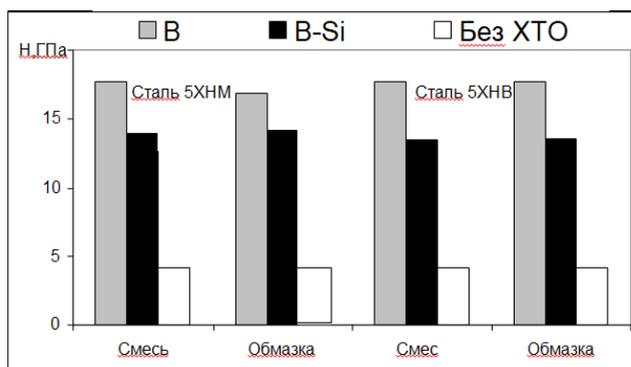


Рисунок 2 – Влияние ХТО на микротвердость поверхностных слоев, полученных при 880 °С за 4 ч

Изменение структурного состояния боросилицированных слоев по сравнению с борированными очень заметно сказывается на микрохрупкости. Определение микрохрупкости диффузионных слоев проводилось с использованием прибора для измерения микротвердости ПМТ-3. Микрохрупкость оценивалась по напряжению скола  $G_{ск}$  упрочненной поверхности (чем ниже напряжение скола, тем выше хрупкость), которое зависит от  $l$  (минимальное расстояние от центра отпечатка алмазной пирамиды до края образца при нагрузке  $P$ ):

$$G_{ск} = 0,17P / (2l^2 + lc),$$

где  $c$  – длина диагонали отпечатка алмазной пирамиды [2].

Так, наиболее твердая поверхностная зона из фазы FeV боридного слоя обладает и наиболее высокой хрупкостью (минимальный уровень напряжения скола). В случае боросилицирования при температуре 880 °С при снижении микротвердости всего на 20–25 % (до уровня 13–13,5 ГПа, что характерно фазе Fe<sub>2</sub>V) напряжение скола увеличивается примерно в 3 раза (рисунок 3), что свидетельствует о значительном повышении сопротивления хрупкому разрушению боросилицированных поверхностей деталей при их работе в условиях динамических воздействий в процессе изнашивания.

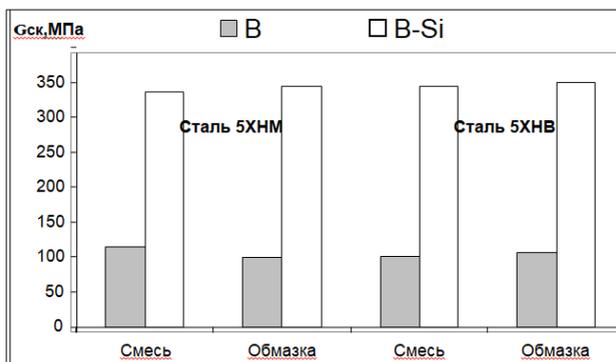


Рисунок 3 – Микрохрупкость диффузионных слоев, полученных при 880 °С за 4 ч

Таким образом, изменяя виды боридного упрочнения (боросилицирование, борирование) можно получать отличающиеся по структуре диффузионные слои с различным соотношением фаз FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>Si. Это в значительной степени влияет на сопротивление хрупкому разрушению поверхностных слоев деталей, эксплуатирующихся в реальных условиях в парах трения при высоких давлениях или ударных воздействиях, приводящих к сколам высокотвердых фаз, повышенной хрупкости. Причем использование боросилицирования, после которого в структуре диффузионного слоя отсутствует более хрупкая фаза FeB, более эффективно по сравнению с борированием.

Практика эксплуатации деталей, упрочненных высокотвердыми боридными фазами, показывает, что наиболее эффективная толщина боросилицированных слоев 70–100 мкм. Исследования показывают, что на исследуемых низколегированных сталях 5ХНМ, 5ХНВ при температурах ХТО 880–920 °С боросилицированные слои указанной толщины формируются за 4–6 ч.

На первоначальном этапе в условиях ОАО «МТЗ» с целью повышения долговечности запрессовочных, распрессовочных и осадочных штамповых вставок проведены работы по применению процессов диффузионного упрочнения с использованием порошковых сред для борирования. Как известно, борированные диффузи-

онные слои, состоящие из высокотвердых фаз FeB и Fe<sub>2</sub>B, обеспечивают высокие показатели твердости и износостойкости. Однако производственные испытания борированных штамповых вставок показали, что при обеспечении существенного повышения износостойкости в результате значительных удельных давлений, имеющих место в процессе запрессовки, на отдельных вставках имелись сколы высокотвердого, но довольно хрупкого поверхностного борированного слоя. Это является отрицательным фактором при использовании борирования для конкретного вида оснастки. Снизить хрупкость боридных диффузионных покрытий можно за счет структурного регулирования при двухкомпонентном диффузионном насыщении поверхностных слоев стальных деталей бором и кремнием, когда среди высокотвердых хрупких боридов в структуре появляются относительно мягкие силициды железа.

Процесс боросилицирования промышленных партий запрессовочных, распрессовочных и осадочных штамповых вставок по отработанным параметрам осуществлялся в условиях термического цеха инструментального производства ОАО «МТЗ». Проведенные дюраметрические исследования с использованием микродвердометра ПМТ-3 показали, что на образцах из стали 5ХНМ микротвердость рабочих поверхностей в результате боросилицирования составляла 13,5 ГПа. В то же время без химико-термической обработки после закалки с температуры 880 °С и отпуска 500 °С микротвердость исследованных сталей не превышала 4 ГПа.

Промышленные партии боросилицированных вставок использовались при сборке шарнирных соединений в механическом цехе № 4 ОАО «МТЗ». Результаты сравнительных испытаний запрессовочных, распрессовочных и осадочных штамповых вставок индекса 1450-5671 оценивались по количеству собранных шарнирных соединений (таблица 1).

Таблица 1 – Стойкость штамповых вставок из стали 5ХНМ

Наименование оснастки	Стойкость без ХТО, количество собранных шарнирных соединений	Стойкость после ХТО, количество собранных шарнирных соединений
Вставки индекса 1450-5671	250	750

Проведенные цеховые наблюдения показывают, что в результате применения боросилицированных вставок обеспечивается изготовление 750 шарнирных соединений. При этом каких либо сколов поверхностных слоев, как это имело место в случае борированных вставок, не обнаруживалось. В то же время у вставок без ХТО количество собранных шарнирных соединений не превышает 250.

Приведенные данные свидетельствуют о повышении стойкости штамповых вставок в 3 раза с одновременным увеличением эксплуатационных периодов, приводящих к уменьшению объемов ремонтных работ, необходимых для замены вышедших из строя штамповых вставок на новые.

### Список литературы

1. **Ситкевич, М. В.** Совмещенные процессы химико-термической обработки с использованием обмазок / М. В. Ситкевич, Е. И. Бельский. – Минск: Выш. школа, 1987. – 156 с.

2. **Григоров, П. К.** Методика определения хрупкости борированного слоя / П. К. Григоров, А. И. Катханов. – В книге «Повышение надежности и долговечности деталей машин». – Ростов-на-Дону, 1972. – Вып. 16. – С. 97–98.

### References

1. **Sitkevich, M. V.** *Sovmeshchennye processy himiko-termicheskoy obrabotki s ispol'zovaniem obmazok* [Combined processes of chemical-thermal treatment using coatings] / M. V. Sitkevich, E. I. Belsky. – Minsk: Vyshejschaya shkola Publ., 1987. – 156 p.

2. **Grigоров, P. K.** *Metodika opredeleniia hrupkosti borirovannogo sloia* [Method for determining the fragility of the borated layer] / P. K. Grigоров, A. I. Katkhanov. – In the book “Improving the reliability and durability of machine parts”. – Rostov-on-Don, 1972. – Vol. 16. – P. 97–98.

*Поступила 14.11.2022*

*Received 14.11.2022*