

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ БОРИРОВАНИЯ

Ланчиков Д.А.- аспирант

Алтайский государственный технический университет ( г. Барнаул)

Внедрение новых технологических процессов в промышленности в ряде случаев тормозится отсутствием материалов, способных работать в экстремальных условиях. Изыскание новых возможностей изменения комплекса физико-механических свойств металлов в заданном направлении является актуальной задачей современного материаловедения. Решение этой задачи требует совершенствования существующих и создания новых методов обработки металлов. Одним из наиболее эффективных и распространенных способов поверхностного упрочнения металлопродукции является химико-термическая обработка (ХТО). Методы ХТО позволяют получать на поверхности весь спектр требуемых при эксплуатации изделий свойств: высокую твердость, коррозионную стойкость, износостойкость, жаростойкость и т.д. К перспективным методам ХТО относят процесс борирования [1,4].

В основу деления разработанных и применяемых в настоящее время процессов борирования можно положить агрегатное состояние насыщающей среды при химико-термической обработке (ХТО). В соответствии с этим классификационным признаком можно выделить три основных метода борирования: в твердых, жидких, газообразных средах. Борирование в обмазках (из паст) занимает промежуточное положение между борированием в твердых и жидких средах. В зависимости от состава обмазки, температуры процесса и способа нагрева этот способ борирования приближается к одному из них.

## Классификация методов борирования

### *1. Борирование в порошках в герметизируемых контейнерах*

В качестве насыщающих сред при этом способе борирования можно использовать порошки аморфного и кристаллического бора, карбида бора, ферробора, боридов переходных металлов. С целью предотвращения спекания порошков в них часто вводят инертные добавки ( $Al_2O_3$ , MgO и др.) в количестве от 20 до 60%, а для ускорения процесса - активаторы (NaF,  $AlF_3$ ,  $KBF_4$  и др.) в количестве 1-5% от массы смеси.

Из известных смесей [2] для борирования в порошках предпочтение следует отдать следующим смесям на основе карбида бора: 1) 100 %  $B_4C$ ; 2) 98,5...98 %  $B_4C$  + 1,5...2,0 %  $AlF_3$ .

Перед использованием компоненты порошковых смесей подсушивают, измельчают, просеивают, дозируют в необходимых количествах и смешивают. Карбид бора перед употреблением рекомендуется прокалить при температуре 350-400°C в течение 1,5-2 ч. Отработанные смеси регенерируются путем добавления 20-30% свежей смеси.

Температура формирования плавкого затвора должна находиться в пределах 500-700°C.

Насыщение проводят при температуре 900-1000°C в течение 2-6 ч. Длительность выдержки выбирают исходя из требуемой толщины боридного слоя. Как показывает опыт, для подавляющего большинства изделий боридный слой толщиной 80-150 мкм оказывается вполне достаточным. Длительность прогрева тигля устанавливается из расчета 30 мин на 100 мм сечения тигля.

После истечения времени выдержки контейнеры выгружают из печи, охлаждают на воздухе и распаковывают. С целью устранения припекания смеси к поверхности деталей рекомендуется их извлекать из контейнера при температуре не ниже 80°C.

### *2. Газовое борирование*

Газовое борирование проводят в специальных установках за счет разложения газообразных соединений бора: диборана ( $B_2H_6$ ), треххлористого бора ( $BCl_3$ ), трехбромистого бора ( $BBr_3$ ), триметил [ $(CH_3)_3B$ ] и других веществ [5].

В технологическом отношении процесс газового борирования подобен процессам газовой цементации или азотирования. Борируемые детали собирают, как правило, на специальных приспособлениях и загружают в реакционную камеру, нагретую до заданной

температуры, после чего реактор герметизируя установку продувают (3-5 мин) инертным газом и создают избыточное давление (200-400 мм. рт. ст.) [5]. После достижения указанного давления через инжекторный смеситель в реактор подают борсодержащий газ. Наиболее часто для борирования применяют диборан и треххлористый бор, который разбавляют водородом, аргоном, очищенным азотом или аммиаком. Наибольшая скорость процесса наблюдается при использовании смесей  $B_2H_6$  и  $BCl_3$  с водородом. Соотношение диборана и водорода должно быть в пределах 1/25-1/225, а треххлористого бора и водорода - 1/15-1/20 [5]. Замена водорода азотом или аммиаком уменьшает скорость процесса, но уменьшает и его взрывоопасность, поэтому такую замену следует считать целесообразной.

Насыщение проводят при температурах 800-850°C. Время выдержки варьируется от 2 до 6 ч. Существенное влияние на результаты борирования оказывает скорость газового потока. Для каждой установки она подбирается индивидуально. При рекомендованных режимах борирования на углеродистых сталях формируется боридный слой толщиной 50-200 мкм. По окончании процесса борирования подачу борсодержащего газа прекращают, а газ-разбавитель пропускают через установку еще 5-10 мин. По истечении указанного времени давление в реакторе уменьшают до атмосферного, прекращают подачу инертного газа, разгерметизируют установку и извлекают борированные детали.

### *3. Электролизное борирование*

Электролизное борирование проводят на специальных установках, основными составными частями которых являются печь-ванна с металлическим тиглем, система питания постоянным током, система автоматического контроля и регулирования температуры.

Подготовленные к насыщению детали монтируют на специальных приспособлениях и подключают в цепь электролиза в качестве катода. Анодами служат графитовые (реже силитовые) стержни. Перед началом процесса детали прогревают в электролите 10-30 мин, затем включают ток электролиза, величина которого устанавливается из расчета  $1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup> борлируемых деталей и приспособления, и ток защиты тигля  $1 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^2$  А/м<sup>2</sup> поверхности тигля, находящейся в расплаве [3]. Режим процесса электролизного борирования выбирают в зависимости от требуемой толщины слоя.

Электролизное борирование применяется преимущественно в массовом производстве при обработке однотипных изделий.

### *4. Жидкостное (безэлектролизное) борирование*

Жидкостное (безэлектролизное) борирование можно проводить в любых печах-ваннах, обеспечивающих получение требуемой температуры. Обычно для этих целей применяют те же печи, что и для электролизного борирования.

В качестве насыщающих сред используют расплавы на основе боратов щелочных металлов (преимущественно  $Na_2B_4O_7$ ), в которые добавляют электрохимические восстановители: химически активные элементы (Al, Si, Ti, Ca, Mn, V и др.) или ферросплавы, лигатуры и химические соединения на их основе - ферромарганец (ФМн95), силикомарганец (СМн17), силикоцирконий (СиЦр50), карбид бора ( $B_4C$ ), карбид кремния (SiC), силикокальций (СК25). Указанные вещества вводят в расплав в виде порошка с размером частиц 0,05-0,6 мм (в зависимости от природы и удельной массы восстановителя). Оптимальное содержание восстановителя в расплаве колеблется от 20 до 40% по массе [3].

Для получения двухфазных ( $FeB + Fe_2B$ ) слоев можно рекомендовать следующие расплавы: 1) 60-70 %  $Na_2B_4O_7$  + 40-30 %  $B_4C$ ; 2) 80 %  $Na_2B_4O_7$  + 20 % СК25, а для получения однофазных ( $Fe_2B$ ) слоев: 1) 70 %  $Na_2B_4O_7$  + 30 % SiC; 2) 70 %  $Na_2B_4O_7$  + 30 % СМн17.

Наиболее рационально применение данного способа борирования в мелкосерийном и серийном производствах.

### *5. Борирование в обмазках (из паст)*

Борирование в обмазках (из паст) целесообразно применять при упрочнении крупногабаритных изделий, а также при необходимости местного борирования. Развитие этого направления в борировании стимулируется также возможностью совмещения

борирования с применяемыми на предприятиях режимами термической обработки упрочняемых деталей.

Технология процесса борирования из паст предусматривает выполнение следующих операций: приготовление обмазки, подготовка упрочняемой поверхности к насыщению, нанесение и сушка обмазки, борирование деталей по заданному режиму, охлаждение и очистка деталей от пасты.

Основные компоненты пасты тщательно смешивают в специальных смесителях и разбавляют связующим до требуемой консистенции. В качестве связующих используют гидролизованый этилсиликат, жидкое стекло, сульфитно-спиртовую барду, декстриновый клей и т. д. Консистенция пасты определяется в основном выбранной технологией ее нанесения на детали: пульверизацией, окунанием, кистью.

После завершения режима насыщения детали охлаждают на воздухе или подвергают непосредственной закалке.

#### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ БОРИРОВАНИЯ

При сравнительной оценке существующих методов борирования в первую очередь необходимо учитывать их технологические достоинства и недостатки, производительность (скорость насыщения) и стоимость (экономическую эффективность).

Таблица №1 – Сравнительная характеристика методов борирования

№	Метод	Достоинства	Недостатки
1	Жидкостное борирование (безэлектролизное)	Технологическая простота, отсутствие специального оборудования	Повышенная вязкость применяемых расплавов по сравнению с чистой бурой
2	Электролизное борирование	Высокое качество боидных слоев, высокопроизводительно	Необходима специальная энергоемкая установка
3	Борирование в порошковых средах	Простота технологического оборудования, упрочнение изделий сложных форм, минимальная деформация при обработке	Наибольшие денежные затраты на порошковую смесь
4	Газовое борирование	Упрочнение изделий сложных форм	Взрывоопасен

Следует отметить, что в настоящее время не существует метода борирования, который бы по своим технико-экономическим показателям значительно превосходил все остальные. Каждый из методов борирования имеет достоинства и недостатки. Выбор метода должен проводиться с учетом характера обрабатываемых изделий, условий их работы, массовости изготовления экономичности и т. д.

С точки зрения технологической простоты наиболее выигрышным является жидкостное борирование. Для проведения этого процесса, как уже указывалось, не требуется какое-либо специальное оборудование - процесс осуществляется в обычных печах-ваннах. Однако расплавы, применяемые при жидкостном борировании, как правило, имеют повышенную по сравнению с чистой бурой вязкость, что приводит к заметному уносу расплава с обрабатываемыми деталями. Это один из главных недостатков указанного способа борирования.

Второй нерешенной до конца проблемой жидкостного борирования является очистка борированных изделий от остатков расплава и их повторное использование. Этому вопросу до сих пор не уделялось достаточного внимания.

Электролизное борирование нашло более или менее широкое, промышленное применение. Оно высокопроизводительно, результаты хорошо воспроизводимы, качество получаемых боридных слоев высокое. Однако и этот способ борирования не лишен технологических недостатков. Для осуществления этого способа насыщения необходима специальная энергоемкая установка. Насыщающей средой при электролизном борировании обычно является расплавленная бура. Чистая бура более агрессивна по отношению к материалам, из которых изготавливаются тигли, чем расплавы, используемые для жидкостного борирования. Стойкость тиглей может быть повышена применением катодной защиты, но это заметно усложняет и удорожает установку для электролизного борирования.

Электролизное борирование может быть рекомендовано в массовом производстве для деталей сравнительно простой конфигурации.

Борирование в порошкообразных смесях начинает получать все большее промышленное применение. Однако это обусловлено не столько достоинствами данного метода борирования, сколько нерешенными проблемами и технологическими недоработками других методов борирования.

В аппаратном оформлении процесс насыщения порошков достаточно прост, но культура производства остается низкой, а трудоемкость высокой.

Насыщению можно подвергать изделия любой конфигурации. Качество боридных слоев, полученных насыщением из порошков (чистота поверхности и сплошность), ниже качества диффузионных слоев, полученных другими методами борирования.

В существующем технологическом варианте борирование в порошкообразных смесях можно рекомендовать для упрочнения изделий сложной формы, в особенности если они после борирования не подвергаются термической обработке, так как коробление и деформация при этом методе борирования минимальная.

При необходимости упрочнения крупногабаритных изделий или совмещения борирования с термической обработкой целесообразно использование насыщения из паст.

Производительность основных способов борирования в первом приближении может быть оценена по скорости формирования боридного слоя при одинаковых условиях насыщения. Скорость формирования боридного слоя при электролизном борировании примерно вдвое больше, чем при жидкостном, и втрое больше скорости насыщения из твердой фазы.

Поскольку бура является самым дешевым насыщающим веществом, электролизное борирование оказалось не только самым производительным, но и самым экономичным способом борирования.

Экономическая эффективность порошкового борирования определяется кратностью использования смеси и используемым борсодержащим веществом. Стоимость обработки порошковым методом, как правило, выше, чем жидкостным. В этом отношении особого внимания заслуживает металлотермический способ борирования как наиболее экономичный из всех порошковых способов.

#### *Литература:*

1. Лахтин Ю.М. Основы металловедения: учеб.-М.: Металлургия, 1988. -320с.
2. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия: справ. пособие,1989.-187с.
3. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали: перераб. и доп.-М.: Металлургия, 1991.-472с.
4. Гармаева И.А. Фазовый состав и кинетика формирования диффузионных слоев при борировании сталей: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, 2008. с15-16.
5. Л.Г. Ворошнин Борирование сталей и чугунов: справ. пособие,1981.-205с.

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА БОРИРОВАНИЯ СРЕДИ МЕТОДОВ ХИМИКО – ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРОБОТКИ (ХТО)

Ланчиков Д.А.- аспирант

Алтайский государственный технический университет (г. Барнаул)

В последнее десятилетие борирование в нашей стране и за рубежом получило широкое распространение. Достаточно отметить, что по количеству ежегодных публикаций борирование конкурирует с такими широко распространенными в промышленности процессами, как цементация, азотирование, нитроцементация. Качественно изменился и характер работ в этой области. Наряду с чисто теоретическими и технологическими исследованиями появляются работы прикладного и внедренческого характера. В сферу выполнения этих работ вовлечен широкий круг промышленных предприятий, отраслевых институтов, технологических и конструкторских бюро, которые раньше борированием не занимались. Естественно, что они вынуждены начинать освоение этого процесса с самого начала, в частности выполнить определенный объем экспериментальных работ по изучению кинетики формирования борированного слоя, его строения, фазового состава и свойств, изменению размеров, чистоты поверхности и механических свойств промышленных сталей в результате борирования и т. д. Необходимость выполнения этих работ обусловлена тем, что имеющиеся в литературе сведения по борированию промышленных сталей и сплавов разрознены, не систематизированы, а часто и не сопоставимы [1,2].

В данной статье представлена сравнительно-сопоставительная характеристика процесса борирования над традиционными процессами ХТО.

Борированием называют химико-термическую обработку, заключающуюся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде. Борирование выполняют при электролизе расплавленной буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) [3], изделие служит катодом. Температура насыщения 930-950 °С, выдержка 2-6 ч. Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ), в которые добавляют 20 % ферробора или 10 % карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Газовое борирование дает хорошие результаты. В этом случае насыщение ведут при температуре 850-900 °С в среде диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) или треххлористого бора ( $\text{BCl}_3$ ) в смеси с водородом.

В результате этих процессов образуется диффузионный слой, который состоит из боридов  $\text{FeB}$  (на поверхности) и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Толщина слоя 0,1-0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1800-2000 HV), износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окалиностойкостью (до 800°C) и теплостойкостью.

На практике борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов, дисков пяты турбобура, вытяжных, гибочных и формовочных штампов, деталей пресс форм и машин для литья под давлением. Стойкость указанных деталей после борирования возрастает в 2 -10 раз.

Среди методов ХТО можно выделить наиболее распространенные – это цементация, нитроцементация, азотирование.

*Цементация.* Цементацией (науглероживанием) называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагреве в соответствующей среде - карбюризаторе. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки  $A_{c_1}$  (930-950°C) [3], когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в большом количестве.

После цементации выполняют закалку и низкий отпуск, что формирует окончательные свойства цементованного изделия.

Процесс цементации и последующей термической обработки - придает поверхностному слою высокую твердость и износостойкость, повышает предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе и кручении.

Для цементации изделий обычно используют низкоуглеродистые (0,1-0,18 % C), чаще легированные, стали, а для цементации крупногабаритных деталей применяют стали с более высоким содержанием углерода (0,2-0,3 %). Выбор таких сталей необходим для того, чтобы

сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки.

На цементацию детали поступают после механической обработки с припуском на шлифование (50-100 мкм). Во многих случаях цементации подвергается только часть детали; тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди (20-40 мкм), которую наносят электролитическим способом или изолируют специальными обмазками. Специальные обмазки состоят из смеси огнеупорной глины, песка и асбеста, замешанных на жидком стекле, лентом и др..

*Азотирование.* Азотированием называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом. Азотирование ведут в диссоциированном аммиаке  $\text{NH}_3$  (25-60%)[3]. Азотирование очень сильно повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др. Твердость азотированного слоя заметно выше, чем твердость цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур 450—500 °С, тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200-225°С.

На обрабатываемой поверхности происходит диссоциация  $\text{NH}_3$  с образованием ионов азота, которые адсорбируются поверхностью и диффундируют в глубь металла. Азотированный слой по твердости (300-350HV) уступает по сравнению с борированием.

*Нитроцементация.* Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 840-860 °С в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4-10 ч. Основное назначение нитроцементации - повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стальных деталей.

Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоев на глубину 500 мкм практически одинакова, хотя температура нитроцементации почти на 100°С ниже температуры цементации.

Для нитроцементации легированных сталей рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5-5,5 об. % необработанного природного газа и 1-3,5 об. %  $\text{NH}_3$ .

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже после повторного нагрева применяют и ступенчатую закалку. После закалки проводят отпуск при 160-180 °С.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 30-50 % остаточного аустенита. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска 58-60 HRC, 570-690 HV[4]. Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость, например, нешлифуемых автомобильных шестерен, что обеспечивает их бесшумную работу. Максимальные показатели прочности достигаются только при оптимальном для данной стали содержании на поверхности нитроцементованного слоя углерода и азота,

Азота в слое должно быть не меньше того количества, которое устраняет вредные последствия внутреннего окисления (0,1-0,15 %). При высоком содержании азота (0,4-0,5 %) в слое образуется так называемая темная составляющая, которая обнаруживается на поверхности в виде темной точечной сетки. Темная составляющая, вероятно, представляет собой поры, образовавшиеся в результате выделения из твердого раствора молекулярного азота под высоким давлением. Это снижает предел выносливости стали на 30-70 % и предел контактной выносливости в 5-6 раз.

Оптимальное содержание углерода в сумме C + N зависит от марки стали и колеблется в широких пределах (1,0-1,65 %):

- при низкой концентрации углерода в структуре слоя по границам зерен мартенсита появляется троостит.

- при высокой концентрации углерода в стали, содержащей Сг, Мп, Тi, V, образуются карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки. Переход углерода и легирующих элементов в карбонитриды понижает устойчивость аустенита, что также ведет к образованию в слое троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость стали[3].

В результате обработки, толщина нитроцементованного слоя составляет обычно 200-800 мкм. Она не должна превышать 1000 мкм. При большей толщине в нем образуются темная составляющая и другие дефекты, снижающие механические свойства стали.

Вышеизложенное, позволяет систематизировать показатели процессов.

Таким образом составим таблицу:

1. Преимущественную твёрдость над другими процессами ХТО:

Таблица №1-Сравнительные показатели твёрдости

	Процесс	Твёрдость (HV)
	Борирование	1800-2000
	Цементация	500-700
	Азотирование	300-350
	Нитроцементация	570-690

2. Толщина диффузионного слоя в процессе борирования наиболее меньше, чем в других процессах ХТО.

3. Борирование достаточно эффективный процесс и экономичный по сравнению с традиционными процессами ХТО.

#### *Литература:*

1. Лахтин Ю.М. Металловедение: учеб.-М.: Металлургия, 1990. -528с.
2. Бернштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали: перераб. и доп.-М.: Металлургия, 1991.-472с.
3. Лившиц Б.Г. Металловедение и термическая обработка : учеб.-М.: Металлургия, 1989. -228с.
4. Солнцев Ю.П. Металловедение и технология металлов: учеб.-М.: Металлургия, 1988. -512с
5. Л.Г. Ворошнин Борирование сталей и чугунов: справ. пособие,1981.-205с.

### СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА СТАЛИ 65Г ВЫСОКОСКОСТНЫМ БОРИРОВАНИЕМ

Мишустин Н.М. - аспирант,

Ишков А.В. – к.х.н., д.т.н., профессор, Иванайский В.В. - к.т.н., доцент  
ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», г. Барнаул

В Алтайском крае для производства стрельчатой лапы и других элементов почвообрабатывающей рабочей части к культиваторам, сеялкам типа СЗС, а также машинам зарубежного производства на ОАО «Анитим» и в ООО «Ремзавод «Леньковский» широко применяют легированные углеродистые стали марок 50ХГА, 30ХГСА, 45Х и 65Г. Однако рыночная стоимость стали 50 ХГА и схожих с ней в настоящее время постоянно растет, ее качество от партии к партии сильно отличается, что определяет необходимость постоянной корректировки технологического процесса термообработки, кроме того, при изготовлении и термообработке массивных (до 2-3 кг) деталей из этого материала происходит значительное изменение их форм и размеров, что вынуждает производителей, как, например, в ОАО

«Анитим», идти по пути изготовления стрелчатых лап из нескольких элементов с последующим соединением кондукторной сваркой. Для улучшения производительности и снижения стоимости готовой продукции можно изготавливать рабочие органы из более мягкой стали 65Г из одной заготовки, увеличивая их толщину и проводя объемную закалку готового изделия (как поступают в ООО «Ремзавод «Леньковский»). Однако эксплуатационные показатели таких изделий все же уступают стали 50ХГА и особенно в части их поверхностной твердости износостойкости.

Для дальнейшего повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя стали 65Г широко используют методы нанесения или организации на рабочей поверхности готовых изделий различных износостойких слоев методами плазменного и газопламенного напыления, электроконтактного напекания и приварки, индукционной наплавки твердого сплава, химико-термической обработкой [1, 2]. Однако в условиях конкретного малого предприятия не все эти методы экономически оправданы и не позволяют легко встроиться в существующий технологический процесс. Так наиболее приемлемыми методами упрочнения поверхностного слоя стрелчатой лапы культиватора в условиях ООО «Ремзавод «Леньковский» являются индукционная наплавка и химико-термическая обработка (борирование). Но индукционная наплавка твердого сплава сильно удорожает готовое изделие а борирование, в виду длительности процесса, не позволяет использовать его в рамках существующей технологии.

Целью нашего исследования является разработка высокоскоростной технологии борирования поверхностного слоя стали 65Г под требования заказчика ( $h_{\min} = 0,2-0,6$  мм;  $t = 1-2$  мин; микротвердость покрытия 1600-2000 ед.), исследование структуры и свойств износостойких слоев.

Классические технологии печного борирования основываются на постепенном (в течение 0,5-6 ч) насыщении поверхности стального изделия бором из различных паст, обмазок, жидкой или газовой среды при температурах процесса от 750 до 950 °С. При этом в качестве источников бора применяются различные его соединения, способные разлагаться на активные элементы при температурах процесса. В зависимости от фазового состояния борлирующего агента различают твердофазное и жидкое борирование, а также борирование из газовой фазы [3].

С уменьшением плотности борлирующей фазы и увеличением температуры процесса его скорость в интервале температур от 800 до 950 °С возрастает незначительно, поэтому для их интенсификации используют совместное насыщение поверхности сразу несколькими элементами или термоциклирование [4]. Если же температура процесса превышает 1050-1100 °С, то в виду начинающихся процессов высокотемпературной структурной перестройки в сталях, скорости борирования резко возрастают - в 2-4 раза при увеличении температуры на каждые 15-20 °С, то есть процесс переходит из диффузионной зоны в зону химической реакции.

Так при температуре 1200-1300 °С, по данным [5], удается за несколько минут получить толщину однофазного боридного слоя до 0,2-0,4 мм, при этом нагрев детали осуществляется специальной термитной смесью в герметичном ящике, однако этот способ трудоемок, мало технологичен и очень сложен для малого предприятия. С другой стороны, высокие скорости и температуры нагрева поверхности стальных деталей, без опасности перегрева их более глубоких слоев, дают также токи высокой частоты (ТВЧ). При совмещении процессов химико-термической обработки и кратковременного индукционного нагрева деталей до высоких температур удастся получить протяженные борированные слои на поверхности деталей, обеспечивающие им заданные показатели микротвердости.

Нами были исследованы несколько вариантов смесей для высокоскоростного ТВЧ борирования стали 65 Г. Смеси отличались видом борлирующего агента, составом, наличием флюсующихся компонентов и дополнительных технологических присадок.

Различные варианты смеси I в качестве борлирующего агента содержали карбид бора, а смеси II - аморфный бор, в смесь III был добавлен фторид кальция в качестве флюсующегося



компонента, а смесь IV содержала в своем составе флюс для индукционной наплавки Ф1, состоящий из прокаленной буры, борного ангидрида, силикокальция и сварочного флюса АН-348 (30%  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 20%  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 10%  $\text{CaSi}_2$ , 40% АН-348). Составы использованных смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Состав некоторых смесей для высокоскоростного борирования, %

С месь	Борирующий агент	Активиру ющий компонент	Флюсующи йся компонент
Ia	$\text{B}_4\text{C}$ (84)	$\text{NH}_4\text{Cl}$ (6)	Ф1 (10)
II	$\text{B}_4\text{C}$ (84)	–	Ф1 (16)
II Ia.	B (90)	$\text{CaF}_2$ (5)	Ф1 (5)

Смеси свободно наносились на предварительно подготовленные образцы, вырубленные из товарной стали 65 Г, или закреплялись на них с помощью жидкого стекла или эпоксидного компаунда, вводимого в их состав за счет уменьшения количества борирующего компонента, после чего образцы помещались в кольцевой водоохлаждаемый медный индуктор диаметром 160 мм, подключенный к высокочастотному ламповому генератору ВЧГ 7-60/0,066. Настройка контура и геометрия индуктора обеспечивали нагрев исследуемых образцов до температуры 1300-1350 °С в течение 40-60 сек, с последующей стабилизацией. После выдержки при температуре в течение от 1 до 2 мин образцы вынимались из индуктора и остывали свободно. У полученных материалов была исследована микроструктура (МИМ-7) и измерена их микротвердость (ПМТ-3). Структура полученных износостойких боридных слоев приведена на рис. 1-2.

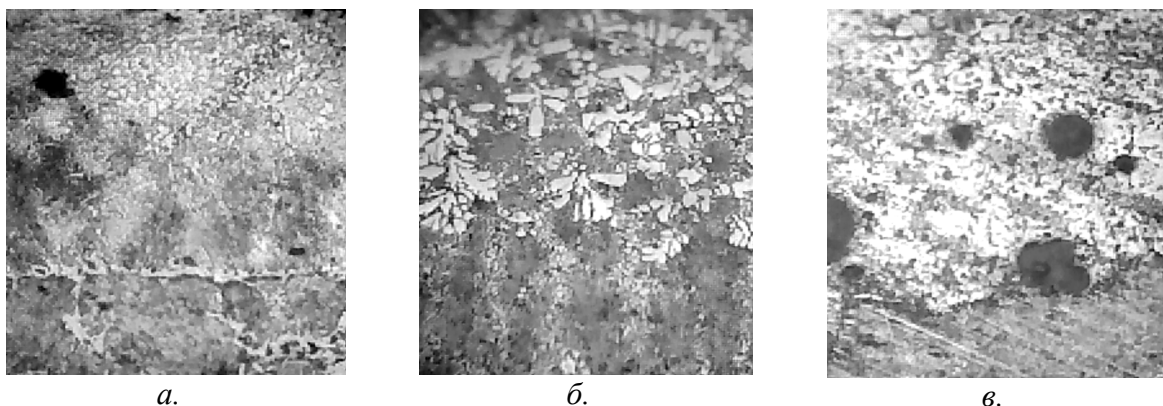


Рис. 1. Микрофотографии ( $250\times$ ) борированных слоев на стали 65 Г, полученных за 1 мин из различных смесей: а. - Ia, б. - II, в. - IIIa.

Как видно из рис. 1, при одинаковых температурных условиях и времени борирования структура и состояние границы полученных износостойких слоев сильно отличаются, но во всех случаях, в отличие от классических боридных иглообразных двухфазных слоев, образуется более стойкая в условиях тяжелого абразивного, знакопеременного и ударного износа пластичная боридная эвтектика.

Так для смесей, содержащих в качестве борирующего агента одинаковое количество карбида бора, схожее количество флюсующегося компонента и отличающихся только наличием активатора  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , способствующего усилению обратимых диффузионных и транспортных процессов, особенно при низких температурах, в начале процесса борирования, наблюдается образование мелкозернистой структуры эвтектических включений с микротвердостью не выше 700-750, толщиной слоя 0,16 мм и четко различимой границей раздела с основным металлом (рис. 1а). Для аналогичной смеси II без этого активатора, наблюдается выраженный рост дендритов, островов и друз боридной фазы с

микротвердостью до 1050-1120, толщиной слоя 0,28 мм и диффузной границей раздела боридного слоя с основным металлом (рис. 1б). Самыми реакционноспособными оказались смеси на основе аморфного бора (рис. 1а), так в смеси IIIа, содержащей дополнительно 5 % активатора  $\text{CaF}_2$  и 5 % флюсующегося компонента, за 1 мин толщина слоя на стали 65 Г составила 0,88 мм, при микротвердости 2200-2300. Структура представляет собой переплавленную гомогенизированную железо-боридную эвтектику, образовавшуюся с такой скоростью, что из расплава при его затвердевании не успели выделиться шарики шлака.

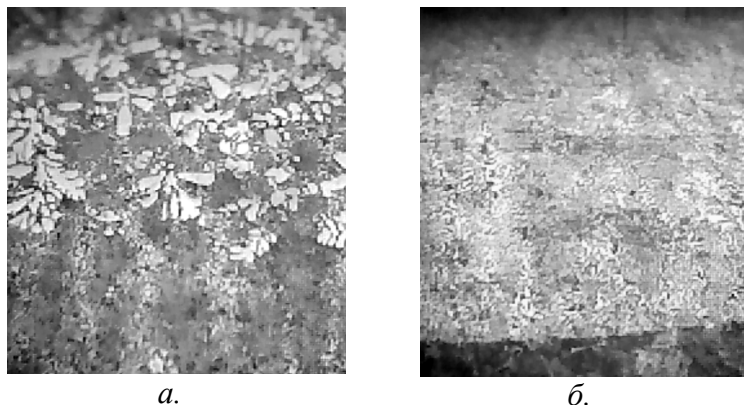


Рис. 2. Микрофотографии ( $250\times$ ) борированного слоя на стали 65 Г, полученного за 1 (а.) и 2 (б.) мин минуты из смеси II.

Интересно отметить, что структура износостойкого покрытия, полученного при высокоскоростном 1-минутном борировании стали 65 Г смесью II является метастабильной (рис. 2а), и при борировании уже в течении 2 мин превращается в мелкозернистую структуру 2б с микротвердостью 2300-2400, причем толщина покрытия заметно не изменяется и становится четко различимой его граница раздела с основным металлом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методы повышения долговечности деталей машин. Сельскохозяйственные машины: Учебное пособие для вузов. / Под ред. В.Н. Ткачева. - М.: Машиностроение, 1971.
2. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин К.Н. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. - М.: Машиностроение, 1991.
3. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. - М.: Металлургия, 1978.
4. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000.
5. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов. - Минск: Беларусь, 1981.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР В ПРОЦЕССАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ СВЧ-ТЕРМОИНДИКАТОРОВ

Селиверстов К.В. - аспирант,

Ишков А.В. – к.х.н., д.т.н., профессор, Иванайский В.В. - к.т.н., доцент  
ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет», г. Барнаул

Измерение высоких температур, сопровождающих процессы термической и химико-термической обработки, представляет собой одну из важных задач современной технологии машиностроения. От того насколько быстро и точно будет определена температура в рабочем объеме аппарата или на поверхности обрабатываемой детали, зависят не только

свойства самого материала, но и качественные характеристики готовых изделий, процент брака, производительность и эффективность всей технологии.

В настоящее время для измерения высоких температур в различных областях науки и техники широко применяются способы, основанные на обратимых физических или физико-химических процессах, протекающих под их воздействием тепла в материалах, из которых изготавливается рабочее тело или термочувствительные элементы специальных контактных или безконтактных измерительных приборов - термометров [1, 2]. Эти способы хорошо исследованы и методически оформлены, однако, несмотря на их широкое использование, в отдельных случаях их применение в технологиях машиностроения не позволяет получить требуемую информацию о температуре объекта, связано с большими техническими трудностями (исследование температурных градиентов в объеме и на поверхности, термометрия внутри агрегатов или на подвижных деталях, измерение температуры в труднодоступных зонах), высокой стоимостью приборов, или же сопряжено с возможностью разрушения или порчи чувствительных элементов в условиях промышленных измерений. Поэтому в производственных процессах термической и химико-термической обработки часто используют так называемый альтернативный метод измерения температуры, основанный на индикации достижения определенного ее значения с помощью легко различимых визуальными изменениями различных чистых веществ или их смесей - термоиндикаторов.

В качестве термоиндикаторов могут применяться, например, вещества, изменяющие свой цвет при достижении заданных температур за счет химического взаимодействия, фазовых переходов или температурного изменения спектральных поглощательных или излучательных характеристик [3]. Тем не менее, многие из них не позволяют измерять температуры выше 150-200 °С, в затемненном пространстве и людьми с цветовыми нарушениями зрения (дальтонизмом). Поэтому используются также и термоиндикаторные пиросоставы, воспламеняющиеся при достижении ими заданной температуры.

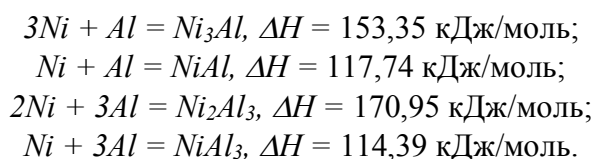
Зажигание пиросоставов при достижении ими определенных температур позволяет более достоверно фиксировать температуру, в том числе в затемненном помещении или объеме печи, людьми с цветовыми нарушениями зрения, не влияя на точность индикации и тепловые излучения. Однако неоднозначная зависимость температуры вспышки термоиндикаторов от состава и других характеристик смеси, вызванная наличием в ней сильных окислителей и восстановителей, сильно снижает точность измерения температуры этим методом. Основная погрешность измерения температуры стальной поверхности пиросоставом может достигать 10-15 %, а температуры рабочего объема аппарата - до 20-30 %. В условиях термообработки большинства сталей и сплавов, когда температурные интервалы начала и конца процессов закалки, отпуска и нормализации составляют 20-30 °С, такие погрешности измерений не приемлемы, так как неконтролируемое пребывание материала в высокоинерционных технологических аппаратах приводят к неконтролируемому изменению его структуры и механических свойств.

Целью нашей работы являлось повышение точности измерения высоких температур альтернативным методом термоиндикации и разработка термоиндикаторных составов, гарантированно воспламеняющихся в заданных температурных интервалах.

Для таких измерений, с учетом преимуществ и недостатков известных термоиндикаторных пиросоставов, нами были выбраны смеси порошков различных металлов, дающие при взаимодействии друг с другом в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) двойные интерметаллиды - химические соединения типа  $Me_xMe'_y$ , а в качестве фактора, управляющего температурой возгорания состава - содержание более тугоплавкого компонента сверх стехиометрического.

Была исследована система  $Ni-Al$  в которой при взаимодействии металлов в режиме СВС возможно образование нескольких индивидуальных интерметаллидов, устойчивого  $NiAl$  и неустойчивых, плавящихся с разложением  $Ni_3Al$ ,  $Ni_2Al_3$  и  $NiAl_3$ . Соответствующие фазы

алюминидов никеля могут быть получены сжиганием смесей порошков исходных металлов, взятых в стехиометрических соотношениях по реакциям:



Как следует из приведенных уравнений реакций самые благоприятные условия для осуществления СВС в этой системе должны создаваться в наиболее экзотермичной реакции, дающей при протекании интерметаллид состава  $Ni_2Al_3$ , однако фазовое состояние, температуры плавления и максимальные адиабатические температуры синтеза алюминидов никеля сильно осложняют этот процесс, и в реальных условиях при горении смесей алюминия и никеля, рассчитанных на состав  $Ni_2Al_3$ , получается смесь двух продуктов -  $Ni_2Al_3$  и  $NiAl$ . Максимальные же температуры и скорости горения реализуются для реакции, дающей при СВС моноалюминид никеля  $NiAl$  [4].

СВС в исследованной системе может осуществляться в нескольких режимах, основным из которых являются режим послойного горения и режим теплового взрыва. При осуществлении СВС в классическом режиме послойного горения температура начала синтеза сложным образом зависит от многих факторов: дисперсности и чистоты исходных порошков металлов, их химического состава, наличия оксидной пленки на поверхности частиц металла, соотношении компонентов шихты, начальной температуры заготовки и т.д., что затрудняет его использование для целей термоиндикации. В то же время, в режиме теплового взрыва, реализуемым для смесей порошков близких по составу к интерметаллидам, когда заготовка равномерно прогревается по всему объему до температур, близких к эвтектическим, а затем происходит ее мгновенный саморазогрев, было установлено, что различные факторы, такие как пористость заготовки, дисперсность компонентов и даже соотношение компонентов практически не влияют на температуру начала взаимодействия, которая равна либо температуре эвтектики в системе, либо температуре плавления более легкоплавкого компонента шихты [5]. Прежде всего это связано с переводом СВС-процесса из состояния Т+Т в состояние Т+Ж при появлении первых порций и растеканию жидкой фазы в пористой системе. Однако в реальных условиях обеспечить режим «чистого» теплового взрыва довольно трудно, поэтому и появляется возможность регулирования температуры начала резкого тепловыделения в СВС-системе, путем добавления туго- или легкоплавких компонентов, инерта, готового продукта и т.д.

В этом случае, часть тепла, подводимого извне к образцу, будет расходоваться не только на инициирование основной реакции синтеза интерметаллида, но и пойдет на плавление, нагрев или разложение дополнительно введенных компонентов, пропорционально их количеству.

Нами были исследованы температуры начала СВС-процесса в системе  $Ni-Al$  при различных соотношениях порошков исходных металлов, их различных марках и чистоте, при значительном (до 10-15 %) колебании состава смесей вблизи стехиометрического.

Для обеспечения режима теплового взрыва в исходном образце из готовой шихты приготавливали плотные цилиндрические таблетки на 0,5-1 % органической связки (спиртовый раствор канифоли), сохраняя соотношение диаметра к высоте таблетки более 1,67 (критерий Зельдовича). Готовые сухие таблетки прогревали до определенной температуры контактным способом, помещая их на массивную металлическую пластину из стали 1Х18Н9Т, прогреваемую снизу газовой горелкой. Температуру основания контролировали вольфрам-рениевой термопарой диаметром 0,2 мм, которую с помощью конденсаторной контактной сварки приваривали в непосредственной близости от образца. После предварительной калибровки термопару подключали к АЦП К57ПВ1А и осуществляли считывание, оцифровку и передачу на персональную ЭВМ (с установленным

на ней ПО регистрации данных (ADC.com) и чтения данных и калибровки устройств (ADC.mcd), функционирующем в системе «Mathcad» ее показаний со скоростью до  $36 \text{ сек}^{-1}$ , что позволяло фиксировать быстропротекающий процесс СВС (рис. 1).

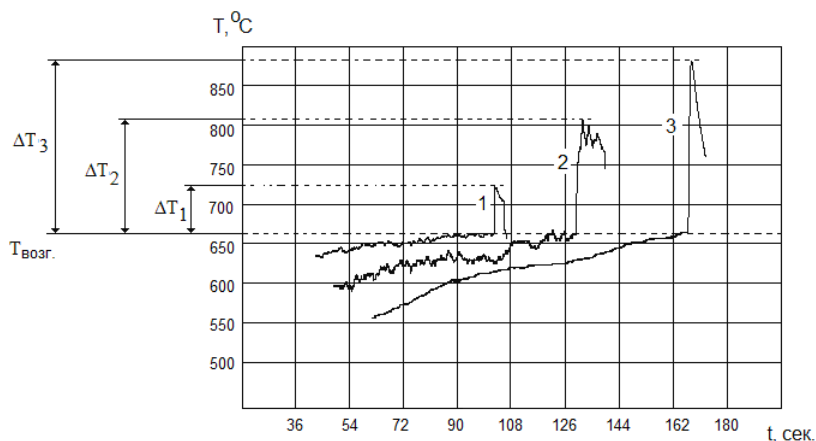


Рис. 1. Термограммы нагрева образцов различного состава, мас. % :  
1 - 58 (Al), 42 (Ni); 2 - 15 (Al), 85 (Ni); 3- 36 (Al), 64 (Ni).

Как следует из представленного рисунка, температура возгорания всех исследованных составов от  $Ni_3Al$  до  $NiAl_3$  вне зависимости от колебаний состава шихты, марок и дисперсности порошков исходных металлов находится вблизи  $660 \pm 12 \text{ }^\circ\text{C}$ , а высокий тепловой эффект ( $\Delta T$  от 465 до 875  $^\circ\text{C}$ ) реакции обеспечивает возможность легкой и достоверной индикации температуры визуальным методом при вспышке термоиндикаторной таблетки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. 3 изд. -М.: 1983. С. 38-85.
2. Промышленные приборы и средства автоматизации. Справочник. / Под ред. В.В. Черенкова. -Л.: 1987. С. 27-46.
3. Абрамович Б.Г., Картавец В.Ф. Цветовые индикаторы температуры. -М.: Энергия, 1978. С. 101-105, 113-114.
4. Итин В.И., Найбороденко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. -Томск: Изд-во ТГУ, 1989. С.78-80.
5. Химия синтеза сжиганием. / Ред. М. Коидзуми. Пер. с японск. -М.: Мир, 1998. С. 44-51.