

КОМПЛЕКСНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА

М.А. Гурьев, С.Г. Иванов, Е.А. Кошелева, А.Г. Иванов,
А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Г.А. Околович

Исследования воздействия насыщающих сред при химико-термической обработке показали, что соединения бора с титаном, бора с хромом в качестве добавки к смеси для борирования, значительно увеличивает срок службы инструмента, а также более экономично в сравнении с другими способами ХТО при получении покрытий с заданными свойствами. Установлено оптимальное содержание компонентов в насыщающих смесях при диффузионном боротитанировании и борохромировании.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, химико-термоциклическая обработка, борирование, борохромирование, боротитанирование, износостойкость, упрочнение, эксплуатационная стойкость инструмента.

В настоящее время для промышленности требуются конструкционные материалы с уникальными физико-механическими свойствами: высокой прочностью, износостойкостью, тепло-, жаро- и коррозионной стойкостью. Чистые металлы, такие как хром, никель, ванадий, вольфрам, и др., обладающие этими свойствами, довольно редки, и соответственно дороги, поэтому целесообразно применение их сплавов на основе железа. Кроме того, возможно также варьировать характеристики сплавов с помощью различных технологий: термообработки, нанесения покрытий, механической обработки. Каждая из технологий имеет свои достоинства и недостатки, и соответственно, свою область применения. Так, например, нанесение покрытий (плакирование) в настоящее время довольно редко применяется, так как некоторые способы еще довольно слабо проработаны (например, некоторые виды напыления), некоторые способы экологически вредны, либо опасны (например, сварка взрывом), некоторые же способы просто дороги и в определенных условиях экономически невыгодны (лазерная, либо электронно-лучевая наплавка). Механическая обработка является более дешевым видом упрочнения, но ее недостаток заключается в незначительных пределах изменения комплекса механических свойств. Часто применяемым способом изменения характеристик сплавов является термическая обработка, с ее помощью возможно изменение механических свойств в довольно значительных пределах. Недостаток этой технологии состоит в том, что с ее помощью нельзя придать материалу какие-либо специальные

свойства, например, коррозионную, радиационную стойкость и т.д. Наряду с традиционной термической обработкой широко применяется химико-термическая обработка (ХТО). Данный вид обработки позволяет значительно расширить пределы изменения механических свойств, в сравнении с традиционной термообработкой, а также придать материалу какие-либо специальные свойства [1, 2].

При эксплуатации наибольшему воздействию, как правило, подвергаются поверхностные слои деталей машин и инструмента: это могут быть агрессивные среды, высокая температура, различные силовые воздействия, наличие абразивных частиц и т.д. и различные их комбинации. Для деталей, работающих в тех или иных условиях, применяют различные виды сталей, как правило, высоколегированных, что существенно усложняет технологические процессы изготовления и приводит к увеличению расходов на готовое изделие [3].

В тоже время возможно замещение специальных сталей на менее легированные, и даже на углеродистые стали при условии нанесения на них специальных покрытий, повышающих работоспособность изделий в данных условиях. Такой способ упрочнения дает больший ресурс работы деталей и узлов машин и механизмов, чем при изготовлении их из объемно-легированных специальных сталей. Также при этом упрощается процесс их изготовления и снижается себестоимость, а, следовательно, повышается конкурентоспособность, как изделия, так и технологии его производства в целом. При этом экономятся дорогостоящие легирующие элементы.

КОМПЛЕКСНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА

Дальнейшее развитие технологии и расширение фронта внедрения разработанных методов упрочняющих технологий требуют систематизации, унификации различных методов и выработки практических рекомендаций по наиболее эффективному применению их в конкретных эксплуатационных условиях [4 - 12].

Химико-термическая обработка существенно изменяет физико-химические свойства поверхностных слоев. К перспективным методам ХТО относится борирование. Проводимые исследования воздействия насыщающих сред в виде обмазок при ХТО показали, что соединения бора с различными металлами достаточно эффективны как поставщики бора и как поставщики второго компонента. Использование соединений бора с титаном, бора с хромом в качестве добавки к карбиду бора, значительно увеличивает срок службы инструмента, а также более экономично в сравнении с другими способами ХТО при получении покрытий с заданными свойствами.

Повышение работоспособности деталей узлов машин и механизмов, инструмента и технической оснастки, их надежности и долговечности обеспечивается в определенной мере оптимизацией технологии нанесения борсодержащих покрытий, а также собственно химического состава насыщающей смеси. Целью настоящей работы являлось аналитическое описание зависимости износостойкости и толщины упрочняющего покрытия при диффузионном борохромировании и боротитанировании от соотношения компонентов, входящих в состав насыщающей смеси.

Для описания зависимости состав-свойство в многокомпонентных системах более удобен метод симплексных решеток, позволяющий получать математическую модель исследуемой зависимости, ее графическую интерпретацию и не требует большого объема экспериментов. Данный метод был применен при изучении влияния химического состава многокомпонентной насыщающей среды на толщину и износостойкость борсодержащих покрытий инструментальных сталей [13 - 15].

В качестве исходных компонентов насыщающей смеси (обмазки) для диффузионного борохромирования использовались феррохром (FeCr), карбид бора (B_4C), мелкодисперсный графит, бентонит и фторид аммония (NH_4F).

В качестве исходных компонентов насыщающей смеси (обмазки) для диффузионного боротитанирования использовались диборид титана (TiB_2), карбид бора (B_4C), мел-

кодисперсный графит, бентонит и фторид аммония (NH_4F).

В качестве упрочняемых деталей способом диффузионного борохромирования были использованы штамповые вставки для горячего деформирования из стали 5ХНМ. Предварительно насыщающая смесь разводилась в воде до пастообразного состояния. Приготовленная таким образом обмазка наносилась на упрочняемую поверхность детали слоем 4–6 мм, после чего была произведена сушка деталей на воздухе до получения твердой корки. Далее производилось насыщение поверхности детали из обмазки в термической печи при нагреве до температуры 1050 °С. Время процесса насыщения – 6 ч. Затем было проведено охлаждение непосредственно с температуры насыщения в масле с температурой 40 °С и последующий отпуск при 480 °С в течение 1 ч. Обмазка была отделена от поверхности детали. На деталях было получено равномерное покрытие. Износостойкость определялась ресурсом упрочненной штамповой вставки по количеству выштампованных деталей.

Поскольку задача создания насыщающих смесей подобного рода является многофакторной, в ее основу должна быть положена определенная система. Предыдущие исследования показали, что в данном случае зависимость свойств от состава необходимо изучать не во всей области изменения концентрации компонентов, а лишь локальный участок, ограниченный следующим содержанием веществ в смеси при диффузионном борохромировании: B_4C – 40-80%, FeCr – 10–30%, графита – 10-20%, NH_4F – 5-10%, бентонита – 2–5%; при диффузионном боротитанировании: B_4C – 40–80%, TiB_2 – 10–30%, графита – 10–20%, NH_4F – 5–10%, бентонита – 2–5% [16 - 22].

Так как изучаемая локальная область представляет собой неправильный симплекс, то для получения уравнения регрессии были составлены симплекс-решетчатые планы {5, 2} относительно псевдокомпонентов, представляющих собой полный план, и, соответственно, исходных компонентов насыщающей смеси. Были получены коэффициенты уравнения регрессии в координатах псевдокомпонентов, проверена адекватность реализованного плана. Для практического использования произведен перевод координат из одной аффинной системы в другую и получено уравнение регрессии в исходных координатах.

По приведенной выше методике были построены математические модели второй

степени зависимости износостойкости (ресурса детали) и толщины упрочняющего покрытия от соотношения компонентов, входящих в составы насыщающих смесей. По результатам планирования экспериментов проведены контрольные опыты, которые подтвердили правильность математических моделей.

На упрочненных деталях поверхность приобрела характерную для боридных слоев текстурованность структуры. На рисунке 1 представлены диффузионные слои, образующиеся при борохромировании (а) и боротитанировании (б) образцов.

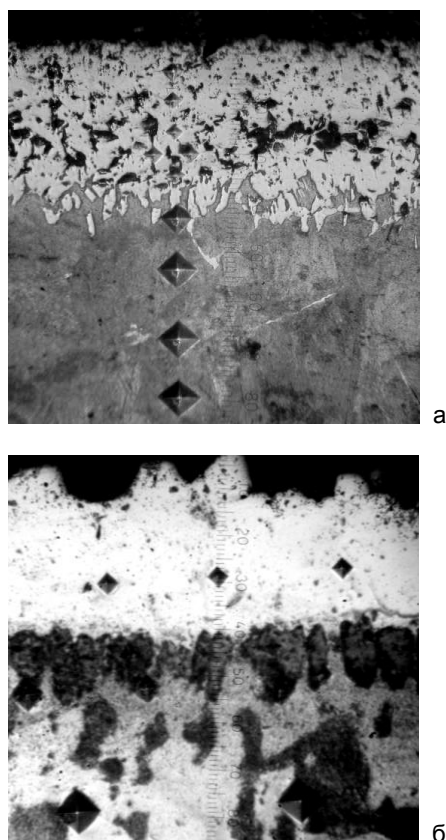


Рисунок 1 – Микроструктуры поверхностных слоев стали при диффузионном упрочнении:
а) методом борохромирования (сталь 5XNM);
б) методом боротитанирования (сталь 45).
Цена малого деления шкалы – 10 мкм

Лучшие результаты для диффузионного борохромирования получены с насыщающими смесями следующего состава (% по массе):

- 1) 52 % B_4C + 25% $FeCr$ + 3 % NH_4F + 13 % графита + 7 % бентонита
- 2) 55 % B_4C + 20 % $FeCr$ + 3 % NH_4F + 15 % графита + 7 % бентонита
- 3) 60 % B_4C + 20 % $FeCr$ + 3 % NH_4F + 12 % графита + 5 % бентонита

Лучшие результаты для диффузионного боротитанирования получены при следующих составах насыщающей смеси (% по массе):

- 1) 50 % B_4C + 25 % TiB_2 + 3 % NH_4F + 15 % графита + 7 % бентонита
- 2) 55 % B_4C + 20 % TiB_2 + 5 % NH_4F + 15 % графита + 5 % бентонита
- 3) 60 % B_4C + 20 % TiB_2 + 5 % NH_4F + 10 % графита + 5 % бентонита

При содержании в насыщающей смеси при диффузионном борохромировании феррохрома меньше 15 % от общей массы, идет преимущественно насыщение бором, что приводит к высокой хрупкости диффузионного слоя и, следовательно, к снижению ресурса работы. При содержании в обмазках $FeCr$ больше 25 %, идет преимущественно процесс хромирования, что приводит к образованию более мягких диффузионных слоев, обладающих пониженной твердостью, и, соответственно, низким ресурсом.

Содержание в насыщающей смеси B_4C меньше 50 % приводит к получению диффузионных слоев с малой твердостью и снижению ресурса упрочненных деталей. При содержании карбида бора больше 60 % приводит к преимущественному насыщению бором, к высокой хрупкости получающихся слоев и выходу изделия из строя еще до начала процесса эксплуатации.

При содержании в обмазке мелкодисперсного графита в количестве ниже 10 % упрочненные слои получаются малой толщины, причем отделение обмазки от поверхности упрочненной детали затруднено. Содержание мелкодисперсного графита больше 15 % от общей массы приводит к сползанию обмазки с упрочняемой детали и, как следствие, отсутствию упрочненного слоя.

При содержании в насыщающей смеси бентонита меньше 5 %, возможно осыпание обмазки в процессе сушки, либо сползание ее в процессе насыщения. Содержание бентонита в обмазке больше 7 % дает диффузионные слои малой толщины, что способствует образованию сколов при отделении обмазки из-за ее повышенной адгезии к поверхности детали.

При содержании в насыщающей смеси фторида аммония в количестве меньшем 2 % возможно получение диффузионного слоя очень малой толщины, либо полное его отсутствие по причине недостаточной активности смеси. Количество фторида аммония большее 3 % повышает активность смеси и приводит к прогару обмазки, окислению поверхности детали, что снижает стойкость упрочненной детали.

КОМПЛЕКСНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА

Таким образом, установлено оптимальное содержание компонентов в насыщающей смеси при диффузионном борохромировании:

1) 15-25 мас.% феррохрома, так как при данном содержании образуются упрочненные слои с наиболее высоким ресурсом.

2) 50-60 мас.% карбида бора, при этом содержании образуются диффузионные слои с наибольшей пластичностью и износостойкостью.

3) 10-14 мас.% мелкодисперсного графита, что обеспечивает легкое отделение обмазки и достаточная толщина диффузионных слоев.

4) 5-7 мас.% бентонита обеспечивает необходимую жесткость обмазке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обмазки в процессе сушки.

5) 2-3 мас.% фторида аммония обеспечивает необходимую активность насыщающей смеси, что приводит к формированию диффузионных слоев с оптимальными пластичностью и износостойкостью.

Оптимальное содержание компонентов в насыщающей смеси при диффузионном боротитанировании:

1) 20-25 мас.% диборида титана, так как при данном содержании образуются упрочненные слои с наиболее высоким ресурсом.

2) 50-60 мас.% карбида бора, при этом содержании образуются диффузионные слои с наибольшей пластичностью и износостойкостью.

3) 10-15 мас.% мелкодисперсного графита, что обеспечивает легкое отделение обмазки и достаточная толщина диффузионных слоев.

4) 5-7 мас.% бентонита обеспечивает необходимую жесткость обмазке в процессе насыщения и предотвращает осыпание обмазки в процессе сушки.

5) 3-5 мас.% фторида аммония обеспечивает необходимую активность насыщающей смеси, что приводит к формированию диффузионных слоев с оптимальными пластичностью и износостойкостью.

По результатам исследований и оптимизации химического состава насыщающих смесей разработаны новые составы для комплексного поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента из штамповых, конструкционных и инструментальных сталей, на которые были получены соответствующие патенты на изобретения [7, 8].

Повышение износостойкости упрочненных деталей обеспечивается снижением хрупкости диффузионных слоев. Это достигается отсутствием необходимости в предварительной цементации при насыщении поверхностей стальных деталей одновременно бором и хромом, либо бором и титаном и

увеличением толщины получаемых диффузионных слоев до 75–95 мкм (в зависимости от химического состава сталей), образованных при насыщении из обмазки, содержащей феррохром (диборид титана), мелкодисперсный графит, бентонит, фторид аммония. Повышение ресурса упрочненных деталей достигается повышением пластичности и коррозионной стойкости диффузионных слоев за счет введения феррохрома или диборида титана, мелкодисперсного графита и бентонита.

Повышение экономичности процесса упрочнения при диффузионном борохромировании и боротитанировании обусловлено, во-первых, тем, что процесс упрочнения осуществляется с использованием термических печей любого принципа действия, имеющих на каждом металлообрабатывающем предприятии, и позволяет отказаться от дорогостоящего индуктора с токами высокой частоты, во-вторых, отсутствием необходимости применения предварительной цементации, связанной с использованием дорогостоящего муфеля, изготавливаемого из дорогостоящих высоколегированных сталей, в-третьих, многократным использованием насыщающей обмазки – до 10–15 раз.

Проведены комплексные исследования структуры и свойств образцов быстрорежущей стали Р6М5 после процесса борохромирования из насыщающей обмазки на основе карбида бора. Изучали кинетику формирования окончательной структуры основного металла и диффузионных слоев. Процесс химико-термической обработки осуществлялся из насыщающих обмазок (паст) нанесенных на поверхность упрочняемых деталей и образцов. После проведения процессов диффузионного насыщения изучали структуру, фазовый и химический состав упрочненных слоев металлографическим и микрорентгеноспектральными методами. Металлографическое исследование проводили на оптических микроскопах (МИМ-10, Neophot-21) и электронном растровом микроскопе BS-300 «Tesla». Для просмотра в оптическом микроскопе шлифы готовились методами химического и электрохимического травления. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводили с помощью дифрактометра ДРОН-1,5 в монохроматическом Fe-K α излучении. На универсальной испытательной машине «Instron» с максимальным усилием 50 кН определяли прочность и пластичность. Ударную вязкость определяли при испытании образцов без надреза на маятниковом копре типа 2130КМ-03.

Исследование твёрдости производили на твердомере Роквелла ТР 5005 по шкале С (алмазный наконечник, нагрузка 150 кг.) согласно ГОСТ 9013-82. ДюрOMETрические исследования осуществляли на приборе ПМТ-3М по ГОСТ 9450-76.

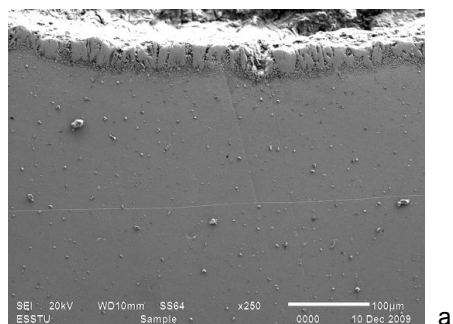
В результате проведенных исследований была показана принципиальная возможность поверхностного диффузионного упрочнения вольфрам и молибденсодержащих быстрорежущих сталей из насыщающих обмазок на основе карбида бора.

При насыщении поверхности бором и хромом по разработанной авторами технологии на стали образуется диффузионный слой толщиной 15 – 30 мкм. Слой имеет характерное для боридных слоев игольчатое строение. В силу того, что сталь Р6М5 является высоколегированной быстрорежущей сталью и имеет сложный химический состав, боридные иглы имеют закругленные концы и значительный диаметр. Между иглами и под боридным слоем заметно выделение различных фаз, преимущественно карбоборидов сложного химического состава на основе хрома, молибдена и вольфрама (рисунок 2).

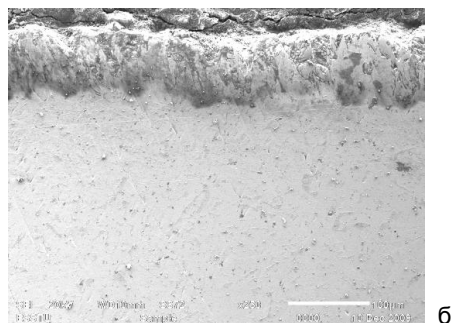
Как видно из приведенных на рисунке 2 фотографий микроструктуры боридных слоев, время насыщения кардинальным образом влияет как на микроструктуру диффузионного слоя, так и на его прочностные и эксплуатационные характеристики. Наиболее предпочтительным является диффузионный слой, полученный в результате насыщения в течение 2 часов. В результате этого образуется слой, толщиной 17–22 мкм, под которым располагается высокодисперсные включения, состоящие из карбидов и карбоборидов легирующих элементов (преимущественно хрома, молибдена и вольфрама), распределенных в более мягкой матрице твердого раствора углерода и бора в железе. Сам диффузионный слой при этом также обладает значительным запасом пластичности.

Диффузионный слой, получаемый насыщением в течение 6 часов представляет собой сплошной слой, характерное игольчатое строение такого слоя менее выражено, поверхностная часть слоя представлена преимущественно моноборидом железа FeB, обладающим высокой твердостью наряду с хрупкостью.

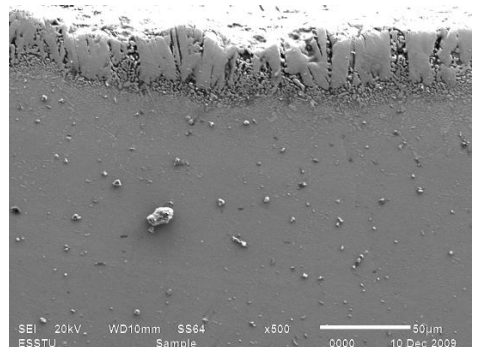
Дисперсные включения боридов легирующих элементов растворены в боридном слое. Поэтому несмотря на большую протяженность, такой слой обладает пониженными эксплуатационными характеристиками.



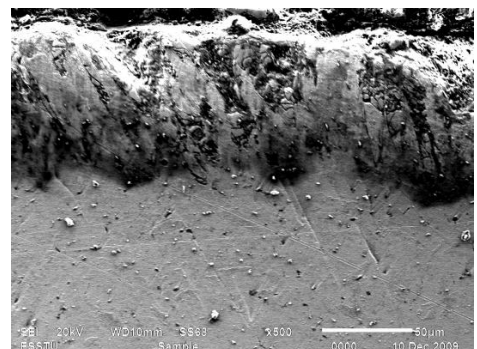
а



б



в



г

Рисунок 2 - Микроструктура боридных слоев при различных условиях насыщения:
а), в) – время насыщения 2 часа;
б), г) – время насыщения 6 часов

В общем виде кинетика формирования боридного слоя представлена на рисунке 3, однако высокими эксплуатационными характеристиками обладают слои, полученные при времени насыщения, не превышающими 2,5-3 часов. При большем времени насыще-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2010

ния на поверхности боридного слоя начинает формироваться сплошной слой моноборида, в то время как слой высокодисперсных включений карбидов и карбоборидов растворяется, что ведет к снижению эксплуатационных показателей упрочненного изделия. При времени насыщения около 10 часов возможно получение диффузионных слоев толщиной до 70–80 мкм. Однако вследствие больших напряжений, возникающих в процессе упрочнения и высокой хрупкости диффузионного слоя происходит его практически полное самоскалывание уже при охлаждении с температуры насыщения.

При борохромировании химический состав упрочненного слоя претерпевает значительные изменения в направлении от поверхности вглубь. Так, содержание бора изменяется от 22,67% на поверхности слоя до 7,35% на глубине 80 мкм. Содержание вольфрама, молибдена, хрома и углерода – соответственно от 6,68 до 6,41; 5,10 – 5,32; 7,25 – 4,27 и 0,12 – 0,84. Причем на глубине около 30 мкм, где проходит граница между боридным слоем и переходной зоной (рисунк 1 а), в) химический состав изменяется наиболее кардинально - содержание таких элементов как В, С, W, Мо, V, Cr находится соответственно на уровне 16,49; 1,83; 5,63; 4,81; 1,86; 4,68 процентов.

Проведенные в лабораторных условиях испытания на износостойкость показали 2,5 кратный рост ресурса работы упрочненного изделия по сравнению с не упрочненным при нагрузке вплоть до 40 МПа/мм². Однако при нагрузках превышающих эту величину происходит снижение износостойкости упрочненного изделия до значений в 1,5 – 2 раза меньших, чем у не упрочненной детали. Данный эффект объясняется тем, что в процессе диффузионного насыщения сердцевина детали подвергается разупрочнению, в результате чего под поверхностным слоем высоко-

твердых боридов находится мягкий металл. При определенной нагрузке это приводит к продавливанию слоя, а мелкие осколки твердых боридов, образовавшиеся в результате разрушения зоны сплошных боридов, значительно ускоряют процесс износа. Поэтому для деталей испытывающих при работе нагрузки, превышающие 40 МПа/мм² необходимо проводить закалку изделия непосредственно от температуры диффузионного насыщения. В этом случае продавливания боридного слоя не наблюдается.

При упрочнении ТВЧ в тех же обмзках происходит формирование слоя толщиной до 3 мкм за время порядка 3 минут (рисунок 4). Структура упрочненного слоя при этом так же отличается классической игольчатой. При упрочнении ТВЧ не происходит отпуска сердцевины упрочняемой детали, так как нагрев ТВЧ позволяет реализовать режимы химикотермоциклической обработки (ХТЦО), недоступимые при обычном печном нагреве. Так как нагрев ТВЧ начинается с поверхности изделия и распространяется вглубь материала.

При этом скорость нагрева может достигать сотен градусов в секунду, то возможно достижение формирования диффузионного слоя при одновременном сохранении прочности сердцевины. Так как нагрев ТВЧ до температуры насыщения не превышал 10–12 секунд и упрочняемое изделие не успевает прогреться полностью, то при выключении нагрева происходит быстрое охлаждение, которое не превышает так же 15 секунд. За 3 минуты количество циклов нагрева-охлаждения составило 5, что достаточно для измельчения зерна слоя, прилегающего к боридному (рисунок 5). Это способствует ускорению диффузии и более прочному сцеплению диффузионного слоя с основным металлом.

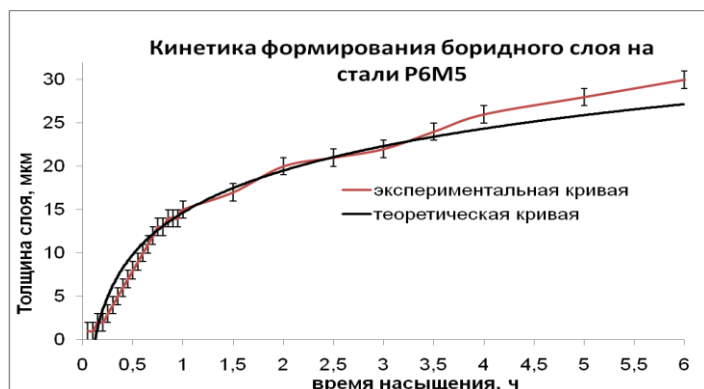


Рисунок 3 –
Кинетика роста боридного
слоя на быстрорежущей
стали Р6М5

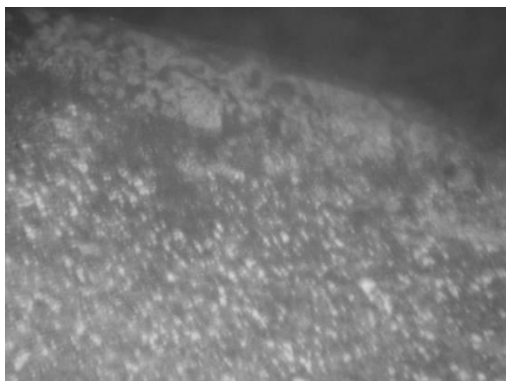


Рисунок 4 - Боридный слой на стали P6M5
при упрочнении ТВЧ x1500

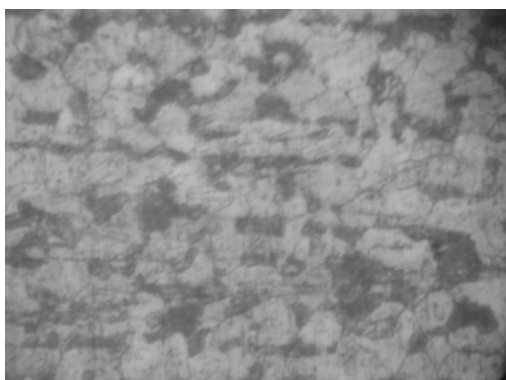


Рисунок 5 - Исходная структура стали P6M5

Износостойкость такого слоя в 1,2–1,6 раза выше по сравнению с износостойкостью неупрочненной стали независимо от удельной нагрузки.

Процессы многокомпонентного насыщения позволяют сформировать многофазную структуру поверхностного слоя, обладающего комплексом полезных свойств. Более того, химико-термической обработкой можно получить такое сочетание свойств упрочненного изделия, которое другими методами получить невозможно. В этом случае ХТО можно рассматривать не как определенную операцию изготовления детали, а как метод получения принципиально нового конструкционного материала. Многокомпонентное насыщение разными элементами или насыщение ими наружной и внутренней поверхности изделия дает возможность создавать многослойные композиционные материалы с уникальными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. – Минск: Наука и техника, 1981. – 296с.
2. Ворошнин, Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов [Текст] / Л. Г. Ворошнин. – Минск: Беларусь, 1981.– 205 с.
3. Ворошнин, Л. Г. Свойства штамповых сталей горячего деформирования легированных ванадием, ниобием, титаном, РЗМ / Л. Г. Ворошнин, А. М. Гурьев // Новые материалы и ресурсосберегающие технологии термической и химико-термической обработки деталей машин и инструментов: тез. докл. всесоюз. науч.-техн. конф. – Пенза, 1990. – С. 14-15.
4. Гурьев, А. М. Борирование в условиях циклического изменения температуры / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин // Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. : в 2-х ч. Ч. 1 / под ред. А. В. Горехова. – Минск, 1994. – С. 100.
5. Пат. 2078440 Российская Федерация, МПК С 21 Д 1/78. Способ термоциклической обработки инструментальной стали / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин, Д. П. Чепрасов, А. А. Рубцов. – № 95106172/02; заявл. 19.04.95; опубл. 27.04.97. – 3с.
6. Гурьев, А. М. Высокоэффективная технология диффузионного упрочнения штампового инструмента / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин, А. Н. Жданов // Пластическая и термическая обработка современных металлических материалов: междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1995. – С.109.
7. Чепрасов, Д. П. Повышение стойкости штампов для чистовой вырубki термоциклической обработкой / Д. П. Чепрасов, А. М. Гурьев, В. В. Свищенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 7. – С. 26-29.
8. Гурьев, А. М. Высокоэффективная технология термического упрочнения инструментальных сталей / А. М. Гурьев // Ползуновский альманах. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 1999. – № 3. – С. 90-94.
9. Физические основы термоциклического борирования / А. М. Гурьев, Э. В. Козлов, Л. Н. Игнатенко, Н. А. Попова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с.
10. Guriev, A. M. Transformation of the Phase Composition and the Mechanism of Transition Region Structuring in a Ferrite-Pearlite Steel Subjected to Thermal-Cycling Borating / A. M. Guriev, E. V. Kozlov, A. N. Zhdanov, L. I. Ignatenko, I. A. Popova // Russian Physics Journal. 2001. Т. 44. № 2. С. 183-188.
11. Гурьев, А. М. Высокоэффективная технология термоциклического упрочнения конструкционных и инструментальных сталей / А.М. Гурьев, О.В. Шаметкина, О. А. Гурьева, А. А.Колядин // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. 2004. № 2. С. 10.
12. Guriev, A. M. Transition zone forming By different diffusion techniques in borating process of ferrite-pearlite steels Under the thermocyclic conditions /

КОМПЛЕКСНОЕ ДИФфуЗИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИНСТРУМЕНТА

A. M. Guriev, E. V. Kozlov, B. D. Lygdenov, A.M. Kirienko, E.V. Chernykh // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2004. № 2. С. 54.

13. Гурьев А. М., Лыгденов Б. Д., Попова Н. А., Козлов Э. В. Физические основы химико-термоциклической обработки сталей. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008.-250с.

14. Гурьев, А. М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение инструментальных сталей / А. М. Гурьев, Л. Г. Ворошнин, Ю. П. Хараев, Б. Д. Лыгденов, С. А. Земляков, О. А. Гурьева, А. А. Колядин, О. В. Попова // Ползуновский вестник. 2005. № 2. С. 36.

15. Гурьев, А. М. Влияние параметров борирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев, И. А. Гармаева // Ползуновский вестник. 2007. № 3. С. 28-34.

16. Гурьев, А. М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, И. А. Гармаева, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев // Успехи современного естествознания. - 2007. -№ 10. - С. 89-91.

17. Иванов, С. Г. Комплексное насыщение сталей бором и хромом – борохромирование / С. Г. Иванов, А. М. Гурьев, Е. А. Кошелева, О. А. Власова, М. А. Гурьев // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 53-54.

18. Гурьев, А. М. Новый способ диффузионного термоциклического упрочнения поверхностей железоуглеродистых сплавов / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденов, С. Г. Иванов, О. А. Власова, Е. А. Коше-

лева, М. А. Гурьев, С. А. Земляков // Ползуновский альманах. - 2008. - № 3. - С. 10-16.

19. Кошелева, Е. А. Оптимизация химического состава насыщающих смесей при диффузионном борировании инструментальных сталей / Е. А. Кошелева, А. М. Гурьев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2009 - № 5 - С. 76-77.

20. Кошелева, Е. А. Разработка химического состава насыщающих смесей при диффузионном упрочнении инструментальных сталей/ Е. А. Кошелева, А. Г. Иванов, А. М. Гурьев // Труды Всероссийской конференции «Новые материалы. Создание, структура, свойства – 2009» / Томский политехнический университет. - Томск, 2009. - С. 93-96.

21. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей: пат. 2345175 Рос. Федерация: / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев – № 2007112368/02: заявл. 03.04.2007: опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.

22. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей: пат. 2360031 Рос. Федерация: / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, С. А. Земляков, О. А. Власова, Е. А. Кошелева, М. А. Гурьев – № 2007127587/02: заявл. 18.07.2007: опубл. 27.06.2009. Бюл. № 18.

Кошелева Е.А.,
Бурятский научный центр СО РАН, Улан-Удэ,
Гурьев М.А., Иванов С.Г.,
Иванов А.Г., Грешилов А.Д., Гурьев А.М.,
Лыгденов Б.Д., Околович Г.А.,
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул