УДК 621.793.5

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-2-249-82-88

*В. А. Тельдеков¹, Л. М. Гуревич²***ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ
КОМПЛЕКСНЫМ НАСЫЩЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ
ЛЕГИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**¹ ОАО «ВНИИТМАШ», Волгоград,² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: m@vstu.ru

Исследовано изменение микроструктуры, твердости и толщины диффузионных покрытий при варьировании содержания в расплаве солей карбида бора. Для образцов из стали У10 наибольшая насыщающая способность при образовании карбидного слоя характерна для состава, содержащего 2% B_4C , 5–6 % легирующих элементов (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное бура $Na_2B_4O_7$. Добавка 3–5 % оксида алюминия существенно повышает стабильность расплава и способствует сохранению насыщающей способности. Технология комплексного насыщения стали легирующими элементами может быть использована для упрочнения деталей штамповой оснастки и широкой номенклатуры деталей тракторов.

Ключевые слова: сталь, диффузия, борирование, расплав, легирующие элементы, микроструктура, карбидное покрытие, боридное покрытие, износостойкость.

*V. A. Teldekov¹, L. M. Gurevich²***INCREASING THE PERFORMANCE OF STEEL PARTS BY COMPLEX
SATURATION OF THE SURFACE WITH ALLOYING ELEMENTS**¹ ОАО «ВНИИТМАШ», Volgograd,² Volgograd State Technical University

The change in the microstructure, hardness and thickness of diffusion coatings with varying content of boron carbide salts in the melt is studied. For samples made of U10 steel, the highest saturation capacity with the formation of a carbide layer is characteristic of a composition containing 2% B_4C , 5-6% alloying elements (Cr, V, Ti), 10% NaCl, the rest is borax $Na_2B_4O_7$. The addition of 3-5% aluminum oxide significantly increases the stability of the melt and contributes to the preservation of the saturating capacity. The technology of complex saturation of steel with alloying elements can be used to harden parts of stamping equipment and a wide range of tractor parts.

Keywords: steel, diffusion, borating, melt, alloying elements, microstructure, carbide coating, boride coating, wear resistance.

Широкое промышленное применение для повышения стойкости деталей машин и инструмента получили процессы химико-термической обработки (азотирование, цементация, нитроцементация, цианирование, борирование) за счет диффузионного насыщения поверхности металлов и сплавов различными химическими элементами. Ранее описанные исследования [1] показали возможность насыщения различных по содержанию углерода сталей (стали 20ХН3А, 40Х, 20ХН3А после цементации) бором в расплаве буры с добавками порошкообразного карбида бора. Установлено, что при температуре 950 °С и длительности обработки не менее 1 ч на поверхности стали формируются качественные диффузионные слои толщиной от 60 до 140 мкм с однофазной (Fe_2B) и двухфазной ($Fe_2B + FeB$) структурой, при этом поверхностная максимальная твер-

дость борированного слоя достигает соответственно 1,6 и 2,1 ГПа. Вместе с тем показано, что рекомендованные ранее составы расплавов солей, содержащих 25–30 % B_4C имеют низкую жидкотекучесть, что сопровождается заметным выносом расплава с изделиями и приводит к необходимости частых корректировок рабочего состава и повышения уровня расплава ванны. Несмотря на достаточную простоту реализации технологии жидкостного безэлектролизного борирования [3], проведенные исследования [2] подтвердили, что показатели теплостойкости, коррозионной стойкости в агрессивной жидкости (10 % водный раствор HCl) и износостойкости при комплексном насыщении стали бором и другими легирующими элементами (хром, ванадий, титан) существенно выше, чем при образовании чисто боридных слоев. В связи с этим технологию комплексного насыщения

стали бором совместно с другими легирующими элементами (хром, ванадий, титан) можно считать предпочтительной для деталей и инструментов, подвергающихся воздействию высоких температур, агрессивных сред и сил трения.

Целью настоящей работы являлась оптимизация состава расплава для комплексного насыщения деталей машин и инструментов и исследования эксплуатационных свойств получаемых слоев.

Исследования выполнялись с применением базового состава расплава, содержащего техническую буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, поваренной соли NaCl и карбид бора B_4C .

В качестве основных параметров технологии одновременного насыщения стали бором и легирующими элементами принимались:

- температура 950°C ;
- длительность насыщения – 3 ч;
- содержание компонентов расплава – 10 % NaCl , 5–6 % легирующих элементов (Cr, V, Ti в пересчете на чистые), 2–25 % B_4C , остальное бура $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Установлено что при малом (2–4 %) содержания B_4C в расплаве, когда доля его в отношении к содержанию легирующих элементов не превышает 70 %, происходит образование диффузионного слоя на основе карбидов леги-

рующих элементов. Это соответствует ранее полученным данным, когда в смеси из порошков, содержащих хром и менее 10 % бора, протекает процесс хромирования с образованием карбидного слоя. В нашем случае толщина карбидного слоя на стали У10 оказалась существенно (на $\approx 50\%$) выше, чем на стали 45, что объясняется, вероятно, менее благоприятными условиями образования карбидных фаз из-за пониженной концентрации углерода. Можно полагать, что в жидкой ванне указанного выше состава термодинамические условия взаимодействия компонентов не обеспечивают образования боридов железа, а пригодны лишь для образования карбидов легирующих элементов. Вместе с тем, металлографическим анализом закаленных после насыщения образцов из стали 45 выявлены различия микроструктур диффузионных зон, расположенных вглубь от зоны карбидов после обработки в расплавах, содержащих 2–4 % B_4C и без него. Твердость диффузионной зоны (рис. 1) на глубине 0,6 мм после обработки в присутствии B_4C выше (5 ГПа), чем без него (4 ГПа). Это может быть обусловлено дополнительным легированием стали бором, что приводит к повышению прокаливаемости стали 45 после закалки в масле и некоторому повышению твердости этих зон слоя.

Рис. 1. Изменение микротвердости по толщине диффузионной зоны в стали 45 после насыщения в расплаве при 950°C в течение 3 ч и закалке в воде:
1 – расплав 10 % NaCl + 5–6 % (Cr, V, Ti) + 2–4 % B_4C + $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (остальное);
2 – расплав 10 % NaCl + 5–6 % (Cr, V, Ti) + $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (остальное)

Более резкое падение твердости диффузионного слоя на стали 45 при обработке без добавок

B_4C может быть вызвано локальным обеднением аустенита углеродом из-за встречной диффузии

его при образовании карбидной зоны. Выявленная возможность повышения прочности этих зон слоя при обработке в расплаве, содержащем 2–4 % B_4C , может быть дополнительным фактором повышения работоспособности изделия при эксплуатации в условиях трения и высоких

удельных давлений, когда есть опасность продавливания тонкого карбидного слоя.

Увеличение содержания карбида бора в составе расплава изменяет условия взаимодействия атомов легирующих элементов с поверхностью стали (рис. 2).

а

б

Рис. 2. Микроструктура участков боридов в диффузионном слое на стали 45 после комплексного насыщения в течение 3 ч при 950 °С из расплава солей, содержащих 10 % NaCl + 5–6 % (Cr, V, Ti) + $Na_2B_4O_7$ (остальное) при различной доле карбида бора:
а – 6 % B_4C ; б – 25 % B_4C

Так, при 6 % B_4C в стали 45 наблюдается образование участков боридного слоя (рис. 2, а), а у стали У10 в расплаве такого состава формируется карбидный слой с высокой твердостью и характерным светло-серым блестящим цветом поверхности. Дальнейшее повышение концентрации карбида бора в расплаве до 12 % приводит к образованию боридов железа даже на высокоуглеродистой стали У10. При содержании B_4C в расплаве 18–25 % образуется диффузионный слой на основе боридов железа и легирующих элементов (рис. 2, б) характерного серого цвета и более низкой твердостью (17 ГПа). При этом выявлено влияние состава расплава на толщину диффузионного слоя: максимальная толщина слоя выявлена после обработки в расплаве с 18 % B_4C , увеличение концентрации карбида бора до 25 % приводит к некоторому падению толщины слоя (рис. 3), причиной которого может быть повышение вязкости расплава и ухудшение условий насыщения стали.

В зависимости от характера эксплуатационных напряжений детали машин и инструменты после завершения режима диффузионного насыщения могут подвергаться охлаждению в режиме нормализации, закалке после подстуживания либо с повторного нагрева. Результа-

ты серии экспериментов показали, что толщина и твердость боридного слоя не зависит от условий охлаждения после насыщения, но закалка с повторного нагрева приводит к повышенной деформации изделий. При формировании диффузионных слоев как на основе боридов, так

Рис. 3. Влияние содержания B_4C в составе расплава на толщину диффузионного слоя после насыщения в течение 3 ч при температуре 950 °С:
1 – сталь 45; 2 – сталь У10

и на основе карбидов неизбежно увеличивался размер обрабатываемого изделия. Экспериментальные исследования, проведенные на цилиндрических образцах из сталей 45, У10, Х12Ф1, подтвердили, что наибольший прирост диаметра характерен для стали 45. Для диффузионного слоя на основе боридов железа и легирующих элементов при длительности обработки 3 ч прирост диаметр составлял около 26,5 мкм, а для стали Х12МФ – лишь 22,5 мкм. Диффузионное комплексное насыщение с образованием упрочненного слоя на основе карбидов легирующих элементов показало наименьший прирост диаметра образцов из стали У10, который при длительности обработки 3 ч составил около 3,7 мкм. Это может быть связано с меньшей общей толщиной карбидного слоя (12–16 мкм), что позволяет подвергать такой обработке окончательно механически обработанные изделия. Напротив, изделия после комплексного насыщения с образованием диффузионного слоя на основе боридов железа и легирующих элементов могут подвергаться шлифованию и притирке с учетом допусков на размеры и величины прироста диаметра.

Практическое значение имеют и технологические характеристики используемых расплавов, к числу которых относятся активность (насыщающая способность) расплавов, определяющая скорость роста диффузионного слоя, и жидкотекучесть расплава. Она влияет на показатели конвективного перемешивания и удельного уноса рабочего расплава поверхностью обрабатываемых изделий.

Экспериментальная оценка показала, что для образцов из стали У10 наибольшая насыщающая способность при образовании карбидного слоя характерно для состава, содержащего 2 % B_4C , 5–6 % легирующих элементов (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное бура $Na_2B_4O_7$. При этом удельный унос расплава составляла около $0,12 \text{ мг/см}^2$, что свидетельствует о небольшой его вязкости. В случае обработки с получением диффузионного слоя на основе боридов железа и легирующих элементов лучшие результаты были получены в расплаве состава 18 % B_4C , 5–6 % легирующих элементов (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное бура $Na_2B_4O_7$. Увеличение содержания карбида бора до 30 % несколько снижало насыщающую способность расплава и почти в 2 раза увеличивало удельный унос его поверхностью изделий, что неприемлемо.

Одним из недостатков расплавов солей, используемых для ХТО, является их недостаточная стабильность, то есть быстрое истощение в течение времени ХТО и снижение скорости роста диффузионного слоя. Это особенно характерно для составов на основе буры с добавками легирующих элементов или ферросплавов. Считается, что в этом случае происходит спекание порошков и осаждение их на дно тигля. Проведенные эксперименты по получению диффузионного слоя на основе карбидов легирующих элементов с использованием расплава с добавкой Al_2O_3 показали, что добавка 3–5 % оксида алюминия существенно повышает стабильность расплава и способствует сохранению его насыщающей способности (рис. 4).

Рис. 4. Изменение толщины комплексного покрытия на стали 45 после 3 ч насыщения при 950°C в зависимости от продолжительности работы расплава после введения технологических компонентов:
 1 – расплав, содержащий 3–5 % Al_2O_3 , 2–4 % B_4C , 5–6 % (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное $Na_2B_4O_7$;
 2 – 2–4 % B_4C , 5–6 % (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное $Na_2B_4O_7$

В ходе отработки технологии ХТО стала ясна необходимость оценки еще одного фактора, характеризующего условия насыщения стали бором и другими легирующими элементами – так называемого удельного объема расплава, то есть отношения объема расплава к суммарной поверхности обрабатываемых изделий в одной садке. Удельный объем расплава должен быть равен $10\text{--}20\text{ см}^3/\text{см}^2$. Экспериментальная проверка показала, что для насыщения стали бором и другими легирующими элемен-

тами на основе боридов железа указанные рекомендации вполне справедливы, а для получения карбидных диффузионных слоев удельный объем расплава должна быть не менее $30\text{ см}^3/\text{см}^2$. В противном случае не соблюдаются необходимые условия взаимодействия компонентов насыщающей среды с поверхностью изделия, что приводит к снижению толщины диффузионного слоя и большой неравномерности его по высоте садки (рис. 5).

Рис. 5. Влияние удельного объема расплава на толщину слоя, полученного при комплексном насыщении стали 45 при температуре 950°C в течение 3 ч:
1 – слой на основе боридов, насыщение в расплаве, содержащем 18–20 % B_4C , 5–6 % (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$;
2 – слой карбидного типа, насыщения в расплаве, содержащем 2–4 % B_4C , 5–6 % (Cr, V, Ti), 10 % NaCl, остальное $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Сравнительные испытания износостойкости проводились на образцах-свидетелях из стали Х12Ф1 по схеме «ролик-колодка» с применением смазки. Образцы подвергали упрочнению по двум вариантам:

вариант 1 – комплексное насыщение бором, хромом, ванадием и титаном с получением диффузионного слоя боридного типа $(\text{Fe}, \text{Me})_2\text{B}$;

вариант 2 – насыщение бором с получением боридного слоя двухфазного строения строения $(\text{FeB}$ и $\text{Fe}_2\text{B})$, что соответствует строению диффузионных слоев, получаемых при известных технологиях борирования, традиционно применяющихся для повышения износостойкости стальных изделий.

В результате испытаний установлена различная сопротивляемость этих образцов износу: время работы до получения лунки износа глубиной 4 микрометра составила для комплексно-насыщенного слоя 50 ч, а для борированного двухфазного слоя всего 5 ч. Далее, при длительности испытаний 64 ч износ образца с покрытием, полученным по новой технологии упрочнения, равен 4,8 мкм против 8,5 мкм при

традиционном борировании. Для борированного слоя с двухфазным строением интенсивность изнашивания резко возрастала с увеличением удельных нагрузок от 20 до 30 МПа, тогда как интенсивность изнашивания комплексно легированного слоя боридного типа невелика и не превышает 0,4 (рис. 6) при удельном давлении 40 МПа. Эти результаты можно, по нашему мнению, объяснить более высокой пластичностью и теплостойкостью диффузионного слоя при комплексном насыщении стали бором, хромом, ванадием и титаном [4].

Проведен анализ номенклатуры наиболее приемлемых для опробования предложенной технологии деталей инструментального производства и трансмиссий ходовых частей тракторов, требующих повышения долговечности. Это детали штамповой оснастки (пуансоны для изготовления головок винтов), режущий и мерительный инструмент, шестерни, шлицевые валы из сталей 25ХГТ и 20ХН3А, вилки карданной передачи, шестерни коробок перемены передач, различные втулки и оси из стали 45.

Рис. 6. Зависимость линейной интенсивности изнашивания плоских образцов с различными вариантами боридного слоя от среднего удельного давления в зоне контакта при трении скольжения со смазкой в паре с нормализованным роликом из стали 45:
1 – вариант 1; 2 – вариант 2

Такие изделия являются типовыми, характерными для многих заводов сельскохозяйственного машиностроения. При анализе учитывались: состав используемых материалов, конфигурация, габаритные размеры деталей и инструментов, нормативная и фактическая долговечность изделий, характер действующих рабочих напряжений, возможность получения качественного диффузионного покрытия нужной толщины, минимальное коробление изде-

лий при насыщении и закалки. В результате был выбран ряд деталей-представителей, пригодных к упрочнению по технологии комплексного диффузионного насыщения легирующими элементами с целью повышения износостойкости. Химико-термическая обработка опытной партии деталей и инструментов проводилась совместно с образцами свидетелями в лабораторной установке на базе печи СШОЛ-1.1,6/12 МЗ (таблица).

Характеристика полученных покрытий на деталях-представителях после комплексного насыщения (температура 950 °С в течение 3 ч)

Деталь	Материал	Тип диффузионного слоя	Толщина слоя, мкм	Микротвердость, ГПа
Кольцо торцового уплотнения	СЧ-20	боридный	90	17,0
		карбидный	7	20,7
Пуансон	Сталь Х12Ф1	боридный	70	17,0

Для определения работоспособности колец торцового уплотнения, упрочненных по новой технологии комплексного насыщения, проводились сравнительные стендовые испытания с соблюдением нормативных условий эксплуатации этих деталей со смазкой маслом М10В и ускоренные испытания (без смазки трущихся поверхностей). В качестве сравнительных данных использовались результаты испытаний колец, упрочненных по действующей технологии. Испытания проводились на специальном стенде, включающем трансмиссию трактора в сборе с системами электроподогрева масла и пневматического включения/выключения тормозов.

Узел уплотнения собирался целиком в соответствии с конструкторской документацией. В период испытаний температура масла поддерживалась в пределах 100–110 °С. Имитация поворота трактора достигалась ежеминутными включениями остановочного и выключениями планетарного тормозов. Уровень износа испытываемых колец определялся по разности результатов измерений высоты до и после испытаний. Как ускоренными, так и длительными испытаниями колец из чугуна СЧ20 установлена значительная эффективность упрочнения методом комплексного насыщения бором и другими легирующими элементами: износ поверх-

ности не отмечался, в то время как кольца, изготовленные по традиционной технологии, имели повышенный износ, приводящий к нарушению герметичности. Выявлена возможность значительного (50–60 %) повышения работоспособности таких деталей после упрочнения по технологии комплексного насыщения их поверхностных легирующими элементами.

Производственные испытания пуансонов, упрочненных методом комплексного насыщения легирующими элементами, проводилось в условиях реального производства инструментального завода при горячей высадке головок винтов М10 и М12. Усилие кривошипного штамповочного пресса составляло 630 кН, скорость штамповки 90 двойных ходов в минуту. Нагрев заготовок производился ТВЧ до температуры 1180 ± 20 °С. Износостойкость пуансонов оценивали по внешнему состоянию рабочих поверхностей после 1000 циклов штамповки и результатам измерения геометрических размеров рабочей части пуансонов. Установлено повышение работоспособности пуансонов после упрочнения комплексным насыщением легирующими элементами на 45–50 % по сравнению с термообработанными по серийной технологии.

Выводы

1. Для комплексного насыщения стали бором, хромом, ванадием и титаном необходимо использовать расплавы с максимальным (18–20 %) содержанием $\text{В}_4\text{С}$, что обеспечивает высокую насыщающую способность, хорошую стабильность расплава и приводит к формированию диффузионного слоя на основе боридов железа.

2. Введение небольших (2–4 %) добавок $\text{В}_4\text{С}$ в расплав позволяет при комплексном насыщении получать диффузионные слои на основе карбидов хрома, ванадия и титана, а также зону толщиной 0,5 мм с повышенным содержанием бора в аустените стали.

3. Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний дают основание считать, что новая технология комплексного насыщения стали легирующими элементами может быть успешно использована для упрочнения деталей штамповой оснастки, работающих в условиях холодного и горячего деформирования металлов, а также широкой номенклатуры деталей тракторов и сельхозмашин, испытывающих действие сил трения, высоких (до 600 °С) температур или коррозионноактивных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тельдеков, В. А. Структура и свойства боридных и карбоборидных покрытий, формирующихся в расплавах солей бора и углерода // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 80–86.
2. Тельдеков, В. А. Структура и свойства формирующихся в расплавах многокомпонентных боридных и карбидных покрытий / В. А. Тельдеков, Л. М. Гуревич // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 69–75.
3. Ворошнин, Л. Г. Борирование промышленных сталей и чугунов / Л. Г. Ворошнин. – Минск, Беларусь. – 204 с.
4. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. – М. : Физматлит, 2010. – 384 с.
5. Лабунец, В. Ф. Износостойкие боридные покрытия / В. Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М. В. Киндрачук. – К. : Техника, 1989. – 158 с.