

5. Улянин, Е. А. Коррозионностойкие стали и сплавы: справ. / Е. А. Улянин. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.

6. Масленков, С. Б. Жаропрочные стали и сплавы / С. Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

7. Жаропрочные сплавы / Ч. Симс, В. Хагель; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 568 с.

8. Коломыцев, П. Т. Жаростойкие диффузионные покрытия / П. Т. Коломыцев. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.

УДК 621.791.92

**В. М. КОНСТАНТИНОВ**, канд. техн. наук,  
**А. В. СТЕФАНОВИЧ** (БНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ С ЗАДАННОЙ СТРУКТУРОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХТО**

Среди промышленных способов упрочняющей обработки быстроизнашивающихся деталей машин и инструментов (термическая и химико-термическая обработка, наплавка, напыление, лучевые способы упрочнения) процесс наплавки занимает ведущее место вследствие своей универсальности и возможности получения упрочненных слоев в широком диапазоне толщин (0,2–10 мм и более) с различным комплексом свойств.

Покрyтия методом наплавки можно применять для повышения стойкости деталей, работающих не только при обычной температуре, но и при повышенной, а также в агрессивной среде и при сочетании температуры и агрессивной среды.

Условия, в которых происходит износ деталей машин, очень разнообразны. В общем объеме всех видов износа примерно 80–90 % приходится на долю абразивного или абразивно-ударного износа.

В разновидностях абразивного изнашивания общим является механизм процесса, который заключается во внедрении абразивного тела в металл и его продвижении при трении вдоль поверхности, вследствие чего приходит пластическое деформирование металла

(выдавленная царапина), отделение микростружки или скол. Отделение металла, определяющего износ, может быть в результате одно-, двух- или многократного действия абразива [1].

По данным [2], детали машин и соответственно наплавочные материалы, работающие в абразивной среде, можно разделить на пять основных групп: 1 – для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания без ударных нагрузок; 2 – для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с незначительными ударными нагрузками; 3 – для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания со значительной ударной нагрузкой; 4 – для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания с очень большой ударной нагрузкой; 5 – для деталей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания.

Для повышения стойкости деталей машин, работающих в условиях первой, второй и пятой групп, основным требованием к наплавочным покрытиям является высокая твердость, обеспечивающая значительную износостойкость, требования к вязкости практически не предъявляются. При действии ударных нагрузок в наплавленном слое возникают трещины, которые при многократном действии приводят к сколам наплавленного покрытия и даже его отслаиванию от основы, что резко увеличивает износ. Поэтому для деталей, работающих в условиях третьей и четвертой групп, наплавочные покрытия должны обладать наряду с высокой износостойкостью значительной вязкостью.

Анализируя применяемые в промышленности наплавочные материалы, по химическому составу их можно классифицировать на: углеродистые, легированные и высоколегированные стали; легированные чугуны; сплавы на основе никеля, кобальта. В качестве основного упрочняющего элемента используют углерод, бор и элементы, образующие интерметаллиды. Наплавочные материалы на основе никеля и кобальта являются дорогими, их чаще всего используют там, где другие материалы не обеспечивают требуемого ресурса работы деталей.

Наиболее распространенными и дешевыми наплавочными материалами являются сплавы на основе железа, легированные хромом, марганцем, ванадием, титаном, никелем, а также их сочетаниями. В качестве упрочняющих элементов используются углерод и бор. Сплавы системы «бор – железо – легирующий элемент» обла-

дают высокой износостойкостью, но невысокой вязкостью из-за значительной хрупкости боридов, а также строения боридной эвтектики, имеющей пластинчатое строение. Возникающая трещина быстро распространяется на значительную толщину, способствуя выкрашиванию наплавленного покрытия. Сплавы системы «бор – железо – легирующий элемент» используют для повышения износостойкости деталей, работающих без ударных нагрузок.

В сплавах «углерод – железо – легирующий элемент» в качестве износостойкой фазы в структуре наплавленного материала присутствуют изолированные карбиды, находящиеся в металлической основе, которые обеспечивают износостойкость покрытия, а металлическая основа – вязкость.

Основы рационального легирования наплавленных покрытий системы «углерод – железо – легирующий элемент» представлены в работе [2], которые сводятся к следующему:

1. Взаимосвязь твердости покрытия и износостойкости существует для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания без ударных нагрузок. При наличии в зоне износа динамических нагрузок износостойкость определяется структурой металла:

- видом твердой фазы (карбидом, карбоборидом, боридом);
- типом твердой фазы ( $M_3C$ ,  $M_2C$ ,  $M_{23}C$ ,  $M_7C_3$ ,  $MB_2$ ,  $MB$ ,  $M_2B$ ,  $M_2(C,B)$ ,  $M_{23}(C,B)$  и др.);
- размером и формой твердых частиц;
- видом основы (ферритная, аустенитная, перлитная, мартенситная, бейнитная и их сочетанием);
- соотношением структурных составляющих основы (мартенсита и аустенита остаточного).

2. Наибольшее повышение износостойкости обеспечивают карбиды  $M_{23}C_6$  и  $M_2C$  или карбобориды  $M_{23}(C, B)_6$ ,  $M_2(C, B)$ , которые могут быть первичными и входить в эвтектику. Для деталей, работающих в условиях сильного абразивного изнашивания и небольших ударов, можно использовать заэвтектические сплавы с наличием в структуре первичных карбидов 20–50 мкм. В случае работы деталей со значительными динамическими нагрузками целесообразно использовать доэвтектические и заэвтектические сплавы с размерами зерен твердого раствора до 50 мкм.

3. Количество твердых частиц в структуре должно составлять 20–30 % для работы в условиях абразивного изнашивания с ударными нагрузками и 30–50 % для работы в условиях абразивного изнашивания без ударных нагрузок.

4. Твердые частицы должны быть угловатой формы и изолированы друг от друга.

5. Металлическая основа наплавленного материала, обеспечивающая оптимальное сочетание износостойкости и вязкости, должна быть аустенитно-мартенситной, при этом оптимальное соотношение аустенита в структуре должно составлять 30–40 % для сплавов системы «углерод – железо – легирующий элемент» и 50–55 % – для сплавов системы «углерод – железо – легирующий элемент – бор». Для регулирования содержания количества аустенита остаточного в наплавленном покрытии в системе «углерод – железо – легирующий элемент – бор» необходимо введение никеля в пределах 4–8 %.

6. Наиболее интенсивное влияние на повышение износостойкости наплавленных покрытий оказывает бор. В зависимости от содержания бора в наплавочных материалах он может находиться либо целиком в твердом растворе (его содержание не должно превышать 0,003 %), либо растворится в карбидах, образуя карбобориды, при этом содержание бора в сплавах не должно превышать 0,25–0,4 % с соответствующим содержанием в структуре 50–55 % остаточного аустенита. При этом бор эвтектическую точку смещает влево, увеличивая в структуре количество твердой фазы. При содержании бора более 0,5 % образуются бориды легирующих элементов, количество которых в структуре увеличивается с повышением содержания бора. Дополнительное легирование бором 0,25–0,4 % повышает износостойкость без значительного снижения вязкости. При содержании бора более 0,5 % сплав резко охрупчивается.

7. Содержание углерода в сплавах системы «углерод – железо – легирующий элемент» должно быть оптимальным с целью получения карбидов  $M_{23}C_6$ ,  $M_2C$  или карбоборидов  $M_{23}(C,B)_6$ ,  $M_2(C,B)$ . Оптимальное содержание углерода в наплавочных материалах определяется количеством карбидообразующих элементов и определяется из соотношения  $(Cr + W + Mo + V + Ti)/C = 2–5$  % ат. Рассчитанное количество углерода по данному соотношению обеспе-

чивает максимальную ударостойкость. Для сплавов, работающих в условиях безударных нагрузок, содержание углерода может быть более 2 %, при этом количество карбидов в структуре может достигать до 40 %, резко повышая износостойкость.

Разработанные сплавы по приведенной выше методике [2], такие как 90X4M4Ф2БС [3], У12Х13В10Ф [4], в условиях работы ударно-абразивного износа имеют более высокую износостойкость (в 1,5–6,0 раза), чем детали, наплавленные сплавом сормайт 1.

Целью данной работы является исследование возможности получения наплавочных материалов, обладающих высоким сопротивлением абразивному изнашиванию, при эксплуатации деталей с различными ударными нагрузками путем использования отходов инструментальных сталей, подвергнутых ХТО.

Реализация полученной цели возможна при использовании отходов инструментальных сталей, содержащих значительное количество карбидообразующих элементов и подвергнутых процессам цементации, высоко- и низкотемпературной нитроцементации. Значительное содержание карбидообразующих элементов (более 10 %) должно обеспечить наличие 20–30 % твердых частиц в наплавленном слое. Процессы цементации и нитроцементации позволяют получить повышенное содержание углерода в отходах инструментальных сталей. Легирование азотом обеспечит получение в металлической основе наплавленного покрытия требуемого количества аустенита остаточного, заменяя легирование никелем. Так, по данным работы [5], количество остаточного аустенита в поверхностном слое на толщину до 0,2 мм составляет при температуре насыщения 860 °С – 10–20 %, 760 °С – 20–40 %, 700 °С – 20–90 %. Подбирая температурно-временные параметры при нитроцементации отходов инструментальных сталей (стружка имеет толщину 0,1–0,3 мм), можно получить различное количество азота и углерода в отходах инструментальных сталей, регулируя тем самым количество и тип карбонитридной фазы и соотношение мартенсита и аустенита остаточного в металлической основе. Для дополнительного введения бора в стружечные отходы можно проводить после нитроцементации процесс борирования. Процесс нитроцементации и борирования можно осуществлять в одной и той же смеси. Ниже 700 °С будет осуществляться преимущественное насыщение азотом и углеродом, причем с понижением температуры насыщения количество

азота в слое будет увеличиваться. При увеличении температуры насыщения свыше 800 °С будет происходить процесс борирования – на поверхности отходов инструментальных сталей будут образовываться бориды FeB (содержащий  $\approx 16\%$  В) и Fe<sub>2</sub>B (содержащий  $\approx 8\%$  В). Количество бора в наплавленном слое будет зависеть от температурных параметров процесса борирования.

В качестве сталей инструментального производства на промышленных предприятиях Республики Беларусь в больших количествах используются следующие стали:

5ХНМ – с суммарным количеством карбидообразующих элементов  $\approx 1\%$ ;

4Х5МФС – с суммарным количеством карбидообразующих элементов  $\approx 6,8\%$ ;

Х6ВФ – с суммарным количеством карбидообразующих элементов  $\approx 8,2\%$ ;

Р6М5 – с суммарным количеством карбидообразующих элементов  $\approx 17\%$ ;

11Р3М3Ф2Б – с суммарным количеством карбидообразующих элементов  $\approx 12\%$ .

Целесообразно использовать отходы сталей Х6ВФ и быстрорежущих, так как они содержат значительное количество карбидообразующих элементов и по их количеству близки к широкоиспользуемым наплавочным материалам. С учетом вышеприведенных данных [1] по разработке износостойких наплавочных материалов при использовании стали Х6ВФ содержание углерода в наплавочных материалах должно составлять 0,9–0,4 %; Р6М5 – 1,85–0,74 %. Поэтому при разработке наплавочных материалов из стали Х6ВФ насыщение необходимо осуществлять только преимущественно азотом, так как содержание углерода в стали Х6ВФ составляет 1,05–1,15 %, что выше верхнего предела рекомендуемого количества углерода (0,9 % углерода), а для стали Р6М5 насыщение можно осуществлять углеродом, азотом и бором.

В качестве отходов инструментальных сталей Х6ВФ и Р6М5 использовалась стружка толщиной 0,1–0,2 мм, шириной и длиной от 0,2 до 0,8 мм. ХТО проводилось в контейнере с плавким затвором: цементация – при температуре 910 °С в карбюризаторе на основе древесного угля и ацетата натрия; нитроцементация – при температурах 860, 760, 700, 600, 550 °С в карбюризаторе на основе дре-

весного угля, ацетата натрия и азотсодержащих соединений; насыщение азотом углеродом и бором проводилось по ступенчатому режиму: при 600 °С проходило насыщение азотом, далее контейнер нагревался до 900 °С, где осуществлялось насыщение бором. Время выдержки во всех случаях было одинаковым (1–4 ч), отходы после ХТО подвергались магнитной сепарации для отделения от насыщающей среды.

Исследование микроструктуры осуществлялось на оптическом микроскопе при увеличении в 1000–1500 раз. Структура стружечных отходов после различных видов ХТО представлена на рис. 1.

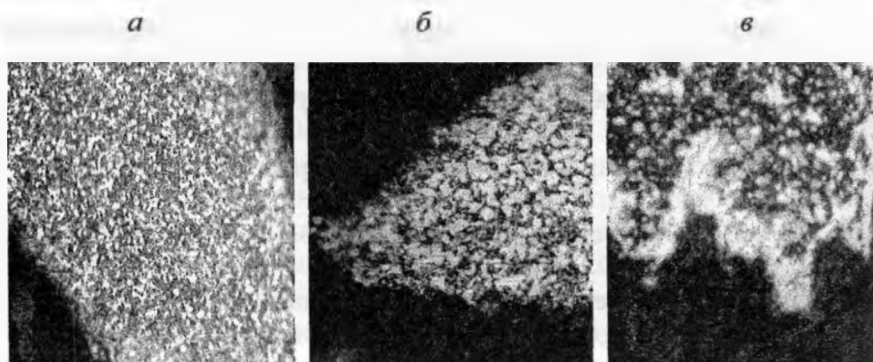


Рис. 1. Микроструктуры стружки инструментальной стали после ХТО: а – цементация 910 °С; б – нитроцементация 860 °С; в – нитроцементация 550 °С,  $\times 1000$

При процессах цементации (рис. 1, а) и высокотемпературной нитроцементации (рис. 1, б) происходит объемное легирование стружечных отходов азотом и углеродом. Структура во всех случаях состоит из карбидных включений, находящихся в матрице. При насыщении при температуре 550 °С структура представляет собой типичный карбонитрированный слой, получаемый на быстрорежущей стали. На поверхности имеется  $\epsilon$  фаза толщиной 1–5 мкм, а далее следует зона внутреннего азотирования (рис. 1, в).

Микроструктуры после наплавки представлены на рис. 2. Наплавленное покрытие после цементации представляет собой изолированные избыточные карбиды, равномерно распределенные в мартенситной матрице (рис. 2, а). Микроструктура покрытий, получен-

ных после наплавки нитроцементированных отходов быстрорежущей стали, представлена на рис. 2, б. Наплавленные слои после нитроцементации представляют собой светлую сетку с включениями карбонитридов розового цвета и дендритов, состоящих из мартенсита и аустенита остаточного и мелкодисперсных округлых карбидов. Количество аустенита остаточного составляет 5–10 %. С понижением температуры нитроцементации до 760 °С в структуре наплавленного слоя резко увеличивается количество остаточного аустенита до 50–60 % (светлое поле), в котором имеются включения карбонитридов розового цвета и иглы мартенсита (рис. 2, в).



Рис. 2. Микроструктура наплавленного слоя из стружки, подверженной ХТО: а – цементация 910 °С; б – нитроцементация 860 °С; в – нитроцементация 760 °С,  $\times 1000$

## Выводы

1. На основе анализа литературных данных по разработке наплавочных материалов систем «углерод – железо – легирующий элемент», «углерод – железо – легирующий элемент – бор» предложена концепция создания наплавочных материалов на основе отходов инструментальных сталей с использованием процессов цементации, нитроцементации, борирования.

2. Выполненные предварительные эксперименты подтвердили основные положения концепции: наплавленные покрытия, полу-



ченные из отходов инструментальных сталей, состоят из карбидных частиц (изолированных друг от друга) угловатой формы, находящихся в мартенситно-аустенитной матрице. При этом количество аустенита в основе может колебаться в широких пределах – от 5 до 60 % в зависимости от температурно-временных параметров ХТО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрущев, М. Н. Износостойкость и структура твердых наплавов / М. Н. Хрущев, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович. – М.: Машиностроение, 1971.
2. Лифшиц, Л. С. Наплавочные материалы и технология наплавки для повышения износостойкости и восстановление деталей машин / Л. С. Лифшиц // Сварочное производство. – 1991. – № 1. – С. 15–17.
3. Мельников, А. И. Исследование и разработка износостойкого сплава для наплавки деталей, подверженных ударноабразивному изнашиванию: автореф. ... канд. техн. наук / А. И. Мельников. – Свердловск, 1977.
4. Мамаев, П. И. Исследование и разработка наплавочных сплавов в условиях абразивного изнашивания и технология их наплавки: автореф. ... докт. техн. наук / П. И. Мамаев. – М.; Киев, 1982.
5. Гудремон, Э. Специальные стали / Э. Гудремон; пер. с нем. – М.: Металлургиядат, 1959. – Т. 2.

УДК 621.785.5

Е. С. ГОЛУБЦОВА, д-р техн. наук,  
Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БНТУ),  
Н. Б. КАЛЕДИНА (БГТУ)

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРУ, ПРОЧНОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 60ХФА

Использование предварительной термомеханической обработки (ПТМО) обеспечивает повышение механических свойств и эксплуатационных характеристик ряда деталей, таких как валы, оси, болты. По сравнению с серийной технологией ПТМО обеспечивается повышение износостойкости в среднем на 25 %, предела прочности  $\sigma$ , на 15–20 %. ПТМО может применяться для упрочнения галтельных переходов коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания.