

## **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ ИЗ СПЛАВА БрА7Н6Ф**

**Девойно О. Г., Кардаполова М. А., Луцко Н. И., Ковальчук А. А.**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,*  
[scvdmed@bntu.by](mailto:scvdmed@bntu.by)

Сложнолегированные бронзы обеспечивают оптимальное сочетание триботехнических свойств при малых и средних нагрузках (от 2 до 5 МПа). В то же время, повышение удельной нагрузки выше допустимой приводит к их быстрому разрушению. Медь – основа сплава – отличается дороговизной и дефицитностью. Актуальной поэтому явилась попытка создать материал для покрытия, обладающий стоимостью, близкой к стоимости углеродистой стали и износостойкостью – в 2-3 раза выше, чем у стандартных бронз. Иначе говоря, в работе ставилась задача: создать покрытие на основе бронзы БрА7Н6Ф, обладающее достоинствами сложнолегированной бронзы, но значительно превосходящее по износостойкости.

При выборе легирующих компонентов для модификации бронзовых покрытий принималось во внимание: способность данного компонента образовывать с материалом основы высокотвердые соединения, т.е. формирования в покрытии вторичной упрочняющей фазы; способность данного компонента к упрочнению твердого раствора; смачиваемость компонента медью в расплавленном состоянии, т.е. возможность образования первичных твердых упрочняющих фаз. Следует учесть технологические особенности лазерного легирования, включающие высокоэнергетическое воздействие на вводимые модифицирующие компоненты, сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения зоны воздействия лазерного луча. В таких условиях поведение легирующих компонентов не всегда подчиняется общепризнанным канонам и требуется экспериментальная проверка эффективности использования того или иного компонента. Производилась оптимизация состава сложной обмазки из выбранных компонентов, режимов легирования на основе изучения их влияния на структуру и свойства упрочненного слоя.

### **Методика проведения исследований. Выбор легирующих компонентов для лазерного легирования**

Легирующие компоненты в виде шликера наносились на поверхность газотермического покрытия (толщиной 0,6 мм) из алюминиевой бронзы БрА7Н6Ф. Толщина шликерной обмазки на покрытии составляла порядка 0,1 мм. Лазерная обработка покрытия проводилась на установке непрерывного действия Комета-2 мощностью излучения 1 кВт при скорости перемещения луча 2,67 мм/с, диаметре пятна лазерной обработки 2 мм и коэффициенте перекрытия 0,8. Эти режимы обеспечивали стабильный переплав покрытия на всю глубину и ширину зоны с минимальным влиянием на основу, и одинаковый фазовый состав. Перемещение детали относительно лазерного луча осуществлялось с помощью станка с ЧПУ.

Рентгеноструктурный анализ покрытий позволил оценить фазовый состав легированного покрытия, степень легированности твердого раствора, наличие и состав упрочняющей фазы. После предварительных исследований в качестве легирующих компонентов были отобраны 4 вещества: карбиды вольфрама и хрома, борид титана и кремний. Исходное бронзовое покрытие имело в составе алюминиды (25% об.) и фосфиды (10% об.) меди, распределенные в легированном твердом растворе. В процессе лазерной обработки фосфиды, видимо, выгорают и в составе оплавленного покрытия не найдены. Кремний довольно активно реагирует с медью, но его окислы, вследствие их тугоплавкости, не могут служить защитой от окисления при ЛХТО. Поэтому после

указанной обработки в поверхностном слое появляются силициды меди, окислы меди и кремния. Присутствует также небольшое количество непрореагировавшего кремния.

Хотя вольфрам с медью не взаимодействует, его карбиды хорошо ею смачиваются. В воздушной атмосфере при интенсивном энергетическом воздействии монокарбид вольфрама не вполне стабилен и обезуглероживается до  $W_2C$ ; покрытие имеет в составе:  $WC(30\%)$ ,  $W_2C(5-7\%)$ , алюминиды меди (25%),  $Cu_3P$  и  $CuO$  (по 5-7%) в легированном твердом растворе. При использовании в качестве шликерной обмазки карбидов хрома лазерно-обработанное покрытие включает карбиды хрома (20-25%, преимущественно  $Cr_7C_3$ ), алюминиды меди (25-30%), распределенные в твердом растворе хрома в меди. Для диборида титана оказывается справедливым то, что сказано относительно монокарбида вольфрама:  $TiB_2$  при лазерной обработке частично разлагается с образованием монокарбида  $TiB$ , в результате чего оба соединения присутствуют в сплаве примерно в одинаковых количествах. При этом титан не легирует твердый раствор.

### **Влияние технологических параметров на параметры качества упрочненных слоев**

Проводимое исследование представляло собой многофакторный и многопараметрический эксперимент, т. е. исследуемая система подвержена влиянию множества входных, поддающихся управлению факторов и характеризуется множеством выходных параметров, изменения которых необходимо исследовать и оптимизировать.

Поэтому в качестве метода планирования эксперимента выбрали планирование на симплексе, позволяющее при сравнительно небольшом числе опытов получить нелинейную модель поверхности отклика достаточно высокой степени (в данном случае - полной третьей), учитывающую сложность зависимости свойств системы от состава и возможность химических взаимодействий между компонентами. Алгоритм процедуры планирования и обработки результатов был взят из работы Ф. С. Новика, а расчёты производили на ПЭВМ с использованием программы SYMPLEX3, входящей в пакет прикладных программ STAT, разработанный в БНТУ.

Исследуемая система управлялась четырьмя входными факторами – переменными концентрациями компонентов (доли по объему):  $X_1$  – карбиды вольфрама,  $X_2$  – карбиды хрома,  $X_3$  – бориды титана,  $X_4$  – порошкообразный кремний.

В качестве выходных факторов (параметров оптимизации) для построения математических моделей полной третьей степени оценивали следующие величины:

$Y_1$  – средняя микротвердость покрытия (по данным 50 замеров, МПа);  $Y_2$  – содержание в покрытии твердого раствора на основе меди, в % по объему;  $Y_3$  – содержание в покрытии упрочняющих фаз высокой твердости (боридов, карбидов и чистого кремния), % по объему;  $Y_4$  – степень легированности твердого раствора на основе меди; в таблице приведены величины параметра кубической решетки твердого раствора в ангстремах – результаты экстраполяции по 6 дифракционным линиям (период решетки чистой меди 3.615);  $Y_5$  – содержание в покрытии интерметаллидов системы "Cu-Al";  $Y_6$  – износ при трении стального плоского контртела по плоской поверхности покрытия. Параметр  $Y_6$  имеет относительный характер и описывает скорость изнашивания, так как представляет собой глубину канавки изнашивания при трении с постоянной удельной нагрузкой. Тем не менее, по его величине можно судить о износостойкости покрытия. Матрица планирования потребовала реализации 20 основных и 4 повторных опытов. Результаты первых 20 опытов были использованы для расчета шести математических моделей - уравнений гиперповерхностей отклика параметров "Y" на вариацию факторов "X". Результаты опытов 21 .. 24 использовались для определения дисперсии опытов и оценки степени адекватности моделей (все модели оказались адекватными с вероятностью не менее 0.99).

Общий вид модели полного III порядка:

$$Y = \sum_{I=1}^4 B_i X_i + \sum_{I=1}^3 \sum_{J=2}^4 B_{i,j} X_i X_j + \sum_{I=1}^3 \sum_{J=2}^4 G_{i,j} X_i X_j (X_i - X_j) + \\ + \sum_{I=1}^2 \sum_{J=2}^3 \sum_{K=3}^4 B_{i,j,k} X_i X_j X_k,$$

Для оценки достоверности моделей программа сравнивает опытные значения параметра с рассчитанными модели. Это позволило рассчитать положение максимумов и минимумов в концентрационном тетраэдре методом прямого последовательного перебора с шагом, равным 5 % по объему. Расчет наличия, знака и степени тесноты корреляции между полученными координатами показал следующее: средняя микротвердость и износостойкость покрытия тесно коррелируют: износ уменьшается с повышением твердости; твердость покрытий обусловлена величиной объемной доли фаз высокой твердости; наоборот, увеличение концентрации твердорастворной составляющей снижает твердость и износостойкость покрытий; степень легированности твердого раствора мало влияет на свойства покрытий.

Весьма важно для теории и практики упрочнения следующее обстоятельство: максимумы твердости и износостойкости покрытий не совпадают с вершинами концентрационного тетраэдра; иначе говоря, упрочнение покрытий происходит не столько из-за высокого уровня свойств отдельных фаз (они ни в одном случае не образуют сплошного слоя), сколько в результате создания многофазных высокодисперсных структур с весьма развитыми межфазными поверхностями. Таким образом, основные механизмы упрочнения – дисперсионное твердение в результате торможения дислокаций на поверхностях раздела фаз различной природы.

При этом максимальный уровень свойств обеспечивается при определенном соотношении как свойств матрицы и упрочняющей фазы, так и их количества. Это подтверждается тем, что, несмотря на наличие корреляции, концентрационные максимумы твердости и износостойкости не совпадают. Так, расчеты по полученным моделям показывают, что покрытие с максимальной износостойкостью имеет микротвердость порядка 5500 МПа, содержит порядка 22% легированного твердого раствора, 56% высокотвердых составляющих и 14% алюминидов меди.

Исследования микроструктуры покрытий напыленной порошковой бронзы, оплавленной при различных режимах с обмазкой показали, что после сквозного проплавления она состоит из легированных дендритов твердого раствора, в пазах которых кристаллизуются мелкодисперсные высокотвердые фазы. При неполном энергокладе введенные фазы из обмазки не успевают раствориться полностью, но покрытие остается работоспособным и может быть рекомендовано для условий трения с абразивом. Неоплавленное покрытие содержит большое количество окислов.

## Выводы

1. Исследована и подтверждена возможность повышения твердости и износостойкости покрытия на основе бронзы БрА7Н6Ф для деталей, работающих в условиях повышенного износа плазменной и лазерной обработкой их поверхности.

2. Рассчитаны математические модели структурообразования при лазерной ХТО покрытий и на их основании определены оптимальные сочетания упрочняющих компонентов.

3. Установлено, что основным механизмом, обуславливающим повышение свойств после лазерной ХТО, является фазовое дисперсионное упрочнение.

4. Микроструктура оплавленной лазером бронзы состоит, в основном, из высоколегированных дендритов твердого раствора на основе меди.