МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.018.25.017

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-7-242-7-10

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, Е. А. Иваненко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ, ТВЕРДОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ОСНОВОЙ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ «КАРБИД ХРОМА – ТИТАН»*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: weld@vstu.ru

Исследованы основные количественные зависимости, связывающие параметры термической обработки плакированных твердыми сплавами деталей с их структурой и твердостью, а также прочностью сцепления покрытий с основой. Предложено теоретическое обоснование найденных закономерностей.

Ключевые слова: твердый сплав, покрытие, взрывное прессование, карбид хрома, титан, термическая обработка, микроструктура.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, E. A. Ivanenko, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON THE STRUCTURE, HARDNESS AND STRENGTH OF COUPLING WITH THE BASIS OF THE COATING OF THE CHROMIUM CARBIDE – TITANIUM SYSTEM

Volgograd State Technical University

The main quantitative dependencies that relate the parameters of heat treatment of parts clad with hard alloys with their structure and hardness, as well as the adhesion strength of coatings to the substrate, are studied. The theoretical substantiation of the found regularities is proposed.

Keywords: hard alloy, coating, explosive pressing, chromium carbide, titanium, heat treatment, microstructure.

Термическая обработка является эффективным средством повышения служебных (и, в частности, механических) свойств металлических и композиционных материалов. Положительно-го результата от ее применения можно ожидать и при разработке технологии получения покрытий из твердых сплавов взрывным прессованием. Поскольку при выборе режимов нагружения и составов порошковых смесей, обеспечивающих получение твердых сплавов и покрытий из них на стадии прессования без спекания, ведущим фактором, определяющим прочность соединения покрытия с основой, является уровень остаточных напряжений [1], то в первую

очередь должна быть исследована возможность использования такого вида термической обработки, как отжиг.

Для решения этой задачи образцы с покрытием из твердого сплава карбида хрома с 30 % титановой связки, нанесенным с использованием титановой прослойки [2], подвергали нагреву до температуры от 300 до 800 °С. Длительность выдержки при выбранной температуре составляла 1 час, охлаждение проводилось на воздухе. После термообработки производились измерения твердости и прочности соединения покрытий на срез, результаты которых представлены в приведенной ниже таблице.

**Влияние температуры термической обработки
на свойства покрытий из твердого сплава
 $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{Ti}$ с прослойкой титана**

Температура нагрева t , °C	Прочность соединения покрытия на срез τ , МПа	Твердость покрытия, HRA
Без термической обработки	69	72
300	75	75
400	130	77
500	88	77
600	90	79
700	40	81
800	–	80

Анализ полученных данных показывает, что прочность соединения покрытий после нагрева до 300 °C практически не изменяется, затем резко возрастает, достигая максимума при температуре 400 °C, и далее снова достаточно быстро уменьшается, так что при охлаждении после нагрева до 800 °C происходит отслоение покрытия (рис. 1).

Прочность соединения покрытия с основой после отжига при 400 °C достигает 130 МПа, что почти в два раза превышает ее значение до проведения термической обработки. При этом разрушение образцов при испытаниях происходит преимущественно по материалу твердого сплава (рис. 2), что говорит о достижении состояния равнопрочности на границах раздела «твердый сплав – титановая прослойка» и «титановая прослойка – стальная подложка».

Рис. 1. Влияние температуры t термообработки на прочность соединения с основой τ и твердость покрытия HRA

Рис. 2. Макроструктура зоны разрушения образцов, отожженных при температуре 400 °C, после испытания на срез, оптическая микроскопия, Carl Zeiss Axiovert, $\times 50$

Температура 400 °C попадает в интервал $(0,3 \dots 0,4)T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}$ – температура плавления титана. Данный интервал соответствует температуре начала рекристаллизации технически чистых металлов [3].

Проведение исследований микроструктуры титановой прослойки между твердым сплавом и стальным основанием показало, что в процессе отжига при температуре 400 °C действительно имеет место рекристаллизация титана, в результате которой исходные вытянутые в направлении деформации (перпендикулярно импульсу давления) зерна размером 500...800 нм (рис. 3, а) заменяются пространственно разориентированными, равноосными зернами (рис. 3, б).

Поскольку процесс рекристаллизации всегда сопровождается снятием существующих внутренних остаточных напряжений [3], то резкое возрастание прочности соединения покрытий с основой при увеличении температуры

отжига до 400 °С (рис. 1), можно считать связанным с релаксацией (полной или частичной) сформировавшихся при охлаждении после взрывной обработки напряжений – растягивающих в покрытии и сжимающих в основе.

Рис. 3. Микроструктура титановой прослойки до термической обработки (а) и после отжига при температуре 400 °С (б), шлиф, АСМ, Solver Pro

Уменьшение прочности соединения покрытия с основой при более высоких температурах отжига с этих позиций можно объяснить появлением новых напряжений, которые также связаны с торможением усадки, но возникают при достаточно быстром охлаждении после термической обработки в условиях близких температур покрытия и подложки из-за разницы в значениях их коэффициента линейного расширения [4]. Поскольку численное значение этого коэффициента для твердых сплавов на основе карбида хрома близко к $\alpha = 9,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [5], а для малоуглеродистой стали в интервале температур от 20 до 700 °С – к $\alpha = 15,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [6], то очевидно, что их совместное охлаждение приведет к возникновению сжимающих напряжений в покрытии и растягивающих в основании. При температуре отжига, равной 800 °С, уровень вновь появившихся напряжений становится столь высок, что вызывает отслоение покрытия.

Описанный характер изменения напряженного состояния покрытия (растяжение при температурах отжига, меньших 400 °С, и сжатие при температурах от 400 до 700 °С) может объяснить также наблюдаемое увеличение твердости покрытий в интервале температур от 300 до 700 °С (см. рис. 1). Снижение твердости мате-

риала покрытия при температуре отжига, равной 800 °С, при этом может быть связано с релаксацией напряжений, вызванной отслоением покрытия от подложки.

Следует отметить, что определенную роль в изменении прочности соединения покрытия с основой и его твердости при термической обработке может играть также начало процессов химического взаимодействия между компонентами твердосплавного покрытия [6]. Проявление подобных эффектов возможно, однако, лишь при температурах нагрева выше 600...650 °С и не может повлиять в связи с этим на уже сделанные предположения о причинах изменения прочности соединения и твердости при более низких температурах.

Выводы

1. Увеличения прочности соединения покрытий из твердого сплава карбида хрома и титана с покрываемой поверхностью при наличии между ними металлической прослойки можно добиться термической обработкой – отжигом для уменьшения остаточных напряжений.

2. Оптимальная температура отжига должна обеспечивать протекание рекристаллизации в материале прослойки. При использовании в качестве металлической прослойки титана эта температура соответствует 400...420 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Особенности сохранения порошковых покрытий системы $\text{Cr(3)C(2)} - \text{Ti}$ при их нанесении на стальные основания с использованием нагружения плоской нормально падающей детонационной волной / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (213) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 40–44.
2. Способы повышения прочности сцепления покрытий из твердых сплавов системы $\text{Cr(3)C(2)} - \text{Ti}$ со стальной подложкой / В. О. Харламов, А. В. Крохалев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, М. А. Тупицин, Е. А. Иваненко, Д. О. Сагулев, Б. Б. Ионов, О. Гонсалес // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (221) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений»). – С. 62–66.
3. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1986. – 480 с.
4. Авдеев, Н. В. Металлирование / Н. В. Авдеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
5. Определение термомеханических свойств твердых сплавов системы $\text{Cr(3)C(2)} - \text{Ti}$ с помощью полидисперсной модели / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. А. Глухенький // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. Инфо 2014 : мат-лы XI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Сочи, 1–10 окт. 2014 г.) / Национальный исследовательский ун-т «Высшая школа экономики» [и др.]. – М., 2014. – С. 155–156.
6. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.] ; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.
7. Исследование структуры и химического взаимодействия между составляющими твердых сплавов, полученных взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, М. А. Тупицин, Е. А. Иваненко, Д. М. Оджури, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (221) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений»). – С. 73–77.