ПОРОШКОВЫЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.762.4.04

DOI:10.35211/1990-5297-202010-245-21-25

*А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин,
В. И. Лысак, Е. А. Косова, В. А. Безруков*

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ И ПОДБОР РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОЕ ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СЦЕПЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ «КАРБИД ХРОМА – ТИТАН» С ОСНОВОЙ*

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. Krokhaliev, V. O. Kharlamov, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, E. A. Kosova, V. A. Bezrukov

DEVELOPMENT OF A THEORETICAL JUSTIFICATION AND SELECTION OF HEAT TREATMENT MODES PROVIDING EFFECTIVE INCREASING THE ADHESION STRENGTH OF COATINGS OF THE "CHROME CARBIDE - TITANIUM" SYSTEM WITH THE BASE

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.

Как показали многочисленные исследования [1, 2], наиболее простой и эффективной в технологическом отношении схемой нагружения для нанесения покрытий из порошковых твердых сплавов является схема, предусматривающая размещение исходной смеси порошков

Cr_3C_2 и металлической связки непосредственно на рабочей поверхности заготовки детали и ее нагружение плоской нормально падающей детонационной волной через промежуточную прокладку, отделяющую продукты детонации от порошка (рис. 1).

Рис. 1. Схема нагружения (а) и внешний вид полученных образцов (б):
1 – электродетонатор; 2 – детонирующий шнур; 3 – заряд ВВ; 4 – промежуточная прокладка;
5 – порошок; 6 – стальное основание; 7 – песчаная подушка

При использовании данной схемы разогрев порошкового материала происходит не за счет теплообмена между ним и продуктами детонации, а в результате общего увеличения внутренней энергии порошка в ходе его необратимого сжатия в ударных волнах. Повышение давления в наносимом материале осуществляется ступенчато вследствие отражения движущейся по невозмущенному порошку ударной волны от поверхности покрываемой подложки, а затем и от промежуточной прокладки, отделяющей продукты взрыва от порошка. При этом рост температуры происходит в основном в первой волне, движущейся по невозмущенному порошку [3, 4], а максимальное давление его сжатия достигается в отраженных ударных волнах, что является оптимальным с точки зрения сварки давлением. После снятия давления в результате разлета продуктов детонации и разгрузки заготовки с покрытием слой спрессованного взрывом порошкового материала, претерпевший значительное необратимое уменьшения объема, имеет остаточную температуру, близкую к температуре разогрева в процессе ударно-волнового сжатия [3, 4], а монолитная подложка – температуру, лишь на несколько десятков градусов отличающуюся от начальной [5].

Снижение температуры покрытия за счет теплоотвода в подложку и окружающую среду должно сопровождаться его усадкой. Однако, вследствие наличия прочной связи порошкового слоя с основанием, будет происходить торможение этой усадки, в результате чего в покрытии, не зависимо от значения коэффициентов линейного расширения материалов, неизбежно будут возникать растягивающие напряжения. В случае, когда уровень этих напряжений превысит некоторый предел, произойдет отслоение покрытия.

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, обеспечи-

вающих 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 на рис. 2.

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

Прочность соединения покрытия с основой после отжига при 400 °С 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. 3), что говорит о достижении состояния равнопрочности на границах раздела «твердый сплав – титановая прослойка» и «титановая прослойка – стальная подложка».

Температура 400 °С попадает в интервал $(0,3...0,4)T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления титана. Данный интервал соответствует температуре начала рекристаллизации технически чистых металлов [6].

Проведение исследований микроструктуры полученных взрывным прессованием покрытий системы Cr_3C_2 –Ti показало, что в титановой связке твердых сплавов при температуре 400 °С действительно протекают процессы рекристаллизации, приводящие к появлению новых равноосных зерен размером 50...90 нм (рис. 4)

Рис. 2. Влияние температуры t термообработки на прочность соединения с основой τ и твердость покрытия HRA

a

б

Рис. 3. Исходная микроструктура зоны соединения покрытия из твердого сплава с основой (*a*), РЭМ, FEI Versa 3D LoVac, и вид зоны разрушения образцов, отожженных при температуре 400 °C, после испытания на срез (*б*), оптическая микроскопия, Carl Zeiss Axiovert

a

б

Рис. 4. Микроструктура покрытий системы Cr_3C_2 –Ti после взрывного прессования (*a*) и отжига при температуре 400 °C (*б*), фольга, РЭМ, FEI Versa 3D LoVac

Протекание рекристаллизационных процессов также хорошо различимо в титановой прослойке между твердым сплавом и стальным основанием, в структуре которой при 400 °С исходные вытянутые в направлении деформации

(перпендикулярно импульсу давления) зерна размером 500...800 нм (рис. 5, *а*) заменяются пространственно разориентированными равноосными зернами (рис. 5, *б*).

Рис. 5. Микроструктура титановой прослойки до термической обработки (*а*) и после отжига при температуре 400 °С (*б*), шлиф, АСМ, Solver Pro

Поскольку процесс рекристаллизации всегда сопровождается снятием существующих внутренних остаточных напряжений [6], то резкое возрастание прочности соединений покрытий с основой при увеличении температуры отжига до 400 °С (рис. 2), можно считать связанным с релаксацией (полной или частичной) сформировавшихся при охлаждении после взрывной обработки напряжений – растягивающих в покрытии и сжимающих в основе.

Уменьшение прочности соединения покрытий с основой при более высоких температурах отжига с этих позиций можно объяснить появлением новых напряжений, которые также связаны с торможением усадки, но возникают при охлаждении после термической обработки в условиях близких температур покрытия и подложки из-за разницы в значениях их коэффициента линейного расширения [7]. Поскольку численное значение этого коэффициента для твердых сплавов на основе карбида хрома

близко к $\alpha = 9,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [8], а для малоуглеродистой стали в интервале температур от 20 до 700 °С – к $\alpha = 15,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [9], 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. 2). Снижение твердости материала покрытия при температуре отжига, равной 800 °С, при этом может быть связано с релаксацией напряжений, вызванной отслоением покрытия от подложки.

Рис. 6. Микроструктура границ между Cr_3C_2 и титаном после отжига при температуре 650 °С (*а*) и 700 °С (*б*), фольга, РЭМ, FEI Versa 3D LoVac

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 [10]. Как показало исследование границ раздела между структурными составляющими покрытия (рис. 6) проявление подобных эффектов возможно, однако, лишь при температурах нагрева выше 650...700 °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 Cr(3)C(2) – 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 мате-

риаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 40–44.

2. Способы повышения прочности сцепления покрытия из твердых сплавов системы Cr(3)C(2)–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. Рогозин, В. Д. Взрывная обработка порошковых материалов / В. Д. Рогозин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 136 с.

4. Pruemmer, R. A. Explosive Compaction of Powders and Composites / R. A. Pruemmer, T. Balakrishna Blat, K. Siva Kumar, K. Hokamoto. – Science Publishers, 2006. – 194 pp.

5. Физика взрыва / под ред. К. П. Станюковича. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1975. – 704 с.

6. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Металлургия, 1986. – 480 с.

7. Металлирование / Н. В. Авдеев. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.

8. Определение термомеханических свойств твердых сплавов системы Cr(3)C(2)-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 : матер. 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.

9. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский [и др.] ; под общей ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.

10. 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.