



УДК 621.793

Поступила 12.03.2013

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, О. Г. ДЕВОЙНО, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, БНТУ

## МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Целью данной работы является создание покрытий с композитной макрогетерогенной структурой, которая характеризуется хорошими антифрикционными свойствами и может эксплуатироваться в тяжелых условиях. Для формирования покрытия был применен CO<sub>2</sub>-лазер.*

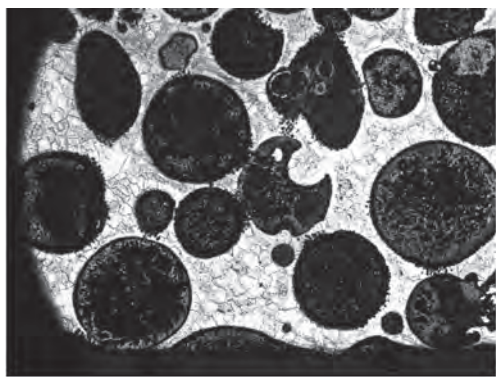
*The aim of the work is development of coatings with composite macroheterogeneous structure that are characterized with good antifriction properties and able to perform in severe working conditions. To form coating a CO<sub>2</sub>-laser was applied.*

Повышение износостойкости поверхностей деталей в узлах трения – это одна из приоритетных задач машиностроения. Для решения данной задачи целесообразно переходить на управление процессом формирования микроструктуры на микро- и наноуровнях [1]. Одним из методов управления микроструктурой поверхностных слоев является воздействие концентрированными потоками энергии [2, 3], что создает условия для формирования структуры при неравновесных условиях, способствующих образованию микро- и наноразмерных фаз. Представляет научный интерес применения таких технологий для управления микроструктурой композиционных материалов с макрогетерогенной структурой. Данные материалы показали высокие эксплуатационные свойства при использовании в тяжелонагруженных узлах трения [4]. В силу особенностей структуры и со-

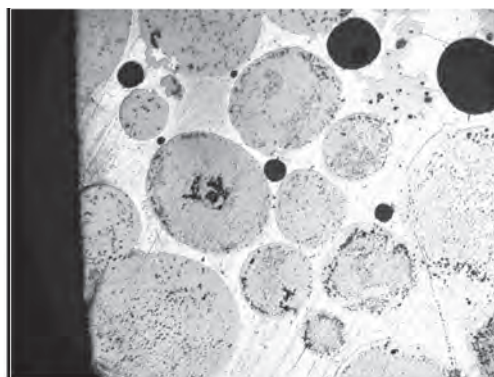
става эти композиционные материалы наиболее эффективны при низких скоростях относительно движения в узлах трения и высокой удельной нагрузке [5]. С целью расширения области применения композиционных материалов с макрогетерогенной структурой было решено изучить влияние на структуру их поверхностных слоев после воздействия лазерного излучения.

В экспериментальных исследованиях был использован CO<sub>2</sub>-лазер типа «Комета-2» мощностью 1 кВт.

В качестве объекта исследований был выбран макрогетерогенный композиционный материал на основе бронзы КЗМц, армированный чугунными сферическими гранулами диаметром 0,5–1,0 мм. После лазерной обработки шлифы из образцов были изучены с применением оптической микроскопии (микроскоп «Микро



а



б

Рис. 1. Общий вид шлифа композиционного материала: а – после травления; б – без травления.  $\times 50$

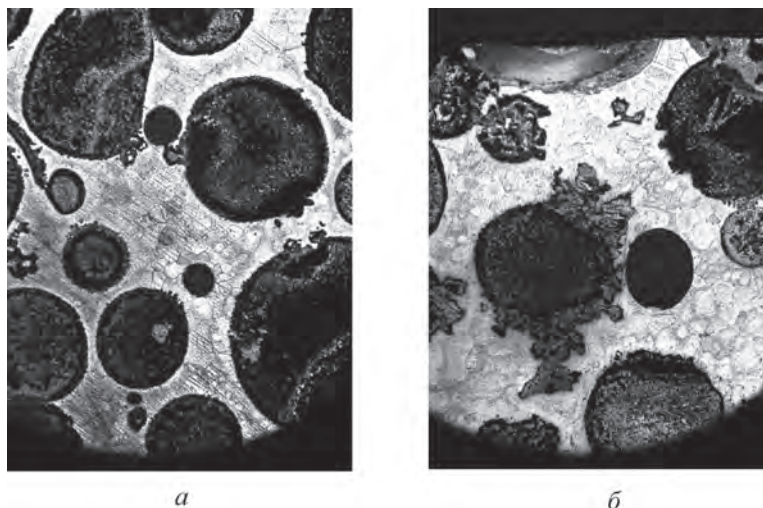


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя композиционного материала после лазерной обработки из первой серии: *а* – без покрытия; *б* – с покрытием. Травлено,  $\times 50$

200»). Травление образцов для выявления структурных изменений в медной матрице проводили водным раствором, содержащим 10 ч  $K_2Cr_2O_7$  и 1 ч  $H_2SO_4$ .

На рис. 1 приведены структуры исходных образцов до и после травления, которые характерны для композиционных материалов с макрогетерогенной структурой [6].

Для изучения влияния лазерного излучения на формирование поверхностных слоев были проведены две серии экспериментов с разными параметрами интенсивности лазерного луча. В каждой серии обрабатывали два вида образцов: с покрытием, содержащим наноразмерные графитные частицы, и без покрытия. Покрытие, кроме того, увеличивало степень поглощения лазерного излучения материалом матрицы. Для первой серии опытов были выбраны следующие

параметры луча: диаметр лазерного пятна – 1,5 мм, скорость движения луча – 100 мм/мин, шаг дорожки – 1,5 мм.

Полученные микроструктуры в результате лазерной обработки образцов показаны на рис. 2. Под воздействием высокоэнергетического потока наблюдается изменение структуры гранул, которая стала более дисперсной. Кроме того, произошло подплавление с образованием интерметаллидных фаз (рис. 2, *а*). Предварительное нанесение графитсодержащего покрытия способствует заметным структурным изменениям обработанного слоя. Мелкие гранулы у поверхности даже диспергированы, а крупные гранулы были подплавлены и при последующем затверждении образовали значительные по площади неравновесные интерметаллидные соединения (рис. 2, *б*).

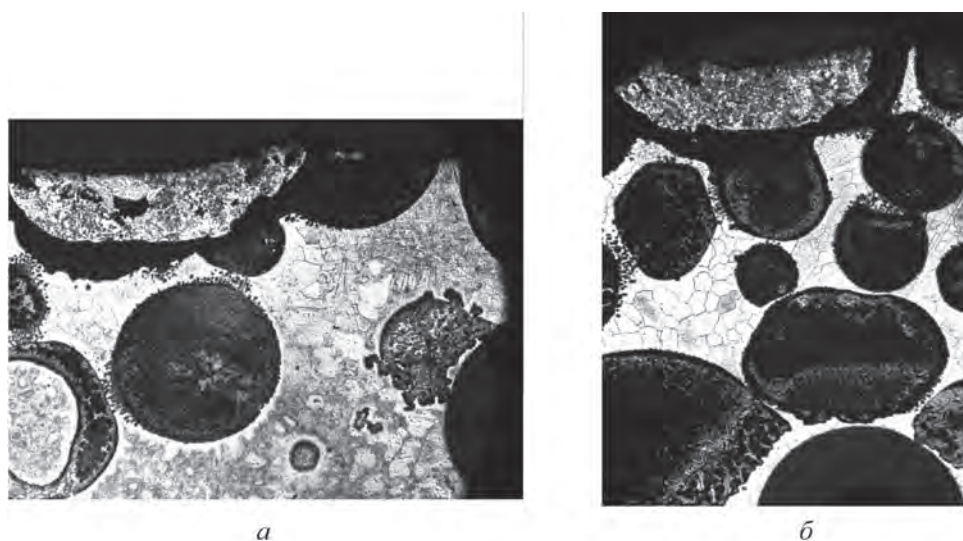


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя композиционного материала после лазерной обработки из второй серии: *а* – без покрытия; *б* – с покрытием. Травлено,  $\times 50$





Рис. 4. Микроструктура композиционного материала после лазерной обработки из второй серии. Травлено,  $\times 100$

Для второй серии были выбраны следующие параметры: диаметр лазерного пятна – 3,0 мм, скорость прохождения луча – 70 мм/мин, шаг – 3,0 мм. Полученные в результате обработки образцы представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, лазерная обработка слабо повлияла на исходную структуру образцов, что объясняется снижением удельной энергии примерно в 2,5 раза. Однако необходимо отметить, что в случае образцов с покрытием заметен больший объем гранул, претерпевших структурные изменения. Гранулы на поверхности были переплавлены в обоих случаях. При более высоких увеличениях было выявлено незначительное измельчение структуры у образцов второй серии на границе «гранула – матрица» (рис. 4) с образованием микроразмерных интерметаллидных фаз.

Обнаруживается частичное разрушение армирующего элемента и переход его частиц в матрицу.

Композиционные материалы с макрогетерогенной структурой характеризуются хорошей демпфирующей способностью, а также формированием пленки трения, снижающей очень значительно износ рабочей поверхности [6]. Однако практический интерес представляет создание макрогетерогенной структуры не во всем объеме металла, а только в поверхностном слое, что открывает новые возможности в управлении свойствами поверхностных слоев.

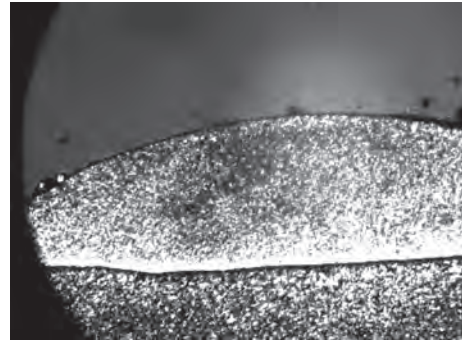


Рис. 5. Микроструктура самофлюсующейся бронзы на стальной подложке после лазерного переплава.  $\times 50$

Для проведения исследований были использованы пластинки из стали 40, на которые производили наплавку композиционных материалов. В качестве сравнения были проведены опыты по формированию покрытия на основе самофлюсующейся бронзы БрО8НСП, которая характеризуется хорошими антифрикционными свойствами.

На рис. 5 приведена микроструктура слоя из бронзы БрО8НСП, которая имеет мелкозернистый характер. Образцы были обработаны при следующих двух режимах: 1) диаметр лазерного пятна – 3,0 мм, скорость прохождения луча – 70 мм/мин, шаг – 3,0 мм; 2) диаметр лазерного пятна – 1,5 мм, скорость прохождения луча – 100 мм/мин, шаг – 1,5 мм. Как показали эксперименты, для данного типа подложки приемлемым оказался только первый режим. Второй режим (с более высокой плотностью энергии) вызывал проплавление даже подложки и ее коробление. Для последующей серии экспериментов по лазерному синтезу композиционного покрытия использовали смесь из бронзы БрО8НСП, служившей матрицей, и чугуновых гранул размером 0,5–1,0 мм, которые выступали в качестве упрочняющей фазы. Формирование покрытий лазерным оплавлением проводили по трем режимам: 1) диаметр пятна – 3,0 мм, скорость прохождения луча – 70 мм/мин, шаг – 3,0 мм (рис. 6, а); 2) диаметр пятна – 4,0 мм, скорость прохождения луча – 70 мм/мин, шаг – 3,0 мм (рис. 6, б); 3) диа-

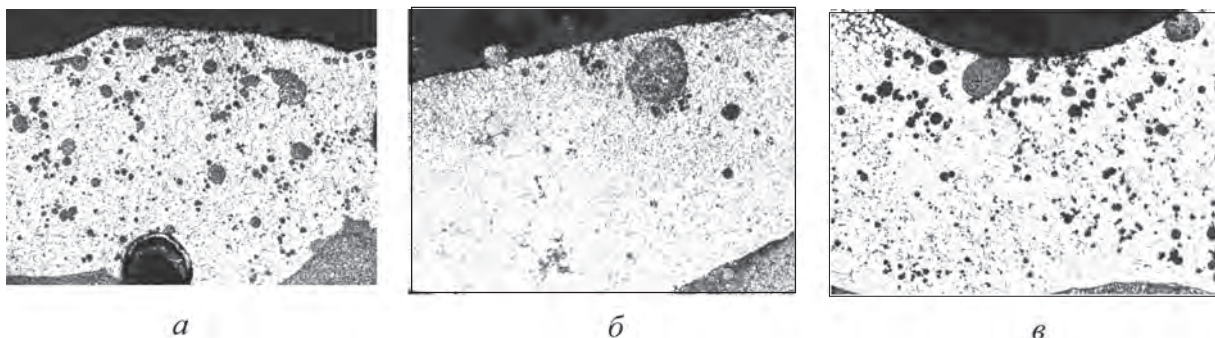


Рис. 6. Микроструктура композиционного покрытия на стальной подложке.  $\times 100$

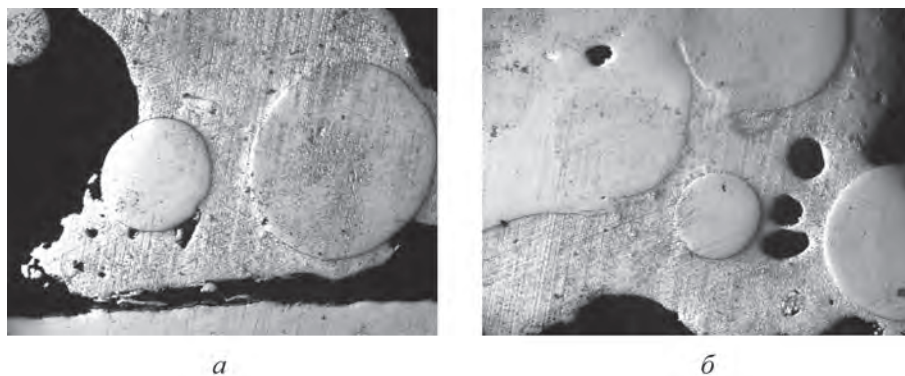


Рис. 7. Микроструктура композиционного покрытия с макрогетерогенной структурой, полученного лазерным спеканием: *а* – край образца; *б* – середина образца. Не травлено,  $\times 50$

метр пятна – 5,0 мм, скорость прохождения луча – 70 мм/мин, шаг – 3,0 мм (рис. 6, в).

Как видно из рисунка, в образцах наблюдается практически полное растворение чугуновых гранул и относительно равномерное распределение их по объему матрицы с образованием композиционной структуры.

Первые опыты по созданию композиционных покрытий на пластинах показали наличие коробления подложки, особенно значительное при высоких плотностях подводимой энергии. Во избежание возможного коробления было решено увеличить толщину подложки. Как результат, она была увеличена с 1 до 10 мм. Для лучшей адгезии гранул с материалом матрицы использовали флюс, применяемый для производства литых композиционных материалов. При первоначальной толщине нанесенного слоя толщиной 1 мм (не превышающий диаметр гранул) сложно реализовать макрогетерогенную структуру покрытия, так как необходимо иметь толщину слоя, которая должна быть не менее трех диаметров гранул. Поэтому толщина слоя покрытия была увеличена с 1 до 5 мм.

Как видно из рис. 7, при диаметре лазерного пятна 7 мм и скорости прохождения луча 70 мм/мин

была синтезирована типичная для литых макрогетерогенных композиционных материалов структура. Хотя следует отметить частичное проплавление гранул в центре дорожки (рис. 7, б) и наличие микропористости. Однако проведенные исследования показывают возможность формирования на деталях из стали покрытий, имеющих композиционную макрогетерогенную структуру.

### Выводы

Результаты проведенных исследований подтвердили, что, варьируя технологические и геометрические параметры лазерной обработки, можно получать композиционные покрытия с макрогетерогенной структурой для применения в узлах трения. Поскольку синтез покрытия идет при высокой интенсивности подводимой лазером энергии, то можно обеспечить формирование упрочняющих фаз микронных размеров, равномерно распределенных в матрице. Это, в свою очередь, будет способствовать повышению износостойкости поверхностного слоя. Как результат, расширяется область применения композиционных материалов с макрогетерогенной структурой.

### Литература

1. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик и др.; под ред. В. Е. Борисенко, Н. К. Толочко. Минск: изд. центр БГУ, 2008.
2. Спиридонов, Н. В. Формирование износостойких поверхностных слоев концентрированными потоками энергии / Н. В. Спиридонов. Минск: БНТУ, 2012.
3. Девойно О. Г., Калининко А. С., Кардаполова М. А. Лазерная обработка износостойких газотермических композиционных покрытий. Минск: БНТУ, 2011.
4. Жорник В. И., Калининко А. С., Кезик В. Я. Рекомендации по ремонту и реконструкции тяжело нагруженных узлов скольжения с использованием композиционных материалов. Минск: ИТК НАН Беларуси, 2000.
5. Калининко А. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Формирование структуры поверхностного объема литых макрогетерогенных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки // Литье и металлургия. 2003. № 2. С. 118–123.
6. Kalinichenko A. S., Kezik V. Ya., Bergmann H. W., Kalinichenko V. A. Structure of surface layers of metal matrix composites // Materialswissenschaft und Werkstofftechnik. 1999. Vol. 30. P. 136–144.