

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ ТИПА ПГСР-4 В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ

Кутепов С.Н., Клементьев Д.С.

Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, Тула

Ключевые слова: лазерное упрочнение, зона лазерного воздействия, микротвердость, фазовый состав, номограмма, диффузия.

Аннотация. В работе изучено влияние непрерывного лазерного излучения на структуру и микротвердость покрытия ПГСР-4, нанесенного на стальную подложку. Выявлено слоистое строение и значительное количество пор и окислов, присутствующих на напыленном покрытии. Определены зависимости, распределения химических элементов и показателей микротвердости в зоне лазерного воздействия, от величины подведенной тепловой энергии. По результатам экспериментов построена результирующая номограмма.

FORMATION OF THE STRUCTURE OF COATINGS OF THE PGSR4 TYPE IN THE PROCESS OF LASER REFLOW

Kutepov S.N., Klementyev D.S.

Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, Tula

Keywords: laser hardening, laser exposure zone, microhardness, phase composition, nomogram, diffusion.

Abstract. The effect of continuous laser radiation on the structure and microhardness of the PGSR-4 coating applied to a steel substrate is studied. The layered structure and a significant number of pores and oxides present on the sprayed coating were revealed. The dependences of the distribution of chemical elements and microhardness indices in the laser exposure zone on the value of the supplied thermal energy are determined. Based on the results of the experiments, the resulting nomogram is constructed.

Лазерное поверхностное упрочнение имеет в настоящее время широкий круг промышленных применений. И хотя внедрение по-прежнему сдерживается высокой ценой лазерного оборудования, необходимостью иметь обученный и грамотный персонал, использование этих технологий существенно повышает конкурентоспособность изделий отечественного машиностроения [1].

Преимущества лазерного упрочнения по сравнению с другими видами упрочнения – это локальность обработки и зоны термического нагрева. При этом деталь даже можно взять руками после обработки, что, соответственно, позволяет обрабатывать тонкостенные детали, по сути, без поводок, не подвергать основную часть детали сколько-нибудь существенному разогреву [2]. Специфика лазерной обработки позволяет упрочнять тонкостенные детали, например, резьбовые поверхности, а также труднодоступные места деталей, в том числе внутренние поверхности [3].

Цель работы – изучение влияния непрерывного лазерного излучения на структуру и микротвердость покрытия ПГСР-4, нанесенного на стальную подложку, с целью оптимизации режимов упрочнения деталей, работающих в условиях повышенного износа.

Лазерному облучению подвергали образцы из стали 9Х (в отожженном и улучшенном состоянии (закалка + высокий отпуск)) с предварительно нанесенным плазменным покрытием из самофлюсующегося сплава ПГСР-4. На часть образцов наносили покрытие из сплава ПГСР-4 с добавками карбида хрома Cr_3C_2 (табл. 1).

Лазерную обработку в режиме оплавления проводили с использованием волоконного непрерывного CO_2 -лазера с выходной мощностью 1,35; 2,0; 2,5; 3,0 кВт и скоростью перемещения луча 2,5; 4,5; 8; 12 мм/с.

Металлографические исследования структуры проводили методами оптической и электронной микроскопии с использованием оптического микроскопа Neophot-21 и электронного микроскопа JEOL «JSM 6390». Рентгеноструктурный анализ выполняли на установке ДРОН-7.

Металлографический и рентгеноструктурный анализ исходного напыленного покрытия показал, что оно имеет слоистое строение и значительное количество пор и окислов (рис. 1,а). На границе соединения покрытия со стальной подложкой наблюдались поры и несплошности.

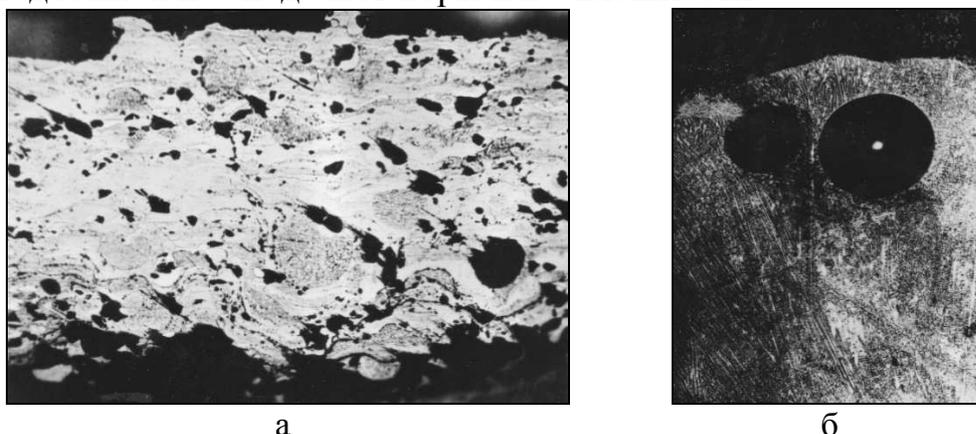


Рис. 1. Микроструктура покрытия ПГСР-4, нанесенного на сталь методом плазменного напыления (а, $\times 400$) и обработанного лучом лазера (б, $\times 100$)

Рентгеноструктурный и локальный рентгеноспектральный анализ исходного напыленного покрытия позволил установить наличие в покрытии следующих фаз: 1) γ -твердого раствора на основе никеля; 2) боридов никеля Ni_3B и хрома CrB ; 3) карбидов хрома Cr_7C_3 ; 4) силицида Ni_2Si .

Структура стали 9Х в ЗЛВ неоднородна. По мере удаления от границы оплавления микротвердость уменьшается от максимального значения у границы (6500 МПа) до значения характерного для исходной стали (2500 МПа), а структура соответственно изменяется от мартенситной до трооститной и перлитной. Такая значительная неоднородность строения ЗЛВ в стали обусловлена наличием резкого температурного градиента [5], прохождением полной и частичной перекристаллизации, самоотпуска в различных участках.

Макроструктура зоны оплавления состояла из столбчатых дендритов, первичные оси которых располагались в направлении отвода теплового потока (в тело образца) и равноосных зерен в центре (рис. 2).

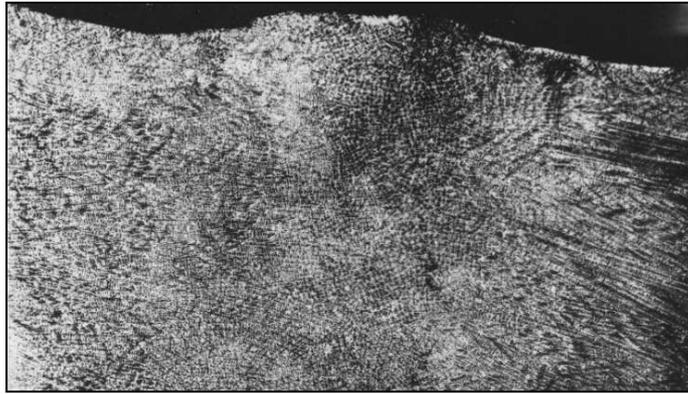


Рис. 2. Дендритная структура оплавленного покрытия, $\times 50$

Факторами, существенно влияющими на структуру и свойства оплавленного покрытия, являются: толщина и химический состав исходного покрытия; мощность излучения; скорость перемещения луча относительно образца.

Микрорентгеноспектральный анализ показал характер распределения элементов по сечению ЗЛВ. По его результатам в ЗЛВ можно выделить три зоны:

- 1) зона практически постоянного содержания основных элементов – Cr, Ni, Fe, равномерно распределенных в зоне оплавления;
- 2) зона непосредственно у границы зоны оплавления со сталью (0,1...0,2 мм) характеризуется постепенным снижением содержания элементов;
- 3) зона размером 0,12 мм – диффузионная зона в стали.

Вторая и третья зоны отражают диффузионные процессы, происходящие в приграничных зонах во время контакта жидкой ванны и твердой фазы (стальная подложка). Содержание элементов в зоне оплавления зависело от глубины проплавления стальной подложки.

Сравнительно однородный состав зоны оплавления predetermined и однородную ее структуру, равномерное распределение микротвердости по толщине ЗЛВ. Снижение микротвердости наблюдается только у границы оплавления, что, вероятно, обусловлено концентрационным сдвигом в доэвтектическую область (рис. 3).

Результаты металлографического, рентгеноструктурного и дюрOMETрического анализа показали, что в зависимости от значения параметра $(W/V)^{1/2}$ лазерная обработка может приводить к возникновению на поверхности покрытий с различной структурой твердостью.

В зависимости от величины подведенной тепловой энергии в центральной и поверхностной зонах можно выделить три зоны с измененной микротвердостью:

- 1) зона $(W/V)^{1/2} \leq 0,75$ – характеризуется постепенным снижением микротвердости с 6000 до 2500...3000 МПа. По результатам экспериментальных исследований установлено, что с увеличением $(W/V)^{1/2}$ дисперсность структуры снижается (диаметр осей возрастает), а следовательно, понижает микротвердость, что и наблюдается в первой зоне;
- 2) переходная зона $(W/V)^{1/2} = 0,75...0,9$; эффективная глубина упрочненного слоя $h_{\text{ЭФ}} = 0,4...0,5$;
- 3) зона отличается постепенным увеличением микротвердости до 7100 МПа.



Рис. 3. Микроструктура оплавленного покрытия вблизи границы сплавления со стальной основой, $\times 800$

Полученные опытные данные по структуре и дисперсности структурных составляющих были нанесены на результирующую номограмму (рис. 4), которая представляет семейство прямых, каждая из которых соответствует определенной глубине проплавления образца и дисперсности структуры.

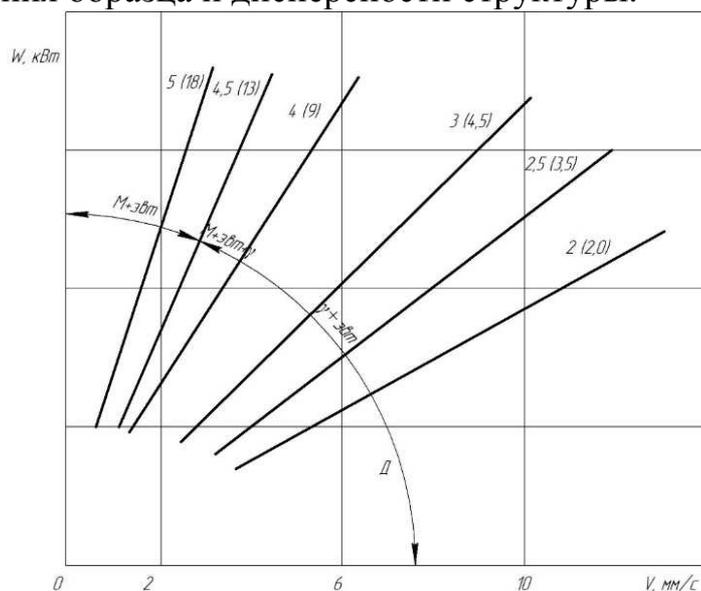


Рис. 4. Номограмма для выбора параметров лазерной обработки; у кривых указаны эффективный линейный размер ($h_{эф}$) и диаметр дендритных осей (D)

Номограмма позволяет решать конкретную задачу по получению покрытия с заданной структурой (фазовым составом, дисперсностью) и твердостью. При этом необходимое условие – соответствие экспериментальной толщины и состава исходного напыленного слоя характеристикам слоя, принятым при построении номограммы, а также постоянство параметров лазерной обработки (величины расфокусированного луча, среды обработки и т.д.), размеров исходного образца. В свою очередь изменение этих параметров дает возможность получать различные покрытия, отличающиеся по химическому и фазовому составу, а также свойствам.

Список литературы

1. Попов В.О., Смирнов С.Н., Чеснокова Т.Г. Лазерное упрочнение и модифицирование деталей машиностроения: достижения и перспективы развития // РИТМ Машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 28-31.
2. Дайно А.В., Попов В.О., Смирнов С.Н., Шаромов А.А. Лазерное модифицирование // РИТМ Машиностроения. – 2016. – № 10. – С. 30-33.
3. Попов В.О. Лазерная обработка внутренних поверхностей // РИТМ Машиностроения. – 2015. – № 9. – С. 26-28.
4. Скрипченко А.И., Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Возможности лазерного модифицирования деталей машиностроения // РИТМ Машиностроения. – 2010. – № 6. – С. 23-29.
5. Сергеев Н.Н., Минаев И.В., Тихонова И.В., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Комарова М.Ю., Гвоздев А.Е. Основы лазерной и газоплазменной обработки конструкционных сталей: монография. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 283 с.

Сведения об авторах:

Кутепов Сергей Николаевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса»;

Клементьев Денис Сергеевич – преподаватель кафедры «Технологии и сервиса».