

МИКРОТВЕРДОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРОМ ПОКРЫТИЯ ИЗ БРОНЗЫ ПГ-19М-01 НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЕГО ФОРМИРОВАНИЯ

Девойно О.Г, Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Кавальчук О.Н.

(БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Тел. +375 (17) 3310045; E-mail: scvdmed@bntu.by

Abstract: Application of coatings from powder bronze by laser cladding were investigated. Advantages of laser cladding were exhibited in comparison with other cladding technologies. Coatings microhardness adjustment behavior were determined during coating formation proceeding.

Лазерная наплавка является весьма перспективным методом нанесения покрытий и интересным объектом для исследователей. В силу своей специфики лазерная наплавка, и, особенно при использовании ее в технологиях «быстрого прототипирования», предъявляет особые требования к качеству покрытий, которое характеризуется различными параметрами, такими как микроструктура, распределение микротвердости и диффузия [1-4].

В данной работе нами предпринята попытка исследовать распределение микротвердости в покрытии из бронзы на различных этапах его формирования от единичных валиков до двухслойной структуры.

Для выполнения исследований применялся лазерный технологический комплекс, включавший газовый CO₂ лазер непрерывного действия типа «Комета 2» с мощностью излучения 1000 Вт и координатную систему, обеспечивавшую необходимое перемещение луча лазера относительно наплавлявшихся образцов.

Лазерная наплавка производилась при мощности излучения лазера 1000 Вт, при различных дистанциях, скоростях и шагах наплавки; величина подачи порошка поддерживалась на уровне 12-15 г/мин. Наплавка выполнялась на образцы, изготовленные из стали 45. В качестве наплавочного материала использовался порошок бронзы – ПГ-19М-01, имевший грануляцию 20-80 мкм.

После наплавки образцы разрезались в направлении, перпендикулярном валикам наплавки. Затем на полировальном станке изготавливались поперечные шлифы зон наплавки и производился замер микротвердости в направлении, перпендикулярном основу (поперечное направление), т.е. по глубине слоя.

Измерения микротвердости производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г от основы к поверхности покрытия с шагом 0,05 мм.

Прежде всего исследовалось распределение микротвердости в наплавленных единичных валиках из бронзы ПГ-19М-01 для разных дистанций и скоростей наплавки. Типичная картина распределения микротвердости для единичного валика представлена на рис. 1.

Анализируя полученные результаты для единичных валиков из бронзы ПГ-19М-01 можно отметить следующее:

- микротвердость единичных валиков имеет достаточно равномерную величину по всей глубине валика наплавки для всех дистанций и скоростей наплавки, отсутствуют большие колебания величины микротвердости;

- для всех исследованных дистанций наплавки (различного положения фокуса лазерного излучения относительно поверхности наплавки) происходит активное перемешивание материалов покрытия и основы в ванне расплава, микротвердости покрытия и основы отличаются мало, что свидетельствует о наличии достаточно большой переходной зоны и присутствии материала основы в наплавленном покрытии;

- следует отметить, что с уменьшением дистанции наплавки наблюдается рост средней микротвердости покрытий из бронзы ПГ-19М-01;

- наиболее низкая средняя микротвердость наплавленных валиков из бронзы ПГ-19М-01 наблюдается при скорости наплавки 100 мм/мин – 3479 МПа, увеличение скорости наплавки ведет к росту средней микротвердости до 4739 МПа при 200 мм/мин и некоторому снижению ее при 300 мм/мин до 4400 МПа.

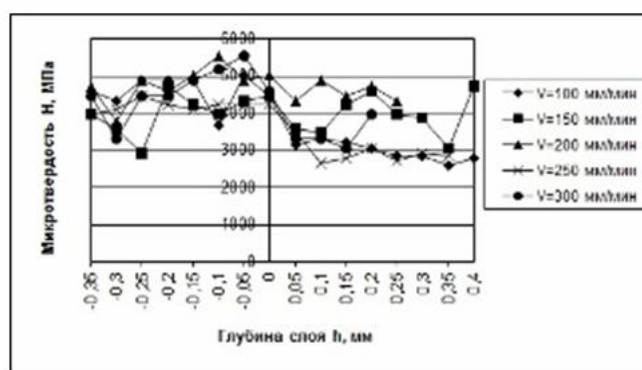


Рис. 1. Зависимость микротвердости H от глубины слоя единичного валика h при дистанции наплавки 12 мм для бронзы ПГ-19М-01

Для проведения исследований микротвердости однослойных покрытий производилась лазерная наплавка бронзы ПГ-19М-01 при различных дистанциях, скоростях и шагах наплавки. Характерный результат измерения микротвердости покрытий по глубине однослойного покрытия представлен на рис. 2.

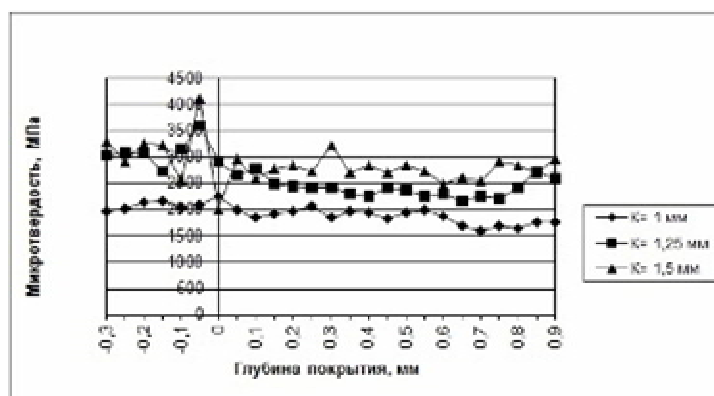


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине однослойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 при скорости наплавки $V = 100$ мм/мин и дистанции наплавки $L = 12$ мм при различных шагах наплавки K

Из анализа графиков распределения микротвердости по глубине однослойного покрытия для бронзы ПГ-19М-01 можно сделать вывод, что:

- микротвердость однослойного покрытия имеет достаточно равномерную величину по всей его глубине для всех шагов и скоростей наплавки, большие колебания величины микротвердости отсутствуют;

- при всех скоростях и шагах наплавки имеет место перемешивание материалов покрытия и основы, наблюдается минимальное отличие микротвердости покрытия и основы, переходная зона между ними большая, соответственно не наблюдается боль-

ших перепадов микротвердости на их границе и можно предположить большое присутствие материала основы в покрытии;

- с увеличением шага наплавки средняя микротвердость покрытия из бронзы ПГ-19М-01 увеличивается, что, видимо, связано с сильным вторичным переплавом уже наплавленных валиков при наплавке соседних валиков при малом шаге наплавки;

- самая низкая средняя микротвердость покрытий из бронзы ПГ-19М-01 наблюдается при скорости наплавки 100 мм/мин – 2412 МПа, увеличение скорости наплавки ведет к росту средней микротвердости до 3640 МПа при скорости наплавки 300 мм/мин.

Для проведения исследований микротвердости двухслойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 производилась лазерная наплавка двухслойных покрытий при различных скоростях и шагах наплавки. Пример измерения микротвердости двухслойного покрытия представлен на рис. 3.



Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине двухслойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 при скорости наплавки $V = 100/160$ мм/мин

Из графиков распределения микротвердости по глубине двухслойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 можно заключить следующее:

- при всех исследованных скоростях наплавки (первого/второго слоя) на графиках распределения микротвердости можно выделить две зоны микротвердости, в каждой из которых микротвердость распределена достаточно равномерно по глубине каждой зоны без значительных колебаний. Ближе к основе на расстоянии 0,2-0,7 мм от нее для разных скоростей наплавки располагается зона с достаточно высокой микротвердостью материала покрытия (далее по тексту первая зона). На большем удалении от основы располагается зона, микротвердость в которой ниже микротвердости первой зоны приблизительно на 300-500 МПа (далее по тексту вторая зона). Можно сделать предположение, что указанные зоны связаны, соответственно, с первым и вторым слоем покрытия. Кроме того, повышенная микротвердость первой зоны, скорее всего, связана с вторичным переплавом первого слоя покрытия при наплавке второго слоя, когда при вторичном переплаве образуется более плотное покрытие с лучшим сплавлением по границам зерен;

- при всех исследованных скоростях наплавки первого/второго слоя покрытия не наблюдается заметного изменения микротвердости на границе основы и первой зоны покрытия, что свидетельствует о хорошем перемешивании материалов покрытия и основы в пределах первой зоны покрытия

- средняя микротвердость двухслойных покрытий из бронзы ПГ-19М-01 в обеих зонах увеличивается с увеличением шага наплавки, что скорее всего связано с меньшим перегревом покрытия при большем шаге наплавки;

- самая низкая средняя микротвердость двухслойных покрытий из бронзы ПГ-19М-01 наблюдается в обеих зонах при скорости наплавки первого/второго слоя 100/160 мм/мин – 2174 и 1698 МПа соответственно, в дальнейшем с ростом скорости наплавки происходит и рост средней микротвердости в обеих зонах, так при скорости наплавки первого/второго слоя 160/220 мм/мин средняя микротвердость двухслойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 составляет соответственно 2337 и 2009 МПа, а при скорости наплавки 220/280 мм/мин – соответственно 2454 и 2172 МПа.

Полученные данные позволяют проследить изменение микротвердости покрытий из бронзы ПГ-19М-01 в процессе их формирования методом лазерной наплавки.

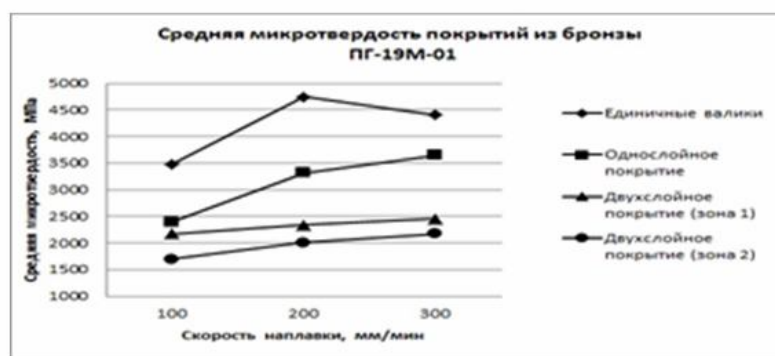


Рис. 4. Зависимость средней микротвердости покрытий из бронзы ПГ-19М-01 от скорости наплавки

На начальном этапе образования покрытия, т.е. в момент наплавки единичного валика, покрытие из бронзы имеет достаточно высокую микротвердость. Средняя микротвердость покрытия (рис. 4) при скорости наплавки 200 мм/мин достигает 4740 МПа, при этом значение микротвердости практически не изменяется по всей глубине покрытия. Более высокие значения средней микротвердости в единичных валиках из бронзы ПГ-19М-01 скорее всего связаны с двумя основными причинами: - с быстрым нагревом и охлаждением материала единичного валика, для которого имеются все необходимые условия (небольшое поперечное сечение валика и большая площадь поверхности), что способствует фиксации в материале валика высокотемпературных структур; - со значительным перемешиванием и взаимодействием материала покрытия и основы в ванне расплава, которая сравнима при лазерной наплавке с поперечным сечением валиков, т.е. с присутствием в материале валика большого количества железа. При этом на величину средней микротвердости достаточно сильно влияет скорость наплавки. При небольшой скорости наплавки (100 мм/мин), т.е. большом энергокладе в материал валика, формируется достаточно крупнозернистая структура со средней микротвердостью порядка 3480 МПа. В диапазоне скоростей наплавки 100-200 мм/мин при достаточно большом энергокладе формируются условия получения оптимальной зернистости структуры и микротвердость достигает при скорости 200 мм/мин максимального значения – 4740 МПа. При дальнейшем увеличении скорости наплавки энергоклад в покрытие уменьшается, создаются условия несплавления покрытия по границам зерен и средняя микротвердость материала валиков снижается при скорости 300 мм/мин до 4400 МПа.

На следующей стадии формирования – образовании однослойного покрытия, значение средней микротвердости распределяется по глубине покрытия также равномерно. Тем не менее, условия нагрева-охлаждения покрытия уже значительно отличаются от тех, которые имели место при наплавке единичных валиков. За счет повторных нагревов при наплавке соседних валиков при сохраняющемся хорошем перемешивании

материалов покрытия и основы такой фактор, как быстрое охлаждение, оказывает уже значительно меньшее влияние. Средняя микротвердость однослойного покрытия (рис. 4) значительно ниже средней микротвердости единичных валиков. Максимальная средняя микротвердость однослойного покрытия составляет 3640 МПа при скорости 300 мм/мин. При этом скорость наплавки по-прежнему сильно влияет на величину микротвердости. С ростом скорости наплавки в исследованном диапазоне скоростей наплавки наблюдается рост микротвердости. Так при скорости наплавки 100 мм/мин за счет большого энерговклада в покрытие формируется крупнозернистая микроструктура с небольшой средней микротвердостью – 2392 МПа; с ростом скорости наплавки энерговклад в покрытие уменьшается, но за счет тепла, выделяющегося при наплавке соседних валиков и повторных переплавов в покрытие, в исследованном диапазоне скоростей наплавки создаются условия образования оптимальной зернистости структуры с хорошим сплавлением по границам зерен, что создает условия роста средней микротвердости до 3310 МПа при 200 мм/мин и 3640 МПа – при 300 мм/мин.

В дальнейшем при наплавке второго слоя покрытия в нем формируются две зоны, различающиеся по величине средней микротвердости. Ближе к основе, до расстояния от нее 0,2-0,7 мм, образуется зона с большей микротвердостью (зона 1), выше зоны 1 располагается зона более низкой микротвердости (зона 2). Микротвердость в обеих зонах распределяется достаточно равномерно. Формирование зоны 1 связано с первым слоем покрытия, который подвергся повторному переплаву при наплавке второго слоя покрытия, при этом за счет перемешивания материала первого слоя покрытия с материалом второго слоя, в котором преобладают фазы на медной основе, в зоне 1 образуется достаточно крупнозернистая структура с микротвердостью ниже, чем у однослойного покрытия. Наибольшая средняя микротвердость зоны 1 составляет 2455 МПа. Средняя микротвердость зоны 1, как и микротвердость однослойного покрытия, увеличивается при росте скорости наплавки (рис. 4). При скорости наплавки 100 мм/мин средняя микротвердость зоны 1 составляет 2175 МПа, при увеличении скорости наплавки в исследованном диапазоне скоростей наплавки средняя микротвердость растет до 2455 МПа при 300 мм/мин. Причины такой зависимости аналогичны тем, которые действуют в однослойном покрытии. Зона 2 двухслойного покрытия формируется на подложке, материалом которой, является материал зоны 1, в котором, как уже говорилось, преобладают медные фазы. Поэтому материал зоны 2 представляет собой практически чистую бронзу, без железной составляющей. Максимальная средняя микротвердость в зоне 2 составляет 2175 МПа. Микротвердость зоны 2 также увеличивается при росте скорости наплавки. При скорости наплавки 100 мм/мин средняя микротвердость составляет 1700 МПа, с увеличением скорости наплавки средняя микротвердость зоны 2 в исследованном диапазоне непрерывно растет и достигает 2175 МПа при скорости наплавки 300 мм/мин. Причины такой закономерности увеличения средней микротвердости также связаны с определенным соотношением увеличения скорости охлаждения и поддержания оптимального энерговклада в покрытие за счет повторного нагрева при наплавке соседних валиков, как это происходит в однослойном покрытии.

Список литературы: 1. John C. Ion, Laser processing of Engineering Materials: principles, procedure and industrial application/C. John Ion.- Elsevier Butterworth – Heinemann, Burlington: MA, 2005.- 183 p. 2. Toyserkani E. Laser Cladding/ E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin.- Boca Raton, Florida: CRS Press, 2005.- 227 p. 3. De Hosson J.Th.M. Functionally graded materials produced with high power lasers/ J.Th.M. De Hosson, V. Ocelik// Proceedings of ASTRA- 2003, Hyderabad, India.- 2003, p.p. 368-376. 4. Wohlers T. Wohlers Report, Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing. State of the Industry/T. Wohlers.- Colorado: Wohlers Associates Inc., 2003.- 323 p.