

СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ ЛАЗЕРОМ ВАЛИКОВ ИЗ СПЛАВА ПГ-12Н-01, НАНЕСЕННЫХ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ

¹О.Г. Девойно, ²Е.Э. Фельдштейн, ¹М.А. Кардаполова, ¹Н.И. Луцко

¹Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

²Зеленогурский университет
г. Зелена Гура, Республика Польша

В статье показана важность изучения свойств единичных валиков при создании мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки. Изучено влияние режимов лазерной наплавки на условия транспортировки порошка, микроструктуру, химический состав и микротвердость валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля. Определены оптимальная грануляция порошка и режимы транспортировки порошка. Найдено влияние скорости наплавки и дистанции наплавки на высоту и ширину единичных валиков. Установлены закономерности формирования микроструктуры, а также распределения элементов и микротвердости по глубине валиков.

Ключевые слова: лазерная наплавка, самофлюсующийся сплав, расход порошка, микроструктура, микротвердость, распределение элементов

THE PROPERTIES OF LASER-CLADDED TRACKS FROM PG-12N-01 ALLOY, DEPOSITED AS MULTIMODAL COATING COMPONENT

¹O.G. Devojno, ²E. Feldstein, M.A., ¹Kardapolova, ¹N.I. Lutsko

¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

²University of Zielona Góra
Zielona Góra, Poland

The article shows the importance of learning single tracks properties while creating multimodal coatings from heterogeneous materials by laser cladding. The influence of laser cladding modes were studied on the powder flow conditions, microstructure, chemical composition and microhardness of an Ni-based self-fluxing alloy tracks. The optimal granulation of a powder and powder transportation modes were determined. The cladding

speed and cladding distance influence on single tracks height and width were found. Patterns of microstructure formation, as well as elements distribution and microhardness distribution over the track depth were defined.

Keywords: laser cladding, self-fluxing alloy, powder flow, microstructure, microhardness, elements distribution

E-mail: nilucko@tut.by

Введение

Машины и механизмы, используемые современной промышленностью, в большинстве случаев предполагают наличие высоких скоростей и нагрузок. Поэтому постоянно растет потребность в высоко-износостойких материалах. Пределы упрочнения однокомпонентных материалов в настоящее время уже близки к исчерпанию. По этой причине возрастает роль композиционных материалов, позволяющих значительно увеличить износостойкость, в том числе композиционных упрочняющих покрытий. Особенно высокие физико-механические свойства показывает такой вид композиционных покрытий, как мультимодальные покрытия [1, 2]. Модой считается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, вида материала), которые встречаются наиболее часто. Если имеют место несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие является мультимодальным (бимодальным).

Лазерная наплавка позволяет наносить валики небольших размеров, поперечные сечения которых сравнимы с размером лазерного пятна на поверхности наплавки, при этом тепловой вклад в прилегающие области покрытия минимален. Кроме того, при лазерной наплавке: перемешивание материала наплавляемых валиков с материалом подложки и с материалом соседних валиков может поддерживаться достаточно низким; сцепление наплавленных валиков с подложкой и между собой великолепное; диапазон технологических параметров лазерной обработки достаточно большой, соответственно параметры нанесения покрытия могут выбираться достаточно свободно [3].

Эти свойства лазерной наплавки наводят на мысль о возможности создания с ее помощью мультимодальных покрытий. В частности, одним из вариантов создания мультимодальных покрытий с использованием возможностей лазерной наплавки является построение покрытия состоящего из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Такая технология создания мультимодальных покрытий может быть использована как для упрочнения поверхностей новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с хорошими прочностными свойствами [4, 5].

Прежде чем приступить к созданию мультимодальных покрытий из разнородных металлических материалов, должна быть отработана технология лазерной наплавки валиков из предполагаемых составляющих мультимодального покрытия и исследованы физико-механические свойства материалов валиков. В данной работе нами предпринята попытка исследовать геометрические параметры, микроструктуру, элементный состав и микротвердость единичных валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01.

Материалы, методики, оборудование

Исследованию подвергались валики из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01. Химический состав порошка показан в табл. 1.

Химический состав порошка сплава ПГ-12Н-01

Марка	Содержание компонентов, % (по массе)					
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni
ПГ-12Н-01	8–14	1,7–2,5	1,2–3,2	1,2–3,2	0,3–0,6	Основа

Валики наносились на образцы из стали 45 размером 20 × 30 × 8 мм, предварительно подвергавшиеся дробеструйной обработке.

Исходный порошок просеивался до грануляций меньше 20 мкм, 20–80 мкм и 80–100 мкм при помощи набора сит и подвергался сушке электрическом шкафу при температуре 200 °С в течение двух часов.

Для нанесения покрытий применялся лазерный технологический комплекс на базе газового CO₂ лазера непрерывного действия «Комета 2» с мощностью излучения 1000 Вт и 3-х координатной системы с числовым программным управлением «Mach 3» для обеспечения необходимого точного перемещения наплавочной головки относительно наплавляемых образцов. Лазерная наплавка производилась при мощности излучения 1000 Вт. Применявшаяся схема наплавки показана на рис. 1.

Луч лазерной установки 7 через систему поворотных зеркал 6 и линзу 5 фокусировался на поверхности образца 8, установленного на столе координатного станка 9. Наплавочной головке-объективу 3 при помощи системы числового программного управления придавалось движение относительно образца со скоростью наплавки v . Наплавляемый порошок из питателя 1 с помощью транспортирующего газа подавался в распределитель газопорошковой смеси 2, а затем по четырем трубкам в коаксиальное сопло 4, при помощи которого поступал в ванну расплава, образуемую лазерным лучом на поверхности образца. В качестве транспортирующего газа использовался аргон. Фокусное расстояние составляло 200 мм, а диаметр пятна сфокусированного лазерного излучения на поверхности наплавки составлял 1 мм, что соответствовало плотности мощности $1,27 \times 10^5$ Вт/см².

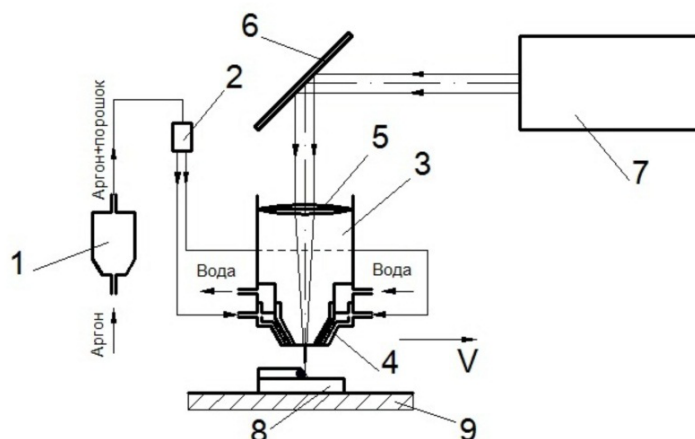


Рис. 1. Схема лазерной наплавки

При определении расхода порошка через сопло объектива давление аргона составляло: для порошка грануляцией меньше 20 мкм – 0,2–0,25 МПа, для фракций 20–80 мкм и 80–100 мкм – 0,15–0,3 МПа. Расход аргона составлял, соответственно 0,0015–0,0022 м³/мин и 0,002–0,0035 м³/мин.

Наплавка валиков из сплава ПГ-12Н-01 производилась при скоростях наплавки v – 40, 60, 80, 100 и 120 мм/мин и дистанциях наплавки l – 10, 12 и 14 мм.

После наплавки образцы разрезались в направлении перпендикулярном валикам наплавки, изготавливались микрошлифы покрытий и на них определялись геометрические параметры валиков – ширина l и высота H . Размеры валиков измерялись при помощи оптического микроскопа «Микро Р200».

Расход порошка через сопло объектива определялся за единицу времени при включенном лазере путем взвешивания образцов с нанесенным порошком на аналитических веса ВЛА 200г-М. Расход воздуха определялся с помощью предварительно тарированного ротаметра. Давление воздуха регулировалось арматурой питателя. Все измерения повторялись три раза.

Микроструктура и химический состав единичных валиков исследовались на аттестованном микроскопе «Mira» фирмы «Oxford Instruments» (Великобритания). Микротвердость определялась при помощи микротвердомера ПМТ-3.

При определении геометрических параметров валиков использовалась методика полного факторного эксперимента (ПФЭ). Обработка данных экспериментов производилась при помощи специальной программы, составленной на основе редактора электронных таблиц Microsoft Excel 2010. Каждый эксперимент повторялся три раза.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований расхода порошка через коаксиальное сопло показаны на рис. 2–4.

Как видно из этих рисунков, при увеличении давления и расхода транспортирующего газа – аргона, расход порошка сплава ПГ-12Н-01 через сопло увеличивается. При этом, полученные результаты зависят от размера частиц порошка. Для фракции с размером частиц меньше 20 мкм увеличение расхода газа приводит к некоторому росту расхода порошка, а увеличение давления газа практически на расход порошка не действует. Это происходит, скорее всего, из-за комкования частиц порошка в питателе и трубопроводах, которое препятствует транспортировке порошка. Для фракции с размерами частиц 80–100 мкм при давлении транспортирующего газа меньше 0,3 МПа транспортирование порошка практически прекращается при расходе газа меньше 0,0025 м³/мин, и получить малые расходы порошка удастся только при давлении больше чем 0,3 МПа. Лучшее и надежнее всего при использовавшихся давлениях и расходах транспортирующего газа показала себя фракция с размерами частиц 20–80 мкм. Эта фракция была выбрана для дальнейших исследований.

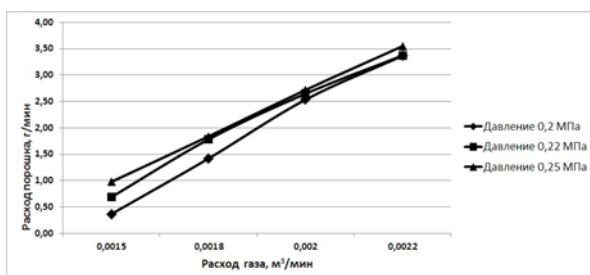


Рис. 2. Зависимость расхода порошка фракции меньше 20 мкм от расхода и давления аргона

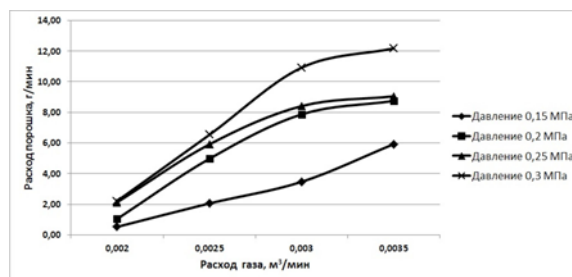


Рис. 3. Зависимость расхода порошка фракции 20–80 мкм от расхода и давления аргона

На рис. 5–6 показаны результаты исследований геометрии поперечного сечения наплавленных валиков от режимов наплавки.

Из приведенных рисунков видно, что при увеличении скорости наплавки ширина и высота единичных валиков уменьшаются, что связано с тем, что один и тот

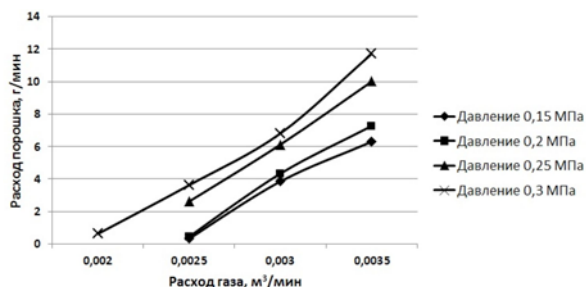


Рис. 4. Зависимость расхода порошка фракции 80–100 мкм от расхода и давления аргона

же объем наплавляемого в единицу времени материала распределяется на большей длине наплавки. В то же время при увеличении дистанции наплавки ширина валиков уменьшается, а высота валиков увеличивается. Такая закономерность объясняется уменьшением диаметра ванны расплава при увеличении дистанции наплавки из-за уменьшения фокусного расстояния.

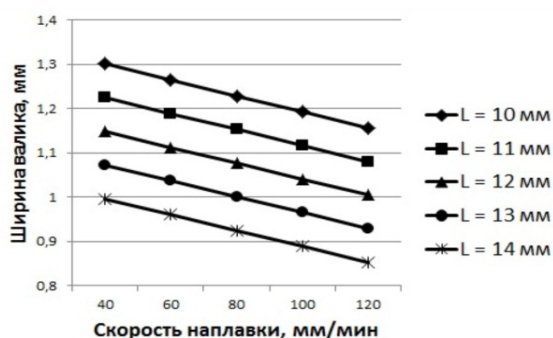


Рис. 5. Зависимость ширины валика от скорости и дистанции наплавки

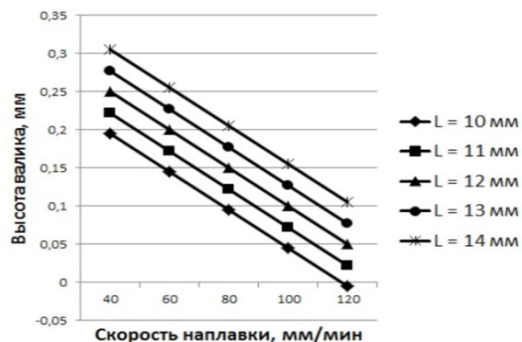


Рис. 6. Зависимость высоты валика от скорости и дистанции наплавки

Уравнения регрессии для расчета ширины l и высоты H единичных валиков, полученные при обработке результатов полного факторного эксперимента имеют следующий вид:

$$l = 2,133 - 0,0018 \cdot v - 0,076 \cdot l, \quad (1)$$

$$H = 0,02 - 0,0025 \cdot v + 0,0275 \cdot l. \quad (2)$$

В приведенных уравнениях: v – скорость наплавки; l – дистанция наплавки.

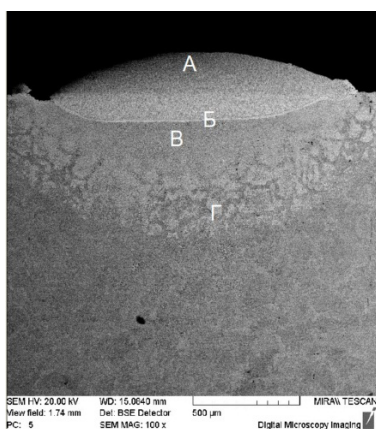


Рис. 7. Исследовавшиеся зоны валиков

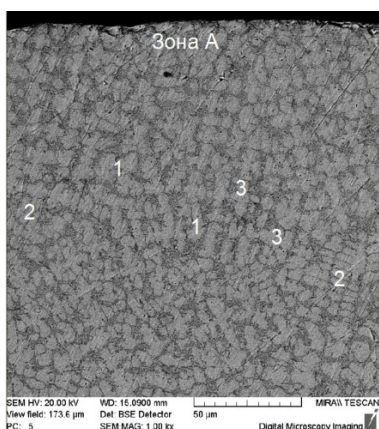


Рис. 8. Микроструктура зоны А: составная квази-эвтектика (1), псевдо-дендриты (2), дендритно-глобулярная структура (3)

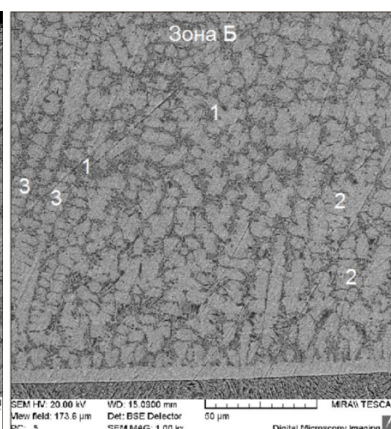


Рис. 9. Микроструктура зоны Б: составная квази-эвтектика (1), псевдо-дендриты (2), дендритно-глобулярная структура (3)

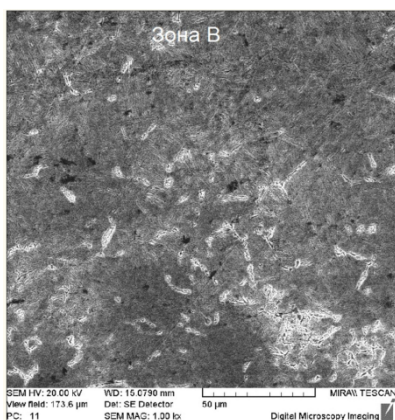


Рис. 10. Микроструктура зоны В

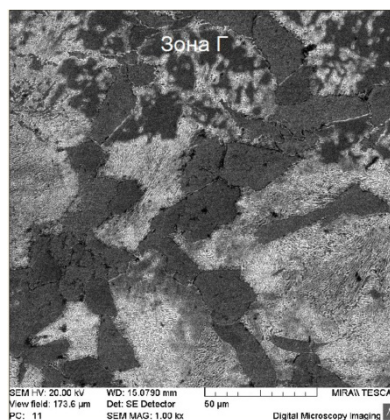


Рис. 11. Микроструктура зоны Г

Структура материала единичных валиков приведена на рис. 7–11. Наплавленные валики имеют плотный состав с четко выраженными структурными составляющими. В структуре наплавленных валиков можно выделить три характерных области: область наплавленного материала, включая переходную зону (зоны А и Б, рис. 7, 8, 9), зону теплового воздействия В (рис. 7, 10) и область основного металла (зона Г, рис. 7, 11).

Наплавленный валик имеет структуру, которая сильно отличается от структуры исходного порошка, при этом фазовый состав в обоих случаях состоит из твердого раствора на основе никеля (γ -Ni), боридов и карбидов хрома. Формирование структуры единичного валика происходит в условиях воздействия высоких температур, высокой скорости охлаждения и направленного теплоотвода. Дендриты первого и второго порядка образуются преимущественно в верхней части наплавленного валика, они располагаются по углом 45° к поверхности (рис. 8). Порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля, который плавится в условиях высоких температур ванны расплава, кристаллизуется в форме псевдо-дендритов, а между ветвями дендритов при температуре $959\text{--}1000^\circ\text{C}$ образуется составная квази-эвтектика γ -Ni + Ni_3B . Поскольку ветви дендритов первого порядка кристаллизуются в первую очередь, они содержат большое количество упрочняющих элементов, которые содержались в исходном порошке. Ветви дендритов второго, а тем более третьего порядка содержат уже гораздо меньшее количество упрочняющих элементов.

Составная квази-эвтектика, расположенная между ветвями дендритов, характеризуется склонностью к залечиванию пор и предотвращению трещинообразования [6]. Однако, чем меньше скорость наплавки, тем эта смесь медленнее кристаллизуется, что приводит к образованию пор и трещин в наплавленном слое. Нижняя, прилегающая к основе, часть валика находится при высокой температуре длительное время, поэтому там формируется дендритно-глобулярная структура с эвтектической смесью γ -Ni + Ni_3B .

Между нанесенным материалом единичного валика и подложкой формируется переходная зона, ее толщина составляет $10\text{--}40$ мкм. Наличие этой зоны указывает на химическую связь между нанесенным материалом и подложкой. Структура переходной зоны включает твердые растворы никеля и железа, которые образуются в процессе кристаллизации при температурах протекания реакций следующих типов: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{B} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$; $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{B} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$; $\text{NiO} + \text{B} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 + \text{Ni}$. Другими словами, во время контакта между двойными поверхностями наблюдается восстановление пленок оксидов металлов из-за наличия сильных восстановителей – бора и кремния. образу-

ющеся боросиликатное стекло всплывает на поверхность покрытия или испаряется. Прочность биметаллической связи при этом становится равной прочности металла подложки. С увеличением времени пребывания в жидкой ванне возможно протекание взаимодиффузии железа и никеля со значительным уменьшением твердости, что необходимо учитывать при выборе параметров наплавки.

Вблизи верхней границы зоны теплового воздействия под действием высоких температур образуются структуры отпущенного мартенсита и тростита. Непосредственно на границе действия температуры оказывается недостаточно для исчезновения границ зерен, но процессы закалки и отпуска происходят внутри зерен.

На рис. 12–13 показано распределение элементов по глубине и в переходной зоне единичного валика из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01.

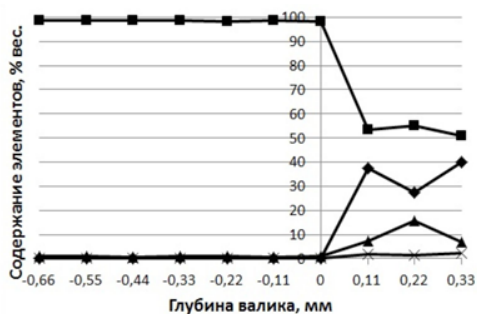


Рис. 12. Распределение элементов по глубине единичного валика

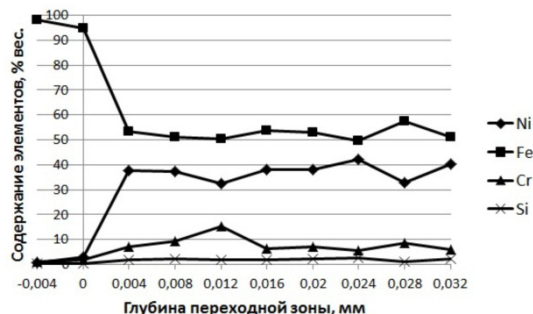


Рис. 13. Распределение элементов в переходной зоне единичного валика

Анализ приведенных графиков распределения элементов по глубине валика наплавки показывает, что на границе покрытия и основы присутствует практически чистое железо (98,44 %), содержание других элементов близко к нулю. На расстоянии 0,11 мм от основы в покрытие содержимое железа уже падает до 53 %, содержание никеля увеличивается до 38 %, хрома – до 7 %, а кремния – до 2 %, что свидетельствует об активном перемешивании материалов покрытия и основы в ванне расплава. В дальнейшем по глубине покрытия содержание элементов находится практически на одном уровне с небольшими отклонениями. При этом содержание элементов в наплавленном валике из-за сильного перемешивания материалов покрытия и основы значительно отличается от значений, приведенных в табл. 1 для порошка сплава ПГ-12Н-01. В то же время приведенные графики показывают, что проникновения элементов из покрытия в основу практически не происходит, что свидетельствует о хорошем качестве наплавки.

Картина распределения элементов в переходной зоне валика из сплава ПГ-12Н-01 приведена на рис. 13. Видно, что на глубине 4 мкм под границей покрытия и основы материал состоит из чистого железа (98 %), но на границе покрытия и основы количество железа уменьшается до 95 %, в то же время количество никеля повышается до 3 %, а хрома – до 1,8 %. В 4 мкм от основы в покрытие последнее состоит уже из 53 % железа, 38 % никеля, 7 % хрома и 1,8 % кремния. Такой состав уже наблюдается по всей глубине переходной зоны. Сравнивая приведенный состав покрытия в переходной зоне с составом покрытия по глубине, можно заметить, что они практически идентичны. Другими словами, переходная зона между материалом валика и основой имеет минимальные размеры.

На рис. 14–15 показано изменение микротвердости по глубине единичных валиков при разных режимах наплавки.

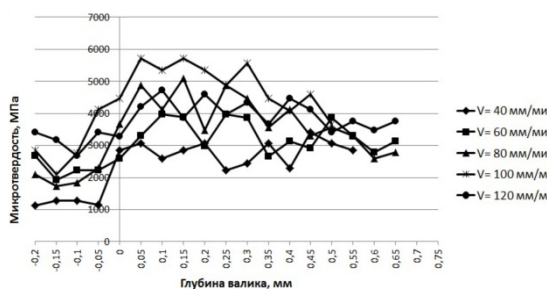


Рис. 14. Изменение микротвердости по глубине валика при дистанции наплавки 10 мм

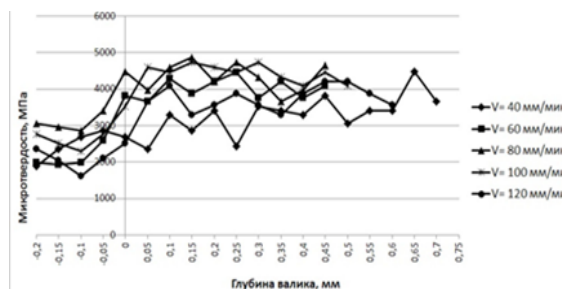


Рис. 15. Изменение микротвердости по глубине валика при дистанции наплавки 14 мм

Из приведенных рисунков видно, что при переходе из основы в наплавленный валик из сплава ПГ-12Н-01 наблюдается резкий рост микротвердости, что свидетельствует о малой величине переходной зоны. В дальнейшем по глубине покрытия микротвердость находится примерно на одном уровне для исследованных скоростей и дистанций наплавки. Это объясняется равномерным распределением температуры по сечению валика и однородностью материала валика при лазерной наплавке, что уже было отмечено выше. Наиболее высокая микротвердость (5500 МПа) наблюдается при скорости наплавки 100 мм/мин и дистанции наплавки 10 мм. При низких скоростях наплавки уровень микротвердости невысок и составляет 2000–3000 МПа. При возрастании скорости наплавки с 40 мм/мин до 100 мм/мин наблюдается рост микротвердости, но при скорости 120 мм/мин микротвердость снова уменьшается. Некоторое увеличение микротвердости наблюдается при уменьшении дистанции наплавки.

Выводы

В статье обсуждена возможность нанесения мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки. Показана необходимость предварительного изучения процесса нанесения единичных валиков из предполагаемых составляющих мультимодального покрытия для обеспечения необходимого качества таких покрытий. Проведено обширное исследование наплавки единичных валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01, начиная с закономерностей транспортировки порошка в зону наплавки до различных свойств покрытий из единичных валиков. Установлено, что оптимальной грануляцией порошка для лазерной наплавки на используемом оборудовании является грануляция 20–80 мкм. Большие и меньшие размеры частиц порошка вызывают нарушение процесса транспортировки. Получены зависимости расхода порошка от давления и расхода транспортирующего газа, позволяющие выбирать необходимые режимы транспортировки порошка. Найдено, что геометрические параметры поперечного сечения единичных валиков зависят от скорости и дистанции наплавки. Показано, что при увеличении скорости наплавки ширина и высота единичных валиков уменьшаются, а при увеличении дистанции наплавки ширина валиков уменьшается, высота же валиков – увеличивается. Определены закономерности формирования микроструктуры единичных валиков при различных режимах наплавки. Установлены закономерности и получены графики распределения элементов и микротвердости по глубине единичных валиков и в переходной зоне. Полученные результаты позволяют производить выбор режимов лазерной наплавки для получения оптимальных свойств единичных валиков из сплава ПГ-12Н-01 с целью обеспечения возможности образования мультимодальных покрытий из разнородных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ J. Ratajski, A. Gilewicz, P. Bartosik, L. Szparaga// Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – I. 2. – pp. 35–45.
2. Gilewicz, A. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel/ A. Gilewicz, R. Olik, L. Szpraga, J. Ratajski// Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. 2014. I. 3. pp. 27–43.
3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2. – pp. 64–79.
4. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.
5. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий / И.В. Шишковский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009, – 424 с.
6. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components/ L. Thivillon [et al.]// Journal of Nuclear Materials. – 2009. – V. 385. – I. 2. – P. 236–241.

REFERENCES

1. Ratajski J., Gilewicz A., Bartosik P., Szparaga L. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings/ Archives of Materials Science and Engineering. – 2015. – V. 75. – I. 2, pp. 35–45.
2. Gilewicz A., Olik R., Szpraga L., Ratajski J. The properties of multi-module and gradient coatings base on CrN/CrCN deposited on nitride 4140 steel / Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 27–43.
3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar// Journal of laser applications. – 1999. – V. 11. – I. 2, pp. 64–79.
4. Lasernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennyye problemy fundamentalnykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok [Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied developments]/Pod. red. V. Ya. Panchenko / Moskow: PHISMATLIT, 2009, 664 p. (in Russian)
5. Shishkovskij I.V. Lasernyj sintez funktsionalno-gradientnykh mezostruktur i ob'iomnykh izdelij [Laser synthesis of functional gradient mesostructures and volumetric products]. Moskow: PHISMATLIT, 2009, 424 p. (in Russian)
6. Thivillon L., Bertrand P.H., Laget B., Smurov I. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components // Journal of Nuclear Materials. – 2009. V. 385. I. 2, pp. 236–241.

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 26.04.18