

10. Биргер, И. А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.

11. Расхожев, К. Т. Технологичность и сравнительная удельная прочность конструкционных материалов / К. Т. Расхожев, М. А. Жукова, Е. З. Степанов // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием / ФГАОУВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (Санкт-Петербург) 2015 г. С. 153-155

**УДК 621.791.72**

**Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И.**

## **МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ И СВОЙСТВА 2D МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Раскрыт механизм формирования 2D мультимодальных покрытий из разнородных материалов лазерной наплавкой. Установлена периодичность изменения микротвердости в поперечном сечении 2D мультимодального покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля и бронзы.*

В современных машинах и механизмах практически повсеместно используются высокие скорости и нагрузки, что значительно повышает риск преждевременного износа деталей и поломки узлов. По этой причине постоянно растет потребность в высокоизносостойких материалах. В тоже время, пределы упрочнения однокомпонентных материалов уже практически близки к исчерпанию. Поэтому возрастает роль композиционных материалов, в том числе композиционных упрочняющих покрытий, позволяющих значительно увеличить износостойкость. Среди композиционных покрытий в последнее время исследователи начали выделять такой их вид, как мультимодальные покрытия, которые показывают особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Модой считается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, величины пористости, вида материала), которое встречается наиболее часто. Если имеют место несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, покрытие считается мультимодальным (бимодальным).

Поперечные сечения валиков, наносимых лазерной наплавкой невелики и сравнимы с размером лазерного пятна на поверхности наплавки, тепловой вклад процесса лазерной наплавки в прилегающие области покрытия при этом минимален. Важно также то, что при лазерной наплавке перемешивание материала наплавляемых валиков с материалом подложки и с материалом соседних валиков поддерживается достаточно низким, наплавленные валики имеют прочное сцепление между собой и с подложкой. В то же время, диапазон технологических параметров лазерной наплавки достаточно велик, что дает возможность выбирать параметры нанесения покрытия в широких пределах [3, 4].

Упомянутые свойства лазерной наплавки определяют возможность ее использования для создания мультимодальных покрытий, модами в которых будут являться разнородные материалы. При этом существует реальная возможность заранее задавать пространственное положение мод из различных материалов в объеме мультимодального покрытия и, соответственно придавать покрытиям заранее заданные свойства. Естественно, для нанесения таких покрытий требуется использовать координат-

ные системы с числовым программным управлением для точной укладки наплавочных валиков в определенном порядке.

В данной работе исследуется формирование однослойного (2D) мультимодального покрытия методом лазерной наплавки, а также распределение микротвердости в таком покрытии. Однослойное мультимодальное покрытие формировалось путем наплавки на основу чередующихся валиков (мод) из разнородных материалов (рис. 1). Наплавка производилась в два этапа. На первом этапе (на рис. 1, а) на основу наносилась решетка из параллельных валиков из материала первой моды покрытия, которые укладывались с шагом  $K_1$  между собой. На втором этапе нанесения 2D мультимодального покрытия в промежутках между валиками из материала первой моды покрытия наплавлялись валики из материала второй моды покрытия (на рис. 1, б). При этом шаг наплавки между валиками первой моды и валиками второй моды покрытия  $K_2$  подбирался таким образом, чтобы выполнялось соотношение  $K_2=K_1/2$ .

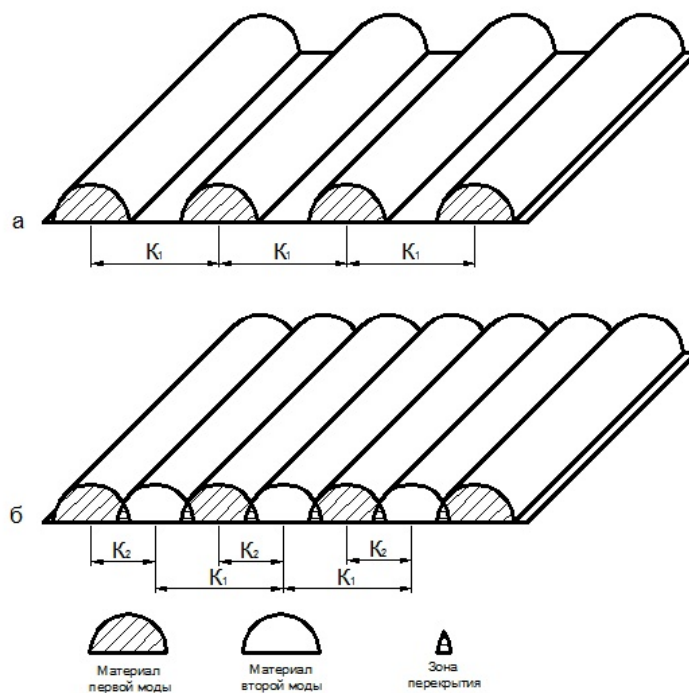


Рис. 1. Схема наплавки 2D мультимодального покрытия

После наплавки поперечное сечение такого однослойного мультимодального покрытия имело вид, показанный на рис. 2. Из рисунка видно, что в покрытии с одинаковой частотой присутствуют мода 1 и мода 2, т.е. покрытие является мультимодальным (бимодальным). В плане сверху такое покрытие представляет собой полосчатую конструкцию с чередованием моды один и моды два. Авторами этой статьи изучалось распределение микротвердости по глубине покрытия и в продольном направлении поперечного сечения параллельно основе в полученном покрытии.

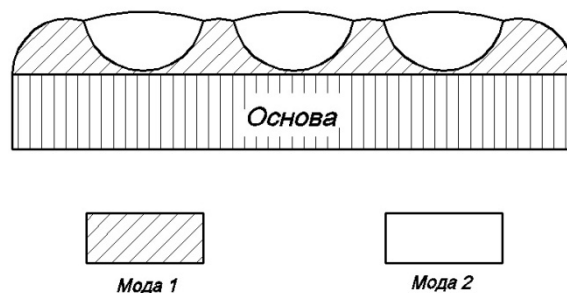


Рис. 2. Схема поперечного сечения 2D мультимодального покрытия.

В качестве материала первой моды покрытия был выбран порошок самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01, который предназначен для упрочнения деталей из углеродистых и нержавеющей сталей и чугунов. Покрытия из этого сплава имеют низкий коэффициент трения, твердость 35-40 HRC и высокую износостойкость [5]. Материалом для нанесения второй моды 2D мультимодального покрытия был выбран порошок алюминиевой бронзы ПГ-19М-01, рекомендованный для создания покрытий на подушках прокатных станков, кулисах прессов, шейках подшипников. Покрытия из этого материала имеют низкий коэффициент трения, обеспечивают максимальную износостойкость при трении по металлу с эффектом самосмазывания [5]. Химический состав исходных порошков приведен в табл. 1.

**Таблица 1 – Химический состав исходных порошков**

Марка	Содержание компонентов, % (по массе)									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-12Н-01	8-14	1,7-2,5	1,2-3,2	1,2-3,2	0,3-0,6	Основа	–	–	–	–
ПГ-19М-01					–	–	–	Основа	–	8,5-10,5

Покрытия наносили на технологической установке для лазерной наплавки на базе CO<sub>2</sub> лазера непрерывного действия «Комета 2» и координатной системы с числовым программным управлением «Mach 3». Основой для нанесения покрытий являлись образцы из стали 45 размером 20x30x8 мм. Шаг наплавки валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля составлял 1,8; 2,4 и 3,0 мм. Шаг между валиками из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 составлял, соответственно, 0,9; 1,2 и 1,5 мм.

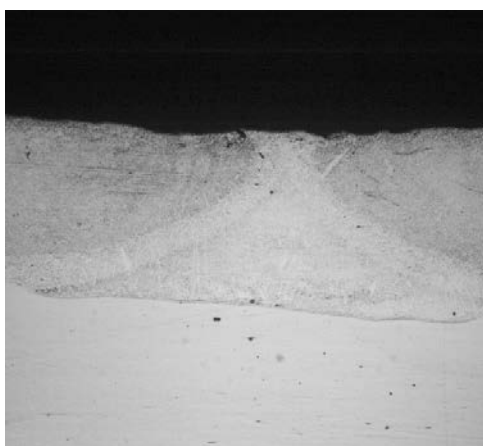


Рис. 3. Фотография поперечного сечения 2D мультимодального покрытия ×50

После наплавки образцы разрезали перпендикулярно валикам наплавки, заливали в оправки с пластиковым наполнителем, после чего шлифовали и полировали. Фотография полученного шлифа поперечного сечения покрытия приведена на рис. 3. Сравнивая рис. 3 и 2, можно отметить, что они имеют большое сходство. Это говорит о том, что построение 2D мультимодального покрытия методом лазерной наплавки успешно реализовано. На рис. 3 хорошо видны две моды бронзы ПГ-19М-01, между которыми находится мода самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01.

Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г по глубине покрытия по линиям симметрии валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 из основы в покрытие с шагом 0,05 мм, и в продольном направлении вдоль поперечного сечения параллельно основе с шагом 0,1 мм.

На рис. 4 представлено распределение микротвердости по глубине 2D мультимодального покрытия. Валики из самофлюсующегося сплава (1 и 3 на рис. 4) наплавлялись на первом этапе нанесения однослойного мультимодального покрытия. Валик из бронзы (2 на рис. 4) наплавлялся на втором этапе формирования покрытия. Для валиков из самофлюсующегося сплава на границе основы и покрытия происходит резкий рост микротвердости, что свидетельствует о небольшой величине переходной зоны. В дальнейшем в валиках (модах) из самофлюсующегося сплава величина микротвердости по всей глубине покрытия не изменяется и составляет в среднем 5500 МПа. Это говорит о хорошем перемешивании материала в ванне расплава и равномерном распределении фаз. При замере микротвердости по оси валика бронзы на границе основы и покрытия также наблюдается резкий рост микротвердости до величины 5500 МПа, такая микротвердость сохраняется до расстояния от основы 0,25 мм. На этом участке мы имеем дело с подслоем из сплава ПГ-12Н-01, образовавшимся на первом этапе нанесения покрытия. В дальнейшем величина микротвердости быстро снижается до 4500 МПа и больше не изменяется по всей глубине покрытия, что также свидетельствует о хорошем перемешивании материала моды бронзы в ванне расплава и равномерном распределении фаз. Быстрое снижение микротвердости между модами самофлюсующегося сплава и бронзы говорит о небольшой величине переходной зоны между ними.

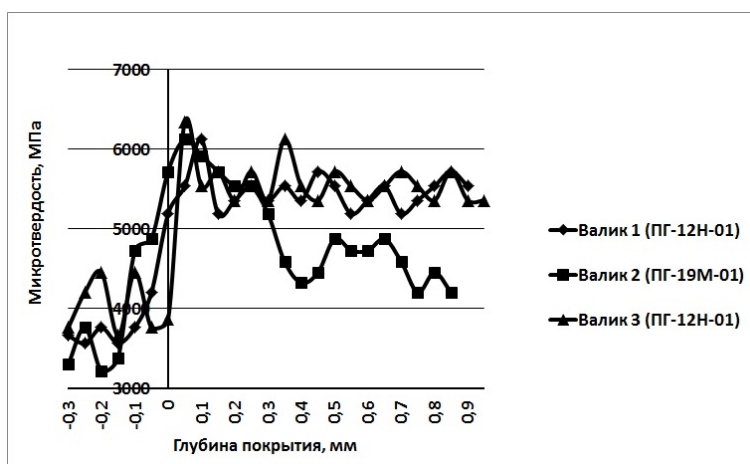


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине 2D мультимодального покрытия

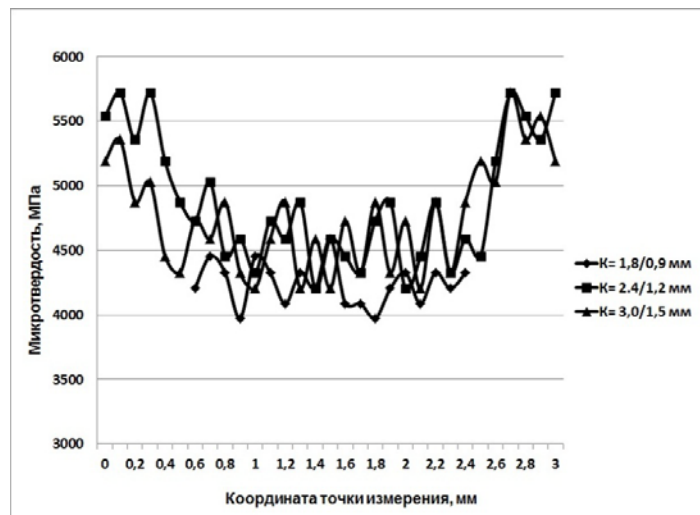


Рис. 5. Распределение микротвердости вдоль поперечного сечения 2D мультимодального покрытия параллельно основе

На рис. 5 представлены результаты измерения микротвердости вдоль поперечного сечения однослойного мультимодального покрытия параллельно основе. Начальная точка измерения микротвердости выбиралась в середине левой моды из самофлюсующегося сплава, а конечная точка измерения микротвердости – в середине правой моды из сплава ПГ-12Н-01. Середина графиков соответствует середине валика (моды бронзы). При шагах наплавки одноименных/разноименных валиков 2,4/1,2 мм и 3,0/1,5 мм в продольном направлении сечения 2D мультимодальных покрытий наблюдается периодическое изменение микротвердости. Когда измерения проводятся в моде самофлюсующегося сплава на основе никеля, средняя микротвердость покрытия находится на уровне 5500 МПа, при переходе в моду бронзы микротвердость снижается и находится на уровне 4500 МПа, при переходе в следующую моду из сплава ПГ-12Н-01 микротвердость снова возрастает до 5500 МПа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения 2D мультимодального покрытия. Понятно, что изменяя шаг наплавки валиков можно изменять период изменения микротвердости в поперечном сечении. При малом шаге наплавки одноименных/разноименных валиков (1,8/0,9 мм), как видно из рис. 5, периодичность изменения микротвердости вообще не наблюдается.

### **Выводы**

1. В результате проведенных исследований изучен механизм формирования однослойных мультимодальных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки и получено такое покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

2. Установлено наличие периодичности изменения микротвердости в поперечном сечении 2D мультимодального покрытия и в плане сверху. Полученные данные говорят о возможном периодическом характере изменения других физико-механических свойств таких покрытий.

3. Существует реальная возможность регулирования физико-механических и эксплуатационных свойств в однослойных мультимодальных покрытиях, формируемых методом лазерной наплавки.

## 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. – P. 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. – P. 27-43. 3. Vilar, R. Laser cladding/ R. Vilar // Journal of laser applications. – 1999. – vol. 11. – P. 64–79.
4. Архипов, В. Е. Лазерная наплавка покрытий/ В. Е. Архипов, Е. М. Биргер // Машиностроитель. – 1985. - №8. – С. 27–29.
5. Волосенков, В. Е. Порошки для газотермических покрытий: Состав. Свойства. Применение/ В. Е. Волосенков, И. Л. Куприянов — Минск: Высшая школа, 1987. – 27 с.

УДК 621.791.755

Девоино О.Г., Кардаполова М.А., Романовский А.О.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ДЕТАЛЯХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В статье показана актуальность использования разработанной технологии термоупрочнения легированных и железоуглеродистых сталей поверхностной закалкой из жидкой и твердой фаз с минимальным изменением исходных размеров и шероховатости поверхности, независимо от массы и габаритов упрочняемых деталей, посредством микроплазменной сжатой дуги.*

Как известно, задача повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов может быть решена, прежде всего, путем увеличения ресурса работы наиболее ответственных и быстроизнашивающихся деталей, что позволяет резко сократить число внеплановых остановок машин, уменьшить количество единиц резервного оборудования, увеличить время эксплуатации машин и повысить их надежность.

В настоящее время существует большое количество самых разнообразных способов повышения долговечности и надежности деталей машин и механизмов с использованием различных технологических приемов, методов и материалов. Наряду с традиционно применяемыми методами упрочнения, такими как: термическая и химико-термическая обработка и наплавка износостойких материалов, нашли широкое распространение методы нанесения защитных и износостойких покрытий с использованием высокотемпературных источников нагрева при получении покрытий. К числу используемых высокотемпературных источников нагрева принято относить: плазменное, газопламенное, детонационное, ионно-плазменное и высокочастотное напыление различных материалов с использованием порошков и проволоки, в том числе, металлических, керамических, металлокерамических и металлополимерных композиций [1]. В настоящее время для упрочнения и восстановления изношенных деталей самого различного оборудования широкое распространение получили износостойкие самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, обладающие достаточно высокими износостойкими свой-