

4. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Летахова Е.В., Орлова Д.В., Охрименко И.А. Типы локализации пластической деформации и стадии диаграмм нагружения металлических материалов с различной кристаллической структурой // ПМТФ. 2006. Т. 47. № 2. С. 176-184.
5. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Шляхова Г.В., Орлова Д.В. Мезо- и макроструктурная локализация пластического течения объемного субмикроструктурного титана // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, № 9/2. С. 48-55.
6. Шляхова Г.В., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И., Шаркеев Ю.П., Толмачев А.И. Микроструктура и особенности разрушения ультрамелкозернистого титана ВТ1-0, полученного методом *abc*-прессования // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 9. С. 24-28.
7. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // ФТТ. 2009. Т. 52. Вып. 6. С. 1090-1097.
8. Шляхова Г.В., Заводчиков А.С., Зуев Л.Б., Данилов В.И., Шаркеев Ю.П. О возможности использования интенсивной пластической деформации для получения заготовок сплава ВТ16 с субмикроструктурной структурой // Титан. 2011. № 4. С. 15-20.
9. Гинье А. Рентгенография кристаллов. М.: ГИФМЛ, 1961. 604 с.
10. Уоррен Б.И. Рентгенографическое изучение деформированных металлов. В кн. Успехи физики металлов. Т. V. М.: Металлургиздат, 1963. С. 172-237.
11. Зуев Л.Б., Полетика Т.М., Нариманова Г.Н. О связи между макролокализацией пластического течения и дислокационной структурой // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 13. С. 74-77.
12. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1988. 224 с.
13. Томас Т. Пластическое течение и разрушение в твердых телах. М.: Мир, 1964. 308 с.

**ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В ОДНОСЛОЙНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛОСЧАТЫХ ПОКРЫТИЯХ ИЗ СПЛАВА ПГ-12Н-01
И БРОНЗЫ ПГ-19М-01, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ**

О.Г. Девойно, д.т.н., проф., Н.И. Луцко, н.с., А.С. Лапковский, м.н.с.

Белорусский национальный технический университет

Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

тел. (375-017-331-00-45), e-mail: scvdmmed@bntu.by

В последние годы резко увеличилась потребность промышленности в высоко-износостойких материалах. Однако, возможности упрочнения однокомпонентных материалов либо уже исчерпаны, либо близки к этому. По этой причине возрастает роль композиционных материалов, позволяющих значительно увеличить износостойкость. Традиционной структурой композиционных материалов является слоистая, когда траектория армирования лежат в плоскостях слоев, связь между которыми осуществляется через прослойки связующего [1-5]. Однако, все большее внимание к себе привлекают композиционные материалы с пространственным расположением арматуры, объем работ в этом направлении непрерывно возрастает. Введение пространственного каркаса не только ликвидирует такой недостаток слоистых композиционных материалов как опасность расслоения вследствие слабого сопротивления сдвигу, но и локализует в пределах нескольких пространственных ячеек распространение трещин. Наличие арматуры с различной жесткостью и прочностью значительно расширяет диапазон свойств композиционных материалов с пространственной схемой армирования. Главные трудности — технологические, возникающие при создании сложных схем армирования [6].

Уникальные возможности создания композиционных износостойких покрытий предоставляет метод лазерной наплавки. Этот метод, при котором сочетаются небольшие размеры наплавляемых валиков (сравнимые с диаметром лазерного пятна на поверхности наплавки) и локальность нагрева, позволяет создавать полосчатые слои, состоящие из материалов, имеющих различные физико-механические свойства, когда один из материалов играет роль связующего, а второй — арматуры. Прежде всего, преимущество метода лазерной наплавки при создании покрытий с полосчатой архитектурой состоит в том, что такие покрытия могут создаваться из металлических материалов, что сложно осуществить другими способами. Такие слои характеризуются не только высокой износостойкостью, но и анизотропией износостойкости в разных направлениях относительно наплавленных валиков.

В настоящее время уже накоплен значительный научный задел в области формирования покрытий из порошковых материалов с использованием метода лазерной наплавки. Изучены материа-

ловедческие и технологические аспекты получения лазерно-наплавленных слоев для различных материалов. [7-9]. Однако, недостаточно изучены вопросы формирования композиционных слоев, получаемых чередованием валиков из разных составляющих композиционного покрытия и их физико-механические характеристики.

В данной работе изучалось распределение микротвердости по глубине и в продольном направлении (вдоль поперечного сечения слоя) в однослойном композиционном покрытии, полученном методом лазерной наплавки чередованием валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Химический состав исходных порошков приведен в таблице 1. Покрытия наносились на технологическом комплексе на базе CO₂-лазера непрерывного действия типа «Комета» и системы числового программного управления на образцы из стали 45, предварительно подвергнутые дробеструйной обработке. Наплавка велась в два этапа, вначале на основу наносились параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01 с шагами 1,8; 2,4 и 3 мм (К1), а на втором этапе между ними наплавливались валики из бронзы ПГ-19М-01, шаг между валиками самофлюсующегося сплава и бронзы составлял, соответственно, 0,9; 1,2 и 1,5 мм (К2). Схема наплавки композиционного покрытия приведена на рисунке 1.

После наплавки образцы разрезались в направлении, перпендикулярном валикам наплавки, заливались в специальные оправки, после чего шлифовались и полировались. Фотография полученного шлифа поперечного сечения покрытия приведена на рисунке 2. Отчетливо видны два валика из бронзы ПГ-19М-01, между которыми находится валик из 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 слоя параллельно основе с шагом 0,1 мм.

Таблица 1

Химический состав наплавливавшихся материалов

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

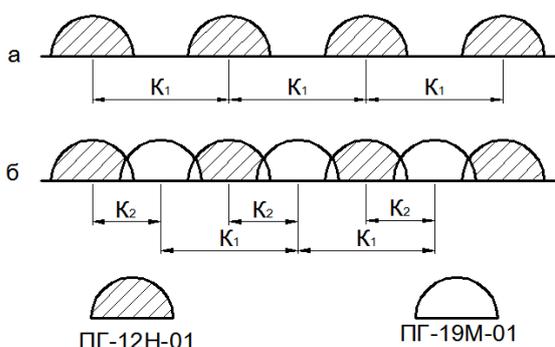


Рис. 1. Схема наплавки композиционного покрытия: а) первый этап; б) второй этап



Рис. 2. Поперечное сечение композиционного полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 x50

Типичная картина распределения микротвердости по глубине однослойного композиционного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 представлена на рисунке 3.

Валик 1 и валик 3 наплавливались на первом этапе нанесения покрытия (рисунок 1) и представляли собой валики наплавки из чистого сплава ПГ-12Н-01, валик 2 наносился на втором этапе, когда после наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01 на месте нанесения валика 2 образовался тонкий под-слой из этого материала.

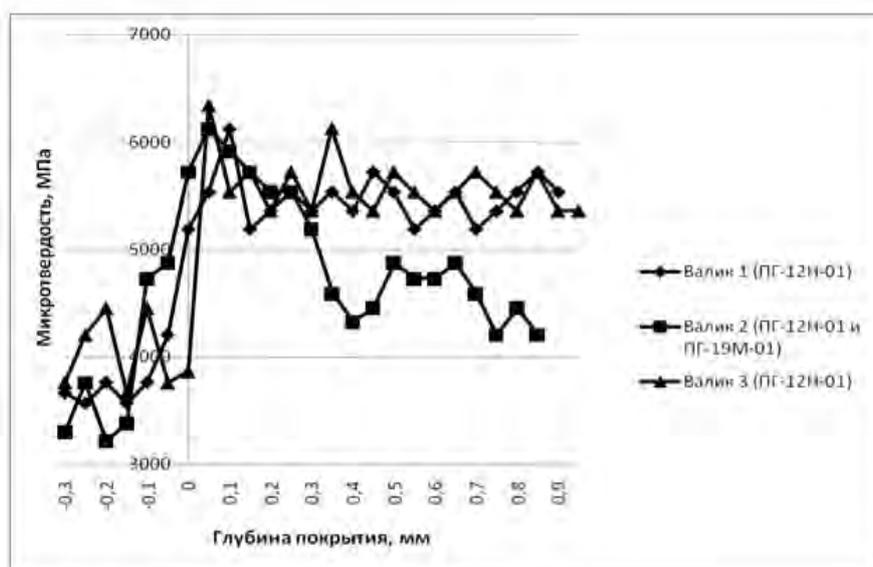


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине в однослойных композиционных покрытиях из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-

Из рисунка 3 видно, что на границе основы и покрытия происходит резкий рост микротвердости, что говорит о том, что, несмотря на металлургическую связь основы и покрытия, переходная зона между ними очень мала или вообще отсутствует. В дальнейшем в валиках из сплава ПГ-12Н-01 (валики 1 и 3 на рисунке 3) величина микротвердости находится примерно на одном уровне по всей глубине покрытия, что свидетельствует о хорошем перемешивании материала в ванне расплава и о равномерном прогреве материала валика. Микротвердость сплава ПГ-12Н-01 в валиках 1 и 2 составляет в среднем 5500 МПа.

Несколько иная картина наблюдается при замере микротвердости по оси валика бронзы ПГ-19М-01. На границе основы и покрытия, как и в валиках из сплава ПГ-12Н-01, наблюдается (валик 3 на рисунке 3) резкий рост микротвердости, что также свидетельствует о малой величине переходной зоны. До расстояния от основы 0,25 мм средняя величина микротвердости в валике 2 составляет 5500 МПа, то есть равна микротвердости сплава ПГ-12Н-01 в валиках 1 и 3. В данном случае мы имеем дело с подслоем из указанного сплава, образовавшимся при наплавке двух соседних валиков из этого материала. В дальнейшем микротвердость снижается примерно на 1000 МПа и остается на этом уровне на всей глубине покрытия, то есть при наплавке валика бронзы ПГ-19М-01 также происходит равномерный разогрев и хорошее перемешивание материала в ванне расплава. Средняя микротвердость бронзы ПГ-19М-01 в этой зоне составляет 4500 МПа. Так как снижение микротвердости от 5500 МПа до 4500 МПа происходит при изменении глубины покрытия на 0,1 мм, можно утверждать, что переходная зона между валиками сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 имеет небольшие размеры или отсутствует.

Характерные результаты измерения микротвердости в продольном направлении вдоль поперечного сечения слоя параллельно основе представлены на рисунке 4. Координата начальной точки измерения соответствовала примерно середине левого валика из сплава ПГ-12Н-01 (валик 1 на рисунке 3), а координата конечной точки измерения – примерно середине правого валика из сплава ПГ-12Н-01 (валик 3 на рисунке 3), координата измерения 1,5 мм соответствовала примерно середине валика из бронзы ПГ-19М-01. Из рисунка 4 хорошо видно, что при шагах наплавки одноименных/разноименных валиков $K1/K2$ 2,4/1,2 мм и 3,0/1,5 мм в продольном направлении покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердости. Вначале, когда измерения выполняются в валике из сплава ПГ-12Н-01, средняя микротвердость покрытия находится на уровне 5500 МПа, затем, когда измерения проводятся в валике бронзы ПГ-19М-01, наблюдается снижение средней микротвердости до 4500 МПа, и наконец, когда измерения снова проводятся в валике из сплава ПГ-12Н-01, средняя микротвердость покрытия опять поднимается до 5500 МПа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения однослойного композиционного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

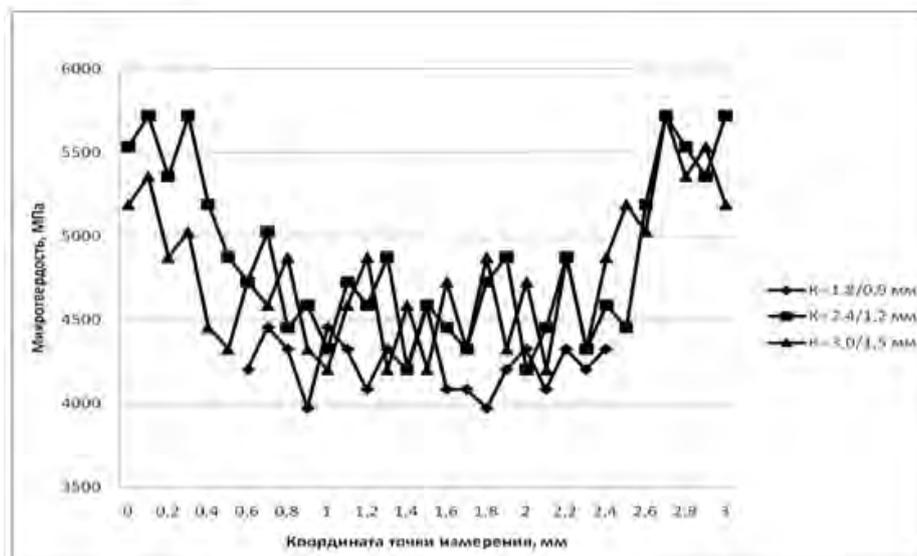


Рис. 4. Распределение микротвердости в продольном направлении вдоль поперечного сечения параллельно основе в однослойном композиционном покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 при разных шагах наплавки

На рисунке 5 наблюдаемая периодичность изменения микротвердости в однослойном полосчатом композиционном покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 для наглядности представлена в виде схемы. Как видно из этого рисунка, однослойное композиционное покрытие из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 представляет собой матрицу из сплава ПГ-12Н-01 со средней микротвердостью 5500 МПа, в которую при помощи лазерной наплавки внедрены области из бронзы со средней микротвердостью 4500 МПа. В плане сверху такое покрытие представляет собой полосчатую композицию, в которой чередуются полосы сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

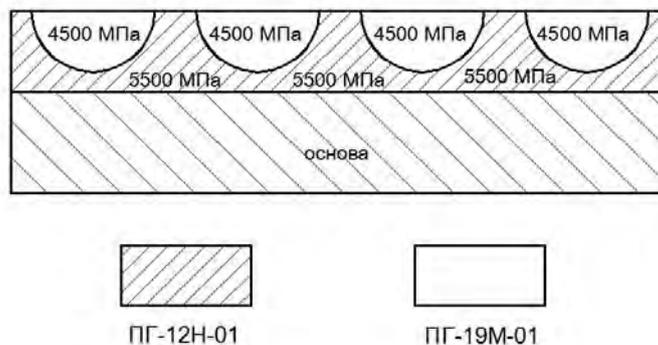


Рис. 5. Схема поперечного сечения однослойного композиционного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01

Таким образом при помощи лазерной наплавки существует возможность создавать композиционные полосчатые покрытия, состоящие из полос разнородных материалов и при этом добиваться периодичности изменения микротвердости покрытий как в поперечном сечении покрытий, так и в плане сверху. При этом, варьируя соотношение шагов наплавки одноименных и разноименных материалов $K1$ и $K2$, можно добиваться разной периодичности изменения этой характеристики покрытий. Как видно из рисунка 4, при соотношении шагов наплавки $K1/K2$ 1,8/0,9 мм периодичность изменения микротвердости вообще не наблюдается. В этом случае в верхней части покрытия находится практически сплошной слой бронзы со средней микротвердостью порядка 4300 МПа. При увеличении соотношения шагов наплавки $K1/K2$ до 2,4/1,2 уже наблюдается периодичность изменения мик-

ротвердости, а при увеличении $K1/K2$ до 3,0/1,5 периодичность сохраняется, но период изменения микротвердости также увеличивается.

Исследования, проведенные в рамках данной работы, позволяют понять механизм формирования композиционных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки. Показана возможность получения периодичности изменения микротвердости как в поперечном сечении композиционных покрытий, так и в плане сверху. Полученные результаты позволяют сделать предположение о периодичности изменения и других физико-механических свойств таких покрытий. Кроме того, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что существует реальная возможность регулирования физико-механических и эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости и коэффициента трения в покрытиях, получаемых методом лазерной наплавки.

Подобные композиционные покрытия могут использоваться для повышения износостойкости направляющих различного назначения, подшипников скольжения, штоков.

Литература.

1. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.; Химия, 1981. 232 с.
2. Жигун И.Г., Поляков В.А. Свойства пространственно-армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 215 с.
3. Композиционные материалы: Т. 2 Механика композиционных материалов. Пер. с англ./ Под ред. А.А. Ильюшина и Б.Е. Победри. М.: Мир, 1978. 564 с.
4. Композиционные материалы: Т. 7, Ч. 1. Анализ и проектирование конструкций. Пер. с англ./ Под ред. Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1978. 344 с.
5. Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами/ Ю.М. Тарнопольский, А.В. Розе, И.Г. Жигун, Г.М. Гуняев. – Механика полимеров, 1971, № 4, с. 676-685.
6. Meylan B.A., Butterfield B.G. Three-Dimensional Structure of Wood. A Scanning Electron Microscope Study. New York: Syracuse University Press, 1972, 80 p.
7. John C. Ion, Laser processing of Engineering Materials: principles, procedure and industrial application, Elsevier Butterworth – Heintmann, Burlington, MA, 2005, 220 p.
8. E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin, Laser Cladding, CRS Press, Boca Raton, Florida, 2005, 380 p.
9. J. Th. M. De Hosson, V. Ocelic, Functionally graded materials produced with high power lasers, Proceeding of ASTRA – 2003, Hyderabad, India, 2003. pp. 368-376.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА СКОРОСТЬ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ

Ю.Д. Жмакин, аспирант, С.А. Невский, к.т.н., доц., С.В. Коновалов, д.т.н., проф.

Сибирский государственный индустриальный университет

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42, тел. (3843) 46-22-77

E-mail: nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru

К настоящему времени однозначно установлено, что внешние электрические воздействия на металлические материалы приводят к изменению их деформационных характеристик [1 – 3]. Так в работе [1] установлено, что электростатические поля оказывают упрочняющее действие на процессы пластической деформации, проявляющееся в увеличении предела текучести. В [4, 5] получены результаты, свидетельствующие о том, что приложение к деформируемому на ползучесть материалу электростатических полей, характеризуемых малыми электрическими потенциалами, приводит к изменению ее скорости. Зависимости скорости установившейся ползучести от потенциала, как в случае алюминия [4], так и в случае меди имеют знакопеременный характер [5]. По мнению авторов [4, 5] причиной такого изменения скорости ползучести являются нарушения структуры двойного электрического слоя. Однако, в работах [1 – 5] исследовано влияние малых электрических потенциалов, но остаются вопросы, связанные с влиянием электростатических полей, характеризуемых потенциалами, больше 1 кВ. В настоящей работе исследовано влияние электростатических полей, характеризуемых потенциалами ± 4 кВ.