

УДК 621.791.72

О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, Н. И. Луцко, А. С. Лапковский
Белорусский национальный технический университет, Минск

СВОЙСТВА ОДНОРОДНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛОСЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Изучены свойства однородных и композиционных покрытий, получаемых лазерной наплавкой. Установлено наличие периодического изменения микротвёрдости в поперечном сечении композиционных покрытий. Показано, что композиционное двухслойное покрытие имеет большую износостойкость, чем покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля.

Ключевые слова: лазерная наплавка, композиционное покрытие, микроструктура, микротвёрдость, износостойкость.

Введение. В последние годы покрытия из однородных материалов уже далеко не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. В такой ситуации возрастает роль композиционных покрытий, позволяющих добиться наиболее заметных результатов.

Традиционной структурой композиционных материалов является слоистая, когда траектории армирования лежат в плоскостях слоёв, связь между которыми осуществляется через прослойки связующего [1]. Однако всё большее внимание к себе привлекают композиционные материалы с пространственным расположением арматуры. 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. Основным препятствием для создания пространственных схем армирования являются технологические трудности, возникающие при создании сложных схем армирования [2].

Широкие возможности создания композиционных износостойких покрытий предоставляет метод лазерной наплавки [3]. Небольшие размеры наплавляемых валиков (сравнимые с диаметром лазерного пятна на поверхности наплавки) и локальность нагрева, характерные для данного метода, позволяют создавать полосчатые структуры, состоящие из материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами, когда один из материалов играет роль связующего, а второй — арматуры. Преимущество метода лазерной наплавки при создании композиционных покрытий с полосчатой архитектурой состоит прежде всего в том, что он значительно облегчает получение таких покрытий из металлических материалов, чего сложно достигнуть другими способами.

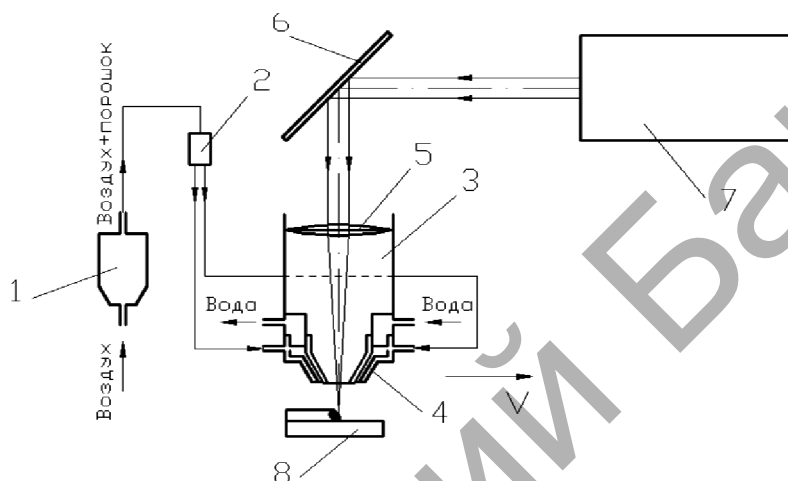
Основная часть. В качестве материалов для создания композиционных покрытий использовались порошки самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 грануляцией 20...80 мкм (таблица 1).

Лазерная наплавка композиционных покрытий осуществлялась на технологическом комплексе на основе CO₂-лазера непрерывного действия типа «Комета 2» и координатной установки с системой числового программного управления «РУХ-5.0». Применявшаяся координатная система позволяла осуществлять перемещение луча лазера относительно наплавлявшихся образцов с необходимой точностью для создания полосчатых композиционных покрытий. Подача порошка в зону действия лазерного излучения производилась через специальное сопло коаксиально лазерному лучу. Мощность лазерного излучения составляла 1 000 Вт, наплавка велась на образцы, изготовленные из стали 45 и подвергнутые дробеструйной обработке, по определённой схеме (рисунок 1).

Исследовали четыре группы образцов. На первую группу методом лазерной наплавки наносили покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01. На вторую — покрытие из бронзы ПГ-19М-01, на третью и четвёртую группу образцов наносили однослойное и двухслойное композиционное покрытие.

Т а б л и ц а 1. — Состав исходных порошков

Марка	Содержание компонентов (по массе)									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-12Н-01	8,0...14,0	1,7...2,5	1,2...3,2	1,2...3,2	0,3...0,6	Основа	—	—	—	—
ПГ-19М-01	—	—	—	До 4	—	—	—	Основа	—	8,5...10,5



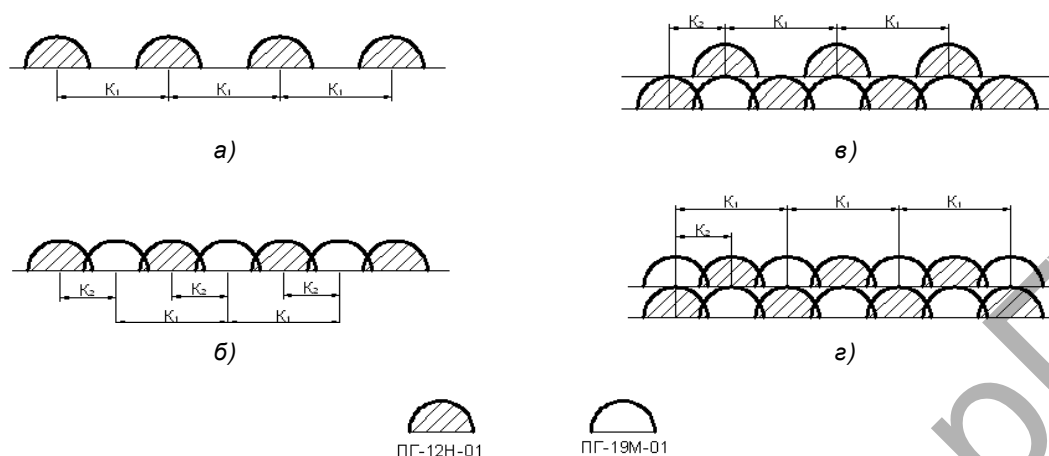
1 — порошок питатель; 2 — распределитель газопорошковой смеси; 3 — наплавочная головка-объектив; 4 — наплавочное коаксиальное сопло; 5 — фокусирующая линза; 6 — система поворотных зеркал; 7 — лазерная установка; 8 — наплавляемый образец

Рисунок 1. — Схема лазерной наплавки

Покрyтия одного состава из порошков ПГ-12Н-01 и ПГ-19М-01 получали путём параллельного нанесения валиков с частичным перекрытием. Для нанесения композиционных полосчатых покрытий использовали схему (рисунок 2). Наплавку однослойного покрытия производили в два этапа (см. рисунок 2, а, б). На первом этапе (см. рисунок 2, а) на основу наносили параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01 с шагом K_1 , на втором этапе (см. рисунок 2, б) между ними наплавляли параллельные валики из бронзы ПГ-19М-01, шаг между валиками самофлюсующегося сплава и бронзы составлял $K_2 = K_1 / 2$. Для получения двухслойного композиционного полосчатого покрытия выполняли ещё два этапа наплавки (см. рисунок 2, в, г). Вначале (см. рисунок 2, в) на первый слой покрытия снова наносили параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01, причём эти валики наносились со смещением относительно валиков первого слоя таким образом, чтобы валики из сплава ПГ-12Н-01 располагались над валиками из бронзы ПГ-19М-01 первого слоя. Шаг нанесения валиков из сплава ПГ-12Н-01 был также равен K_1 . После этого (см. рисунок 2, г) между валиками сплава ПГ-12Н-01 наплавляли валики из бронзы ПГ-19М-01, шаг между валиками из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 составлял $K_2 = K_1 / 2$. После наплавки покрытий поверхность образцов подвергали шлифованию до R_a 1,6 мкм.

Для всех покрытий были предварительно получены поперечные шлифы покрытий, сделанные перпендикулярно направлению наплавки валиков, и изготовлены микрофотографии поперечного сечения. Указанные исследования проводились методом оптической микроскопии на металлографическом микроскопе с фотофиксацией «Микро-Р200» и методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения с использованием аттестованного микроскопа Miра фирмы Oxford Instruments (Великобритания).

Исследования микротвёрдости поперечного сечения покрытий проводили на таких же шлифах в направлении параллельно основе с шагом 0,1 мм. Для исследований применялся микротвердомер ПМТ-3.



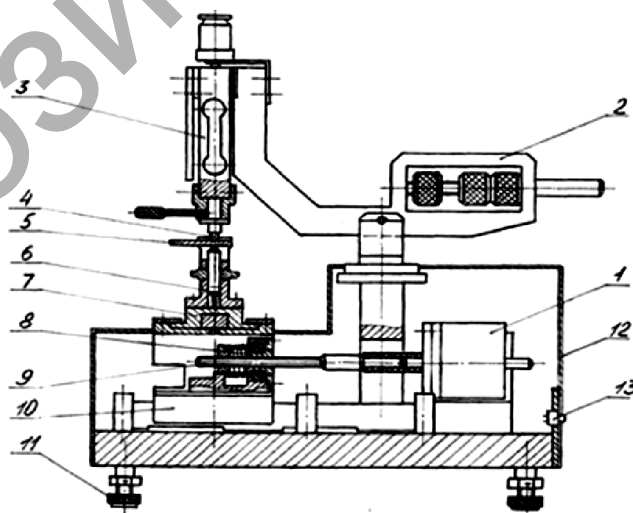
а — первый этап; б — второй этап; в — третий этап; г — четвёртый этап

Рисунок 2. — Схема наплавки композиционного покрытия

Износостойкость полученных покрытий исследовали на двух типах образцов: 1) для испытаний в условиях сухого трения — в виде пластин длиной 30 мм, шириной 20 мм и толщиной 8 мм; 2) для испытаний в условиях трения с граничной смазкой — в виде диска диаметром 50 мм и толщиной 12 мм, в центре которого имелось отверстие диаметром 15 мм.

Испытания на износ в условиях сухого трения проводили на установке МИПТ (модуль по исследованию процессов трения) (рисунок 3), являющейся частью автоматизированного комплекса для исследования процессов трения (АКИПТ). Метод испытаний на данной установке основан на возвратно-поступательном движении контртела относительно образца по схеме «алмазный наконечник—плоскость». Величина нагрузки (действующая перпендикулярно контактирующим поверхностям) обеспечивалась набором грузов.

Контртело для испытаний на износ представляло собой цангу с закреплённым в ней алмазным индентором типа Роквелл. Нормальная нагрузка для этого вида испытаний составляла 2 Н, скорость



1 — двигатель шаговый; 2 — коромысло; 3 — датчик веса, совмещённый с датчиком силы трения; 4 — индентор; 5 — образец; 6 — механизм фиксации образца; 7 — каретка поперечной подачи; 8 — гайка; 9 — винт ходовой; 10 — каретка продольной подачи; 11 — винт установочный; 12 — корпус; 13 — разъёмы электрические

Рисунок 3. — Схема установки МИПТ

каретки — 5 мм / с, длина единичного прохода — 15 мм, путь трения — 10 м. Показателем величины износа являлся объём изношенного материала. Для его определения при помощи профилографа-профилометра «Профи-130» измерялись глубина и ширина дорожки износа. Объём изношенного материала V рассчитывался по формуле

$$V = \frac{1}{2} b h L,$$

где b — ширина дорожки износа;
 h — глубина дорожки износа;
 L — длина единичного прохода.

Испытания на износ в условиях граничной смазки проводили на машине трения, изготовленной на базе сверлильного станка. Схема узла трения (рисунок 4): в патроне 4 станка закреплено контртело 6

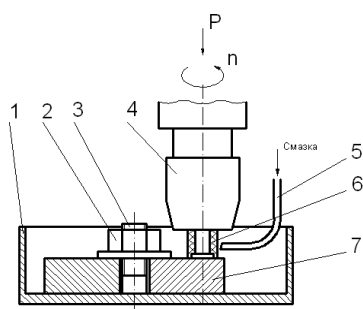


Рисунок 4. — Схема узла трения при испытаниях на износ в условиях граничной смазки

из твёрдого сплава ВК-6, рабочая часть которого выполнена в виде трубки с толщиной стенки 1,5 мм. Образец 7 представлял собой диск с центральным отверстием. Крепление образца в ванне для сбора смазки 1 осуществлялось при помощи шпильки 3 и гайки 2. В зону трения при испытаниях капельным способом через трубку 5 подавалась смазка — масло индустриальное марки И-20А. Величина нагрузки на контртело при испытаниях изменялась при помощи комплекта грузов. Время испытаний образцов устанавливали экспериментально путём промежуточных замеров износа до получения измеримых значений износа у всех испытывавшихся материалов. Оценку износа производили при помощи профилографа-профилометра «Профи-130» по глубине канавки износа.

Для получения сопоставимых величин износа для всех испытывавшихся материалов для каждого из них определялась величина износа, мм, на 1 000 м пути трения по формуле

$$I_{1000} = 1000 \cdot \frac{I}{n \pi d t},$$

где I — средняя величина износа по результатам измерений;
 n — скорость вращения шпинделя, равная 2 300 об / мин;
 d — средний диаметр твердосплавного контртела, равный 0,016 м;
 t — время испытаний, мин.

Относительная износостойкость покрытий определялась по следующим формулам:

— для сухого трения —

$$\varepsilon = \frac{V_{бр}}{V_{м}},$$

— для трения в условиях граничной смазки —

$$\varepsilon = \frac{I_{1000бр}}{I_{1000м}},$$

где $V_{м}$ — объём изношенного материала исследуемого покрытия, мм³;
 $V_{бр}$ — объём изношенного материала для бронзы ПГ-19М-01, мм³;
 $I_{1000м}$ — величина износа на 1 000 м пути трения для исследуемого покрытия, мм;
 $I_{1000бр}$ — величина износа на 1 000 м пути трения для бронзы ПГ-19М-01, мм.

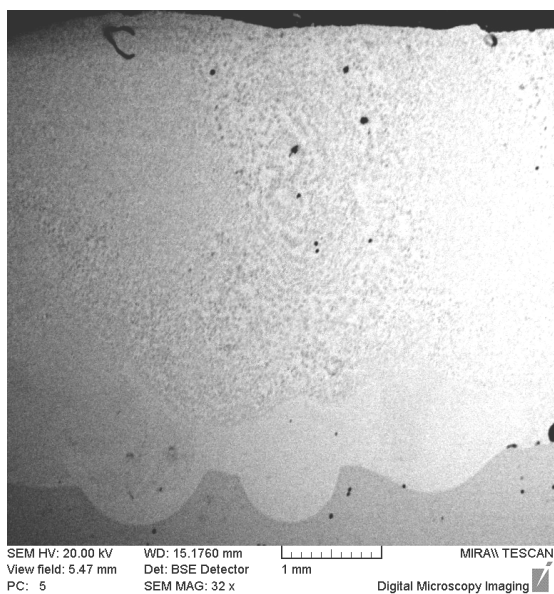


Рисунок 5. — Поперечное сечение покрытия из сплава ПГ-12Н-01. $\times 32$

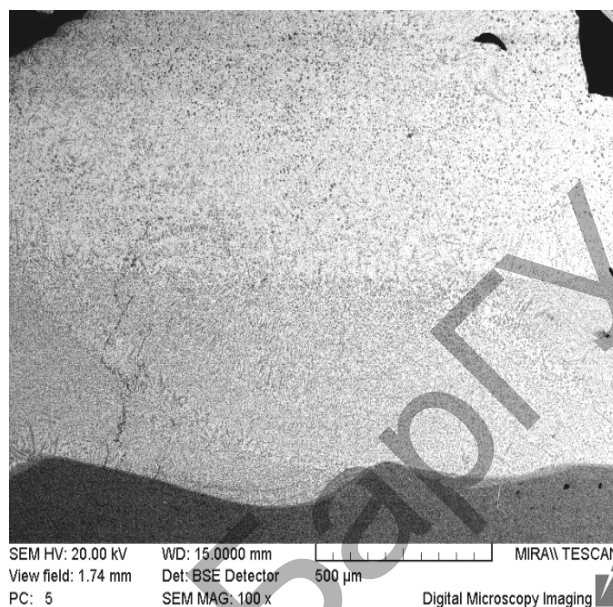


Рисунок 6. — Поперечное сечение покрытия из сплава ПГ-19М-01. $\times 100$

Рассмотрим поперечное сечение двухслойного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 (рисунок 5). В покрытии имеются две чётко различимые зоны: зона мелкозернистой микроструктуры, непосредственно прилегающая к основе, и зона с достаточно крупнозернистой структурой, располагающаяся над зоной 1.

Проанализируем микроструктуру поперечного сечения двухслойного покрытия из бронзы ПГ-19М-01 (рисунок 6). В покрытии из бронзы ПГ-19М-01, так же, как в покрытии из сплава ПГ-12Н-01, имеются две чётко различимые зоны: зона мелкозернистой микроструктуры, непосредственно прилегающая к основе, и зона пластинчато-зернистого строения, располагающаяся над зоной 1. В обоих случаях зоны 1 и 2 связаны с первым и вторым слоем покрытия соответственно.

Микроструктура поперечного сечения однослойного композиционного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 приведена на рисунке 7. Отчётливо видны два валика из бронзы ПГ-19М-01, между которыми находится валик из сплава ПГ-12Н-01.

Сделана фотография микрошлифа поперечного сечения двухслойного композиционного полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 (рисунок 8). В первом слое покрытия (ближе к основе) видны два валика из сплава ПГ-12Н-01, между которыми находится валик из бронзы

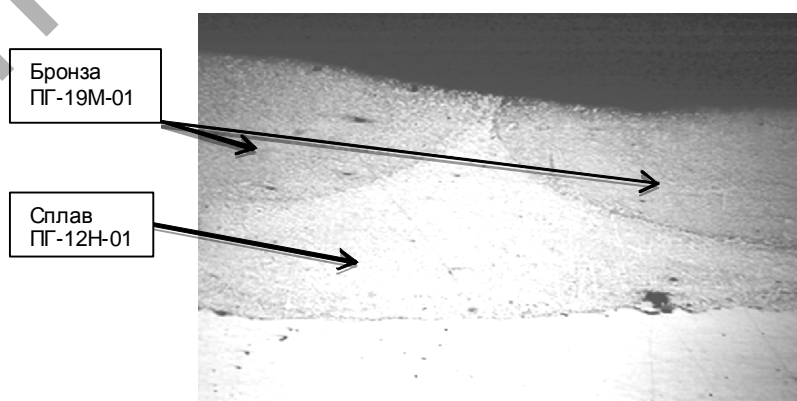


Рисунок 7. — Поперечное сечение однослойного композиционного полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. $\times 50$

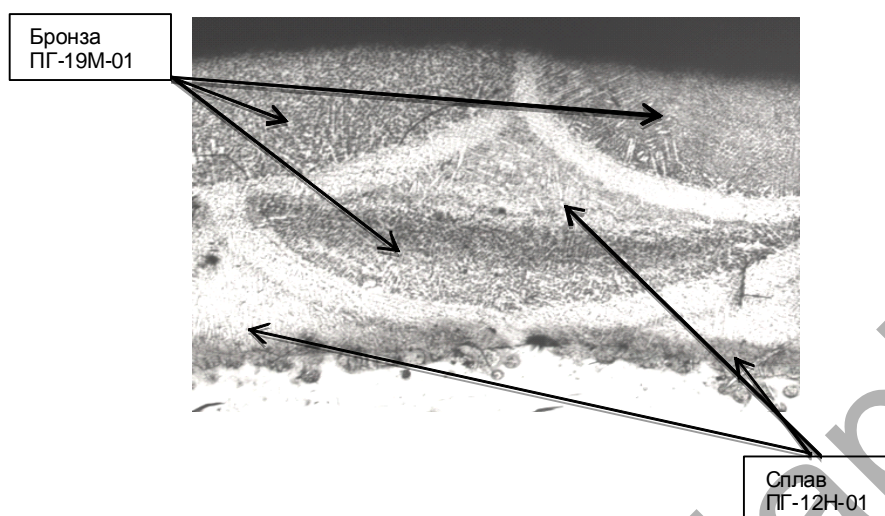


Рисунок 8. — Поперечное сечение двухслойного композиционного полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. $\times 50$

ПГ-19М-01; во втором слое покрытия над валиком бронзы первого слоя виден валик из сплава ПГ-12Н-01, справа и слева от которого расположены валики из бронзы ПГ-19М-01; характерной особенностью является наличие зон термического влияния на первом слое при наплавке предыдущего покрытия.

Исходя из анализа покрытий (см. рисунки 5 и 6), можно предположить равномерное распределение микротвёрдости в поперечном сечении покрытий из однородных материалов в направлении, параллельном основе. Это предположение подтверждается (рисунки 9 и 10).

Видно (см. рисунок 9), что для покрытия из сплава ПГ-12Н-01 микротвёрдость покрытия в направлении, параллельном основе, находится примерно на одном уровне по всей ширине слоя покрытия, значительные колебания величины микротвёрдости отсутствуют.

Результаты измерения микротвёрдости покрытия из бронзы ПГ-19М-01 в направлении, параллельном основе (см. рисунок 10), показывают, что и в этом случае микротвёрдость покрытия в направлении, параллельном основе, находится также примерно на одном уровне по всей ширине слоя покрытия.

Совершенно другие результаты получены при исследовании микротвёрдости в поперечном сечении одно- и двухслойных композиционных полосчатых покрытий в направлении, параллельном основе

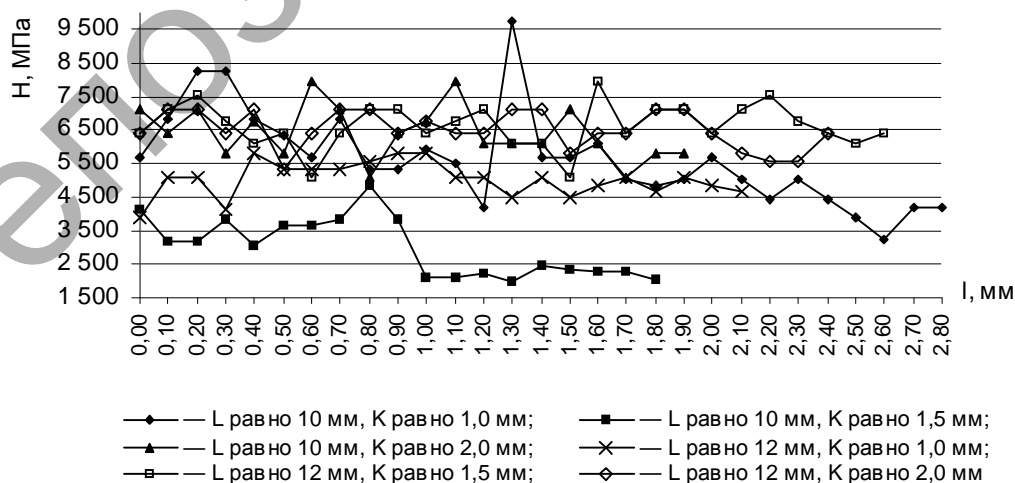


Рисунок 9. — Распределение микротвёрдости в продольном направлении сечения параллельно основе при скорости наплавки V , равной 80 мм/мин и различных дистанциях (L) и шагах наплавки валиков (K) для покрытия из сплава ПГ-12Н-01

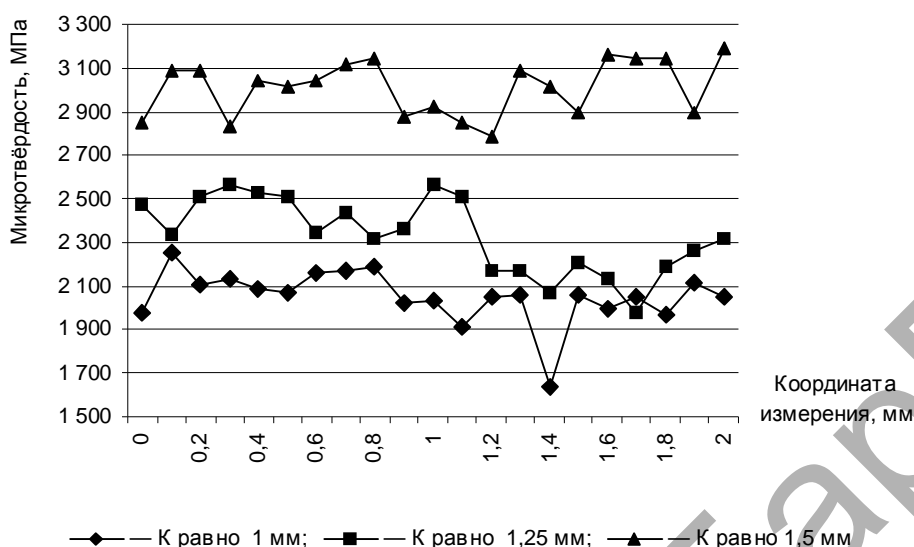


Рисунок 10. — Распределение микротвёрдости в продольном направлении сечения параллельно основе для покрытия из бронзы ПГ-19М-01 при скорости наплавки V , равной 100 мм / мин, дистанции наплавки L , равной 12 мм, при различных шагах наплавки K

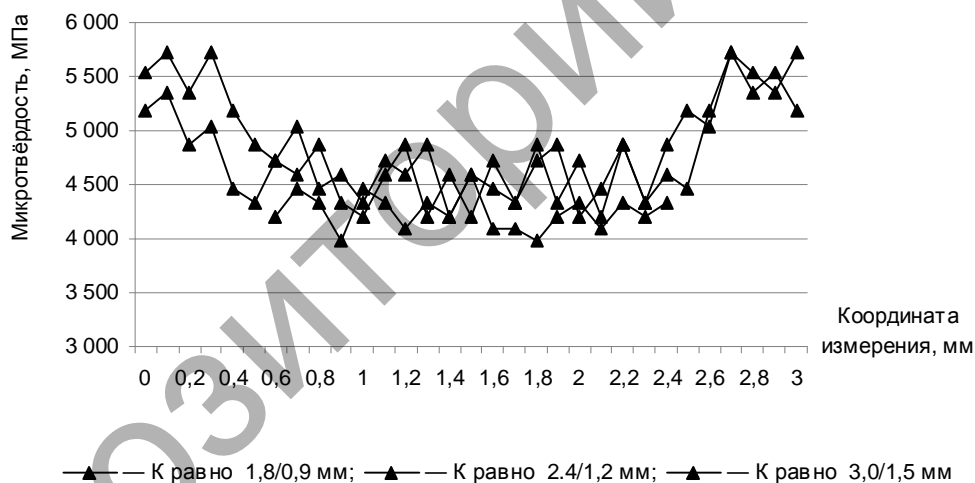


Рисунок 11. — Распределение микротвёрдости в однослойном композиционном покрытии в направлении параллельно основе при скорости наплавки сплава /бронзы V , равной 120/200 мм / мин, и дистанции наплавки L , равной 10 мм (K — шаг наплавки одноименных/разноименных валиков)

(рисунки 11 и 12). Видно, что в однослойном и в двухслойном композиционных полосчатых покрытиях из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 наблюдается периодичность изменения микротвёрдости в продольном направлении сечения покрытия параллельно основе при всех исследованных шагах наплавки.

При этом значения микротвёрдости меняются от 3 300...4 750 МПа в валиках бронзы до 4 400... 5 600 МПа в валиках из сплава ПГ-12Н-01. Такие периодические изменения микротвёрдости происходят вдоль всего поперечного сечения одно- и двухслойных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. При этом, варьируя соотношение шагов наплавки, можно добиваться различной периодичности изменения этой характеристики покрытий. Так, например, при малых шагах наплавки одноименных валиков, когда достигается практически сплошной повторный переплав поверхности, периодичность изменения микротвёрдости будет отсутствовать.

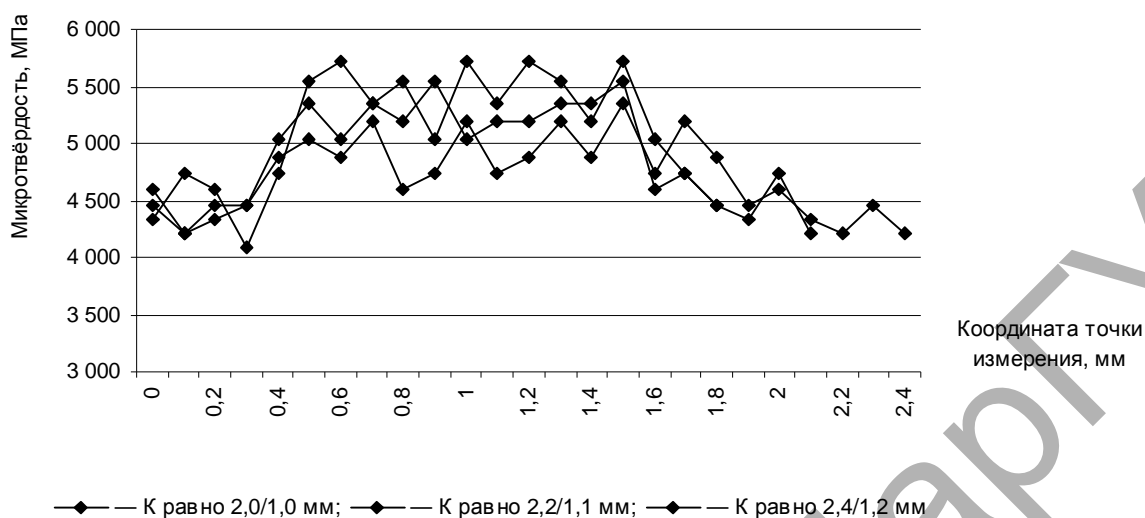


Рисунок 12. — Распределение микротвёрдости в двухслойном композиционном покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в направлении параллельно основе при скорости наплавки сплава/бронзы V , равной 100/150 мм / мин (K — шаги наплавки одноименных/разноименных валиков)

Наблюдаемая периодичность изменения микротвёрдости в композиционных полосчатых покрытиях из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 позволяет предположить, что и такая характеристика покрытий, как их износостойкость, для композиционных полосчатых покрытий будет существенно отличаться от таковой для однородных покрытий из этих же материалов.

Испытания износостойкости покрытий при сухом трении и при трении с граничной смазкой проводили в соответствии с методиками, приведёнными выше. При этом погрешность определения износостойкости при сухом трении составляла 6%, при трении с граничной смазкой — 5%. Представлены результаты исследований относительной износостойкости для всех испытывавшихся покрытий при сухом трении (рисунок 13).

Из диаграммы следует, что наиболее высокой износостойкостью при сухом трении обладают двухслойное композиционное полосчатое покрытие и покрытие из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01. Величины их износостойкости практически равны. Износостойкость однослойного композиционного покрытия в 3,4 раза меньше износостойкости покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и двухслойного композиционного покрытия. Самой низкой износостойкостью обладает покрытие из бронзы ПГ-19М-01, его износостойкость в 6,5 раза меньше износостойкости двухслойного композиционного покрытия.

Рассмотрим показатели относительной износостойкости тех же покрытий при трении в условиях граничной смазки (рисунок 14). Из диаграммы видно, что в условиях граничной смазки самой высокой износостойкостью обладает двухслойное композиционное покрытие. Его износостойкость превышает износостойкость самофлюсующегося сплава на основе никеля в 1,73 раза. Износостойкость однослойного композиционного покрытия в 9 раз ниже износостойкости двухслойного композиционного покрытия и в 5,3 раза ниже износостойкости сплава ПГ-12Н-01. Износостойкость покрытия из бронзы ПГ-19М-01 в условиях трения с граничной смазкой очень низкая: она меньше износостойкости двухслойного композиционного покрытия в 256 раз, меньше износостойкости сплава ПГ-12Н-01 в 148 раз и меньше износостойкости однослойного композиционного покрытия в 28 раз.

Таким образом, наличие периодичности изменения микротвёрдости в композиционных полосчатых покрытиях из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 оказывает положительное влияние на их износостойкость. Хотя однослойное композиционное полосчатое покрытие уступает по своим эксплуатационным показателям покрытиям из сплава ПГ-12Н-01, тем не менее двухслойное композиционное полосчатое покрытие обладает износостойкостью, превышающей износостойкость самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01, который был создан в своё время как сплав с высокой износос-

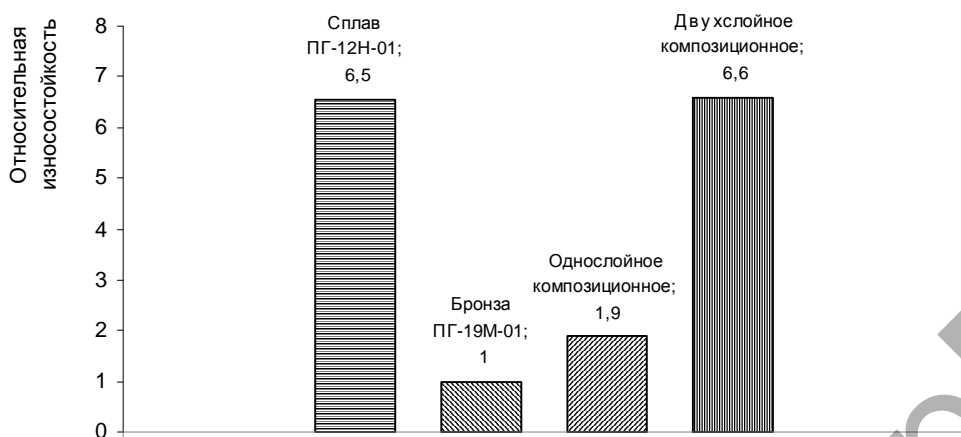


Рисунок 13. — Относительная износостойкость покрытий в условиях сухого трения

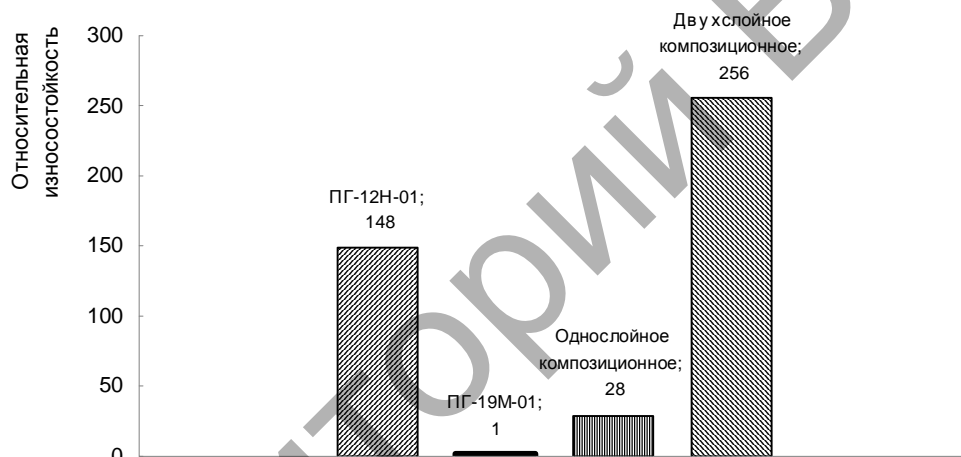


Рисунок 14. — Относительная износостойкость покрытий при нагрузке на контртело 120 Н при граничной смазке

тойкостью, в том числе в условиях сухого трения [4]. В данном случае сплав ПГ-12Н-01 скорее всего играет основную роль в формировании износостойкости композиционного полосчатого покрытия, при этом бронза выполняет функцию твердой смазки, позволяющей понизить коэффициент трения и увеличить износостойкость покрытия, в том числе за счёт возможного существования эффекта избирательного переноса, как это имеет место в многокомпонентных покрытиях, включающих мягкую составляющую [5].

Заключение. Установлена возможность формирования композиционных износостойких покрытий методом лазерной наплавки как с полосчатым строением поверхностного слоя, так и объёмным армированием в случае двухслойного нанесения. Варьирование режимов наплавки позволяет формировать покрытия с различной степенью периодичности свойств.

Исследования износостойкости показали, что наплавленные лазером однослойные композиционные полосчатые покрытия с чередованием сплавов на медной и никелевой основе имеют более низкую износостойкость по сравнению с никелевыми покрытиями, в то время как двухслойные композиционные покрытия по износостойкости не уступают (в случае трения без смазки) покрытиям из никелевых сплавов или превосходят их в 1,7 раза (при граничном трении).

Список цитируемых источников

1. Гуняев Г. М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М. : Химия, 1981. 232 с. ; Жигун И. Г., Поляков В. А. Свойства пространственно-армированных пластиков. Рига : Зинатне, 1978. 215 с. ; Композиционные материалы : в 2 т. М. : Мир, 1978. Т. 2. Механика композиционных материалов ; пер. с англ. ; под. ред. А. А. Ильюшина и Б. Е. Победри. 564 с. ; Композиционные материалы : в 7 ч. М. : Машиностроение, 1978. Ч. 1. Анализ и проектирование конструкций ; пер. с англ. ; под. ред. Ю. М. Тарнопольского. 344 с. ; Конструкционные особенности материалов, армированных высокомодульными волокнами / Ю. М. Тарнопольский [и др.] // Механика полимеров. 1971. № 4. С. 676—685.
2. Meylan B. A., Butterfield B. G. Three-Dimensional Structure of Wood. A Scanning Electron Microscope Study. New York : Syracuse Univ. Press, 1972. 80 p.
3. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. Laser Cladding. Boca Raton, Florida : CRS Press, 2005. 380 p. ; Pinkerton A. J., Lin Li. Multiple-layer laser deposition of steel components using gas- and water- atomized powders: the differences and the mechanisms leading to them. Applied Surface Science. 2005. № 247. P. 175—181. ; Mazumder J., A. Schifferer, J. Choi. Direct materials deposition: designed macro and microstructure // Materials Research Innovations. 1999. V. 3. № 3. P. 118—131.
4. Структура и свойства покрытий из никелевых сплавов / В. В. Безбородов [и др.] // Сварочное производство. 2003. № 3. С. 22—27. ; Получение и структура газотермических покрытий на основе Ni-Cr-B-Si-сплавов / Ю. С. Борисов [и др.] // Порошковая металлургия. 1985. № 9. С. 22—26. ; Хасуй А. Техника напыления. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
5. Берсенев В. М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения и износа // Физическая инженерия поверхностей. 2004. Т. 2. № 4. С. 214—219.

The paper considers the possibility of obtaining composite banded coatings by laser cladding. Regularities of distribution of microhardness in cross-section of homogeneous and composite banded coatings are identified. Shows periodic change of microhardness in composite banded coatings received by laser cladding. Wear resistance of homogeneous and composite banded coatings are investigated. It will be shown, that double layer composite coatings wear-resistance is higher what is the same for nickel based self-fluxing alloys coatings.

Key words: laser cladding, composite coating, microstructure, microhardness, wear-resistance.