

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОЛОСЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

В.К. Шелег, О.Г. Девойно,
Н.И. Луцко, А.С. Лапковский

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

Исследована износостойкость покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля и мультимодального покрытия из сплава на основе никеля и бронзы в условиях сухого трения и трения с граничной смазкой. Показаны преимущества мультимодального покрытия в обоих случаях.

Ключевые слова: лазерная наплавка, мультимодальные покрытия, износостойкость, коэффициент трения

FEATURES OF FORMATION AND WEAR RESISTANCE OF MULTIMODAL BANDED COATINGS, OBTAINED BY LASER CLADDING

V.K. Sheleg, O.G. Devojno,
N.I. Lutsko, A.S. Lapkovskij

Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

The wear resistance of nickel-base self-fluxing alloy coating and multimodal coating of nickel based alloy and bronze under dry friction and friction with boundary lubrication was investigated. The advantages of multimodal coating are shown in both cases.

Keywords: laser cladding, multimodal coatings, wear resistance, friction ratio

E-mail: scvdmed@bntu.by

Введение

Потребность промышленности в высокоизносостойких материалах постоянно растет. При этом пределы упрочнения однокомпонентных материалов близки к исчерпанию. По этой причине возрастает роль композиционных материалов, позволяющих

значительно увеличить износостойкость, в том числе композиционных упрочняющих покрытий. Особое место среди композиционных покрытий занимают так называемые мультимодальные покрытия, которые показывают особенно высокие физико-механические свойства [1, 2]. Под модой понимается значение какого-либо признака (размера частиц упрочняющей фазы, пористости, вида материала), которые встречаются наиболее часто. Если имеются несколько значений какого-либо признака, имеющие одинаковую частоту повторения, то покрытие считают мультимодальным (бимодальным). Поскольку лазерная наплавка позволяет наносить валики небольших размеров, поперечные сечения которых сравнимы с размером лазерного пятна, она дает возможность проектировать и создавать мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Технология создания мультимодальных покрытий методом лазерной наплавки может быть использована как для упрочнения новых деталей, так и для восстановления их изношенных поверхностей с получением хороших прочностных свойств [3, 4].

Исследования проведенные авторами показали, что в поперечном сечении мультимодального покрытия хорошо различаются валики из бронзы ПГ-19М-01 и валики из сплава ПГ-12Н-01, рис. 1. При исследованиях микротвердости в поперечном сечении в направлении параллельно основе было установлено, что в продольном направлении двухслойного мультимодального покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердости. Вначале, когда измерения выполняются в валике бронзы ПГ-19М-01, средняя микротвердость покрытия находится в пределах 3300–4750 МПа, затем, когда измерения проводятся в валике сплава ПГ-12Н-01, наблюдается увеличение средней микротвердости до 4400–5600 МПа, и, наконец, когда измерения снова проводятся в валике из бронзы, средняя микротвердость опять уменьшается до 3300–4750 МПа (рис. 2). Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

На рис. 3 наблюдаемая периодичность изменения микротвердости в двухслойном полосчатом мультимодальном покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 для наглядности представлена в виде схемы. Как видно из рис. 3, это покрытие пред-

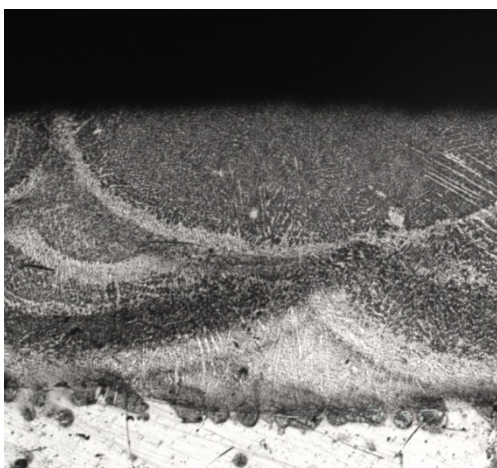


Рис. 1. Поперечное сечение двухслойного мультимодального полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01х50

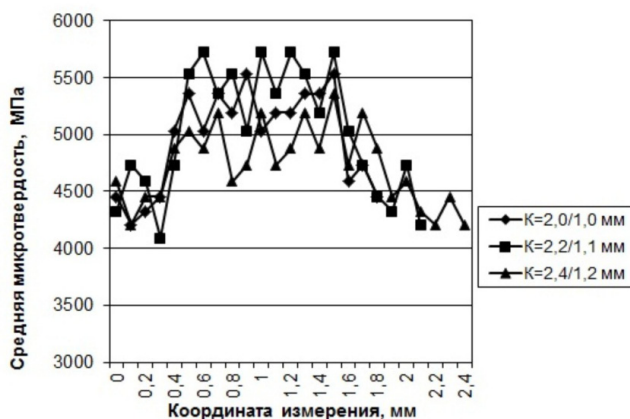


Рис. 2. Распределение микротвердости в двухслойном мультимодальном покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в направлении параллельно основе при скорости наплавки сплава/бронзы $V=100/150$ мм/мин

ставляет собой матрицу из сплава ПГ-12Н-01 со средней микротвердостью 5000 МПа, в которую при помощи лазерной наплавки внедрены области из бронзы ПГ-19М-01 со средней микротвердостью 4000 МПа. После механической обработки поверхности в плане сверху такое покрытие будет состоять из чередующихся полос из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01.

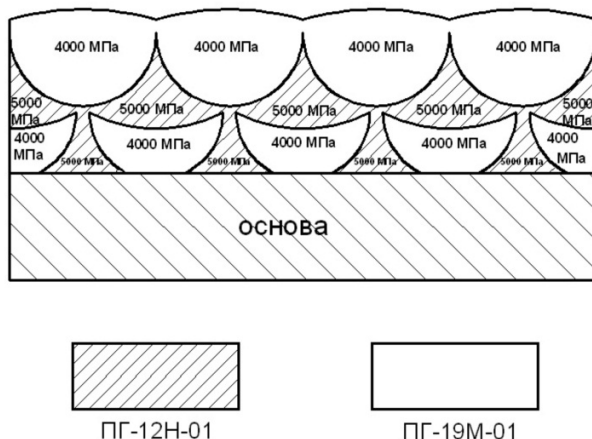


Рис. 3. Схема поперечного сечения двухслойного мультимодального покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01

Материалы, методики, оборудование

В данной работе изучалась износостойкость мультимодальных полосчатых покрытий, полученных методом лазерной наплавки чередованием валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, при различных условиях испытаний. Покрытия наносились на технологическом комплексе на базе CO_2 -лазера непрерывного действия типа «Комета» и координатного стола с системой числового программного управления на образцы из стали 45, предварительно подвергнутые дробеструйной обработке. Производилась наплавка двухслойных мультимодальных покрытий. Схема наплавки покрытия приведена на рис. 4.

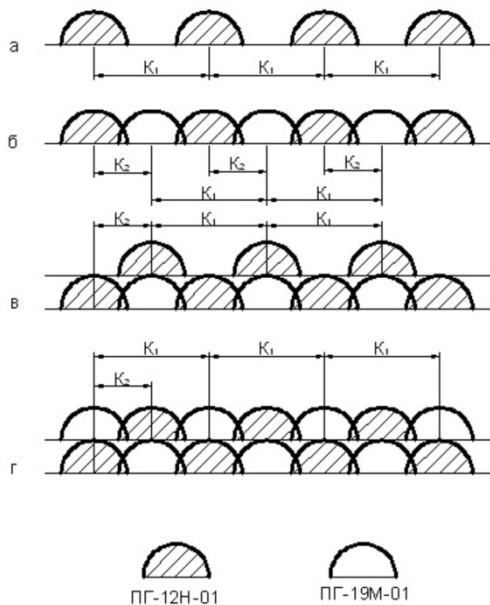


Рис. 4. Схема наплавки мультимодальных покрытий: а — первый этап; б — второй этап; в — третий этап; г — четвертый этап

Наплавка такого покрытия производилась в четыре этапа. На первом этапе на основу наносились параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01 с шагами K_1 , на втором этапе между ними наплавлялись валики из бронзы ПГ-19М-01, шаг между валиками самофлюсующегося сплава и бронзы составлял, соответственно, $K_2=K_1/2$. На этапе 2 завершалось формирование первого слоя покрытия. На третьем этапе на первый слой покрытия снова наносились параллельные валики из сплава ПГ-12Н-01, причем эти валики наносились со смещением относительно валиков первого слоя таким образом, чтобы валики сплава ПГ-12Н-01 располагались над валиками бронзы ПГ-19М-01 первого слоя, шаг между валиками сплава ПГ-12Н-01 составлял K_1 . На четвертом этапе между валиками сплава ПГ-12Н-01 наплавлялись валики бронзы ПГ-19М-01, шаг между валиками сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 составлял $K_2=K_1/2$.

Покрытия наносили на два вида образцов:

- для испытания в условиях сухого трения — размером $20 \times 30 \times 8$ мм;
- для испытания в условиях граничной смазки — $\varnothing 50 \times \varnothing 15 \times 12$ мм.

После наплавки поверхность покрытия подвергалась шлифованию до Ra 1,6 мкм.

Испытания на износ в условиях сухого трения проводились на установке МИПТ (модуль по исследованию процессов трения), являющейся частью автоматизированного комплекса для исследования процессов трения типа АКППТ. Метод испытаний на данной установке основан на возвратно-поступательном движении контртела относительно образца по схеме «алмазный наконечник – плоскость» — для испытаний на износ и по схеме «шарик-плоскость» — для выполнения измерений по определению коэффициента трения скольжения. Коэффициентом трения считалось отношение силы трения к силе нормального давления.

Сила нормального давления (действующая перпендикулярно контактирующим поверхностям) обеспечивалась набором грузов эталонных масс. Величина силы трения дискретно регистрировалась с помощью тензометрических датчиков, коэффициент трения автоматически рассчитывался и индексировался в координатах $K_{тр}$. — путь трения. Схема установки представлена на рис. 5.

Контртело для испытаний на износ представляло собой цангу с закрепленным в ней алмазным наконечником типа Роквелл. Нормальная нагрузка для этого вида испытаний составляла 2 Н, скорость движения каретки — 5 мм/с, длина единичного прохода 15 мм, путь трения — 10 м. Показателем величины износа являлся объем изношенного материала. Для его определения при помощи профилографа-профилометра «Профи-130» измерялись глубина и ширина дорожки износа. Объем изношенного материала V рассчитывался по формуле

$$V=1/2 \cdot b \cdot h \cdot L \text{ (мм}^3\text{)}, \quad (1)$$

где b — ширина дорожки износа;

h — глубина дорожки износа;

L — длина единичного прохода ($L=15$ мм).

Испытания на износ в условиях граничной смазки проводили на машине трения, изготовленной на базе сверлильного станка. Схема узла трения показана на рис. 6.

В патроне станка закреплено контртело 6 из твердого 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 промышленное марки И-20А. Величина нагрузки на контртело при испытаниях изменялась при помощи комплекта грузов. Оценку износа производили при помощи профилографа-профилометра «Профи-130» по глубине канавки износа, замеренной по профилограмме.

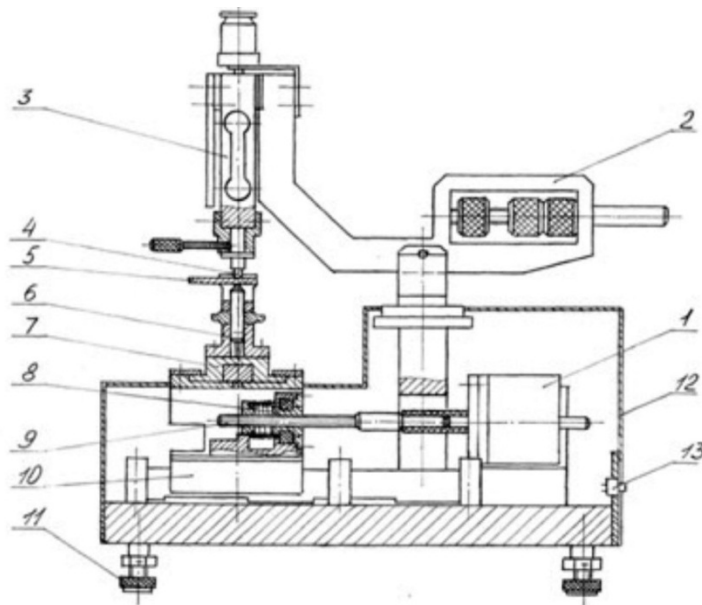


Рис. 5. Схема установки МИПТ:

- 1 — двигатель шаговый; 2 — коромысло; 3 — датчик веса совмещенный 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

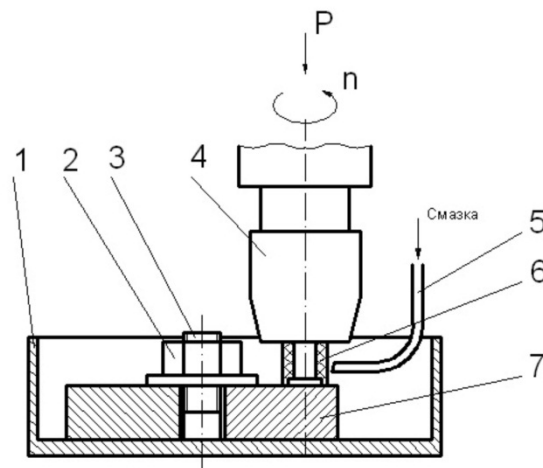


Рис. 6. Схема узла трения при испытаниях на износ в условиях граничной смазки

Для получения сопоставимых величин износа для разных материалов для каждого материала определялась величина износа на 1000 м пути трения по формуле:

$$I_{1000} = 1000 \cdot \frac{l}{n \cdot \pi \cdot d \cdot t} \text{ (мм)}, \quad (2)$$

где l — средняя величина износа по результатам измерений, мм;
 n — скорость вращения шпинделя ($n=2300$ об/мин);
 d — средний диаметр твердосплавного контртела ($d=0,016$ м);
 t — время испытаний, мин.

Результаты и обсуждение

Результаты для сплава ПГ-12Н-01 и двухслойного мультимодального покрытия, полученные при испытаниях в условиях сухого трения, приведены на рис. 7, 9, а на рис. 8, 10 представлены зависимости коэффициента трения от скорости наплавки.

Из рис. 7 видно, что в диапазоне скоростей наплавки 80–100 мм/мин объем изношенного материала для сплава ПГ-12Н-01 увеличивается, т.е. износостойкость уменьшается. Это происходит несмотря на уменьшение в этом диапазоне скоростей наплавки коэффициента трения (рис. 8). При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 120 мм/мин объем изношенного материала уменьшается, т.е. износостойкость увеличивается (рис. 7). Коэффициент трения в этом диапазоне скоростей наплавки уменьшается (рис. 8). При увеличении скорости наплавки со 120 до 140 мм/мин объем изношенного материала опять увеличивается (износостойкость уменьшается). Коэффициент трения для сплава ПГ-12Н-01 при этом тоже растет. Такие зависимости объясняются тем, что при малых скоростях наплавки и большом энерговыделении в покрытие образуется достаточно крупнозернистая, но плотная структура с равномерным распределением упрочняющих фаз, что обуславливает небольшой объем изношенного материала. При росте скорости наплавки с 80 до 100 мм/мин действует одновременно два фактора — уменьшение размера зерен в покрытии и уменьшение сцепления материала покрытия по границам зерен. Как видно, в этом диапазоне большее влияние оказывает второй фактор и объем изношенного материала растет, а коэффициент трения уменьшается. При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 120 мм/мин начинает преобладать действие уменьшения размера зерен, при этом объем изношенного материала уменьшается, а коэффициент трения практически не изменяется. При росте скорости наплавки до 140 мм/мин все больше начинает сказываться уменьшение сцепления материала покрытия по границам зерен из-за сильного уменьшения энерговыделения в покрытие. Величина объемного износа растет, коэффициент трения увеличивается.

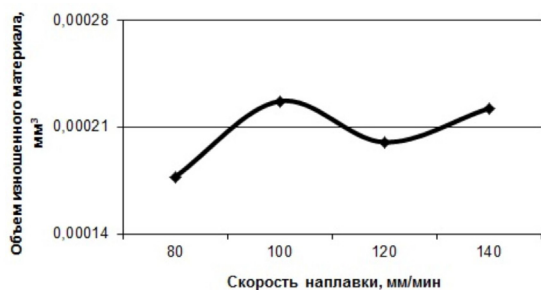


Рис. 7. Зависимость объема изношенного материала от скорости наплавки покрытия из сплава ПГ-12Н-01 в условиях сухого трения

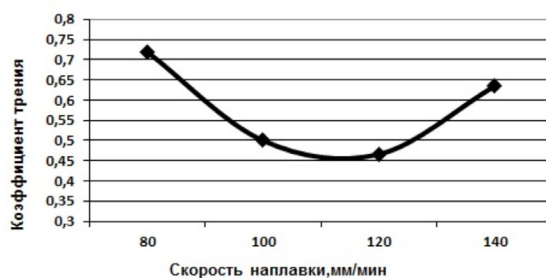


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от скорости наплавки покрытия из сплава ПГ-12Н-01 в условиях сухого трения

Зависимости объема изношенного материала и коэффициента трения от скорости наплавки для двухслойного композиционного покрытия (рис. 9 и 10) очень похожи на такие же зависимости для сплава ПГ-12Н-01. Скорее всего и действующие закономерности те же, за исключением более резкого уменьшения объема изношенного материала в диапазоне скоростей наплавки сплава/бронзы 110/160–120/170 мм/мин, которое объясняется тем, что бронзовая составляющая композиционного покрытия способствует протеканию процесса избирательного переноса и является твердой смазкой при трении [5].

Относительная износостойкость испытывавшихся при сухом трении материалов приведена на рис. 11, из которого видно, что относительная износостойкость двухслой-



Рис. 9. Зависимость объема изношенного материала от скорости наплавки двухслойного мультимодального покрытия в условиях сухого трения



Рис. 10. Зависимость коэффициента трения от скорости наплавки двухслойного мультимодального покрытия при сухом трении

ного композиционного покрытия выше, хотя и незначительно, износостойкости самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01, в то время как себестоимость композиционного покрытия значительно ниже.



Рис. 11. Относительная износостойкость испытывавшихся материалов при сухом трении

На рис. 12–13 представлены зависимости величины износа на 1000 м пути от нагрузки на контртело для покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и двухслойного мультимодального покрытия при трении в условиях граничной смазки. Из рис. 12 видно, что для покрытия из сплава ПГ-12Н-01 при увеличении нагрузки на контртело со 120 Н до 240 Н происходит незначительное увеличение величины износа, при дальнейшем увеличении нагрузки до 360 Н величина износа резко увеличивается в 1,8–2,8 раза. Т.е. в данном случае величина нагрузки при трении до момента наступления схватывания (120–240 Н) влияет на интенсивность процессов определяющих износ в небольшой степени, т.к. это явление связано в основном с изменением величины и интенсивности пластической деформации поверхностных слоев покрытия. И только после достижения критических значений нагрузки (240–360 Н) она начинает оказывать резкое влияние на величину износа, что связано с переходом к износу схватыванием [6].

Рис. 12 позволяет также оценить влияние скорости наплавки на величину износа сплава ПГ-12Н-01 при трении в условиях граничной смазки. Из него видно, что величина износа при нагрузке на контртело 120 и 240 Н выше для покрытия нанесенного при скорости наплавки 120 мм/мин по сравнению со скоростью наплавки 100 мм/мин в 1,4–1,6 раза, что связано меньшим сцеплением зерен в покрытии для скорости 120 мм/мин.

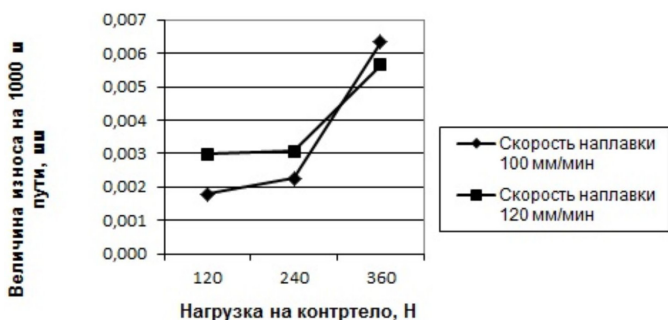


Рис. 12. Зависимость величины износа на 1000 м пути от нагрузки на контртело для покрытия из сплава ПГ-12Н-01 при граничной смазке

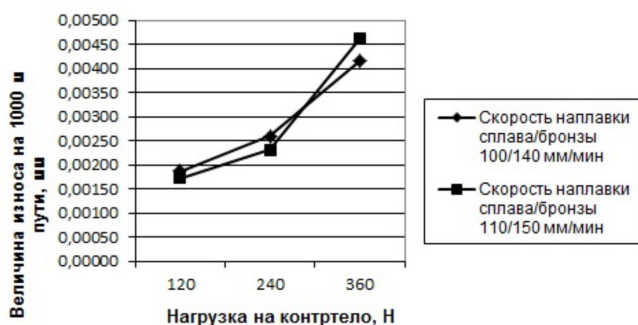


Рис. 13. Зависимость величины износа на 1000 м пути от нагрузки на контртело для двухслойного мультимодального покрытия при граничной смазке

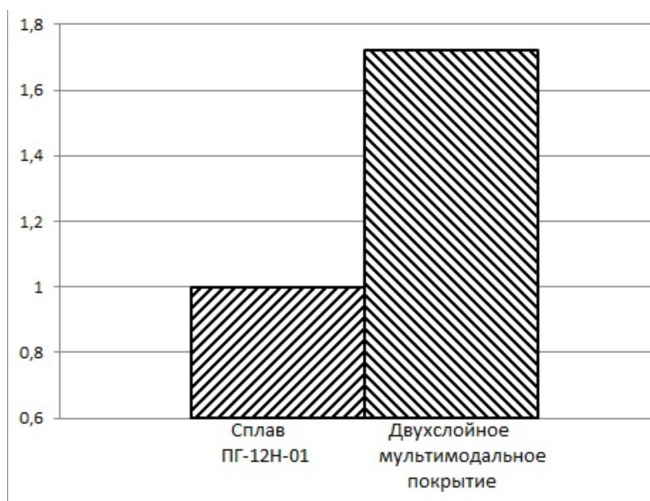


Рис. 14. Относительная износостойкость испытывавшихся материалов при граничном трении

из сплава ПГ-12Н-01 и двухслойного мультимодального покрытия при трении в условиях граничной смазки. Из этого рисунка видно, что в условиях граничной смазки более высокой износостойкостью обладает двухслойное мультимодальное покрытие. Его износостойкость превышает износостойкость самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01.

Однако, при нагрузке на контртело 360 Н величина износа покрытия нанесенного при скорости наплавки 100 мм/мин уже в 1,12 раза выше величины износа покрытия, нанесенного при скорости наплавки 120 мм/мин. Последнее скорее всего связано с тем, что при скорости наплавки 120 мм/мин покрытие из сплава ПГ-12Н-01 имеет более мелкозернистую и более износостойкую микроструктуру.

На рис. 13 приведены зависимости величины износа на 1000 м пути от нагрузки на контртело для двухслойного мультимодального покрытия. Из них видно, что при увеличении нагрузки на контртело со 120 до 240 Н величина износа для обеих скоростей наплавки возрастает в 1,34–1,39 раза. Величина износа покрытия, наплавленного при скорости наплавки 100/140 мм/мин при этом несколько выше, чем наплавленного при скорости наплавки 110/150 мм/мин. В этом случае, также как для покрытия из сплава ПГ-12Н-01 происходит износ без схватывания. При увеличении нагрузки на контртело до 360 Н величина износа на 1000 м пути резко возрастает для обеих скоростей наплавки в 1,6–2,0 раза. В этом случае можно говорить о том, что происходит переход к износу схватыванием. При этой нагрузке величина износа покрытия, наплавленного при скорости наплавки 110/150 мм/мин уже превышает величину износа покрытия, наплавленного при скорости наплавки 100/140 мм/мин в 1,1 раза.

На рис. 14 представлена относительная износостойкость покрытий

Заключение

Таким образом установлено следующее:

— способ лазерной наплавки позволяет наносить мультимодальные полосчатые покрытия из разнородных металлических материалов с чередованием валиков в горизонтальном и вертикальном направлении в поперечном сечении покрытия, а также на поверхности покрытия;

— в мультимодальном полосчатом покрытии, полученном чередованием валиков самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 наблюдается периодичность изменения микротвердости в поперечном сечении покрытия в направлении параллельно основе и по поверхности покрытия;

— испытания на износостойкость покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и мультимодального полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в условиях сухого трения показали, что зависимости объема изношенного материала от скорости наплавки для сплава ПГ-12Н-01 и двухслойного композиционного покрытия весьма похожи, на них имеются области увеличения и области уменьшения объема изношенного материала, связанные с действием двух факторов, изменением размера зерен и изменением силы сцепления материала покрытия по границам зерен, зависящих от количества удельной энергии, поглощаемой покрытием. При этом для мультимодального покрытия накладывается влияние еще одного фактора — наличия бронзовой составляющей, которая способствует протеканию процесса избирательного переноса и играет роль твердой смазки. Также похожи и зависимости коэффициента трения от скорости наплавки, скорее всего на изменение коэффициента трения влияют те же факторы, что и на объем изношенного материала. Следует отметить, что области наименьших коэффициентов трения и наименьшего объемного износа на зависимостях совпадают. Относительная износостойкость двухслойного мультимодального покрытия при сухом трении незначительно превышает износостойкость сплава ПГ-12Н-01.

— испытания на износостойкость тех же покрытий в условиях граничной смазки показали, что при изменении нагрузки на контртело от 120 до 240 Н происходит незначительный рост величины износа, однако при дальнейшем увеличении нагрузки на контртело до 360 Н, износ достаточно резко возрастает, причем для самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 этот рост гораздо более выражен. Тем не менее для обоих материалов на этом участке происходит переход к износу схватыванием. Также установлено, что при нагрузке на контртело от 120 до 240 Н для сплава ПГ-12Н-01 большую величину износа показывают покрытия нанесенные при большей скорости наплавки, имеющие меньшее сцепление материала по границам зерен. Однако, при нагрузке на контртело 360 Н большую величину износа уже имеет покрытие, нанесенное при меньшей скорости наплавки, которое имеет более крупнозернистую микроструктуру. Для двухслойного мультимодального покрытия из-за действия механизма избирательного переноса все происходит с точностью до наоборот. Относительная износостойкость двухслойного композиционного покрытия в 1,7 раза выше износостойкости самофлюсующегося сплава, что особенно важно, если учесть, что себестоимость двухслойного композиционного покрытия практически в 2 раза ниже себестоимости сплава ПГ-12Н-01, который в свое время был разработан, как высокоизносостойкий материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ratajski J., Gilewicz A., Bartosik P., Szparaga L. Mechanical properties of antiwear Cr/CrN multimodule coatings / Archives of Materials Science and Engineering, 2015, vol. 75, iss. 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, iss. 3, pp. 27–43.
3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок/ Под ред. В.Я. Панченко. — М.: Физматлит, 2009. — 664 с.
4. Шишковский, И.В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий/И. В. Шишковский. — М.: Физматлит, 2009. — 424 с.
5. Берсенев В. М. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения и износа/В. М. Берсенев// Физическая инженерия поверхностей. — 2004, Т. 2, № 4. — С. 214–219.
6. Аксенов, А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях / А. Ф. Аксенов. — М.: Машиностроение, 1977. — 152 с.

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, vol. 75, iss. 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, iss. 3, pp. 27–43.
3. Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamentalnykh issledovanij i prikladnykh razrabotok [Laser technologies of material processing: modern problems of fundamental research and applied developments]. edit. V. Ya. Panchenko, Moscow, Fizmatlit, 2009, 664 p. (in Russian)
4. Shishkovskij I. V. Lazernyj sintez funktsionalno-gradientnykh mezostruktur i ob'iomnykh izdelij [Laser synthesis of functional gradient mesostructures and three-dimensional products]. Moscow, Fizmatlit, 2009, 424 p. (in Russian)
5. Bersenev V. M. Vliianie mnogokomponentnykh i mnogoslojnykh pokrytij na protsessy trenia i iznosa [Influence of multicomponent and multilayer coatings on friction and wear processes]. Fizicheskaia inzheneriia poverkhnostej, 2004, vol. 2, iss. 4, pp. 214–219. (in Russian)
6. Aksionov A. F. Trenie i iznashivanie metallov v uglevodorodnykh zhidkostiakh [Friction and wear of metals in hydrocarbon liquids]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 152 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 20.04.17