ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Н.В., Фролов И.С., Фролов Ю.И. Анализ тепловых моделей взаимодействия частицы покрытия с основой при плазменном формировании покрытий / Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Тезисы докл. междун. науч.-техн. конф. – Мн.: Бизнесофсет, 2016. – С.136-139.

2. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977. — 184 с.

3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

4. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Проблемы теплообмена. — М.: Атомиздат, 1967. — С. 41-96.

5. Кучугурный Ю.П., Аксиченко В.И. О начальной стадии конденсации высокоэнтальпийного потока пара на металлическую поверхность // Взаимодействие атомных частиц с твердым телом: Материалы 7-ой Всесоюз. конф. — Минск, 1984. — Ч. 3. — С. 180-181.

6. Осаждение из газовой фазы / Под ред. К. Пауэлла. — М.: Атомиздат, 1970. — 472 с.

УДК 621.791.72

Шелег В.К., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ И КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Показана возможность формирования мультимодальных покрытий из разнородных материалов методами лазерной наплавки и плазменного напыления. Исследована износостойкость мультимодальных покрытий в сравнении с износостойкостью покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля. Установлены преимущества мультимодальных покрытий.

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. Эти свойства лазерной наплавки дают возможность создавать с ее помощью мультимодальные покрытия, состоящие из полосчатых слоев, полученных чередованием материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Мультимодальные покрытия также могут быть получены комбинированием технологий лазерной наплавки и газотермического напыления, например плазменного, напыления, когда с помощью лазерной наплавки в плазменном покрытии создается

сеть армирующих валиков из материала, отличного от материала плазменного покрытия. Такие технологии создания мультимодальных покрытий могут быть использованы как для упрочнения новых деталей, так и для восстановления изношенных поверхностей с получением хороших прочностных свойств [3, 4].

В работе исследованы два метода создания мультимодальных покрытий: метод нанесения лазерной наплавкой чередующихся валиков из различных материалов и метод армирования нанесенными лазерной наплавкой валиками газотермического покрытия. Поперечное сечение покрытия, полученного первым методом, показано на рисунке 1. На рисунке представлено двухслойное мультимодальное покрытие, полученное при чередовании наплавленных лазером валиков из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Поскольку второй слой покрытия сдвинут на шаг наплавки валиков относительно первого слоя, хорошо видно чередование валиков из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 в шахматном порядке.

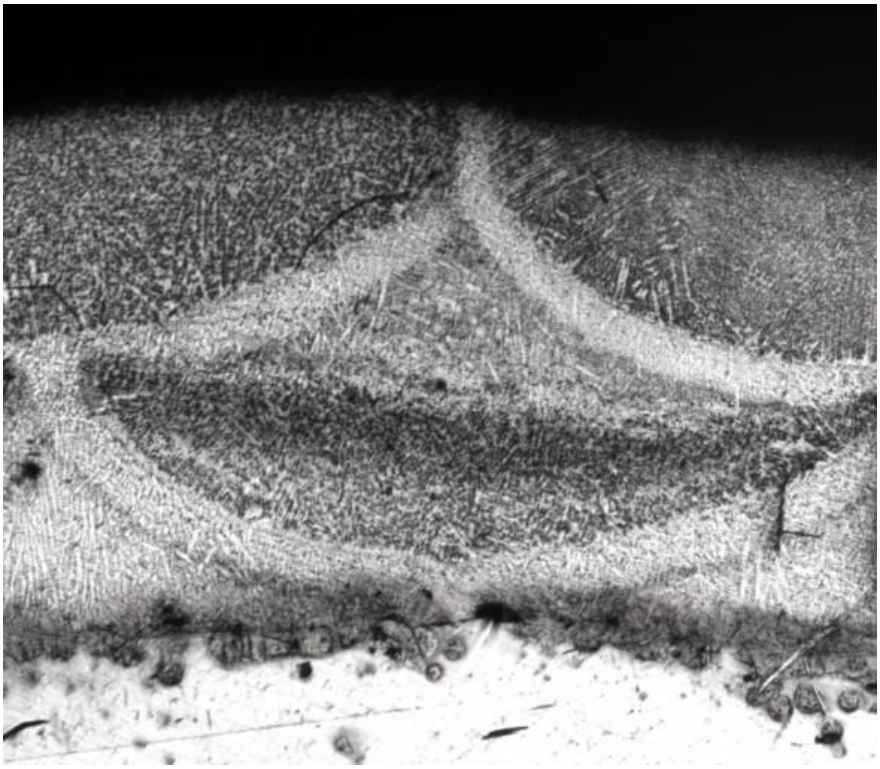


Рис. 1. Поперечное сечение двухслойного мультимодального покрытия

На рисунке 2 представлено поперечное сечение покрытия, полученного вторым методом. Покрытие получено нанесением на основу методом лазерной наплавки армирующих валиков из сплава ПГ-12Н-01 (справа и слева на рисунке 2) и плазменным напылением на полученную решетку покрытия из бронзы ПГ-19М-01.

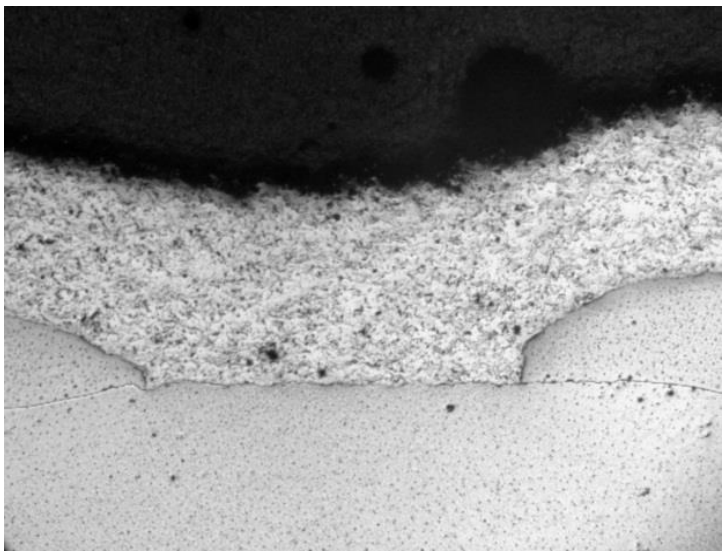


Рис. 2. Поперечное сечение армированного покрытия

Проведенные исследования показали, что в поперечном сечении обоих покрытий в направлении параллельно основе наблюдается периодичность изменения микротвердости. Для двухслойного мультимодального покрытия такая периодичность показана на рисунке 3. Вначале, когда измерения выполняются в левом валике из бронзы ПГ-19М-01, средняямикротвердость покрытия находится в пределах 4000 МПа, когда измерения проводятся в валике из сплава ПГ-12Н-01 наблюдается увеличение средней микротвердости до 5000 МПа, и, наконец, когда измерения проводятся в правом валике бронзы, средняя микротвердость опять уменьшается до 4000 МПа. Такие периодические изменения микротвердости происходят вдоль всего поперечного сечения мультимодального покрытия.Аналогичная картина наблюдается и в армированном покрытии (рисунок 4), отличия состоят только в величинах среднеймикротвердости. Когда микротвердость измеряется в участках плазменного покрытия из бронзы, ее средняя величина составляет 1500 МПа , при переходе в валик из сплава ПГ-12Н-01 средняя микротвердость составляет 5500 МПа, периодически изменяясь по всей ширине покрытия.



Рис. 3. Периодическое изменение микротвердости в поперечном сечении двухслойного мультимодального покрытия

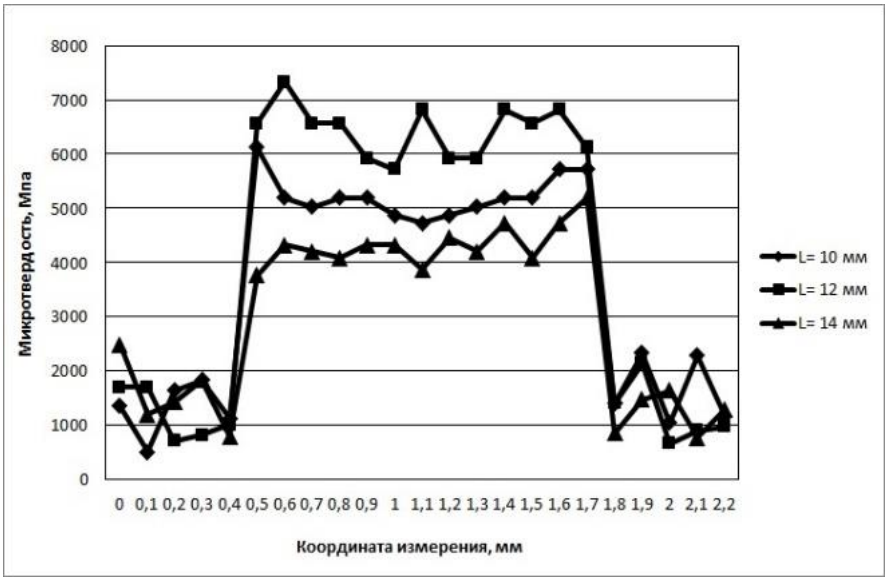


Рис. 4. Периодическое изменение микротвердости
в поперечном сечении армированного покрытия

В статье изучается износостойкость мультимодальных покрытий, полученных обоими описанными выше методами, а также влияние режимов нанесения покрытий на наблюдаемую величину износостойкости. Покрытия, получаемые первым методом, наносились на технологическом комплексе на базе CO_2 лазера непрерывного действия Комета 2 и координатного стола с системой числового программного управления. Армирующие валики при втором методе нанесения наплавлялись на том же технологическом комплексе, а напыление покрытия из бронзы производилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д.

Использовались два вида образцов из стали 45:

- для испытания в условиях сухого трения – размером 20 х 30 х 8 мм;
- для испытаний в условиях граничной смазки – ø 50 х ø15 х 12 мм.

Перед испытанием износостойкости поверхность полученных покрытий подвергалась шлифованию до Ra 1,6 мкм.

Испытания на износ в условиях сухого трения проводились на установке МИПТ. Метод испытания на данной установке основан на возвратно-поступательном движении контртела относительно образца по схеме «алмазный наконечник – плоскость». Сила нормального давления (действующая перпендикулярно контактирующим поверхностям) обеспечивалась набором грузов эталонных масс. Схема установки МИПТ представлена на рисунке 5. Контртело для испытаний на износ представляло собой цангу с закрепленным в ней алмазным наконечником типа Роквелл. Нормальная нагрузка при испытаниях 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 дорожек износа.

Объем изношенного материала рассчитывался по формуле:

$$V = \frac{1}{2} bhL, \qquad (1)$$

где V – объем изношенного материала, мм^3;

b – ширина дорожки износа, мм;

h – глубина дорожки износа, мм;

L– длина единичного прохода, мм.

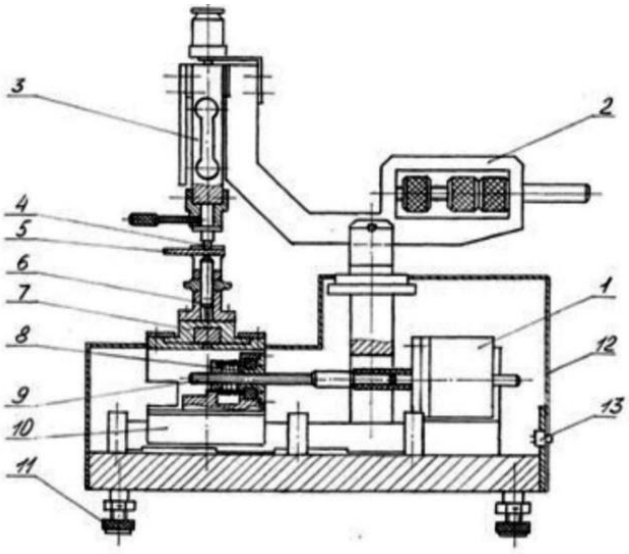


Рис. 5. Схема установки для испытания износостойкости
в условиях сухого трения:
1 – двигатель шаговый, *2* – коромысло, *3* – датчик веса, совмещенный с датчиком силы трения,
4 – индентор, *5* – образец, *6* – механизм фиксации образца, *7*- каретка поперечной подачи, *8* – гайка,
9 – винт ходовой, *10* – каретка продольной подачи, *11* – винт установочный, *12* – корпус,
13 – разъемы электрические.

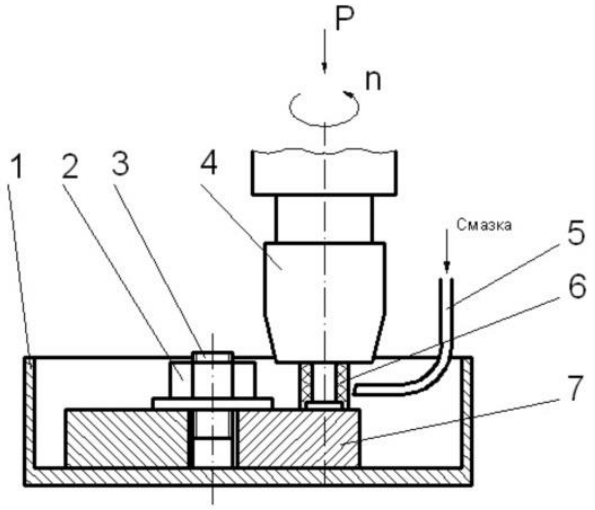


Рис. 6. Схема узла трения для испытания износостойкости
в условиях граничного трения

Испытания на износ в условиях граничной смазки проводили на машине трения, изготовленной на базе настольного сверлильного станка. Схема узла трения показана на рисунке 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 индустриальное марки И-20. 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. Для получения сопоставимых величин износа для разных материалов, для каждого материала определялась величина износа на 1000 м пути трения по формуле:

$$I_t = 1000\frac{I}{\pi ndt}, \qquad (2)$$

где I_t - величина износа на 1000 м пути трения;

I – средняя величина износа по результатам измерений, мм;

n – скорость вращения шпинделя (n = 2300 об/мин);

d – средний диаметр твердосплавной втулки контртела (d=0,016 м);

t – время испытаний, мин.

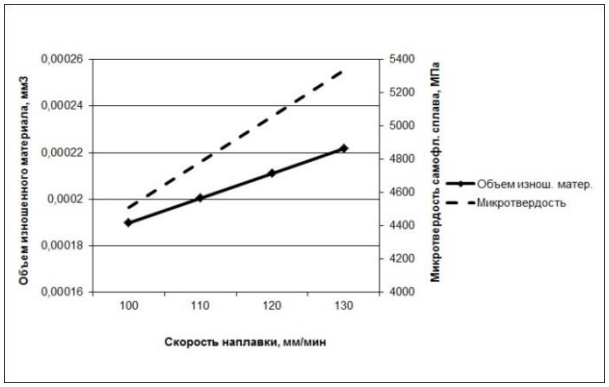


Рис. 7. Зависимость объема изношенного материала от скорости наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01 для двухслойного мультимодального покрытия в условиях сухого трения

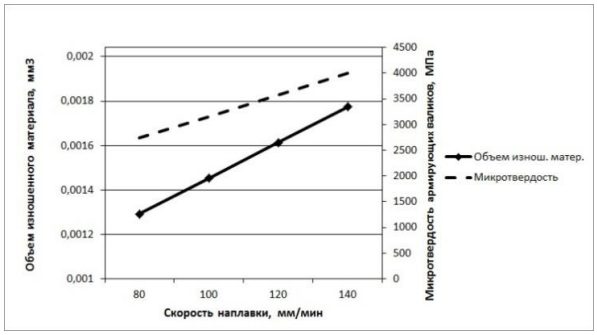


Рис. 8. Зависимость объема изношенного материала от скорости наплавки армирующих валиков для армированного покрытия в условиях сухого трения

Результаты испытаний в условиях сухого трения для двухслойного мультимодального покрытия показаны на рисунке 7, а для армированного покрытия – на рисунке 8. Показанные на указанных рисунках результаты получены путем линейной интерполяции по методу наименьших квадратов с помощью редактора электронных таблиц Excel.

Из рисунка 7 видно, что в исследованном диапазоне скоростей наплавки объем изношенного материала для двухслойного мультимодального покрытия при сухом трении увеличивается с увеличением скорости наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01. Такая зависимость объясняется тем, что при малых скоростях наплавки и большом энерговкладе в покрытие образуется достаточно крупнозернистая и плотная структура фазы сплава ПГ-12Н-01, что обусловливает небольшой объем изношенного материала. С ростом скорости наплавки, несмотря на измельчение структуры, постепенно начинает все больше сказываться уменьшение сцепления материала фазы ПГ-12Н-01 по границам зерен из-за уменьшения энерговклада в покрытие, при этом величина объемного износа растет. Здесь же на рисунке 7 приведена зависимость средней микротвердости фазы сплава ПГ-12Н-01 в мультимодальном покрытии от скорости наплавки. Видно, что при небольших скоростях наплавки микротвердость фазы сплава ПГ-12Н-01 достаточно низкая, покрытие достаточно вязкое, что в сочетании с крупнозернистой структурой определяет небольшую величину объемного износа. При росте скорости наплавки, микротвердость фазы сплава ПГ-12Н-01 увеличивается следовательно возрастает хрупкость, что в сочетании с уменьшением сцепления материала фазы ПГ-12Н-01 по границам зерен приводит к росту величины объемного износа.

Результаты для армированного покрытия (рисунок 8) также показывают, что в исследованном диапазоне скоростей наплавки армирующих валиков происходит рост величины износа при увеличении скорости наплавки. При этом микротвердость материала армирующих валиков, как и в предыдущем случае, увеличивается с ростом скорости наплавки. Здесь видимо действуют такие же закономерности как в случае двух-

слойного мультимодального покрытия. Однако, в случае армированного покрытия увеличение величины объемного износа составляет 37 % от величины износа при минимальной скорости, а для мультимодального покрытия только 17 %. Кроме того, величина объемного износа для мультимодального покрытия имеет гораздо меньшее значение, чем у армированного покрытия. Последнее обстоятельство объясняется тем, что второй фазой в мультимодальном покрытии являются наплавленные валики из бронзы ПГ-19М-01, а в армированном покрытии – напыленное плазменным методом покрытие из той же бронзы, имеющее гораздо более низкую плотность и меньшую связь между частицами. Поэтому материал валиков из бронзы в мультимодальном покрытии не подвергается выкрашиванию, а способствует протеканию процесса избирательного переноса и является твердой смазкой при трении [5], что подтверждается полученными результатами.

На рисунке 9 представлена относительная износостойкость покрытий нанесенных различными способами при сухом трении. Из рисунка 9 видно, что при сухом трении наиболее низкую износостойкость имеют наплавленное лазером покрытие из бронзы (1) и армированное покрытие (0,88). Низкой износостойкостью обладает также однослойное мультимодальное покрытие (1,88). Двухслойное мультимодальное покрытие, между тем, имеет при сухом трении износостойкость (6,57) равную износостойкости наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 (6,55), в то время как его себестоимость значительно ниже. Таким образом, при сухом трении двухслойное мультимодальное покрытие, учитывая его низкую себестоимость, может быть хорошей альтернативой наплавленному лазером покрытию из весьма износостойкого, но дорогого самофлюсующегося сплава на основе никеля. Что касается армированного покрытия, то при сухом трении его использование не имеет перспективы.

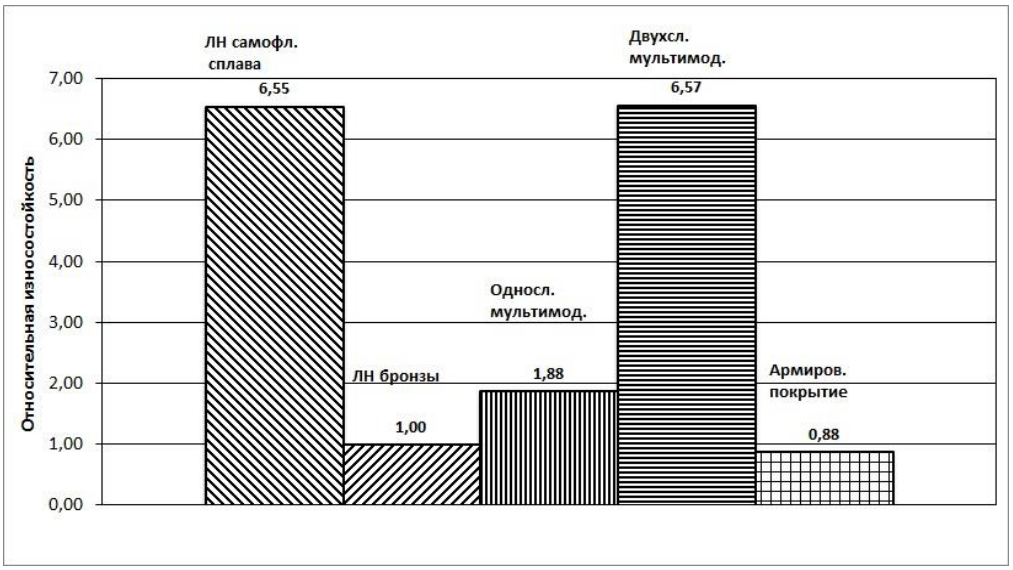


Рис. 9. Относительная износостойкость покрытий в условиях сухого трения

Результаты испытаний при трении в условиях граничной смазки для двухслойного мультимодального покрытия показаны на рисунке 10, а для армированного покрытия – на рисунке 11. Зависимости величины износа от скорости наплавки, показанные на рисунках 10 и 11 получены линейной интерполяцией по методу наименьших квадратов с помощью редактора электронных таблиц Excel.

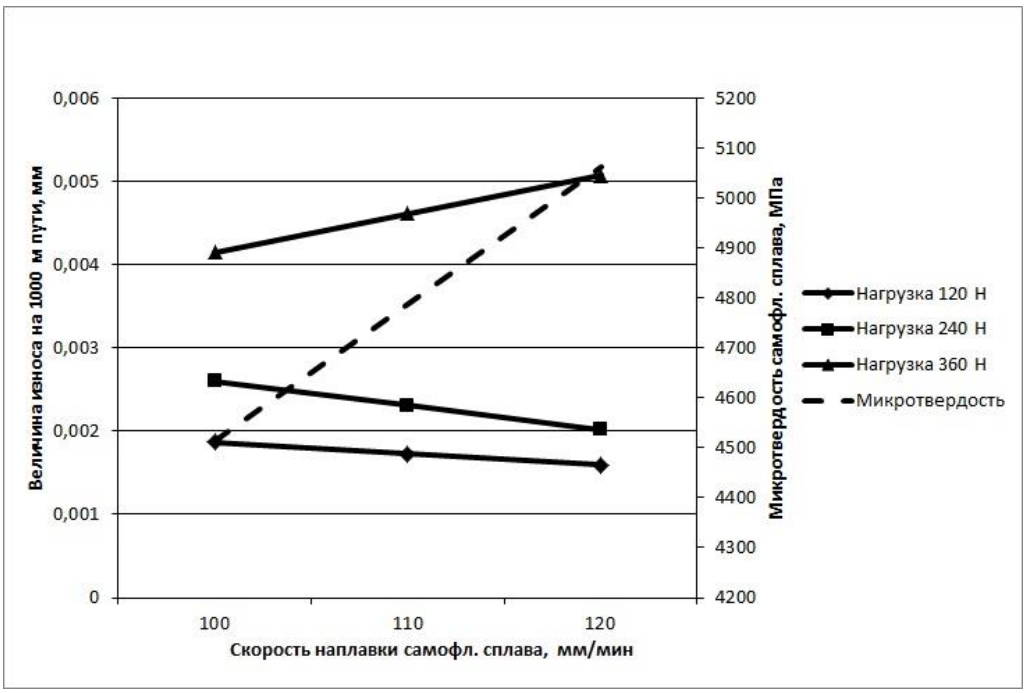


Рис. 10. Зависимость величины износа от скорости наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01 для двухслойного мультимодального покрытия в условиях трения с граничной смазкой

Результаты, приведенные на рисунке 10, показывают, что для двухслойного мультимодального покрытия в условиях трения с граничной смазкой с увеличением скорости наплавки валиков самофлюсующегося сплава величина износа уменьшается при малых и средних нагрузках на контртело (120 и 240 Н). При большой нагрузке на контртело (360 Н), наоборот, происходит увеличение величины износа с увеличением скорости наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01. Полученные результаты показывают, что в случае трения в условиях граничной смазки значительную роль играют процессы избирательного переноса. Если в условиях сухого трения увеличение твердости валиков из сплава ПГ-12Н-01 (с увеличением скорости наплавки) приводило к увеличению износа, то в условиях граничной смазки увеличившаяся хрупкость и уменьшенное сцепление между частицами в валиках самофлюсующегося сплава не способствуют увеличению износа. Наоборот, действие механизма избирательного переноса за счет наличия бронзовой фазы мультимодального покрытия приводит к уменьшению величины износа при росте скорости наплавки (нагрузки 120 и 240 Н)[5]. Только при большой нагрузке на контртело (360 Н) действие механизма избирательного переноса уже не может компенсировать уменьшение сцепления между зернами в валиках сплава ПГ-12Н-01 и при увеличении скорости наплавки величина износа растет.

Для армированного покрытия (рисунок 11) при любой нагрузке на контртело с увеличением скорости наплавки наблюдается уменьшение величины износа. Что в корне отличается от результатов, полученных при сухом трении, когда объем изношенного материала возрастал при увеличении скорости наплавки. При этом величина износа для армированного покрытия в среднем больше величины износа для двухслойного мультимодального покрытия в 2,2 раза присопоставимых скоростях наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01.Таким образом, несмотря на увеличение микротвердости (и хрупкости) материала валиков из сплава ПГ-12Н-01 при увеличении скорости наплавки с одновременным уменьшением сцепления материала валиков по границам зерен наблюдается уменьшение величины износа при увеличении скорости наплавки валиков из сплава ПГ-12Н-01. Это связано, скорее всего, с наличием брон-

зовой матрицы армированного покрытия, что приводит в действие механизм избирательного переноса, а также с тем, что пористость плазменного покрытия из бронзы является накопителем смазки, что облегчает процесс граничного трения, обеспечивая постоянное присутствие смазки в зоне трения [5].

На рисунке 12 показаны зависимости величины износа от нагрузки на контртело для двухслойного мультимодального покрытия, для наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и армированного покрытия. Видно, что для двухслойного мультимодального покрытия и покрытия из самофлюсующегося сплава, величина нагрузки при трении до момента наступления схватывания охватывает диапазон 120 – 240 Н и, при этом, влияет на интенсивность процессов, определяющих износ в небольшой степени, так как 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) нагрузка начинает оказывать резкое влияние на величину износа, что связано с переходом к износу схватыванием [6]. Для армированного покрытия уже в пределах диапазона нагрузок 120 – 240 Н наблюдается интенсивный износ, величина износа возрастает в 2,2 раза, что позволяет говорить об износе схватыванием. В диапазоне нагрузок 240 – 360 Н величина износа возрастает еще в 3,6 раза. Таким образом, можно говорить, что для армированного покрытия износ схватыванием происходит во всем исследованном диапазоне нагрузок. И все это несмотря на то, что при нагрузке 120 Н армированное покрытие имеет величину износа меньше, чем два других покрытия. В целом, во всем диапазоне нагрузок наименьшая величина износа наблюдается у двухслойного мультимодального покрытия.

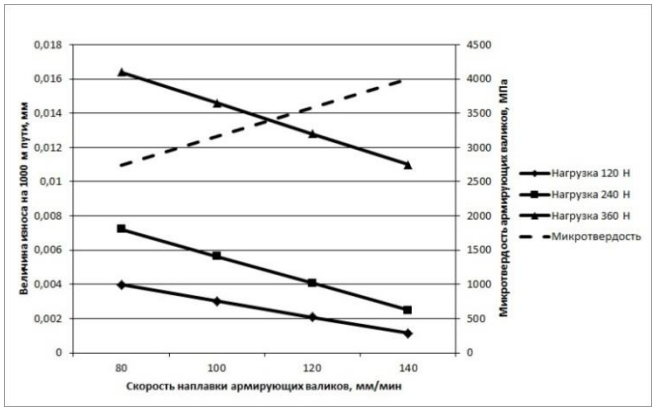


Рис. 11. Зависимость величины износа от с
корости наплавки армирующих валиков
для армированного покрытия в условиях трения
с граничной смазкой

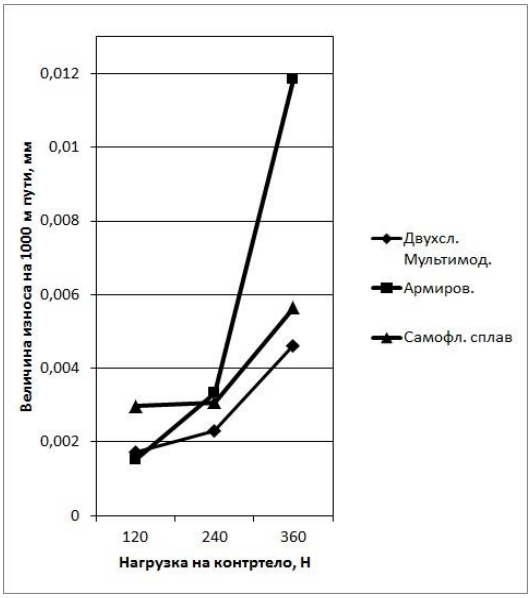


Рис. 12. Зависимость величины износа
покрытий от нагрузки на контртело
в условиях трения с граничной смазкой

На рисунке 13 представлена относительная износостойкость покрытий, нанесенных различными способами в условиях трения с граничной смазкой при нагрузке на контртело 360 Н.

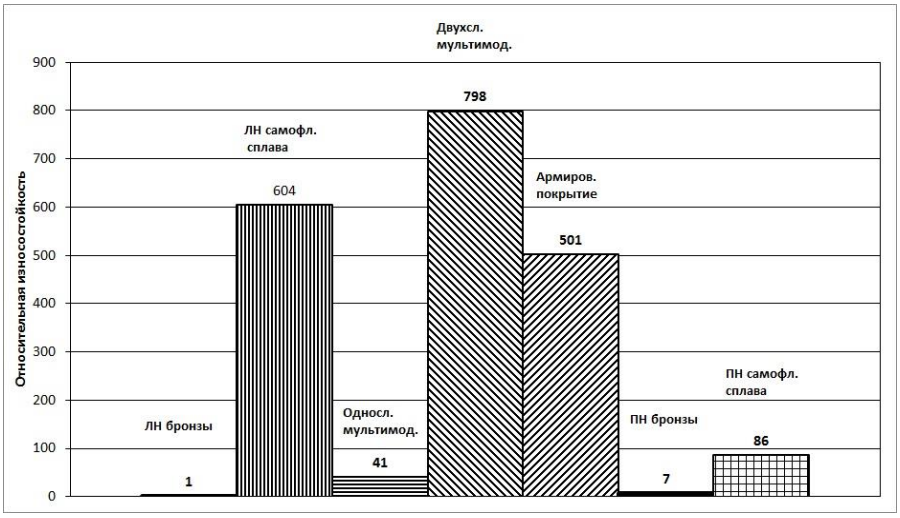


Рис. 13. Относительная износостойкость покрытий в условиях граничной смазки

При трении в условиях граничной смазки наиболее низкую относительную износостойкость имеют наплавленное лазером покрытие из бронзы (1), плазменное покрытие из бронзы (7) и однослойное мультимодальное покрытие (41). Несколько выше износостойкость нанесенного плазменным напылением сплава ПГ-12Н-01 (86). Армированное покрытие имеет износостойкость (501), которая позволяет рекомендовать его в качестве альтернативы плазменному покрытию из сплава ПГ-12Н-01. Износостойкость двухслойного мультимодального покрытия (798) в 1,3 раза превышает износостойкость наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава (604). Таким образом, при трении в условиях граничной смазки двухслойное мультимодальное покрытие, имеющее достаточно низкую себестоимость, может успешно заменять наплавленное лазером покрытие из износостойкого, но дорогого самофлюсующегося сплава на основе никеля. Кроме того, в этих условиях трения армированное покрытие, имеющее относительную износостойкость 501 и удовлетворительную себестоимость, может быть хорошей альтернативой плазменному покрытию из сплава ПГ-12Н-01, имеющему относительную износостойкость 86.

Выводы

1. В мультимодальных покрытиях полученных лазерной наплавкой чередованием валиков из различных материалов и армированием газотермического покрытия лазерной наплавкой наблюдается периодичность изменения микротвердости в поперечном сечении покрытия в направлении параллельно основе и по поверхности покрытий.

2. В случае сухого трения зависимости объема изношенного материала от скорости наплавки для обоих видов покрытий похожи, с ростом скорости наплавки происходит рост объема изношенногоматериала, что связано с ростом микротвердости материала валиков из сплава ПГ-12Н-01 и уменьшением, одновременно, сцепления материала фазы ПГ-12Н-01 по границам зерен. Величина объема изношенного материала для двухслойного мультимодального покрытия при этом гораздо ниже, чем для армированного покрытия, что обусловлено более выраженным протеканием процесса избирательного переноса для двухслойного мультимодального покрытия.

3. При сухом трении двухслойное мультимодальное покрытие имеет относительную износостойкость намного больше износостойкости армированного покрытия, 6,57 против 0,88. Более того, его износостойкость практически равна износостойкости наплавленного лазером покрытия из самофлюсующегося сплава на основе никеля ПГ-12Н-01 (6,57 против 6,55). Если учесть, что себестоимость нанесения двухслойного мультимодального покрытия практически в 2 раза меньше себестоимости наплавленного лазером покрытия из сплава ПГ-12Н-01, такое покрытие в условиях сухого трения

может с успехом заменить покрытие из сплава ПГ-12Н-01. Низкая износостойкость при сухом трении армированного покрытия исключает его использование в этом случае.

4. В отличие от случая сухого трения, при трении в условиях граничной смазки при малых нагрузках на контртело величина износа двухслойного мультимодального покрытия с ростом скорости наплавки уменьшается. И только при большой нагрузке на контртело наблюдается рост величины износа с увеличением скорости наплавки, что показывает значительную роль механизма избирательного переноса при этом виде трения.

Армированное покрытие при трении с граничной смазкой показывает очень хорошие результаты. Для этого покрытия при любой нагрузке наблюдается уменьшение величины износа с ростом скорости наплавки, несмотря на рост при этом микротвердости фазы сплава ПГ-12Н-01, что непосредственно обусловлено действием механизма избирательного переноса.

5. Зависимости величины износа от нагрузки на контртело при граничной смазке показывают, что для двухслойного мультимодального покрытия и для наплавленного лазером покрытия из сплава ПГ-12Н-01 в диапазоне нагрузок 120-240 Н происходит износ без схватывания, и только при нагрузке выше 240 Н эти покрытия переходят к износу схватыванием. Для армированного покрытия износ схватыванием наблюдается во всем диапазоне нагрузок на контртело.

6. При трении в условиях граничной смазки двухслойное мультимодальное покрытие имеет относительную износостойкость в 1,3 раза выше износостойкости наплавленного лазером сплава ПГ-12Н-01 (798 против 604), с учетом его более низкой себестоимости это покрытие более эффективно в условиях трения с граничной смазкой.

Износостойкость армированного покрытия при граничной смазке ниже износостойкости двухслойного мультимодального покрытия (501 против 798). Тем не менее это покрытие имеет износостойкость выше износостойкости плазменного покрытия из сплава ПГ-12Н-01 (501 против 86) и может успешно его заменять.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ratajski, J. Mechanical properties of antiwear Cr/CrNmultimodule 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// ProblemyEksploatacji – Maintenance Problems. – 2014. – I. 3. – P. 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.