

Рис. 8. Диаграмма пористости покрытий

Открытая пористость полученных покрытий, не снижая прочности покрытия ввиду ее небольшой величины (менее 5%), способствует сохранению смазки в условиях граничного трения. Кроме того, из диаграммы видно, что на величину пористости оказывает немаловажное влияние и режимы напыления, так покрытия напыленные на оптимизированных режимах имеют пористость в 1,5 раза ниже, чем покрытия напыленные на рекомендованных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1.ГОСТ 28377-89 «Порошки для газотермического напыления и наплавки. Типы». – Введ 01.01.91.

УДК 621.793

Спиридонов Н.В., Соколов И.О., Володько А.С., Пилецкая Л.И.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

На основе исследования износостойкости предложены материалы для композиционных газотермических покрытий и последующего легирования, а также технологии формирования упрочненных слоев.

К основным особенностям использования высокоэнергетических источников, привлекающих внимание технологов, относятся – высокая концентрация и локальность энергии, вводимой в зону обработки. Это дает возможность проведения необходимой термообработки только определенной поверхностной зоны без объемного разогрева всей детали и точно дозировать энергозатраты. Кроме того, к достоинствам таких видов обработки относятся простота транспортировки излучения к рабочей зоне (особенно у волоконных лазеров с гибким подводом энергии) и хорошая возможность автоматизации процесса.

Концентрированные потоки энергии применяются для упрочнения и восстановления деталей машин как в отдельных технологиях (в частности, лазерная закалка, легирование, наплавка), так и в комплексных технологиях (напыление с последующей лазерной обработкой).

Эти методы существенно расширяют границы использования упрочняющей и восстанавливающей технологий как в отношении упрочняемых материалов, так и материалов покрытий.

Лазерное излучение является эффективным источником концентрированной энергии и характеризуется рядом уникальных свойств: высокой монохроматичностью, значительной степенью временной и пространственной когерентности, узкой направленностью своего распространения [1]. Благодаря когерентности лазерного излучения, оно может быть сфокусировано в пятне с очень высокой плотностью потока энергии.

В зависимости от интенсивности и длительности воздействия различают следующие стадии взаимодействия излучения с материалом при лазерной обработке: подвод лазерного излучения, поглощение светового потока и передача его энергии твердому телу, нагрев материала без видимого разрушения, расплавление материала, испарение и вымывание продуктов разрушения, остывание материала после окончания лазерного воздействия. Как показали многочисленные эксперименты и теоретические расчеты [2], при плотностях потока энергии, обеспечивающих плавление твердого вещества, характерные особенности лазерного излучения практически не влияют на процесс взаимодействия с металлами. Главную роль в создании необходимой зоны нагрева для обработки играют только энергетические характеристики: энергия, мощность, пространственная плотность энергии и мощности, длительность импульса излучения или время воздействия, структура излучения по пространству и времени, физические свойства обрабатываемого материала (коэффициент отражения поверхности, длина волны излучения, температуропроводность, теплопроводность, удельная теплота плавления и испарения, температура плавления и испарения, плотность материала и т.п.) [3].

Процессы, происходящие при лазерном воздействии, определяются, в основном, теплофизическими свойствами обрабатываемых материалов и величиной энергозатрат. Регулируя плотность мощности излучения и время воздействия при конечных величинах теплопроводности обрабатываемых материалов, можно задавать любые энергетические условия. При сравнительно низкой плотности потока (до 10^3 Вт/см²) лазерное излучение служит, в основном, для локального нагрева поверхности металлов без оплавления. С повышением значения этой величины примерно до 10^6 Вт/см² начинается плавление, а при плотности мощности излучения, превышающей 10^8 Вт/см², металлы разрушаются вследствие испарения [3]. Скорости нагрева и охлаждения при этом на несколько порядков выше, чем в широко распространенных процессах термообработки и составляют $10^5 \dots 10^6$ град/с [4]. Благодаря этому скорость прохождения критических точек и температурных интервалов, в которых в сталях и сплавах совершаются структурные превращения, приближается к предельным скоростям протекания собственно процессов.

Особенности концентрированных потоков энергии позволяют осуществлять различные процессы размерной и упрочняющей обработки, выполнять поверхностную обработку без разогрева внутренних слоев материалов и объемного нагрева деталей, избежать нежелательных структурных превращений и деформаций основы; управлять структурообразованием – влиять на качественный и количественный состав, объемную плотность и дисперсность вторичных фаз, фиксировать метастабильные структуры, выявляя предельные свойства материалов, потенциально заложенные в их природе; проводить локальную обработку отдельных участков поверхности материала; обрабатывать труднодоступные участки поверхности деталей любой конфигурации.

Перспективным направлением применения концентрированных потоков энергии является лазерное легирование. Введение в поверхностный слой легирующих элементов в определенных количествах с последующей лазерной обработкой позволяет получить поверхностный слой детали с уникальными свойствами, что открывает возможность замены дорогостоящих высоколегированных сталей дешевыми конструкционными.

Лазерное легирование осуществляется при определенных параметрах обработки, из которых наиболее существенными являются плотность мощности и скорость сканирования лазерного луча [5].

Механизм лазерного легирования заключается в следующем. В поверхностном слое обрабатываемого материала протекает несколько процессов: сверхскоростной нагрев основного и легирующего материалов до образования жидкой фазы и лазерной плазмы над ее поверхностью; механическое перемешивание компонентов под действием гидродинамических сил и температурных градиентов; диффузия легирующих элементов в жидкой и твердой фазах; образование за счет мгновенного охлаждения пересыщенных твердых растворов и протекание в термодинамически неравновесных условиях «нестандартных» химических реакций. Основную роль при

этом играют механическое перемешивание и диффузия в жидкой фазе. Высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к образованию неравновесных твердых растворов с концентрацией легирующих элементов, значительно превышающей равновесную. Это может привести к значительному искажению кристаллической структуры и способствует поверхностному растрескиванию легированного слоя. Многообразию и сложности протекающих в зоне обработки физико-химических процессов исключает пока возможность точного прогнозирования, получаемых при этом фаз, структур и закономерностей их образования.

В настоящей работе лазерное легирование осуществлялось путем нанесения тонкого слоя обмазки с последующим его проплавлением совместно с материалом основы. Первостепенной задачей, возникающей при разработке такой технологии, является выбор оптимального состава обмазки, нанесение которой на упрочняемые поверхности обеспечивало бы формирование высокопрочных фаз в упрочняемой поверхности.

Для исследований были выбраны легирующие боросодержащие составы: карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид, обеспечивающие образование активных атомов насыщающего элемента – В; композиция 2: ПГ-10К-01+В; композиция 3: ПГ-12Н-03+В; композиция 4: ПР-Х4ГСР (50%)+ПГ-СР4 (50%)+В. Нанесение легирующих обмазок производилось на сталь 45 ГОСТ 1050-85 и ВЧ-50 ГОСТ 7293-85.

При выборе компонентов состава весьма важно проанализировать химизм образования активных атомов бора в условиях интенсивного нагрева.

Указанный анализ осуществлялся на основании расчетов температурной зависимости энергии Гиббса (изобарно-изотермического потенциала) реакций, протекающих в борировуемой обмазке в условиях скоростного нагрева в окислительной среде.

Расчет энергии Гиббса, в основном, производился в интервале температур 500...3000 К в связи с тем, что в процессе легирования бором наиболее вероятно контактное эвтектическое плавление (температура плавления эвтектики Fe-B составляет 1457 К, поэтому с учетом возможного перегрева легирующей обмазки и металла основы такой интервал температур является вполне достаточным для анализа.

Термодинамические расчеты показывают, что наряду с аморфным бором обмазка на основе смеси, состоящей из борного ангидрида и графита, может обеспечить получение активных атомов бора.

При использовании обмазок на основе B_4C образование активных атомов возможно лишь за счет реакции его диссоциации при температуре свыше 1100 К, что, очевидно, будет сказываться на эффективности процесса упрочнения.

В качестве связующего элемента был выбран декстриновый клей. Он хорошо растворяется в воде, обеспечивая возможность получения любой консистенции. При воздействии лазерного излучения происходит его интенсивное выгорание с образованием CO_2 и воды, которые удаляются в процессе обработки.

Легирование производилось при плотности мощности 70...100 кВт/см² и скорости перемещения луча 6,66 мм/с.

Проведенный металлографический анализ показал, что в случае использования обмазок на основе аморфного бора происходит эффективное образование легированного слоя. При этом толщина формируемых легированных зон достигала 0,4 мм.

При использовании в качестве основы для обмазки карбида бора наблюдалось интенсивное его выгорание в процессе обработки лазерным лучом. Борированные слои образовывались только при определенных плотностях мощности по периметру образующихся канавок. Толщина слоя в этом случае составляет около 10 мкм.

Анализ зон обработки, полученных при легировании с использованием обмазки, содержащей борный ангидрид с графитом, показал на появление наибольших структурных изменений в поверхностных слоях образца при содержании графита 40% по массе.

Лазерное легирование осуществлялось по двум технологиям.

По первой – лазерное легирование производилось путем нанесения тонкого слоя обмазки на образцы из стали 45 ГОСТ 1050 и высокопрочного чугуна ВЧ-50 ГОСТ 7293-85 с последующим его проплавлением совместно с материалом основы.

По второй – предварительно напыляли плазменным методом покрытие толщиной 1,5...2,0 мм и затем производили лазерное легирование нанесенного покрытия путем нанесения обмазки и последующего проплавления совместно с напыленным материалом.

В качестве легирующих материалов были выбраны:

- композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид;
- композиция 2 – ПГ-10К-01 + В;
- композиция 3 – ПГ12Н-03 + В;
- композиция 4 – ПР-Х4ГСР (50%) + ПГ-СР4 (50%) + В;
- композиция 5 – ВЧ-50;
- композиция 6 – сталь 40Х13.

Выбор в качестве основного компонента обмазки бора произведен на основании того, что он выполняет двойную функцию: служит для раскисления образующихся при напылении окисных пленок и является основой для образования упрочняющей боридной фазы. Рентгеноструктурный анализ показал, что введение в обмазку бора приводит к увеличению боридной фазы, в первую очередь, высших боридов никеля NiB , Ni_3B_4 и Ni_2B и боридов хрома – CrB , Cr_2B , Cr_3B_4 .

Плазменное напыление производилось на установке УПУ-3Д, лазерное легирование – на установке непрерывного действия «Комета-2», мощностью 1,5 кВт. Обмазки из указанных композиций наносились различной толщины. Толщина наносимой обмазки выбиралась такой, чтобы наряду с максимальной глубиной легированного слоя обеспечивались и высокие значения физико-механических свойств – твердости, износостойкости. При этом процесс легирования не должен переходить в наплавку. Малая толщина обмазки не обеспечивает заметного увеличения боридной фазы и, соответственно, требуемого упрочнения, большая вследствие ее низкой теплопроводности при воздействии луча лазера будет приводить к значительному перегреву, сопровождающемуся испарением и окислением. Эффективность при этом снижается еще и в результате потерь подводимой энергии. Толщина обмазки варьировалась в пределах 0,05...0,02 мм.

Результаты проведенных исследований показывают, что с увеличением толщины обмазки глубина легирования уменьшается, а твердость растет. При толщине обмазки свыше 0,15 мм происходит процесс наплавки. Было установлено, что наиболее оптимальной толщиной обмазки является 0,1...0,15 мм, обеспечивающая наиболее высокий уровень физико-механических свойств.

Использование легирующих обмазок позволяет снизить трещинообразование, возникающее при скоростных методах оплавления самофлюсующихся сплавов, и в особенности, на основах из нержавеющей сталей.

На качество легированного слоя влияет исходная шероховатость поверхности и метод подготовки поверхности. Исследовались дробеструйная, лезвийная и шлифовальная виды обработки поверхности основы. Предварительная дробеструйная и лезвийная обработка обеспечивают более высокую степень однородности легированных слоев. При этом дробеструйная обработка позволяет более глубокое проплавление слоя (до 0,45...0,5 мм), что объясняется выделением большей избыточной энергии и, соответственно, интенсифицирующей процесс распространения ванны расплава.

Высота и шаг микронеровностей исходной поверхности влияют следующим образом. Чем быстрее температура плавления достигает вершины микрорельефа, тем раньше начинается процесс образования жидкой фазы. Чем меньше шаг микронеровностей, тем больше выступов попадает в зону плавления и тем больше будет образовываться зон плавления.

С другой стороны, возрастание высоты микронеровностей и уменьшение шага приводят к увеличению доли основного металла в легированном слое и снижению твердости покрытия.

На глубину легирования большое влияние оказывают применяемая оптика и скорость относительного перемещения лазерного луча.

Изучалась проплавливающая способность лазерного луча на линзах, имеющих различные фокусные расстояния и по глубине проплавления экспериментально определялось оптимальное фокусное расстояние. Оптимальным считалось фокусное расстояние, обеспечивающее наибольшую глубину проплавления, соответствующую минимальному размеру пятна нагрева, т.е. максимальной концентрации энергии.

Глубина проплавления изменяется также в зависимости от скорости перемещения образца и выбиралась такой, чтобы исключался перегрев образца и формировалась мелкодисперсная структура покрытия.

В результате проведенных исследований были установлены зависимости глубины легированного слоя от плотности мощности лазерного луча в пределах от 20 до 300 кВт/см² и скорости относительного перемещения луча от 1,6 до 16,6 мм/с. Глубина легированного слоя изменялась в пределах от 0,2 до 0,5 мм при фокусном расстоянии 200 мм.

С целью выбора композиций для дальнейших исследований были проведены экспресс-испытания упрочненных лазерным легированием образцов на износостойкость.

Процесс изнашивания покрытий определяется большим количеством взаимовлияющих факторов, таких как его химический и фазовый состав, физико-механические характеристики и микротопография поверхностного слоя, контактная нагрузка, скорость и температура в зоне трения и ряд других, связанных с влиянием среды, наличием абразивных частиц и т.д. Выявление наиболее значимых факторов требует моделирования процесса. На данном этапе проводились испытания экспресс-методами по упрощенным схемам на установках торцового трения: «диск – втулка», «диск – пальчиковые образцы» и на машине для испытания материалов 2070 СМТ-1 по схеме «диск – колодка». Схемы узлов трения приведены на рисунке 1.

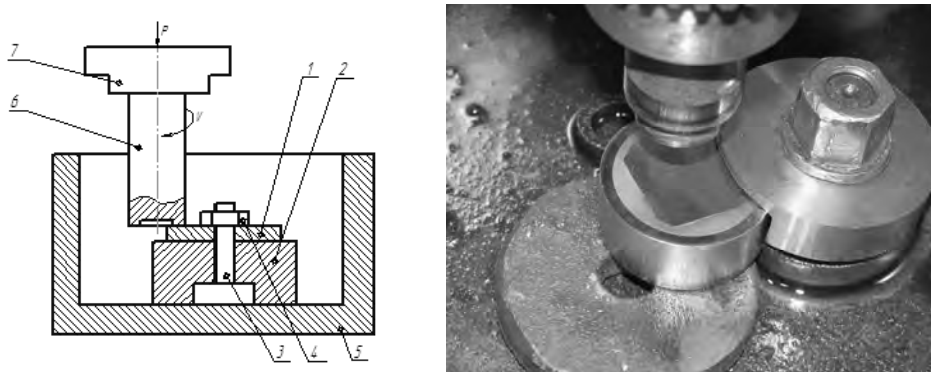


Рис. 1. Схема установки для проведения испытаний износостойкости:
 1 – испытуемый образец; 2 – подставка; 3 – шпилька; 4 – фиксирующая гайка; 5 – емкость;
 6 – контртело; 7 – патрон; 8 – опора
 а) схема установки; б) фотография установки

Основой для машин торцового трения являются настольные вертикально-сверлильные станки (модель 2М 112).

На начальном этапе исследований для предварительной оценки работоспособности покрытий проводили испытания их износостойкости на установке торцового трения, изготовленной в БНТУ, схема которой показана на рисунке 3.1. Данная установка позволяет сократить время испытаний, обеспечивая варьирование в широких пределах величины удельной нагрузки. Образец 1 устанавливается на плоскую шлифованную подставку 2, продолжением которой является шпилька 3, и фиксируется специальной гайкой 4. Во избежание перекоса гайки в случае испытаний призматических образцов с противоположной стороны шпильки подкладывается опора 8, высота которой равна высоте образца. Весь узел крепления образцов смонтирован в емкости 5, которая может устанавливаться в различных положениях на столе станка, что позволяет проводить испытания в условиях жидких сред. В качестве контртела используется кольцо 6 с наружным диаметром 21 мм толщиной стенки 1,5 мм, изготовленное из твердого сплава ВК-6, которое крепится в патроне 7. Величина износа оценивалась по результатам пяти замеров. Длительность испытания образцов на износостойкость устанавливалась такой, чтобы погрешность измерений не превышала 5 % от величины износа. При испытаниях на установках торцового трения задавались переменные параметры: контактная нагрузка посредством груза, скорость скольжения $V_{ск}$ посредством ступенчатых шкивов и изменения размеров образцов.

Обеспечивались следующие скорости скольжения: 18; 10,5; 6; 3,2; 1,8 м/с.
Коэффициент трения определялся из следующей зависимости:

$$f = F / P = 2M_{mp} / (r_1 + r_2)P,$$

где F – тормозящая сила – сила трения, Н; P – нормальная сила, прижимающая контртело к образцу, Н; M_{mp} – момент трения, Нм; r_1 и r_2 – наружный и внутренний радиусы дорожки трения, м.

Величина износа в данной работе определялась линейным методом (индикатором).
Скорость изнашивания определялась как среднее арифметическое пяти замеров по формуле

$$V = h/t, \text{ мкм/ч,}$$

где h – линейный износ за период испытаний, мкм; t – период испытаний, ч.
Схема узла трения машины 2070 СМТ-1 приведена на рисунке 2.

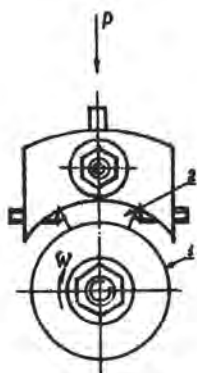


Рис. 2. Схема экспресс-испытаний на машине СМТ-1:
1 – диск-контртело; 2 – испытуемый образец

Частота вращения вала нижнего образца – $75-1500 \text{ мин}^{-1}$, диапазон усилий на образцы – от 200 до 2000 Н.

Перед испытанием на нижнем образце протачивали ступеньку, по уменьшению высоты которой судили о величине износа. Истираемые образцы 1 и 2 прижимались друг к другу силой P .

В процессе работы на машине измерялся момент трения с помощью бесконтактного индуктивного датчика ДИН. Электрические сигналы подавались на электронный потенциометр, который показывал и записывал величину измеряемого момента трения в процессе испытания образцов.

Коэффициент трения определялся по формуле

$$f = F/P = M_{mp}/rP,$$

где r – радиус образца, 0,025 м.

Машина позволяла проводить испытания с различными образцами, нагрузками и частотой вращения образцов, а также коэффициентами проскальзывания.

Исследуемые образцы были изготовлены в виде дисков из стали 45 диаметром 50 мм с покрытиями из 5 композиций. Контртело изготавливалось из стали 20 с покрытием из сплава ВСНГН с твердостью 65-67 HRC. Поверхность образцов обрабатывалась шлифованием до шероховатости $Ra = 1 - 1,25 \text{ мкм}$.

Полученные результаты исследования износостойкости приведены на рисунках 3 – 6.

1 – композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид; 2 – композиция 2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция 3 – ПГ12Н-03 + В; 4 – композиция 4 – ПР-Х4ГСП (50 %) + ПГ-СП4 (50 %) + В; 5 – чугун ВЧ-50; 6 – сталь 40Х13

Сравнение величин износа, показывает, что введение в композиционный материал добавок тугоплавких карбидов приводит к значительному повышению износостойкости покрытий

после лазерного термоупрочнения. Дополнительное легирование также обеспечивает значительное повышение износостойкости.

При введении карбидных добавок в случае лазерного термоупрочнения наименьшая величина износа получена для сплава с добавками карбида хрома. Характерным для покрытий получаемых при лазерном переплаве, является также значительное повышение степени легированности твердого раствора, обуславливающее возрастание концентрации дефектов (дислокаций), создание вокруг них полей упругих напряжений, что сопровождается искажением кристаллической решетки и, соответственно, упрочнением. Об этом свидетельствует сдвиг основных линий никеля в сторону меньших углов и изменение их физической ширины.

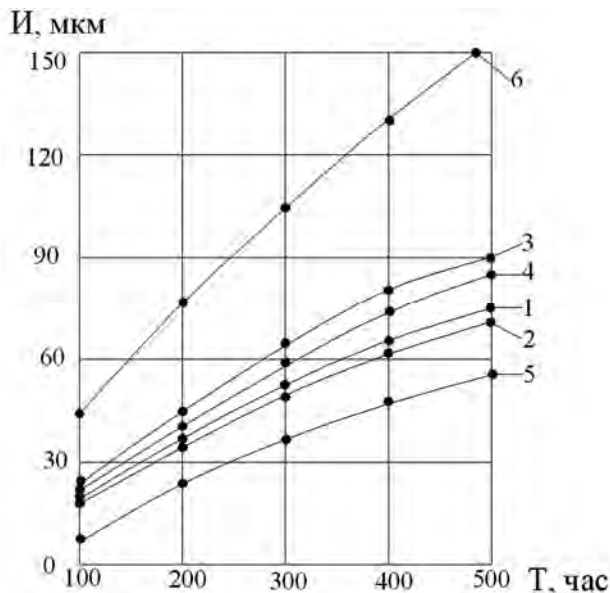


Рис. 3. Зависимость износа образцов с лазерным легированием от продолжительности испытаний со смазкой:

1 – композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид; 2 – композиция 2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция 3 – ПГ12Н-03 + В; 4 – композиция 4 – ПР-Х4ГСР (50 %) + ПГ-СР4 (50 %) + В; 5 – чугуи ВЧ-50; 6 – сталь 40X13

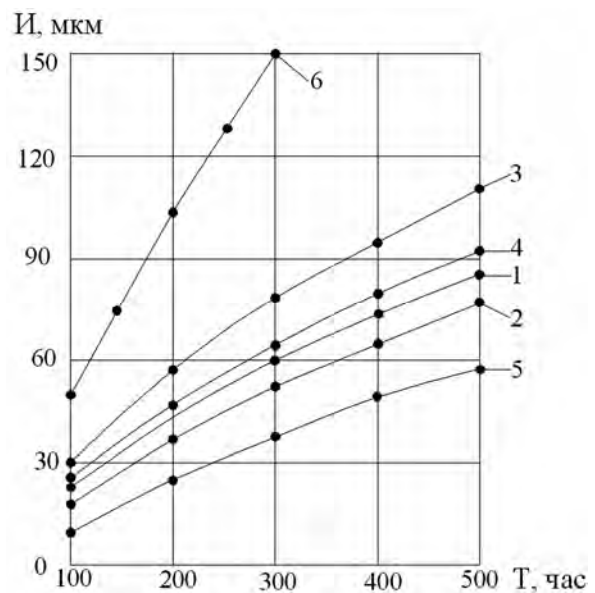


Рис. 4. Зависимость износа образцов с лазерным легированием от продолжительности испытаний при граничном трении:

1 – композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид; 2 – композиция 2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция 3 – ПГ12Н-03 + В; 4 – композиция 4 – ПР-Х4ГСР (50 %) + ПГ-СР4 (50 %) + В; 5 – чугуи ВЧ-50; 6 – сталь 40X13

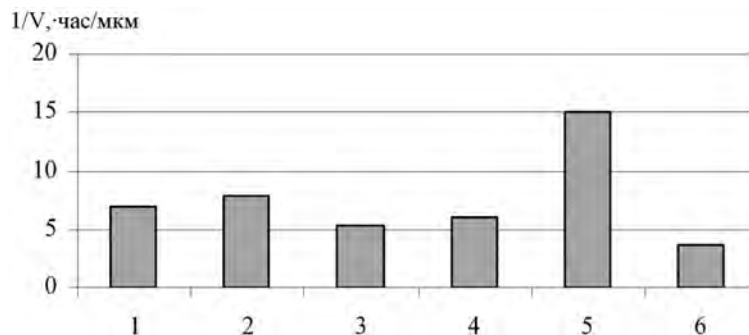


Рис. 5. Диаграмма износоустойчивости образцов с лазерным легированием от продолжительности испытаний со смазкой:

1 – композиция №1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид; 2 – композиция №2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция №3 – ПГ12Н-03 + В; 4 – композиция №4 – ПР-Х4ГСР (50 %) + ПГ-СР4 (50 %) + В; 5 – чугуи ВЧ-50; 6 – сталь 40X13

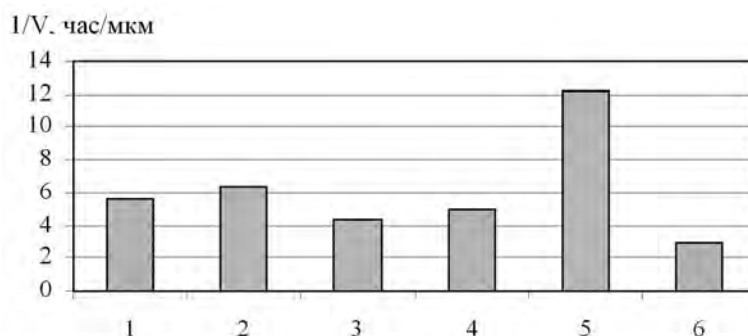


Рис. 6. Диаграмма износостойкости образцов с лазерным легированием от продолжительности испытаний при граничном трении.

1 – композиция 1 – карбид бора, аморфный бор и борный ангидрид;

2 – композиция 2 – ПГ-10К-01 + В; 3 – композиция 3 – ПГ12Н-03 + В;

4 – композиция 4 – ПР-Х4ГСР (50 %) + ПГ-СР4 (50 %) + В; 5 – чугун ВЧ-50; 6 – сталь 40Х13

При этом имеет место текстурирование никелевых зерен в направлении отвода тепла, ориентированных по более плотноупакованным плоскостям (III). Структуры такого типа обладают пониженной склонностью к схватыванию в процессе трения, что и было подтверждено электронно-микроскопическими исследованиями поверхностей износа. Результаты этих исследований показывают, что процесс изнашивания покрытия включает в себя усталостное изнашивание более мягкой составляющей - никелевой фазы, обнажение более твердых составляющих карбида-боридной фазы и их последующее выкрашивание. Хорошую информацию о состоянии и качестве покрытия может дать визуальное изучение поверхностей износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения. – Мн.: Высшая школа, 1988. – 200 с.

2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.

3. Упрочнение деталей лучом лазера /Коваленко В.С. [и др.]. – Киев: Техника, 1981. – 131 с.

4. Астапчик С.А. Фазовые и структурные превращения в сталях и сплавах при лазерном нагреве //Известия АН БССР. Серия физико-технических наук. – 1982. - №4. – С.30-32.

5. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

УДК 621.793

Фролов И.С., Ивашенко С.А., Гречихин Л.И., Комаровская В.М., Фролов Ю.И.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Описан механизм формирования вакуумно-плазменных покрытий на диэлектрических материалах. Предположена методика определения коэффициента потенциальной ионно-электронной эмиссии. Приведен расчет оптимального количества изделий, загружаемых в вакуумную камеру, при котором обеспечивается высокое качество покрытий и максимальная производительность процесса.

Вакуумно-плазменные покрытия находят все более широкое применение для улучшения эксплуатационных и декоративных свойств различных изделий [1,2]. Одним из новых направлений развития является нанесение этих покрытий на изделия из диэлектрических материалов