

**Оковитый В.А., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф.,  
Девойно О.Г., Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.В.**

## **ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ АМОРФИЗИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ТВЕРДОЙ СМАЗКИ**

**Введение.** Актуальность исследований определяется широким применением износостойких защитных покрытий деталей машин и непрерывным повышением требований к ним. Это относится прежде всего к широкой номенклатуре деталей, эксплуатирующихся в условиях трения и изнашивания при граничной, несовершенной смазке с абразивным, коррозионным и тепловым воздействиями (например, изделия моторостроения и металлургического оборудования). Формирования в покрытии неравновесных аморфизированных структур с включениями твердой смазки позволяют существенно улучшить свойства напыленных износостойких покрытий. Они характеризуются повышенной когезионной прочностью и твердостью, способностью образовывать стабильные слои смазки трибосопряжений. При этом дополнительная обработка напыленных композиций высококонцентрированными потоками энергии со сверхбыстрым охлаждением оплавленного материала позволят стабилизировать содержание аморфной фазы в структуре на уровне более 70 %. В результате происходит увеличение износостойкости деталей в 3 - 5 и более раз в сравнении с изделиями без покрытий.

**Методика исследований.** Аморфизированные покрытия Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC, FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC, являющиеся объектом исследований, предназначены для эксплуатации в условиях трения при граничной (несовершенной) смазке, повышенных контактных нагрузках и температурах. Такие условия создаются в тяжело нагруженных трибосопряжениях с малой скоростью относительного перемещения поверхностей трения. При этом разрушение рабочих поверхностей происходит в основном за счет их микроконтактного схватывания с последующим отрывом частиц в точках контакта. Испытание на износ, преобладающим процессом которого является микроконтактное схватывание, обычно осуществляют на машинах с регулируемой подачей смазки в зону трения неподвижных образцов, совершающих относительное перемещение по цилиндрической или плоской поверхностям контртел, вращающихся вокруг горизонтальной или вертикальной осей. Испытания аморфизированных покрытий Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC, FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC осуществляли на машине трения типа Армслера. Подробное изложение методики испытаний приводится в источнике [1-4]. При изучении процессов трения и изнашивания применялись два типа цилиндрических пальчиковых образцов из стали 45 диаметром 10 мм и длиной 12 мм. На торец образцов первого типа плазменным порошковым напылением на воздухе наносили покрытия толщиной 0,5 - 0,6 мм. Вначале наносили подслоем адгезива NiAl, затем - основной слой покрытий NiCr/FeCrMo + MoS<sub>2</sub>/графит + TiC. Образцы второго типа подвергались дополнительной импульсно-плазменной обработке, которая осуществлялась до оплавления и уплотнения покрытий по всей толщине (количество импульсов 14 - 15). Технологическое оборудование, оптимальные режимы получения аморфизированных покрытий подробно рассмотрены в источниках [2-4]. Нанесенные материалы шлифовали до получения плоских поверхностей образцов. Применение двух типов образцов соответствует технологиям, для кото-

рых характерны различные условия формирования аморфизированной структуры покрытий. При этом представляют интерес сравнительные данные по износостойкости и антифрикционным свойствам покрытий с различным содержанием упрочненных аморфных фаз. Лабораторные испытания проводили при комнатной температуре на воздухе. Скорость скольжения и удельное давление в парах трения приняты 2,5 м/с и  $52,9 \times 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, что соответствует условиям эксплуатации широкой номенклатуры деталей трибосопряжений различных отраслей машиностроения и моторостроения. В качестве смазки использовали промышленное масло И-Г-А-32 ГОСТ 17479.4-87 (расход 5 капель в минуту). Линейный износ измеряли с точностью до 1 мкм (износ образцов должен составлять не менее 10 мкм). Параллельно проводилась серия опытов с исследованием антифрикционных свойств покрытий. После плазменного напыления, импульсно-плазменных воздействий и приработки образцов определяли нагрузку задира и коэффициент трения трибосопряжений. Нагрузка задира наступает при критическом количестве микроконтактных адгезионных связей между поверхностями трения. При этом она характеризует антифрикционные свойства покрытий и их склонность к изнашиванию в условиях граничной (несовершенной) смазки. Что касается коэффициента трения, то в процессе испытаний фиксировали угол отклонения маятника установки, который связан нитью через сектор и вал с несущим образцы диском, увлекаемым силами трения. По углу отклонения определяли силу натяжения нити маятника согласно тарировочного графика. Коэффициент трения трибосопряжений образцов с покрытиями рассчитывали с учетом силы натяжения, нагрузки на образец и параметров конструкции установки, на которой проводились триботехнические испытания. Эталоном материалом служила сталь 45 с твердостью 48 - 52 HRC. Контр-тело анализируемых пар трения также было изготовлено из стали 45, которую подвергали поверхностной закалке до вышеуказанной твердости. Износостойкость эталонного материала принята с учетом результатов работ [1-4]. Экспериментальные данные по интенсивности изнашивания покрытий NiCr/FeCrMo + MoS<sub>2</sub>/графит + TiC представлены на рисунке 1.

**Износостойкость и антифрикционные свойства аморфизированных плазменных композиционных покрытий с включениями твердой смазки.** Как видно из рисунка 1, интенсивность изнашивания покрытия FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC ниже в сравнении с композицией Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC. Это объясняется механизмом аморфизации покрытий при их формировании и, в частности, ролью переходных металлов Cr, Ti, Mo. В охлаждающейся метастабильной жидкой фазе материала покрытия, полученной при его формировании, зарождаются элементарные аморфизированные квазикристаллы ("кластеры") с последующим развитием кристаллического ядра за счет диффузии атомов через границу расплав - кристалл. Количество атомов, присоединившихся к узлам на поверхности кристалла из жидкой фазы, увеличивается с возрастом продолжительности диффузии. Компенсация нежелательных последствий чрезмерной диффузии, вызывающей развитие

*Оковитый Вячеслав Александрович, к.т.н., ведущий научн. сотр. лаборатории плазменного напыления ГНУ «Институт порошковой металлургии».*

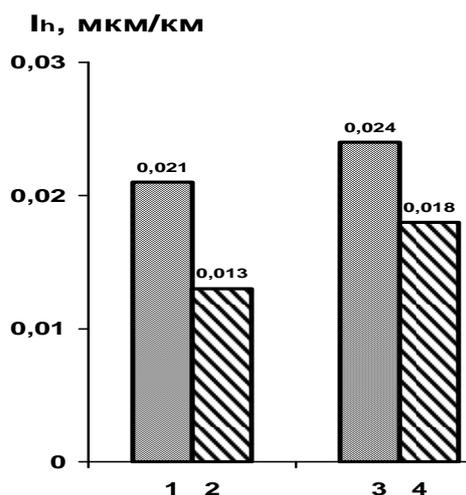
*Шевцов Александр Иванович, к.т.н., ведущий научн. сотр. лаборатории плазменного напыления ГНУ «Институт порошковой металлургии».*

*Ильющенко Александр Федорович, д.т.н., профессор, генеральный директор ГНПО ПМ, лауреат Государственной премии РБ.*

*Девойно Олег Георгиевич, д.т.н., главный научн. сотр. НИИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета НИЧ.*

*Пантелеенко Федор Иванович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой порошковой металлургии, сварки и технологии материалов Белорусского национального технического университета, член-корреспондент НАН Беларуси.*

*Оковитый Василий Вячеславович, студент машиностроительного факультета Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.*



**Рис. 1.** Интенсивность изнашивания покрытий, полученных на режимах способствующих аморфизации структуры нанесенных материалов: 1, 2 - FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC после напыления и дополнительной импульсно-плазменной обработки; 3, 4 – то же для Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC

кристаллического зерна и затрудняющей аморфизацию, обеспечивается элементами переходных металлов, которые ограничивают диффузионную подвижность атомов. Поэтому повышенному содержанию переходных металлов (Cr, Ti, Mo) в покрытии FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC соответствует большее количество аморфных фаз в нанесенном материале, который характеризуется возросшей механической прочностью и твердостью. Уменьшаются степень деформации упомянутого покрытия и площадь его фактического контакта с контртелом трибосопряжения, снижается вероятность микроконтактного схватывания поверхностей трения с последующим разрушением очагов схватывания. При этом возрастает способность упомянутой композиции сопротивляться такому разрушению, как доминирующий процесс в рассматриваемых трибосопряжениях. Интенсивность изнашивания (I<sub>h</sub>) покрытия FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC уменьшается в сравнении с композицией Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC, что иллюстрируется рисунком 1. Касаясь сопостав-

ления величин I<sub>h</sub> покрытий, полученных плазменным напылением и путем дополнительной импульсно-плазменной обработки напыленных материалов, необходимо отметить следующее. Параметр I<sub>h</sub> уменьшается у второго типа образцов, так как при дополнительной обработке обеспечиваются более эффективные аморфизация и упрочнение покрытий. Эффективность связана с локальным оплавлением и уплотнением слоев покрытий толщиной 30 – 40 мкм при их сверхбыстром охлаждении, а также отсутствием нежелательной рекристаллизации, что обусловлено развитием процессов импульсно-плазменной обработки вглубь покрытия (предыдущие уплотненные слои со сниженной пористостью и возросшей теплопроводностью не нагреваются до критических температур). Более эффективному упрочнению нанесенных композиций соответствует повышение их износостойкости, параметр I<sub>h</sub> обработанных импульсами плазмы образцов уменьшается, рисунок 1 (экспериментальные данные 2, 4). Что касается сопоставления темпов изнашивания испытанных композиций и эталонного материала из стали 45 с твердостью 48 - 52 HRC, то износостойкость покрытий в 2,7 – 3,0 и более раз превышает этот показатель для эталонного материала. В таблице 1 представлены результаты исследований антифрикционных свойств покрытий.

Согласно таблице 1 максимальные нагрузки, при которых замеры коэффициентов трения, для различных испытанных покрытий имеют неодинаковые значения. Максимальные давления соответствуют предельным нагрузкам, при которых отсутствуют задиры трибосопряжений. Согласно таблице 1 задиры напыленных на режимах аморфизации (HA) покрытий происходят при пониженных нагрузках в парах трения в сравнении с импульсно-плазменной аморфизацией (IA). По мере увеличения нагрузок задира покрытия образуют следующий ряд: (HA) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC; (HA) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC; (IA) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC; (IA) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC. Образованный ряд характеризует динамику антифрикционных свойств нанесенных композиций и их склонности к изнашиванию в условиях граничной (несовершенной) смазки, что подтверждают экспериментальные данные на рисунке 1, которые коррелируют с изменением нагрузок задира. Как видно из таблицы 1, величины коэффициентов трения полученных покрытий изменяются в пределах 0,010 – 0,062. С учетом данных [5] приведенные в таблице величины коэффициентов трения в 4 и более раз ниже, чем стали 45 с твердостью 48 – 52 HRC.

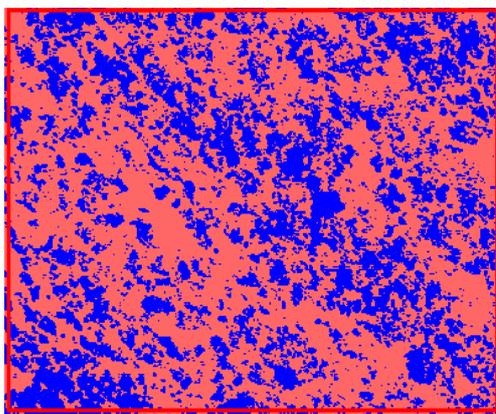
**Исследование поверхностей трения изношенных покрытий.** Фотографии зон трения образцов представлены на рисунках 2-4. На

**Таблица 1.** Результаты исследования антифрикционных свойств

Давление на образцы покрытий в трибосопряжениях, МПа	Коэффициент трения			
	(HA) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	(HA) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC	(IA) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	(IA) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC
0,16	0,051	0,052	0,053	0,051
0,81	0,049	0,047	0,044	0,046
1,21	0,041	0,043	0,035	0,039
1,62	0,031	0,035	0,029	0,034
2,03	0,029	0,034	0,036	0,030
2,44	0,028	0,031	0,025	0,025
2,84	0,029	0,029	0,023	0,022
3,25	0,032	0,026	0,024	0,018
3,66	0,034	0,023	0,026	0,020
4,07	0,039	0,025	0,029	0,023
4,47	0,041	0,028	0,032	0,023
4,88	0,031	0,025	0,033	0,018
5,29	0,025	0,023	0,027	0,018
5,70	0,023	0,017	0,026	0,016
6,10	0,018	0,020	0,019	0,013
6,51	0,017	0,012	0,014	0,010
6,92	0,032	0,028	0,023	0,022
7,16	0,060	0,048	0,045	0,039
9,25			0,062	0,051

Таблица 2. Изменение параметра  $S$  для различных покрытий

Покрытие	Величина $S_{сохр}$ на проанализированных выборках изображений, $\text{мкм}^2$	Величина $S_{схв}$ на проанализированных выборках изображений, $\text{мкм}^2$	Параметр $S$
(ИА) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC	8614221,44	2191913,85	3,93
(ИА) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	8605293,07	2200842,22	3,91
(НА) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC	8545437,53	2260697,76	3,78
(НА) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS <sub>2</sub> + 55 % TiC	8511839,05	2294296,24	3,71

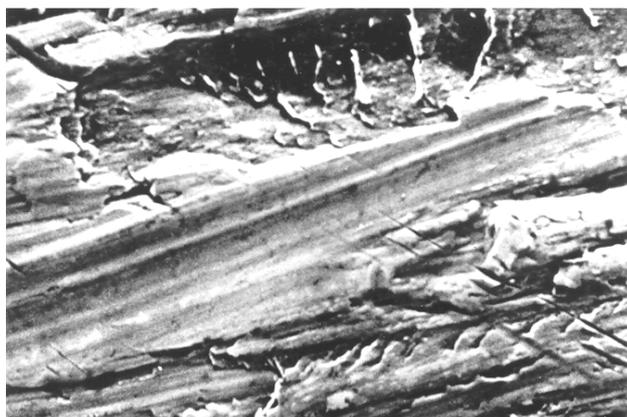


а)

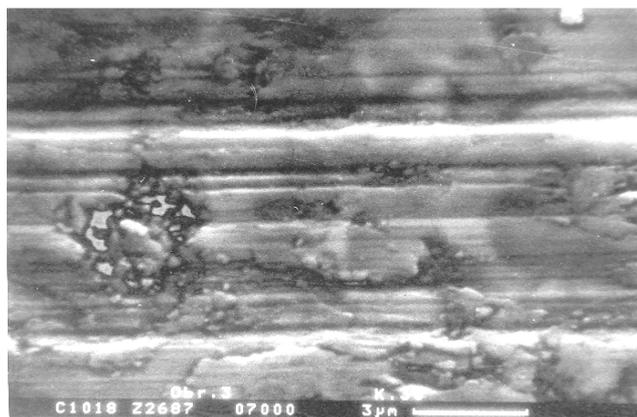


б)

Рис. 2. Типичные следы разрушения твердосмазочной пленки, схватывания и глубокого вырывания частиц при изнашивании покрытий: а)  $\times 500$ ; б)  $\times 1000$



а)



б)

Рис. 3. Следы деформации и разрушения оксидной пленки при изнашивании покрытий: а)  $\times 2500$ ; б)  $\times 7000$

фотографиях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, заметны следы схватывания и глубокого вырывания в виде темных пятен преимущественно сложной формы. Заметны также деформированные оксидные и твердосмазочные пленки на поверхности трения, развитие трещин при контактной усталостной повреждаемости. Остановившись на перечисленных элементах следов износа подробнее, необходимо отметить следующее. В условиях граничной смазки, при которых проведены триботехнические испытания, возрастает роль слоя смазочного материала, разделяющего поверхности трения [6]. Поэтому в данном случае сохранность твердосмазочной пленки на испытанных покрытиях NiCr/FeCrMo + MoS<sub>2</sub>/графит + TiC во многом характеризует их сопротивление изнашиванию. Параметр сохранности  $S$  можно представить в виде соотношения

$$S = \frac{S_{сохр}}{S_{схв}}, \quad (1)$$

где  $S_{сохр}$  – площадь твердосмазочной пленки, сохранившейся после триботехнических испытаний,  $\text{мкм}^2$ ;  $S_{схв}$  – суммарная площадь микроучастков схватывания,  $\text{мкм}^2$ . Значения параметра  $S$  для различных покрытий определяли по фотографиям поверхностей тре-

ния, примеры которых показаны на рисунке 2. В таблице 2 приведены усредненные значения  $S$ , полученные с использованием анализатора изображений AutoScan. Согласно данным таблицы 2 максимальным значением  $S$  характеризуется покрытие (ИА) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC. При снижении параметра сохранности твердосмазочной пленки покрытия образуют следующий ряд: (ИА) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC; (ИА) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC; (НА) FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC; (НА) Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC. При снижении параметра уменьшается стабильность разделительного слоя смазки трибосопряжений, увеличивается количество непосредственных контактов по гребешкам микронеровностей поверхностей трения с возрастанием интенсивности молекулярно - механического изнашивания (глубинного вырывания частиц). Это подтверждается корреляцией параметра  $S$  с результатами замеров линейного износа образцов покрытий.

Как отмечалось, к следам износа покрытий NiCr/FeCrMo + MoS<sub>2</sub>/графит + TiC относятся также деформированные оксидные пленки (рисунок 3) и развивающиеся при трении трещины усталости тонкого поверхностного слоя (рисунок 4). При эксплуатации трибосопряжений в условиях граничной смазки преобладающим является молекулярно-механическое изнашивание микроконтактным схватыванием. Вместе с тем изменение режимов эксплуатации может

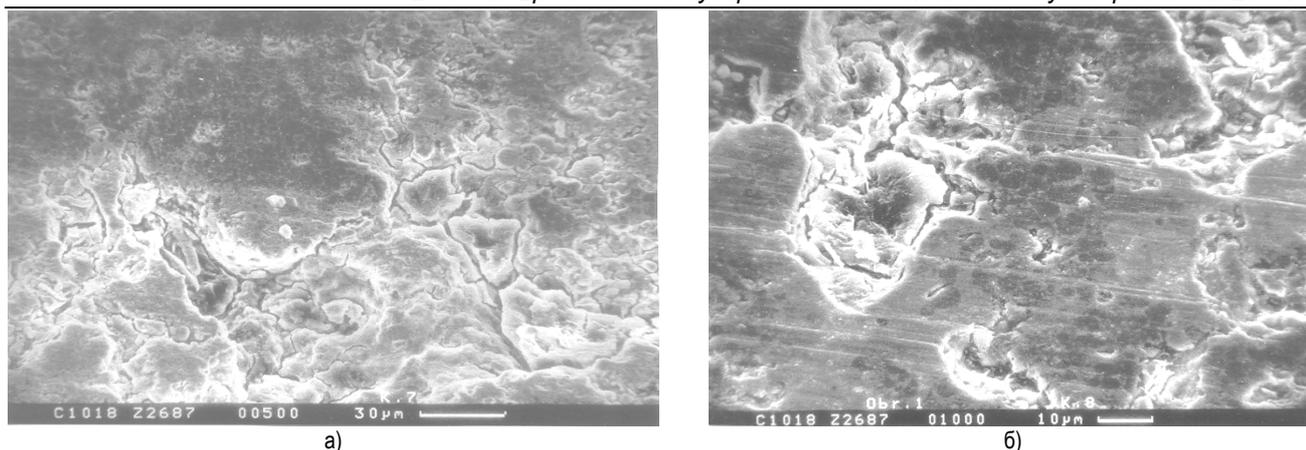


Рис. 4. Следы развития трещин контактной усталостной повреждаемости поверхностей трения при изнашивании покрытий: а)  $\times 500$ ; б)  $\times 1000$

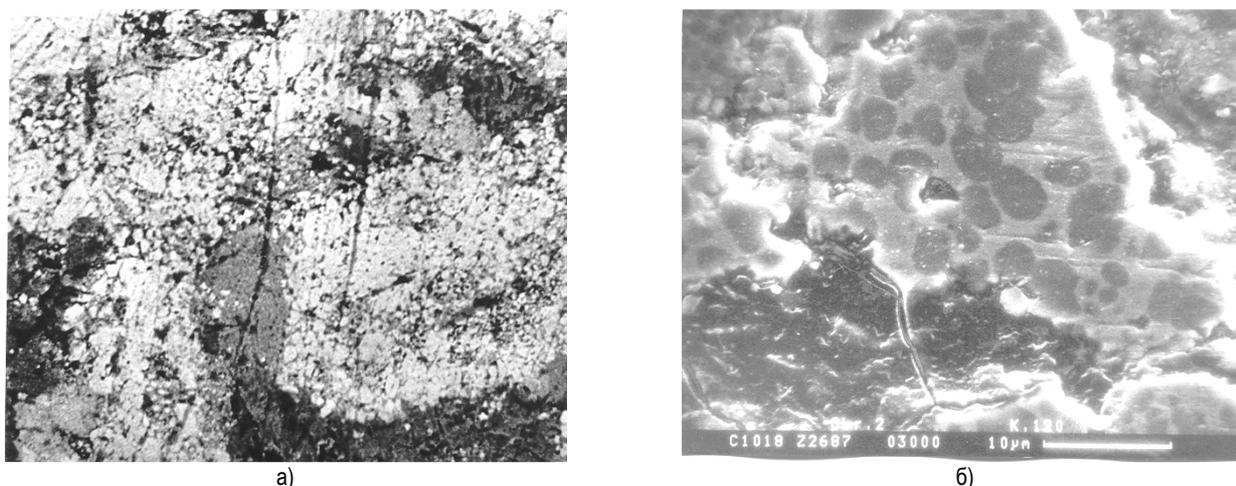


Рис. 5. Следы выкрашивания частиц карбидной фазы при изнашивании покрытий: а)  $\times 1000$ ; б)  $\times 3000$

вызвать активизацию окислительного изнашивания, интенсивность которого ниже [7]. Независимо от режимов эксплуатации трещины усталости способствуют отделению частиц износа от поверхностей трения покрытий. К особенностям анализируемых покрытий относится наличие в них 55 – 70 % TiC. Выкрашивание отдельных карбидов целиком или их более мелких частиц наблюдается при изнашивании покрытий под действием сил трения (рисунок 5). Выкрошенные частицы оказывают существенное абразивное воздействие на трибосопряжения. С учетом абразивного воздействия покрытие Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC при повышенных контактных нагрузках трибосопряжения более перспективно и лучше сопротивляется изнашиванию в сравнении с композицией FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC. Состав последней характеризуется избытком карбидов и сниженным количеством связующего материала FeCr30Mo3. При этом облегчается удаление карбидов из матрицы, что особенно проявляется в условиях трения при повышенных нагрузках. Возрастает интенсивность абразивного воздействия и темпы изнашивания FeCr30Mo3 + 7 % графита + 70 % TiC.

**Заключение.** Проведены триботехнические испытания образцов плазменных композиционных покрытий Ni80Cr20 + 12,5 % MoS<sub>2</sub> + 55 % TiC, FeCr30Mo3 + 7 % графит + 70 % TiC, полученных на режимах способствующих формированию аморфизированных структур. При этом изучены износостойкость и антифрикционные свойства образцов в условиях трения с граничной смазкой, которая обеспечивалась в торцевом трибосопряжении жидким смазочным материалом в виде капель и твердыми включениями MoS<sub>2</sub>/графит нанесенных материалов. Установлено, что износостойкость покрытий превышает этот показатель для эталонной стали 45 с твердостью 48 - 52 HRC в 2,7 - 3,0 и более раз. Повышенная износостойкость обусловлена формированием стабильной смазочной пленки трибосопряжений (жидкая смаз-

ка + пленка из MoS<sub>2</sub>/графит) и твердостью упрочненных аморфизированных покрытий. Существенно снижается интенсивность молекулярно-механического изнашивания (за счет микроконтактного схватывания), возрастает сопротивление воздействию абразивных частиц. Замеры коэффициентов трения покрытий NiCr/FeCrMo + MoS<sub>2</sub>/графит + TiC свидетельствуют о том, что величина коэффициента находится в пределах 0,010 – 0,062 (в 4 и более раз ниже, чем у стали 45).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ильющенко, А.Ф. Формирование износостойких плазменных покрытий на основе композиционных самосмазывающихся материалов [Текст] / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 253 с.
2. Ильющенко, А.Ф. К вопросу аморфизации плазменных композиционных покрытий типа NiCr + карбидная фаза [Текст] / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, К.В. Буйкус // Порошковая металлургия. – Мн.: ОДО "Тонлик", 2004. - Вып. 27. - С. 123-129.
3. Ilyuschenko, A. Investigation and optimization of plasma spraying of hard-lubricating wear-resistant coatings [Text] / A. Ilyuschenko, A. Shevtsov, V. Okovity, I. Smurov, M. Ignatiev, E. Kovaliov // Proc. of the 3 rd Int. Conference "Industrial engineering - new challenges to SME". - Tallinn, 2002. - P. 150-153.
4. Ильющенко, А.Ф. Плазменные покрытия на основе керамических материалов [Текст] / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов. – Мн.: Бестпринт, 2006. – 316 с.
5. Борисов, Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов [Текст]: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
6. Ильющенко, А.Ф. Исследование свойств и механизма упрочнения напыленных самосмазывающихся покрытий, обработанных

импульсными плазменными потоками [Текст] / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, А.И. Шевцов, В.М. Асташинский, Т.А. Ильющенко // Порошковая металлургия. – Мн.: ОДО "Тонпик", 2003. – Вып. 26. – С. 117-123.

7. Шевцов, А.И. Исследование процессов трения и изнашивания газотермических композиционных покрытий, обработанных импульсами плазменной струи [Текст] / А.И. Шевцов, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, Ю.С. Фень // Порошковая металлургия. – Мн.: ОДО "Тонпик", 2006. – Вып. 29. – С. 243-248.

Материал поступил в редакцию 25.04.08

OKOVITY V.A., SHEVTSOV A.I., ILYUSCHENKO A.Ph., DEVOINO O.G., PANTELEENKO V.V., OKOVITY V.V. TRIBOTECHNICAL TEST SAMPLES OF AMORPHISATED COMPOSITE PLASMA COATINGS WITH INCLUSION OF HARD LUBRICATION

Study tribotechnical test samples of composite plasma coatings, received on regime assist to formation of amorphisated structures. Study wear resistance and antifriction properties of samples in condition friction with boundary lubrication.

УДК 621.793

**Кардаполова М.А., Девойно О.Г., Спиридонов Н.В.,  
Кобяков О.С., Баркун А.А., Королева А.Н.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ВЧ-50 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Введение.** Особенности метода лазерного термоупрочнения, определяющими его место среди широкого ряда методов поверхностного упрочнения, являются: 1) возможность концентрации в локальной зоне поверхности высоких плотностей мощности, практически недостижимых другими методами, что позволяет достигать сверхвысоких скоростей нагрева и охлаждения тонкого поверхностного слоя и обеспечивать формирование за счет этого слоев сверхбыстрой закалки с повышенным комплексом свойств за счет высокой степени метастабильности структуры; проводить локальную обработку только рабочих поверхностей деталей без значительного их объемного разогрева; 2) возможность точного управляемого энергетического воздействия на заданную точку поверхности при широком диапазоне его варьирования, что дает предпосылки для стабильного управления структурой и свойствами упрочняемой поверхности в процессе обработки. Для термообработки больших площадей наиболее экономичным считается непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер [1]. Появление новейших мощных лазерных источников волоконного типа актуализирует вопрос об эффективности их использования для лазерного термоупрочнения. Известно, что КПД волоконных лазеров с длиной волны 1.07 мкм составляет 25%, что в 2.5..3 раза выше КПД серийных CO<sub>2</sub>-лазеров с длиной волны 10.6 мкм и общая энергетическая эффективность процесса закалки волоконными лазерами оказывается выше в 20-30 раз [2]. При этом с учетом доставки излучения по оптическому волокну и высокому коэффициенту поглощения излучения, позволяющему исключение нанесения поглощающих покрытий – это процесс чистый и полностью контролируемый.

Лазерное термоупрочнение чугунов-процесс эффективный, широко используемый для повышения эксплуатационных характеристик тракторной техники.

Целью работы является исследование процесса лазерного термоупрочнения тормозных колодок трактора «Беларус» из высокопрочного чугуна СЧ-50 и серого СЧ-20 оптоволоконным лазером.

**Методика исследований.** Для исследования были использованы образцы высокопрочного чугуна ВЧ-50 и серого СЧ-20 после литья в формы. Лазерное поверхностное упрочнение проводили на оптоволоконном лазере серии IPG максимальной мощности 2 кВт длиной волны 1.07 мкм и транспортным волокном 50 мкм. Лазер использовался в режиме непрерывного излучения. Фокусировка

производилась вариосистемой с переменным фокусным расстоянием. Поверхность шлифованного металлического образца относительно лазерного пучка размещалась под углом 20 градусов, чтобы отраженное излучение гарантированно не попадало в технологическую головку.

Исследовали влияние параметров лазерной обработки на шероховатость поверхности образцов из высокопрочного ВЧ50 и серого СЧ20 чугунов методом полнофакторного эксперимента.

Так как число варьируемых факторов невелико, оказалось возможным реализовать полную реплику, в которой число опытов равно 2 в степени, равной числу факторов:  $N = 2^k$ , позволяющую в ходе эксперимента варьировать одновременно несколькими параметрами различной физической природы и получать раздельную, независимую оценку коэффициентов, что невозможно, например, при реализации дробной реплики. При этом необходимо, чтобы все независимые переменные изменялись на максимальном и минимальном уровнях. На первом этапе выбирали основные входные параметры (скорость и диаметр луча лазера), сильно влияющие на параметр оптимизации (шероховатость, микротвердость). Затем определяли пределы их изменения и составляли таблицу исходных данных. Серия состояла из четырех основных опытов, полученная модель считалась линейной и учитывала взаимодействие факторов.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2$$

где  $Y_i$  – параметры оптимизации,  $X_i$  – варьируемые факторы,  $B_{ij}$  – коэффициенты регрессии, описывающие направление и степень влияния каждого из факторов на параметр оптимизации.

Технологические факторы выбирались исходя из возможности их изменения при условии точного измерения их величин, а также исходя из их независимости (ортогональности):

$X_1$  – диаметр луча лазера в месте соприкосновения с поверхностью материала, мм.

$X_2$  – скорость перемещения лазерного луча (фактически производилось перемещение образца под лучом), мм/мин.

Математические модели рассчитывали для следующих параметров оптимизации:

$Y_1$  – шероховатость упрочненной поверхности, мм.

Диаметр луча меняли в пределах 4..5 мм, а скорость от 200 до 3000 мм/мин.

**Кардаполова Маргарита Анатольевна**, к.т.н., ведущий научн. сотрудник НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

**Спиридонов Николай Васильевич**, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Белорусского национального технического университета.

**Кобяков Олег Сергеевич**, к.т.н., ведущий научн. сотр. НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

**Королева Анна Николаевна**, научн. сотр. НИИП плазменных и лазерных технологий НИЧ Белорусского национального технического университета.

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

**Баркун Александр Александрович**, зам. ген. директора по производству РУП МТЗ, г. Минск.