

# ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Electrophysical and electrochemical processing

УДК 621.78

DOI 10.25960/мо.2020.3.35

## Исследование структуры и элементного состава поверхности металла после финишного плазменного упрочнения

П. А. Тополянский<sup>1</sup>, С. А. Ермаков<sup>2</sup>, А. П. Тополянский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 000 «Плазмацентр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*Рассмотрена актуальность изучения структуры и элементного состава тонкопленочных покрытий для прогнозирования эффективности повышения долговечности деталей. Приведены известные механизмы упрочнения металла при создании антифрикционных материалов, обеспечивающих минимальные коэффициент трения, длительность приработки, тепловыделение при трении и параметры износа, и дисперсионно-упрочненных наночастицами материалов, повышающих прочностные характеристики. Рассмотрены отдельные аспекты технологии финишного плазменного упрочнения путем нанесения покрытий на финишной стадии изготовления деталей при их температуре нагрева менее 150 °С и неизменности исходных параметров шероховатости. Результаты растровой электронной микроскопии подтвердили возможность получения бездефектных наноразмерных покрытий, содержащих кремний, кислород, углерод и азот. Доказано взаимное диффузионное проникновение элементов покрытия и подложки, что характеризует высокие адгезионные характеристики покрытия. Приведены отдельные практические примеры повышения долговечности изнашиваемых деталей и инструмента при использовании технологии финишного плазменного упрочнения.*

**Ключевые слова:** упрочнение, износостойкое покрытие, микроструктура, элементный состав, финишное плазменное упрочнение.

### Введение

Одним из перспективных направлений создания деталей и инструмента повышенной долговечности и надежности является применение современных технологий нанесения функциональных покрытий, к которым относятся процессы наплавки, напыления и осаждения. Условным различием данных методов является толщина покрытия: для процессов наплавки — это более 1 мм, для напыления — менее 1 мм, для осаждения — менее 10 мкм. Для повышения ресурса изнашиваемых деталей наиболее часто используются износостойкие покрытия, наносимые методами наплавки (ГОСТ 2601) или газотермического напыления

(ГОСТ 28076). Их применение характеризуется повышенным температурным воздействием, использованием дорогостоящих присадочных материалов и проведением последующей механической обработки (чаще всего абразивной), увеличивающей себестоимость упрочняемых деталей. Общемировая тенденция миниатюризации изготавливаемых изделий привела к разработке и созданию функциональных покрытий микронной толщины, наносимых на финишной стадии изготовления деталей с использованием физических и химических методов осаждения из газовой и паровой фаз. Детали с такими покрытиями могут эффективно противостоять многочисленным эксплуатационным нагрузкам, в том

числе наиболее агрессивному абразивному изнашиванию. В последнее время активизируется применение покрытий, не требующих дополнительной окончательной обработки, наносимых технологией финишного плазменного упрочнения (ФПУ) [1]. Этот процесс проводится в обычных атмосферных условиях на финишной стадии изготовления деталей, при их нагреве не более 150 °С. При этом покрытия на подложке формируются из атомов и молекул, образуемых при разложении паров органических и неорганических жидких летучих соединений, в основном на основе соединений кремния, бора и некоторых других элементов. Покрытия являются мультислойными с нанометровым диапазоном толщины монослоев (2–30 нм), с количеством 50–250 Монослоев могут иметь как одинаковый, так и разный элементный состав.

Повышенная износостойкость таких покрытий может быть спрогнозирована с учетом знаний механизмов упрочнения при применении антифрикционных материалов, обеспечивающих минимальные коэффициент трения, длительность приработки, тепловыделение при трении и параметры износа, и дисперсионно-упрочненных наночастицами материалов, повышающих прочностные характеристики. С этих позиций исследование структуры и элементного состава покрытий, осаждаемых при ФПУ, является актуальной задачей.

Цель работы — оценка критериев повышения долговечности изнашиваемых деталей на основе анализа элементного состава и структуры тонкопленочных покрытий, осаждаемых методом ФПУ.

Для достижения поставленной цели необходимо рассмотреть эффективность использования известных антифрикционных и дисперсионно-упрочненных материалов, закономерно проведения ФПУ, провести исследования морфологии и элементного состава наносимых с использованием этой технологии тонкопленочных покрытий.

### Антифрикционные и дисперсионно-упрочненные материалы

В 1897 г. известный французский инженер Жорж Шарпи сформулировал требования

к антифрикционным материалам: они должны быть пластичными и неоднородными по своей структуре, состоять из распределенных в пластичной массе твердых частиц. При этом используемый материал твердых частиц должен обеспечивать отсутствие образования задиров на контртеле, что предопределяется соизмеримостью твердости этих частиц и вторичных фаз контртела (карбидов, интерметаллидов), а также иметь невысокий коэффициент трения. При эксплуатации таких гетерогенных материалов контактное давление передается на твердые частицы, а пластичная матрица наиболее эффективно прилегает к поверхности контртела, так как в условиях трения и износа пластичная матрица изнашивается быстрее, образуя каналы и оголяя твердые частицы. Это приводит к выравниванию контактной нагрузки, образованию специфического микрорельефа с выступающими твердыми частицами, равномерному распределению циркулирующей смазки, которая обеспечивает максимальное охлаждение трибосопряжения и вынос продуктов износа из зоны трения.

В соответствии с этими требованиями антифрикционные сплавы могут иметь структуру, состоящую из пластичной основы и равномерно распределенных в ней твердых частиц. К таким материалам относятся оловянистые баббиты, антифрикционные силумины, сплавы на кадмиевой, алюминиевой и медной основах, специальные чугуны. Например, в состав первых антифрикционных алюминиевых сплавов, как правило, входили медь, никель, сурьма, железо, кремний и другие легирующие элементы, резко повышающие прочность и твердость. В структуре они образовывали твердые интерметаллические соединения типа  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и др. Такие сплавы соответствовали правилу Шарпи, где роль мягкой пластичной матрицы выполняли твердые растворы на основе алюминия, а интерметаллидные включения воспринимали основную нагрузку и создавали оптимальный микрорельеф, удерживающий масляный слой.

К дисперсионно-упрочненным относятся материалы, состоящие из частиц дисперсной фазы, распределенных в объеме матрицы. Механизм упрочнения дисперсными частицами, основанный на взаимодействии с ними движущихся дислокаций, был опи-

сан в 1948 г. английским ученым Эгоном Орована [2]. Согласно этому механизму, дислокации при движении будут удерживаться на частицах дисперсной фазы до тех пор, пока прилагаемое напряжение не будет достаточным для того, чтобы линия дислокаций изогнулась и прошла между ними, оставив около них дислокационную петлю. Чем плотнее расположены частицы, тем больше они будут противодействовать движению дислокаций.

Дислокации оказывают исключительное влияние на прочность металла. Характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление сплава пластической деформации, является плотность дислокаций, т. е. суммарная их длина, приходящая на единицу объема металла. Согласно теории И. А. Одингга [3] зависимость между плотностью дислокаций и прочностью металла может быть представлена в виде графика (рис. 1).

Как видно, прочность металла может быть повышена как с увеличением плотности дислокаций (за счет поверхностного пластического деформирования, легирования, термообработки и др.), так и с ее уменьшением (например, за счет торможения и организации препятствий перемещению дислокаций). При этом уменьшение плотности дислокаций за счет препятствий дисперсной фазой может привести к более высоким значениям прочности материала.

На практике встречается много примеров использования такого механизма упрочнения. Например, разработка мартенситно-старящих сплавов, где пластичный высоконикелевый мартенсит упрочняется выделениями дисперсных фаз интерметаллидов при старении. Если отжигать закаленный ранее дюралюминий (сплав системы AlCuMgMn), то за счет выделения из пересыщенного твердого раствора большого количества частиц мелкодисперсной фазы сплав также будет упрочняться. Дисперсионное упрочнение является перспективным направлением в создании высокопрочных конструкционных титановых сплавов нового поколения. Известна технология обработки аморфных пиролитических хромовых покрытий для осуществления контролируемого процесса кристаллизации с выделением наноразмерных дисперсных карбидных частиц. Важно отметить, что увеличение

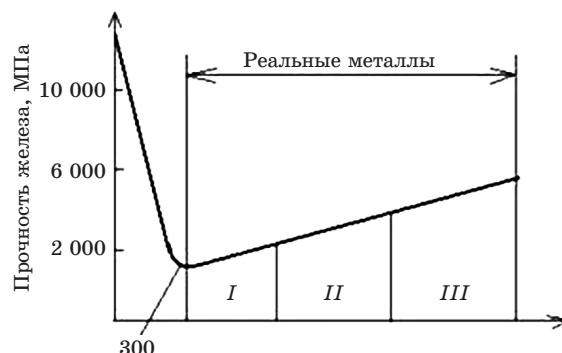


Рис. 1. Влияние количества дислокаций на прочность металла (кривая Одингга), где способы увеличения плотности дислокаций в реальных металлах:

*I* — поверхностное пластическое деформирование; *II* — легирование (замена чистых металлов сплавами); *III* — неравновесная термообработка (закалка)

Fig. 1. The effect of the number of dislocations on the metal strength (Oding curve), where the ways to increase dislocation density in real metals refer to:

*I* — surface plastic deformation; *II* — alloying (replacing pure metals with alloys); *III* — nonequilibrium heat treatment (hardening)

прочности дисперсионно-упрочненного материала зависит от многих факторов, в том числе и от прочности самих дисперсных частиц.

В соответствии с рассмотренными принципами создания антифрикционных и дисперсионно-упрочненных материалов, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств изнашиваемых деталей, целесообразно рассмотреть структурные особенности покрытий при ФПУ.

### Нанесение покрытий с использованием атмосферных плазменных струй

В России технология для нанесения упрочняющих покрытий с использованием атмосферных плазменных струй разрабатывалась с конца 80-х годов прошлого века [4]. Этот процесс под названием финишное плазменное упрочнение (ФПУ) предназначен для модификации поверхности путем осаждения функциональных покрытий с применением электродугового плазмотрона постоянного тока, дополненного малогабаритным плазмохимическим реактором. Метод ФПУ не требует вакуума и осуществляется при обычных атмосферных условиях, что предопределяет малые энергозатраты и габаритные размеры плазмотрона. В качестве плазмообразующе-

го газа применяется аргон, который обеспечивает повышенную долговечность и надежность элементов оборудования при длительном ведении процесса. Для образования покрытия используются пары летучих жидких реагентов, подача которых в плазмохимический реактор осуществляется специальным жидкостным дозатором. Ниже представлены исследования при применении кремнийуглеродосодержащих реагентов семейства Сетол. Источником питания плазмотрона служит инвертор постоянного тока со специальной вольтамперной характеристикой. Для стабильного охлаждения реактора, плазмотрона и других элементов оборудования используется модуль автономного охлаждения. Система мониторинга процесса обеспечивает управление и контроль параметров режима, а также определение толщины наносимого покрытия в процессе его осаждения.

Плазменная струя, истекающая из электродугового плазмотрона, обеспечивает оптимальную теплопередачу в обрабатываемый материал для гетерогенного формирования покрытия на поверхности детали, локальность воздействия в сочетании с широкой зоной охвата за счет программируемого перемещения, возможность упрочнения деталей в любом пространственном положении, а также маневренность плазмотрона с плазмохимическим реактором. Применение дугового разряда между электродами, находящимися внутри плазмотрона, обеспечивает отсутствие воздействия ультрафиолетового излучения на оператора, а минимальный расход паров исходных жидких реагентов осуществляется при полном их разложении в процессе формирования покрытия, что определяет экологичность процесса.

Покрытие при безвакуумной технологии ФПУ с типичными скоростями перемещения плазменной струи 10–100 мм/с наносится слоями толщиной 2–30 нм. В отличие от конденсированных покрытий в вакууме, получаемых при PVD- и CVD-процессах, в рассматриваемом методе покрытие формируется в локальной зоне касания плазменной струи подложки и только в условиях многослойного нанесения покрытия, что является важной особенностью технологии ФПУ. Известно, что многослойные покрытия обеспечивают значительное повы-

шение износостойкости в условиях циклических нагрузок. Это связано с увеличением числа поверхностей раздела и, соответственно, с образованием большего количества препятствий на пути распространения дислокаций и трещин. Циклическое взаимное перемещение плазменной струи и упрочняемой поверхности при ФПУ определяет получение слоистой структуры покрытия и позволяет до минимума уменьшить термическое воздействие плазмы на подложку, исключая разупрочняющий отпуск для всех сталей. Интегральная температура деталей при нанесении покрытия, как правило, не превышает 100–150 °С. Формируется упрочняющее покрытие в виде прозрачной пленки, которая на полированной поверхности имеет вид интерференционной картины с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного в зависимости от толщины покрытия.

Покрытия, наносимые на металлические подложки методом ФПУ, имеют толщину не более 2 мкм. Ограничение по толщине связано с тем, что коэффициент теплопроводности покрытий существенно меньше, чем материала металлической подложки. При этом с увеличением толщины наносимого покрытия происходит значительный перегрев верхнего монослоя за счет уменьшения теплоотвода в массу подложки. Это ведет к замедлению скорости конденсации паров реагентов, уменьшению вероятности протекания гетерогенных реакций на обрабатываемой поверхности и даже к сублимации покрытий.

#### **Исследования морфологии и элементного состава покрытия при ФПУ**

Микроструктуру и элементный состав покрытия определяли при помощи полевого эмиссионного растрового электронного микроскопа JSM-6700F с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии JED-2300F (Jeol, Япония). Глубина получения информации о составе исследуемых образцов составляла порядка 1 мкм. В качестве материала образцов для исследований использовали инструментальную сталь У8 с твердостью 58–60 HRC. До нанесения покрытия образцы шлифовали

Таблица 1

Элементный состав поверхностных слоев образцов с покрытиями

Table 1.

The elemental composition of surface layers of the samples with coatings

№ образца	Содержание элементов, % атом. (% мас.)				
	C	N	O	Si	Fe
1	21,4 (8,4)	6,9 (3,1)	28,2 (14,6)	5,6 (5,1)	37,9 (68,8)
2	15,3 (5,4)	–	32,4 (15,1)	7,0 (5,7)	45,3 (73,8)
3	12,4 (5,3)	6,1 (3,0)	43,2 (24,5)	8,9 (8,9)	29,4 (58,3)
4	22,7 (11,4)	14,7 (8,6)	35,6 (23,8)	5,9 (6,9)	21,1 (49,3)

с двух сторон, одну из сторон полировали. Для исследований были изготовлены образцы с разной длительностью нанесения покрытий: № 1, № 2 — 11 мин, № 3, № 4 — 22 мин.

На основе полученных фотографий микроструктур образцов можно сделать следующие выводы о морфологических особенностях покрытий: образцы № 1, № 2 характеризуются относительно плотной структурой поверхностного слоя с размером структурных элементов 50–100 нм; образцы № 3, № 4 — структура поверхностного слоя плотная, размер структурных элементов 100–500 нм. Таким образом, с увеличением времени осаждения покрытий средний размер структурных элементов увеличивается.

В табл. 1 приведены результаты микро-рентгеноспектрального анализа исследуемых образцов.

В поверхностном слое (толщиной до около 1 мкм) присутствуют C, N, O, Si, Fe. Наличие

железа в исследованном слое может быть связано как с незначительной толщиной покрытия, так и с диффузионным его проникновением в материал покрытия. Это подтверждается результатами исследования поперечного шлифа образца № 4 (рис. 2), по которому можно оценить толщину покрытия, равную 0,4–0,5 мкм. Распределение железа и углерода по поверхности поперечного шлифа (рис. 3) свидетельствует примерно о такой же толщине покрытия. Характер распределения кислорода и кремния в поверхностном слое образцов дает основание предположить, что эти элементы проникают в подложку и образуют на границе «покрытие—подложка» переходную диффузионную зону.

В целях установления вида химических связей элементов, находящихся в поверхностном слое после ФПУ, образцы из стали У8 исследовали методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на установке РНИ-5500 ESCHA (Perkin Elmer, США) [5]. Исследования показали, что состав поверхностного слоя соответствует  $SiO_xC_y$ , а на глубине примерно 20–30 нм —  $SiO_2$ .

Для оценки влияния различных материалов подложки на структуру и элементный состав покрытий, нанесенных методом ФПУ, использовали растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6460LV (Jeol, Япония) со спектрометром фирмы Oxord. Диаметр зонда составлял порядка 0,3 мкм. Для изучения структуры использовали образцы из стали 20X13, стали 20 и титанового сплава ВТ 1-0. На рис. 4 приведены изображения шлифов образцов и соответствующие спектрограммы.

Анализ полученных спектрограмм выявил постоянство состава покрытия в не зависимости от материала основы. Спектрограммы

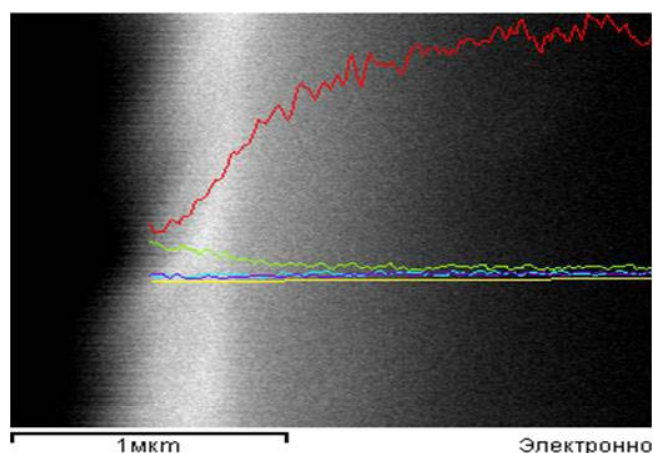


Рис. 2. Фотография поперечного шлифа образца № 4 с наложенной спектрограммой

Fig. 2. Picture of transverse section of the sample N 4 with an overlaid spectrogram

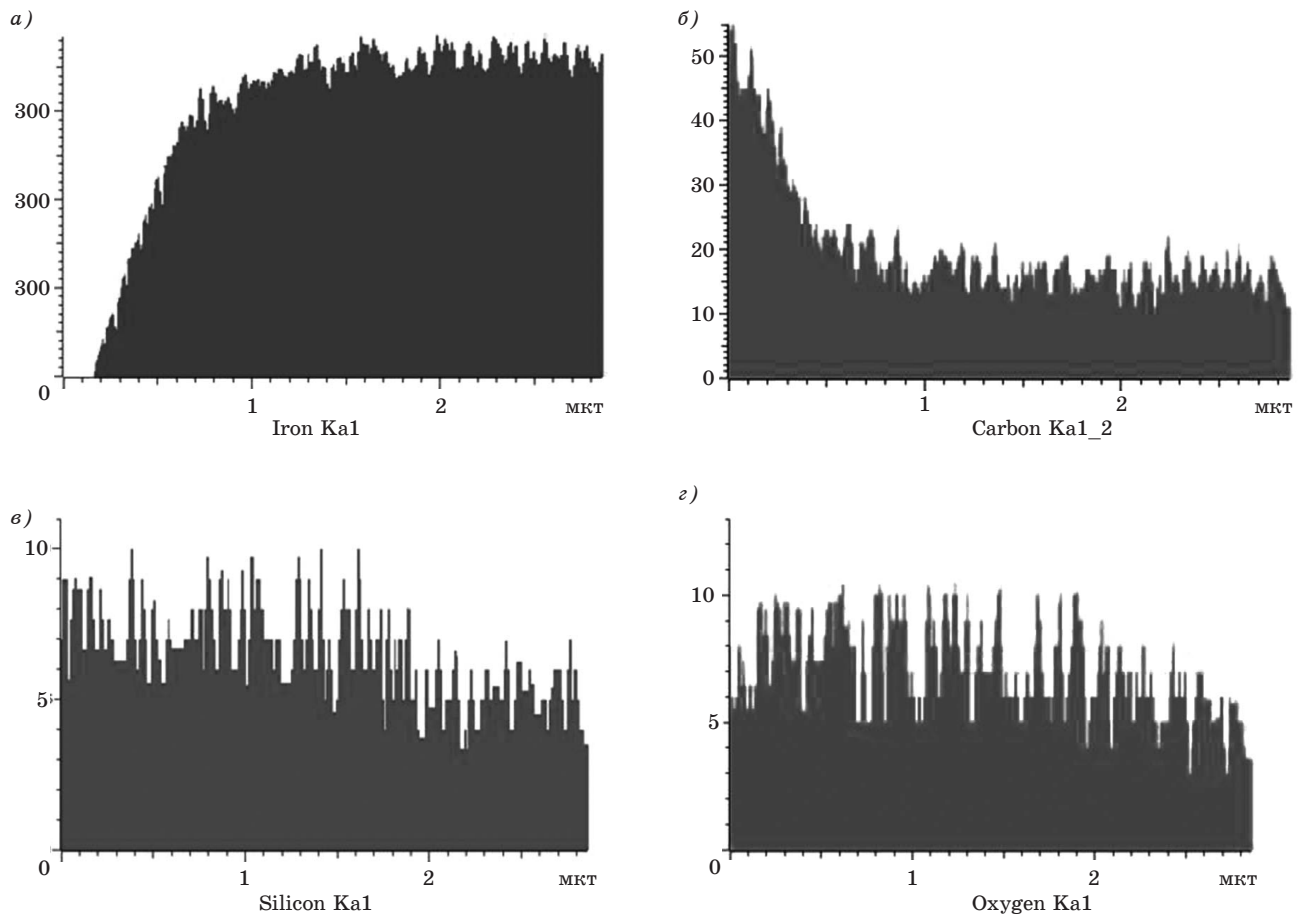


Рис. 3. Распределение элементов по глубине поперечного шлифа образца № 4: а — железо; б — углерод; в — кислород; г — кремний

Fig. 3. Distribution of elements along the depth of cross-section of sample N 4: a — iron, б — carbon, в — oxygen, г — silicon

показывают изменение элементного состава в подложке, переходной зоне «покрытие—подложка» и покрытии. В табл. 2 приведено процентное содержание элементов в покрытии.

По полученным фотографиям шлифов и спектрограммам определено отсутствие влияния материала подложки на элементный состав покрытия по процентному содержанию

Таблица 2

Элементный состав покрытия на различных материалах подложки

Table 2.

The elemental composition of the coating on various substrate materials

Материал образца	Содержание элементов в покрытии, %		
	Si	O	C
20X13	48,5	38,1	13,4
Сталь 20	61,7	29,7	8,6
BT1-0	57,7	35,1	7,2

кремния, кислорода и углерода. Зона взаимного диффузионного проникновения элементов покрытия и подложки по протяженности не превышает 0,3 мкм. В покрытии на всех шлифах отсутствуют микротрещины, поры, отслоения и другие дефекты. По результатам исследований образцов с разной длительностью проведения ФПУ выявлено отсутствие изменения содержания элементов в покрытии.

Морфология и элементный анализ покрытия, нанесенного методом ФПУ на образцы из термообработанной быстрорежущей стали Р6М5, изучали на растровом электронном микроскопе JSM-6390LV (Jeol, Япония) с приставкой энергодисперсионного микроанализа. Фазовый состав и кристаллическую решетку исследовали на дифрактометре X’Pert Pro в CuK $\alpha$ -излучении.

В результате исследований было выявлено, что микроструктура быстрорежущей стали

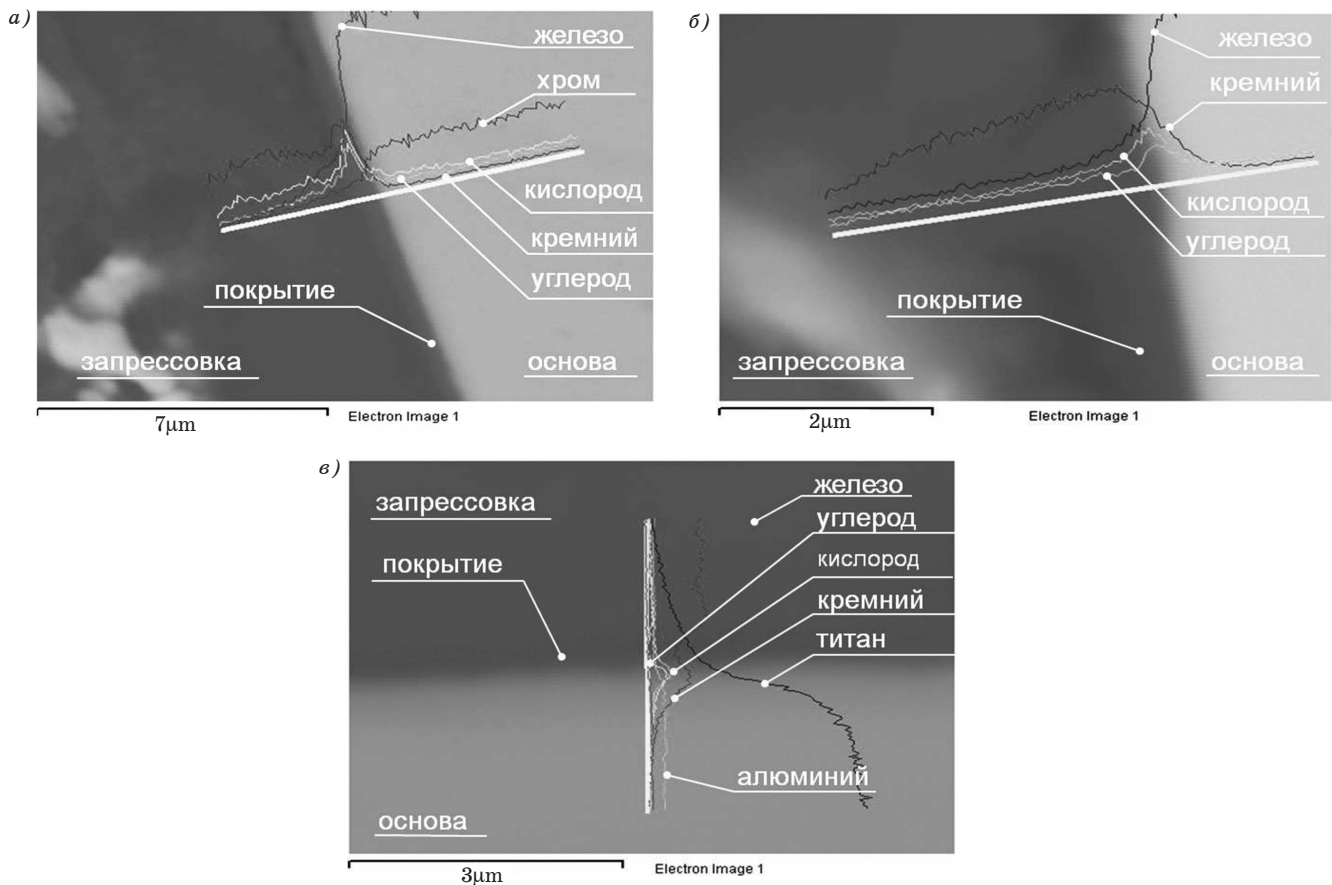


Рис. 4. Фотография шлифов с покрытием и спектрограммы на разных материалах подложки: *а* — стали 20X13; *б* — стали 20; *в* — сплава VT1-0

Fig. 4. Picture of thin sections with a coating and spectrogram on different substrate materials: *a* — steel 20X13; *б* — steel 20; *в* — alloy VT1-0

Р6М5 после закалки и трехкратного отпуска состоит из пластинчатого мартенсита отпуска и специальных карбидов (рис. 5, *а, б*) [6]. Частицы карбидов равномерно распределены в матрице и близки к сферической форме диаметром менее 5 мкм. После нанесения покрытия методом ФПУ наблюдаются видимые изменения — поверхность стали покрывается тонким слоем, который состоит из мелкодисперсных частиц (рис. 5, *в*). При этом в связи с прозрачностью нанесенного покрытия также видны сферические карбидные частицы стали Р6М5. Анализ изображений, полученных методом растровой электронной микроскопии, позволил заключить, что нанесенное покрытие состоит из сферических частиц на основе соединений кремния размером 100–300 нм (рис. 5, *г*).

На рис. 6 указаны области исследований и представлены результаты микроанализа.

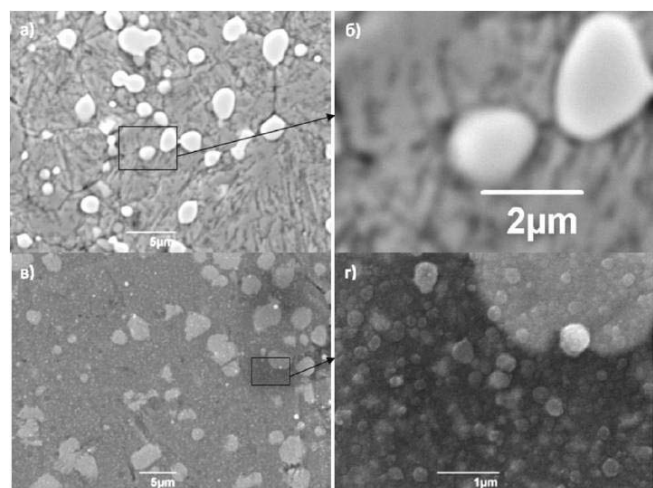


Рис. 5. Микроструктура быстрорежущей стали Р6М5 до (*а, б*) и после (*в, г*) нанесения тонкопленочного покрытия методом ФПУ

Fig. 5. Picture of thin sections with a coating and spectrogram on different substrate materials: *a* — steel 20X13; *б* — steel 20; *в* — alloy VT1-0

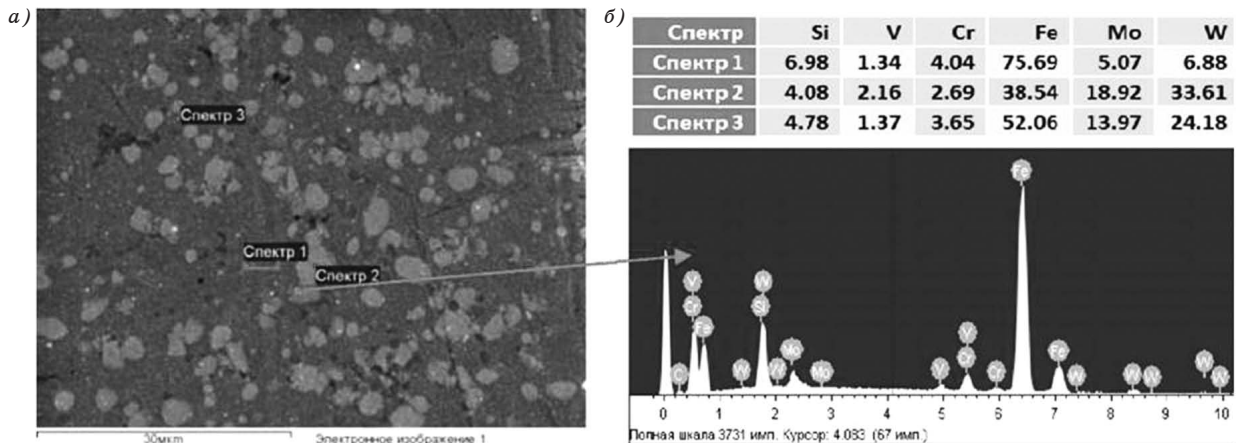


Рис. 6. РЭМ изображение (а) и элементный анализ (б) стали Р6М5 с покрытием

Fig. 6. SEM image (a) and elemental analysis (b) of coated steel P6M5

При этом содержание кремния в поверхностном слое стали Р6М5 в среднем составляет 6 %, в том числе на поверхности сферических карбидов около 4–5 %, на поверхности матрицы около 7 %. Малая концентрация кремния, по-видимому, связана с малой толщиной покрытия, так как зона охвата энергодисперсионного микроанализа составляет

около 5 мкм. Важно отметить, что многими исследователями отмечается особое влияние Si на увеличение прочности стали при сохранении пластичности и вязкости уже в количествах более 1 %.

На рис. 7 представлены рентгеновские дифрактограммы образцов стали Р6М5 до и после нанесения покрытия. Рентгеноструктурный

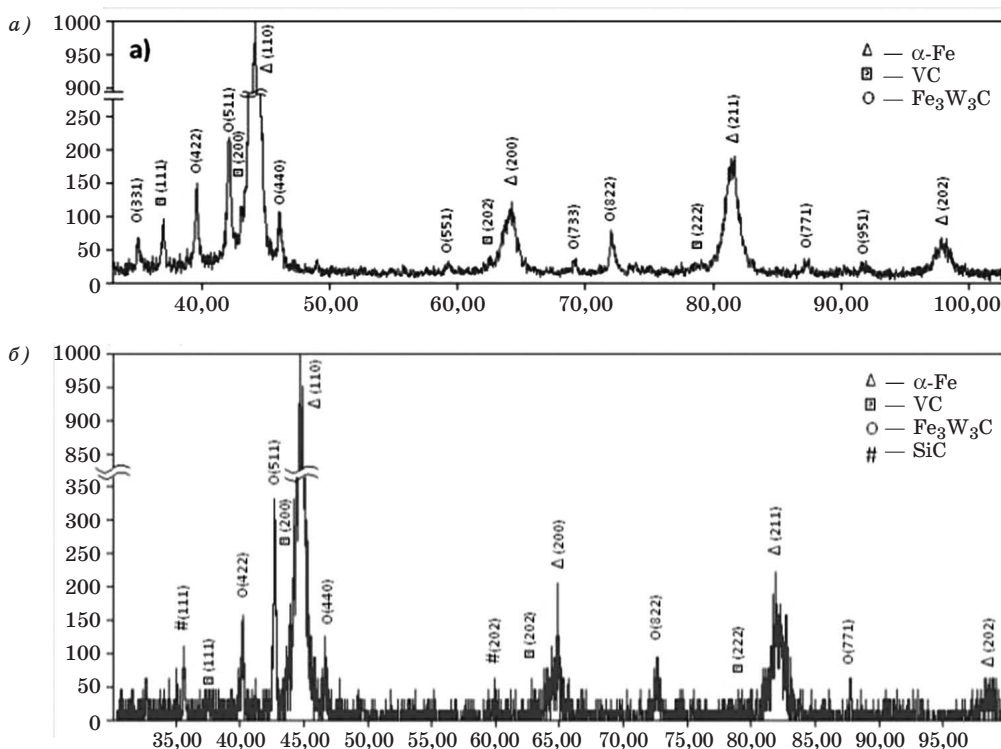


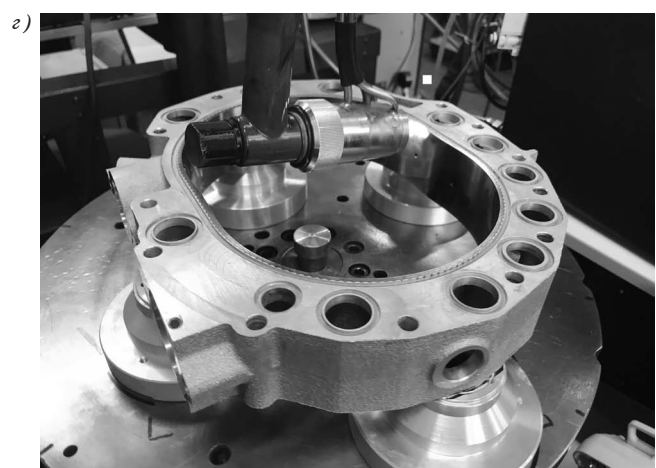
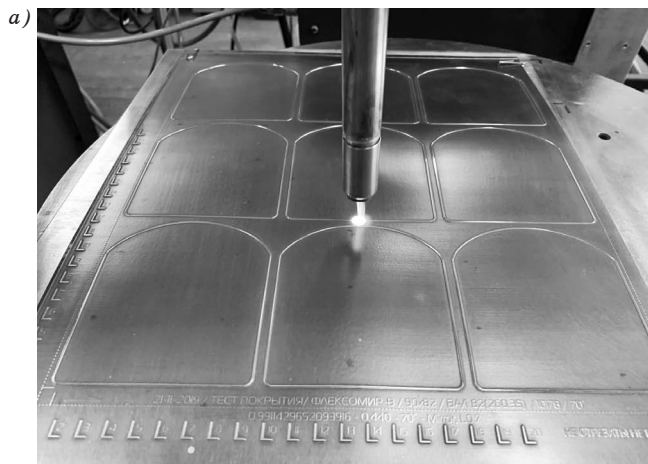
Рис. 7. Дифрактограммы поверхностного слоя стали Р6М5 до (а) и после нанесения покрытия (б)

Fig. 7. Diffraction patterns of the surface layer of steel P6M5 before (a) and after coating (b)



анализ показал, что сталь в исходном состоянии состоит из отпущенного мартенсита и карбидов типа  $M_6C$  ( $Fe_3W_3C$ ) и  $MC$  ( $VC$ ) (рис. 7, а). После нанесения тонкопленочного покрытия на дифрактограмме появляются рефлексы фазы  $SiC$  (111) и (202), которые имеют большую интенсивность отражения и находятся в меньших углах отражения. Появление только этих рефлексов связано с малой толщиной покрытия. Таким образом, по рентгеноструктурным исследованиям установлено, что тонкопленочное покрытие состоит из фазы  $SiC$  и оно не приводит к изменению исходного фазового состава приповерхностного слоя стали Р6М5 (рис. 7, б).

Известно, что  $SiC$  представляет собой очень прочное соединение. Энергия связи атомов  $Si$  и  $C$  значительно превышает энергию связи атомов кремния и лишь несколько меньше сил связи атомов углерода в алмазе. В соединении  $SiC$  тип связи преимущественно ковалентный.  $SiC$  характеризуется высокой термической устойчивостью — заметное испарение с разложением начинается при атмосферном давлении при температуре выше  $2000\text{ }^\circ\text{C}$ , а в неравновесных условиях — при температуре более  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ .  $SiC$  обладает исключительной химической стойкостью. При температуре выше  $1500\text{ }^\circ\text{C}$   $SiC$  реагирует с парами воды и водородом; в атмосфере кислорода он



**Рис. 8.** Финишное плазменное упрочнение: а — гибкого вырубного ножа; б — дискового ножа; в — экструзионной фильеры; з — статора роторно-поршневого двигателя

**Fig. 8.** Fig.8. Finishing plasma hardening of: а — flexible cutting knife; б — circular knife; в — extrusion die; з — rotary piston engine stator

окидается при температуре выше 1400 °С, причем толщина окисной пленки не превышает долей микрометра. При окислении независимо от температуры образуется лишь один стабильный оксид кремния [7].

Представленные результаты растровой электронной спектроскопии покрытий, нанесенных методом ФПУ на различные подложки, показали различие процентного содержания входящих элементов. Это связано с разными технологическими режимами нанесения покрытий и различными применяемыми жидкими препаратами. Но во всех исследованиях прослеживается общая тенденция получения близкого элементного состава покрытия. Обеспечение повышенных антифрикционных свойств покрытий, нанесенных методом ФПУ, ранее было доказано на основе исследований трибологических характеристик [8], а также физико-механических свойств [9] и параметров микроабразивного износа [10]. Приведенные выше исследования подтверждают выполнение требований к антифрикционным материалам, которые сформулировал Жорж Шарпи. В соответствии с этими требованиями покрытия при ФПУ имеют структуру, состоящую из пластичной основы (оксида кремния) и равномерно распределенных в ней твердых частиц (карбида кремния). Повышенные прочностные свойства покрытий, наносимых методом ФПУ, также соответствуют механизму упрочнения, описанному Эгоном Орованом, так как материал покрытия может состоять из частиц дисперсной фазы, распределенных в объеме матрицы. Важным фактором повышенной адгезионной прочности наносимых покрытий является взаимное диффузионное проникновение элементов покрытия и подложки. Это свойство покрытий присуще только химическому осаждению из паровой фазы — процессам CVD, но в отличие от традиционных методов CVD технология ФПУ — это низкотемпературный процесс.

### Практические примеры использования

На рис. 8 представлены некоторые примеры эффективного использования технологии ФПУ с нанесением тонкопленочного покрытия при атмосферном давлении: на рис. 8, *а* —

упрочнение вырубных ножей (гибких высечных штампов), используемых при производстве самоклеющихся этикеток, гибкой упаковки и другой полиграфической продукции; на рис. 8, *б* — дисковых ножей, применяемых для раскроя минеральной и каменной ваты; на рис. 8, *в* — упрочнение экструзионных фильер для прессования алюминиевых профилей для повышения износостойкости и уменьшения налипания; на рис. 8, *г* — упрочнение рабочих поверхностей статора роторно-поршневого двигателя для минимизации трибологических характеристик.

### Выводы

1. Критериями повышенной долговечности изнашиваемых деталей с тонкопленочными покрытиями, наносимыми методом ФПУ, являются наноструктурное состояние покрытий, наличие твердых и мягких фаз в покрытии или распределенных дисперсных твердых частиц, отсутствие дефектов в зоне перехода «покрытие—подложка», взаимное диффузионное проникновение элементов покрытия и подложки.

2. С использованием растровой электронной микроскопии доказано, что в условиях ФПУ осаждаются покрытия из наноразмерных структурных элементов, состоящие из кремния, кислорода, углерода и азота. Элементный состав покрытия не зависит от исследованных материалов подложки.

3. Анализ поперечных шлифов после растровой электронной микроскопии позволяет определить толщину наносимых покрытий, наличие или отсутствие дефектов в покрытии и зоне перехода «покрытие—подложка», изучить взаимное диффузионное проникновение элементов покрытия и подложки.

4. При определенных технологических режимах ФПУ возможно нанесение покрытия, состоящего из мелкодисперсных частиц, отвечающих фазе SiC, с размером порядка 100 нм, при этом покрытие не приводит к изменению исходного фазового состава поверхностного слоя металлической подложки.

5. Покрытия, наносимые методом ФПУ, отвечают требованиям создания антифрикционных и дисперсионно-упрочненных материалов

и, соответственно, могут быть использованы для повышения ресурса изнашиваемых деталей и инструмента.

тега им. С. Сейфуллина (междисциплинарный). 2017. № 2 (93). С. 111–119.

## Литература

1. **Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А.** Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2008. 406 с.
2. **Orowan E.** Condition for dislocation passage of precipitation. Proc. Symp. Intern. Stresses in Metals and Alloys. London. 1948. P. 451–454.
3. **Одинг И. А.** Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Машиностроение, 1962. 260 с.
4. **Соснин Н. А., Тополянский П. А., Вичик Б. Л.** Плазменные покрытия (технология и оборудование). СПб.: Об-во «Знание» России, ДНТП, 1992. 28 с.
5. **Тополянский П. А., Тополянский А. П., Блинков И. В., Скрылева Е. А.** Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев после финишного плазменного упрочнения // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: Материалы 12-й Международной научно-практической конференции 13–16 апреля 2010 г. СПб.: Изд-во. СПбГПУ, 2010. Ч. 2. С. 297–300.
6. **Скаков М. К., Рахадиллов Б. К., Рахадиллов М. К.** Упрочнение поверхности стали P6M5 нанесением тонкопленочного покрытия из SiC // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. 6-й МНПК. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. С. 156–159.
7. **Самсонов Г. В., Виницкий И. М.** Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 560 с.
8. **Канаев А. Т., Тополянский П. А., Тополянский А. П., Ермаков С. А., Бийжанов С. К., Решоткина Е. Н.** Сертификация материалов и покрытий по трибологическим характеристикам // Вестник Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева. Сер. Технические науки и технологии. 2018. № 2 (123). С. 73–81.
9. **Тополянский П. А., Тополянский А. П., Ермаков С. А., Канаев А. Т., Бийжанов С. К., Сарсембаева Т. Е.** Сертификация материалов и покрытий по физико-механическим характеристикам поверхностного слоя // Вестник современных исследований. 2018. № 10–1 (25). С. 354–366.
10. **Канаев А. Т., Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П.** Сертификация материалов и покрытий по параметрам микроабразивного изнашивания // Вестник науки Казахского агротехнического универси-

## References

1. **Sosnin N. A., Ermakov S. A., Topolyanskiy P. A.** Plasma technologies. Manual for engineers. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008, 406 p.
2. **Orowan E.** Condition for dislocation passage of precipitation. Proc. Symp. Intern. Stresses in Metals and Alloys. London, 1948, pp. 451–454.
3. **Oding I. A.** Permissible stresses in mechanical engineering and the cyclic strength of metals. Moscow: Mashinostroenie. 1962, 260 p.
4. **Sosnin N. A., Topolyanskiy P. A., Vichik B. L.** Plasma coatings (technology and equipment). Saint Petersburg, 1992, 28 p.
5. **Topolyanskiy P. A., Topolyanskiy A. P., Blinkov I. V., Skryleva E. A.** X-ray photoelectron spectroscopy of surface layers after finishing plasma hardening. Resource-saving repair technology, restoration and hardening of machines, mechanisms, equipment, tools and technological equipment from nano to macro level. Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference April 13–16, 2010. Saint Petersburg. Ed. SPbSPU, 2010, part 2, pp. 297–300.
6. **Skakov M. K., Rakhadilov B. K., Rakhadilov M. K.** Hardening of the surface of steel P6M5 by applying a thin film coating of SiC. Innovative technologies and economics in mechanical engineering. Collected works of the 6th MNPK. Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2013, pp. 156–159.
7. **Samsonov G. V., Vinitzky I. M.** Refractory compounds. Moscow: Metallurgiya, 1976, 560 p.
8. **Kanaev A. T., Topolyanskiy P. A., Topolyanskiy A. P., Ermakov S. A., Biizhanov S. K., Reshotkina E. N.** Certification of materials and coatings by tribological characteristics. Vestnik Evraziiskogo Nacional'nogo Universiteta imeni L. N. Gumilyova. Series Technical sciences and technologies. 2018, no 2 (123), pp. 73–81.
9. **Topolyanskiy P. A., Topolyanskiy A. P., Ermakov S. A., Kanaev A. T., Biizhanov S. K., Sarsembaeva T. E.** Certification of materials and coatings according to the physicomechanical characteristics of the surface layer. Vestnik sovremennyh issledovaniy. 2018, no 10–1 (25). pp. 354–366.
10. **Kanaev A. T., Topolyanskiy P. A., Ermakov S. A., Topolyanskiy A. P.** Certification of materials and coatings according to the parameters of microabrasive wear. Vestnik nayki Kazahskogo agrotehnicheskogo universiteta imeni S. Seytulina (interdisciplinary). 2017, no 2 (93), pp. 111–119.

## Сведения об авторах

**Тополянский Павел Абрамович** — кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке научно-производственной фирмы ООО «Плазмацентр», 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103, e-mail: info@plasmacentre.ru

**Ермаков Сергей Александрович** — кандидат технических наук, доцент Института машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, e-mail: sermakov@mail.ru

**Тополянский Андрей Павлович** — генеральный директор научно-производственной фирмы ООО «Плазмацентр», 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д. 68, оф. 103, e-mail: info@plasmacentre.ru

**Для цитирования:** Тополянский П. А., Ермаков С. А., Тополянский А. П. Исследование структуры и элементного состава поверхности металла после финишного плазменного упрочнения. *Металлообработка*, 2020, № 3, с. 35–46. DOI 10.25960/мо.2020.3.35

UDC 621.78

DOI 10.25960/мо.2020.3.35

## Study of the structure and elemental composition of the metal surface after finishing plasma hardening

P. A. Topolianskii<sup>1</sup>, S. A. Ermakov<sup>2</sup>, A. P. topolianskii<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Plasmacentre Ltd, Saint. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint. Petersburg, Russia

*The relevance of studying the structure and elemental composition of thin-film coatings to predict effectiveness of increasing the durability of parts has been considered. Known mechanisms of metal hardening in the course of creation of antifriction materials providing minimum friction coefficient, running-in time, heat generation during friction and wear parameters, and dispersion-hardened nanoparticle materials that increase strength characteristics have been presented. Separate aspects of the technology of finishing plasma hardening by coating at the finishing stage of manufacturing parts with their heating temperature less than 150 °C and invariability of the initial roughness parameters have been considered. The results of scanning electron microscopy confirmed possibility of obtaining defect-free nanoscale coatings containing silicon, oxygen, carbon and nitrogen. Mutual diffusion penetration of the coating elements and substrate is proved, which characterizes high adhesive characteristics of the coating. Separate practical examples of increasing the durability of wearing parts and tools using the technology of finish plasma hardening have been given.*

**Keywords:** *hardening, wear-resistant coating, microstructure, ultimate composition, finish plasma hardening.*

### Information about the authors

**Pavel A. Topolianskii** — Candidate Engineering Sciences, Deputy General Director for Science, Plasmacentre Ltd, of. 103, 68, Maloochtinskii pr., St. Petersburg, Russia, 195112, e-mail: info@plasmacentre.ru

**Sergey A. Ermakov** — Candidate Engineering Sciences, Associate Professor, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Higher School of Mechanical Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya str., St. Petersburg, Russia, 195251, e-mail: cermakov@mail.ru

**Andrey P. Topolianskii** — General Director Plasmacentre Ltd, of. 103, 68, Maloochtinskii pr., St. Petersburg, Russia, 195112, e-mail: info@plasmacentre.ru

**For citation:** Topolianskii P. A., Ermakov S. A., Topolianskii A. P. Study of the structure and elemental composition of the metal surface after finishing plasma hardening. *Metallrobrabotka*, 2020, no 3, pp. 35–46. DOI 10.25960/мо.2020.3.35