

УДК 621([91.01/02]:[793.1/71])

DOI 10.52928/2070-1616-2026-53-1-14-23

ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ С РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ И ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК¹, д-р физ.-мат. наук, проф. В.А. КУКАРЕКО²,
канд. техн. наук, доц. Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ¹, А.В. КУШНЕРОВ², В.С. АНИСИМОВ¹,
канд. техн. наук, доц. С.И. ДМИТРИЕВ³*

(¹Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск;

³Псковский государственный университет)

Целью работы является повышение надежности деталей машин и режущих инструментов, функционирующих в экстремальных условиях фрикционного взаимодействия с большими величинами давления и температуры. Для достижения поставленной цели решаются задачи разработки кинематических схем формообразования микрорельефа поверхности и технологических основ нанесения комбинированного газотермического и вакуумного ионно-плазменного покрытия. В качестве объектов исследований выбраны детали плунжерной пары и режущие инструменты. Используются экспериментальные методы исследований структуры, а также современные приборы и аппаратура для определения микротвердости и адгезии покрытий. Приведены результаты измерения твердости и микротвердости, рентгеновские дифрактограммы поверхностного слоя, зависимости акустической эмиссии и коэффициента трения газотермических, комбинированных и ионно-плазменных покрытий.

Ключевые слова: *формообразование, микрорельеф, поверхность, газотермические, ионно-плазменные и комбинированные покрытия, микротвердость, адгезия.*

Введение. В современных промышленных технологиях широко используются износостойкие покрытия для повышения эксплуатационной надежности деталей машин и режущих инструментов, функционирующих в экстремальных условиях фрикционного взаимодействия при больших давлениях и температурах.

Одним из перспективных методов улучшения физико-механических свойств материалов является комбинированное воздействие на поверхности деталей и инструментов путем последовательного нанесения регулярного микрорельефа и покрытий методами газотермического напыления, а также вакуумного ионно-плазменного осаждения [1]. При этом используются различные способы лезвийной и абразивной обработки [2; 3], а также газотермического [4; 5] и вакуумного ионно-плазменного [6] нанесения покрытий из различных материалов [7]. Рекомендуется, в основном, традиционная «треугольная нарезка» поверхностей основы под покрытие токарной обработкой и шлифованием, использование в качестве упрочняющих материалов титановых сплавов, углеродистых инструментальных сталей, фаз внедрения (карбидов, боридов, нитридов), азотных и углекислых газовых сред.

Актуальным является исследование прогрессивных способов формообразования поверхностей основы с регулярным микрорельефом и сочетания нанесения различных упрочняющих покрытий.

В данной статье рассмотрены результаты исследований схем видов лезвийной обработки поверхностей с вращательными движениями заготовки и инструмента и относительного их перемещения в движении подачи, обеспечивающих получение «сетчатой» поверхности детали, газотермического нанесения покрытия из порошка ПГ-Ю-НХ16СР3 на поверхности деталей плунжерной пары и вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN на поверхности лезвий инструмента из стали 9ХС, твердых сплавов ВК10 и Т5К10.

Основная часть. Методика и материалы исследований. В качестве образцов для исследования использовались плунжерные пары «втулка–плунжер из стали 40Х (рисунок 1), на рельефные поверхности которых наносилось покрытие газотермическим методом при различных технологических условиях:

- образец I: напыление, оплавление в печи, шлифование;
- образец II: напыление, оплавление в печи, шлифование;
- образец III: напыление, газопламенное оплавление, шлифование;
- образец IV: напыление, без оплавления, шлифование.

Применялся порошок композиционный терморегулирующий марки ПГ-Ю-НХ16СР3, ТУ14-22-76-95 различного фракционного состава. Покрытие из этого материала имеет следующие основные свойства: стойкость к удару, высокое сопротивление абразивному износу, фреттинг-коррозии, кавитационной эрозии, окислению на воздухе до 800 °С, коррозии в водных, щелочных средах и других промышленных агрессивных средах. Обработка резанием и шлифованием. Из порошка формируются износостойкие покрытия на деталях оборудования энергетического машиностроения (насосы, запорная арматура для нефтепромыслов, металлургического оборудования горячих цехов, штампового инструмента, экструдеров шинных заводов, деталей автомобильного, судового и железнодорожного транспорта, например, лопастей гребных винтов, деталей тепловозов, сцепок вагонов и пр.).



Рисунок 1. – Внешний вид плунжерных пар с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3 (а) и с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3+TiN (б)

Химический состав порошка ПГ-Ю-НХ16СР3: хром – 16%, бор – 2,7%, кремний – 3,2%, железо – <5%, углерод – 0,75%. Твердость 47...52 HRC. Температура плавления 1040 °С. Такой состав используется для детонационного и высокоскоростного напыления покрытий толщиной 20–63 мкм, для плазменного и газопламенного напыления покрытий толщиной 40–100 мкм, для наплавки покрытий толщиной 100–160 мкм.

Образцы с покрытием TiN формировались методом вакуумного ионно-плазменного осаждения на подложках из предварительно отожженной стали 9ХС (твердость 270 HV 10), а также твердых сплавов Т5К10 и ВК10 с твердостью ≈ 1400 HV 10. Нанесение покрытий проводилось на специализированной установке модели РVM-0,5FN. Режим нанесения: ток – 85 А, температура – 190 °С, давление – $3 \cdot 10^{-3}$ МПа, время нанесения покрытия – 30 мин. Толщина покрытий составляет порядка ~ 2 мкм. Внешний вид образцов из инструментальных материалов с покрытием TiN представлен на рисунке 2.

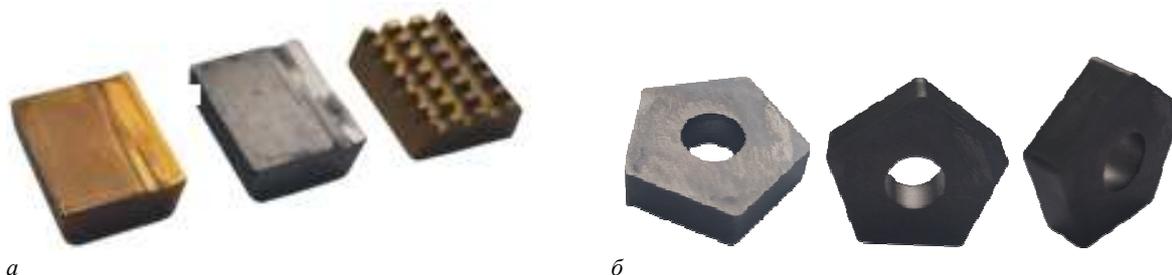


Рисунок 2. – Внешний вид твердосплавных пластин с покрытием на рельефных (а) и безрельфных (б) поверхностях

Рентгеноструктурный анализ фазового состава покрытий проводился на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном $\text{CoK}\alpha$ излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА.

Микротвердость покрытий измерялась на твердомере Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments с применением алмазного индентора Берковича. Нагрузка на индентор составляла 5 г.

Для определения нагрузки полного отслаивания ($Lc3$) покрытий TiN от подложки проводились испытания методом скретч-тестирования на трибометре MFT-5000. К поверхности образца с покрытием подводился индентор Роквелла (алмазный наконечник с радиусом при вершине 20 мкм и углом 120°). Далее индентор перемещался по испытываемой поверхности и одновременно прикладывалась постепенно увеличивающаяся нагрузка в пределах от 1 до 50 Н для подложки стали 9ХС и от 5 до 200 Н для сплавов Т5К10 и ВК10. Нагрузка полного отслаивания ($Lc3$) покрытия от подложки определялась по резкому увеличению значений коэффициента трения и анализу микроструктуры царапины.

Формирование микрорельефа поверхности основы. Создание рельефа поверхностей основы обеспечивается скоростной обработкой лезвийным инструментом, работающим по схемам фрезерования с касательным движением инструмента и частотой его вращения до 10000 мин⁻¹ (таблица 1). Устанавливается соотношение частот вращения инструмента и заготовки более 100 при фрезеровании и порядка 0,5÷0,6 при токарной обработке.

При торцовом фрезеровании (таблица 1, п. 1.1) фреза совершает вращательное главное движение резания D_r , а заготовка – движение подачи D_s , направленное перпендикулярно оси вращательного главного движения (таблица 1, п. 2.1). При этом траектория резания имеет вид циклоиды (таблица 1, пп. 3.1 и 4.1). При плунжерном фрезеровании (таблица 1, п. 1.2) фреза совершает главное вращательное движение D_r и движение подачи D_s вдоль оси вращательного главного движения (таблица 1, п. 2.2), заготовка неподвижна. Вид траектории резания – винтовая линия (таблица 1, пп. 3.2, 4.2).

При обработке цилиндрической или конической поверхностей деталей (таблица 1, п. 1.3) реализуется схема резания с главным вращательным движением резания D_r , сообщаемым инструменту 1, поступательным (вдоль оси главного вращательного движения) движением подачи D_{s1} , также сообщаемым инструменту, и круговым движением подачи D_{s2} , сообщаемым заготовке 2 (таблица 1, п. 2.3). По существу, реализуется схема осевой обработки (зенкерования) или плунжерного фрезерования. Траектория резания – винтовая линия. При этом за счет двух вращательных и поступательного движений, применения многолезвийного режущего инструмента обеспечиваются касательное движение режущей кромки, увеличение его линейной скорости, и, как следствие, повышение производительности и качества обработки.

При обработке неполных сферических поверхностей деталей (таблица 1, пп. 1.4, 1.5) реализуются схемы плунжерного фрезерования, при которых одно из движений подачи D_{s2} направлено под углом или перпендикулярно к оси главного вращательного движения D_r . Результирующая скорость резания равна скорости касательного движения. За счет высокой скорости вращательного движения D_r (порядка 10–20 м/с) и выбора соответствующих значений углов наклона режущей кромки в плане обеспечивается как режим резания, так и режим выглаживания сферической поверхности с параметрами шероховатости сопоставимыми со шлифованными поверхностями.

Выглаживание поверхности обеспечивается уменьшением значений углов в плане и заднего угла, которые могут принимать нулевые значения, и увеличением значений угла наклона режущей кромки лезвия, а также за счет существенного увеличения скорости касательного движения. Таким вращающимся инструментом (фрезой-зенкером) можно последовательно обрабатывать сферические, цилиндрические или конические поверхности детали по схеме, представленной в таблице 1, п. 1.6. Траектории резания – винтовая линия, накрученная на окружность с изменяющимся радиусом и циклоида, накрученная на коническую поверхность.

При обработке плоских поверхностей деталей, например, уступов, полостей и т.п. (таблица 1, пп. 1.7, 1.8) реализуется схема резания с главным вращательным движением D_r и двумя поступательными движениями подачи D_{s1} и D_{s2} , обеспечивающими врезание фрезы по касательной к обрабатываемой поверхности или поверхности резания с линейной скоростью результирующего движения резания.

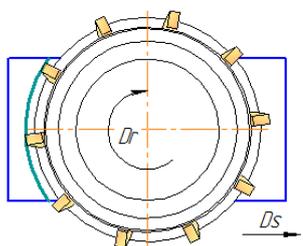
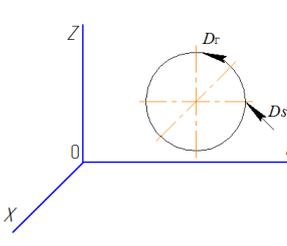
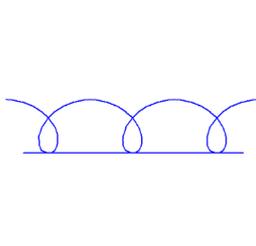
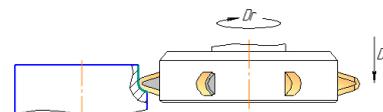
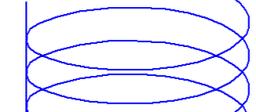
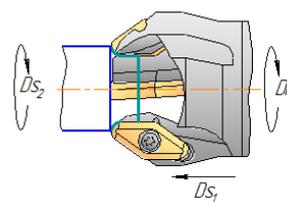
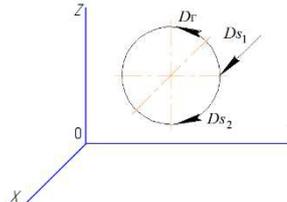
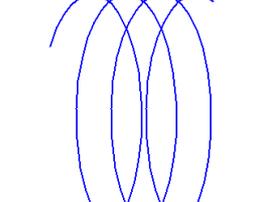
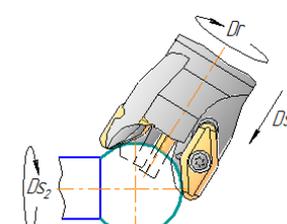
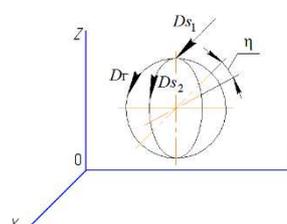
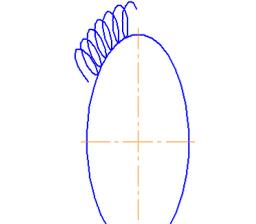
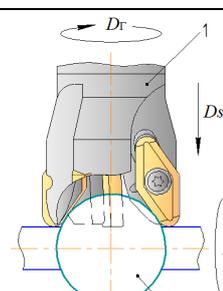
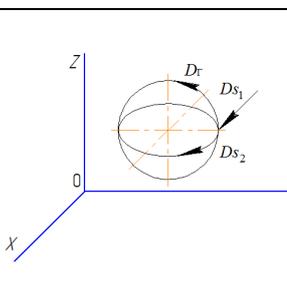
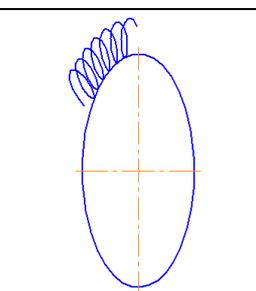
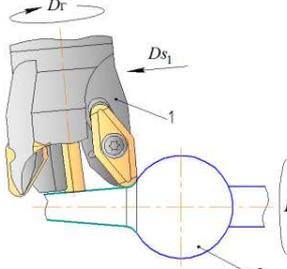
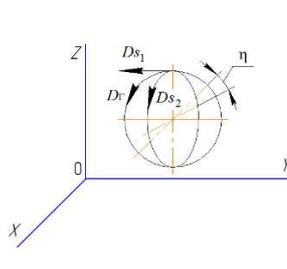
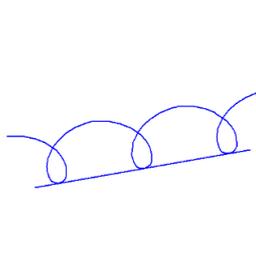
Реализация трехэлементных кинематических схем с движением резания по касательной к обрабатываемой поверхности осуществляется или двумя поступательными движениями подачи D_{s1} и D_{s2} (таблица 1, п. 1.10), или одним поступательным D_{s1} и одним вращательным D_{s2} (таблица 1, п. 1.9) движениями подачи. При этом формируются как плоская, так и цилиндрическая поверхности детали высокого качества.

Каждая из рассмотренных схем обработки может быть условно изображена трехэлементными кинематическими схемами резания, представленными в таблице 1, столбце 2. В таблице 1, столбце 2, в отличие от кинематических схем профессора Г.И. Грановского и в развитие обобщенной кинематической схемы с пятиэлементными движениями резания, уточнен тип режущего инструмента, который, в частности, является охватывающим, и соответственно, траектория вращательного движения подачи изображена внутри траектории главного вращательного движения в виде окружностей (таблица 1, п. 2.3), а в случае расположения оси главного вращательного движения под углом (таблица 1, п. 2.4) или перпендикулярно (таблица 1, п. 2.5) направлению вращательного движения подачи – в виде эллипса.

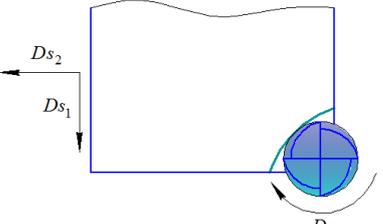
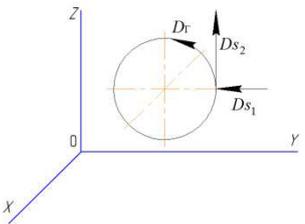
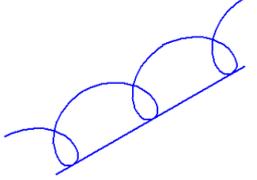
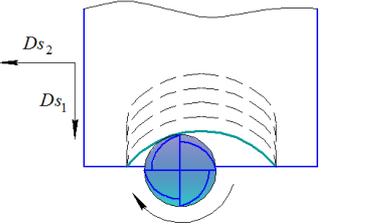
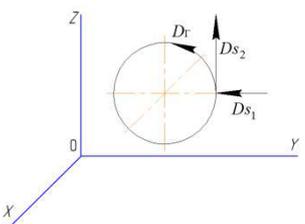
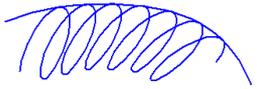
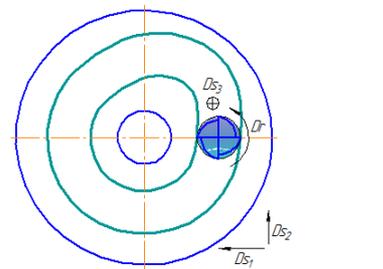
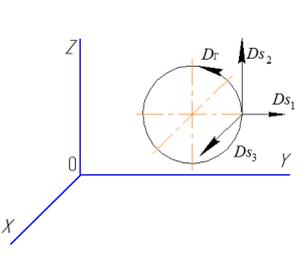
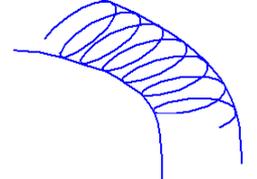
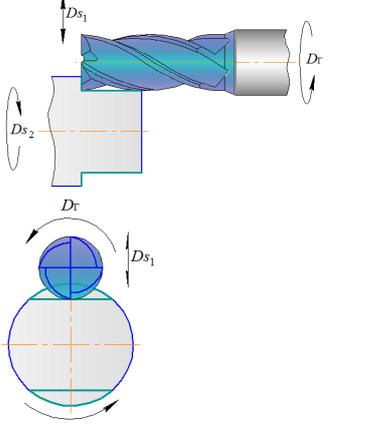
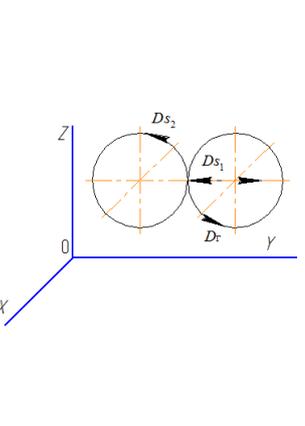
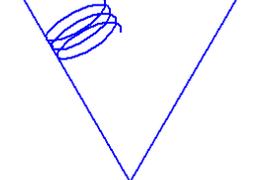
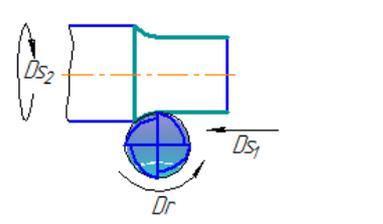
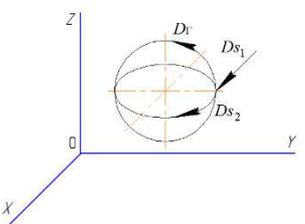
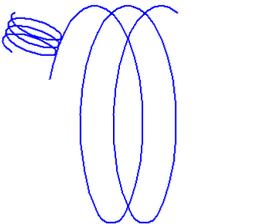
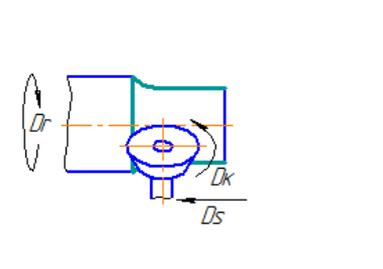
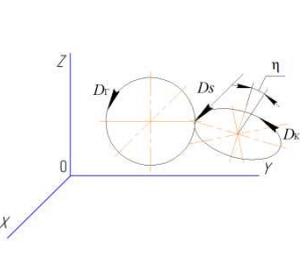
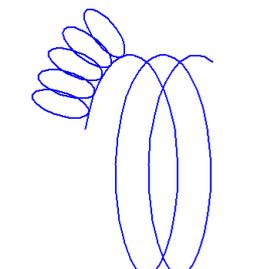
В результате сложного движения резания можно получить рельеф в виде «сетки» на цилиндрических, конических, сферических и плоских криволинейных поверхностях (рисунок 3, а, б). При этом решаются задачи формирования поверхностей под газотермические (рисунок 3, в) и ионно-плазменные (рисунок 3, г) покрытия. При формировании рельефа поверхностей лезвий режущего инструмента учитывается форма его естественного износа (рисунок 3, д). Определены режимы обработки и оборудование, на котором осуществляется подготовка поверхностей.

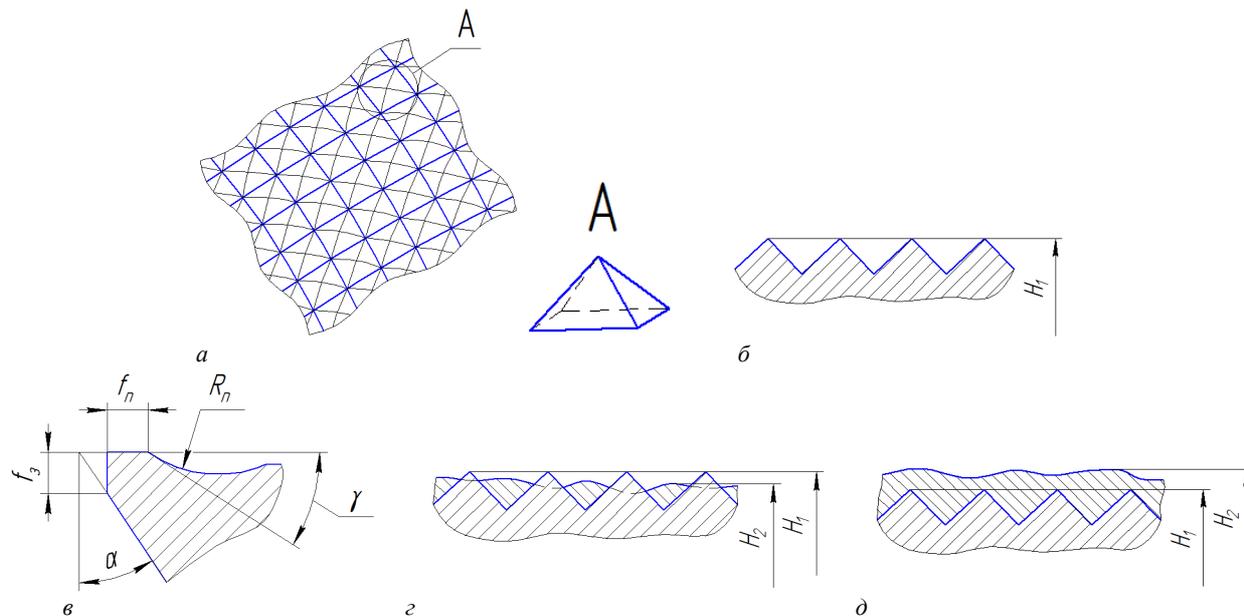
Величина сторон основания и высоты получаемого «пирамидального» рельефа поверхности (рисунок 3, а) зависят от соотношения частот вращения инструмента и заготовки и скорости их относительного движения подачи. В случае токарной обработки это соотношение частот вращения инструмента и заготовки находится в пределах $0,5 \div 0,6$, а при фрезеровании – достигает $100 \div 500$, что обеспечивает высоту неровностей в пределах $H_1 = 0,63 \div 6,3$ мкм (рисунок 3, б) [8; 9]. Нанесение газотермического покрытия перекрывает рельеф высотой H_1 , что обеспечивает его высокую адгезию с основой, а последующая обработка покрытия приводит к высоте неровностей H_2 (рисунок 3, в). Нанесение вакуумного ионно-плазменного покрытия обеспечивает «сглаживание» вершин рельефа высотой H_1 и заполнение впадин рельефа, что позволяет снизить высоту неровностей до значений H_2 . При нанесении покрытия на поверхности лезвия инструмента по форме, представленной на рисунке 3, д, повышает их износостойкость.

Таблица 1. – Разновидности схем обработки поверхностей

№	Схема обработки	Кинематическая схема резания	Вид траектории резания	Наименование траектории резания
	1	2	3	4
1				Циклоида
2				Винтовая
3				Винтовая, накрутая на цилиндр с неизменным или изменяющимся диаметром
4				Винтовая, накрутая на окружность с изменяющимся радиусом
5				Винтовая линия, накрутая на окружность с изменяющимся радиусом
6				Циклоида, накрутая на коническую поверхность

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
7				<p>Циклоида по заданному направлению</p>
8				<p>Циклоида по криволинейному контуру</p>
9				<p>Циклоида, касающаяся двух криволинейных поверхностей</p>
10				<p>Циклоида, наверхнутая на изменяющуюся по длине хорду окружности</p>
11				<p>Циклоида, наверхнутая на винтовую линию</p>
12				<p>Окружность, наверхнутая на винтовую линию</p>



а – «сетчатая»; **б** – «треугольная нарезка»; **в** – «толстым» покрытием; **г** – «тонким» покрытием; **д** – профиль лезвия режущего инструмента; H_1 – высота исходных неровностей; H_2 – высота неровностей покрытия

Рисунок 3. – Вид поверхности с микронеровностями

Исследование структуры и свойств покрытий. В результате газотермического напыления покрытий получены образцы со следующей твердостью: I – 426 HV_{0,1}; II – 444 HV_{0,1}; III – 378 HV_{0,1}; IV – 223 HV_{0,1}. На образцы I и IV ионно-плазменным методом в вакууме наносилось покрытие TiN. Результаты исследований фазового состава и микротвердости образцов представлены на рисунке 4 и в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, комбинированное покрытие, содержит фазу TiN с ГЦК решеткой (параметр $a = 4,3200 \text{ \AA}$) и включения титана, что в 3 раза увеличивает микротвердость образцов по сравнению с монопкрытием ПГ-Ю-НХ16СР3.

Характерные дифрактограммы от нанесенных на различные подложки покрытий TiN представлены на рисунке 5. На дифрактограммах, полученных от покрытий, наряду с дифракционными линиями от подложек: α -Fe, Fe₃C (9ХС, рисунок 5, а); WC, TiC, Co (Т5К10, рисунок 5, б); WC, Co (ВК10, рисунок 5, в) регистрируются линии от нитрида титана TiN с ГЦК решеткой типа NaCl и титана Ti с ГПУ решеткой. Параметр кристаллической решетки фазы TiN составляет $a = 0,4240 \text{ нм}$. Присутствие на дифрактограммах линий от фазы Ti связано с наличием капельной фракции в распыляемом при формировании покрытия титане. Твердость покрытий TiN составляет $H \approx 29 \text{ ГПа}$.

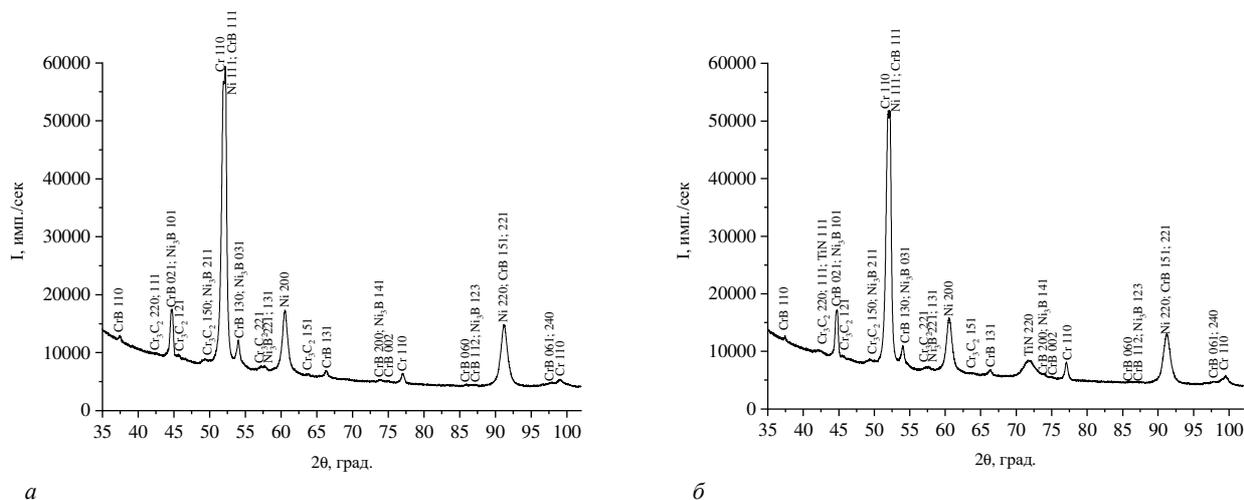


Рисунок 4. – Дифрактограммы образцов с покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3 (а) и с комбинированным покрытием ПГ-Ю-НХ16СР3+TiN (б)

Таблица 2. – Фазовый состав и микротвердость образцов

Образец	HV 0,025	Фаза	PDF №	Кристаллографическая группа	Параметры кристаллической решетки
ПГ-Ю-НХ16СР3	500	Ni	4-850	cubic, Fm-3m	$a = 3,5238 \text{ \AA}$
		Cr	6-694	cubic, Im-3m	$a = 2,8839 \text{ \AA}$
		CrB	32-277	orthorhombic, Cmcm	$a = 2,9663 \text{ \AA}; b = 7,8666 \text{ \AA}; c = 2,9322 \text{ \AA}$
		Cr ₃ C ₂	35-804	orthorhombic, Pnam	$a = 5,5273 \text{ \AA}; b = 11,4883 \text{ \AA}; c = 2,8286 \text{ \AA}$
		Ni ₃ B	48-1223	orthorhombic, Pnma	$a = 5,2112 \text{ \AA}; b = 6,6200 \text{ \AA}; c = 4,3955 \text{ \AA}$
ПГ-Ю-НХ16СР3 + TiN	1600	Ni	4-850	cubic, Fm-3m	$a = 3,5238 \text{ \AA}$
		Cr	6-694	cubic, Im-3m	$a = 2,8839 \text{ \AA}$
		CrB	32-277	orthorhombic, Cmcm	$a = 2,9663 \text{ \AA}; b = 7,8666 \text{ \AA}; c = 2,9322 \text{ \AA}$
		Cr ₃ C ₂	35-804	orthorhombic, Pnam	$a = 5,5273 \text{ \AA}; b = 11,4883 \text{ \AA}; c = 2,8286 \text{ \AA}$
		Ni ₃ B	48-1223	orthorhombic, Pnma	$a = 5,2112 \text{ \AA}; b = 6,6200 \text{ \AA}; c = 4,3955 \text{ \AA}$
		TiN	87-631	cubic, Fm-3m	$a = 4,3200 \text{ \AA}$

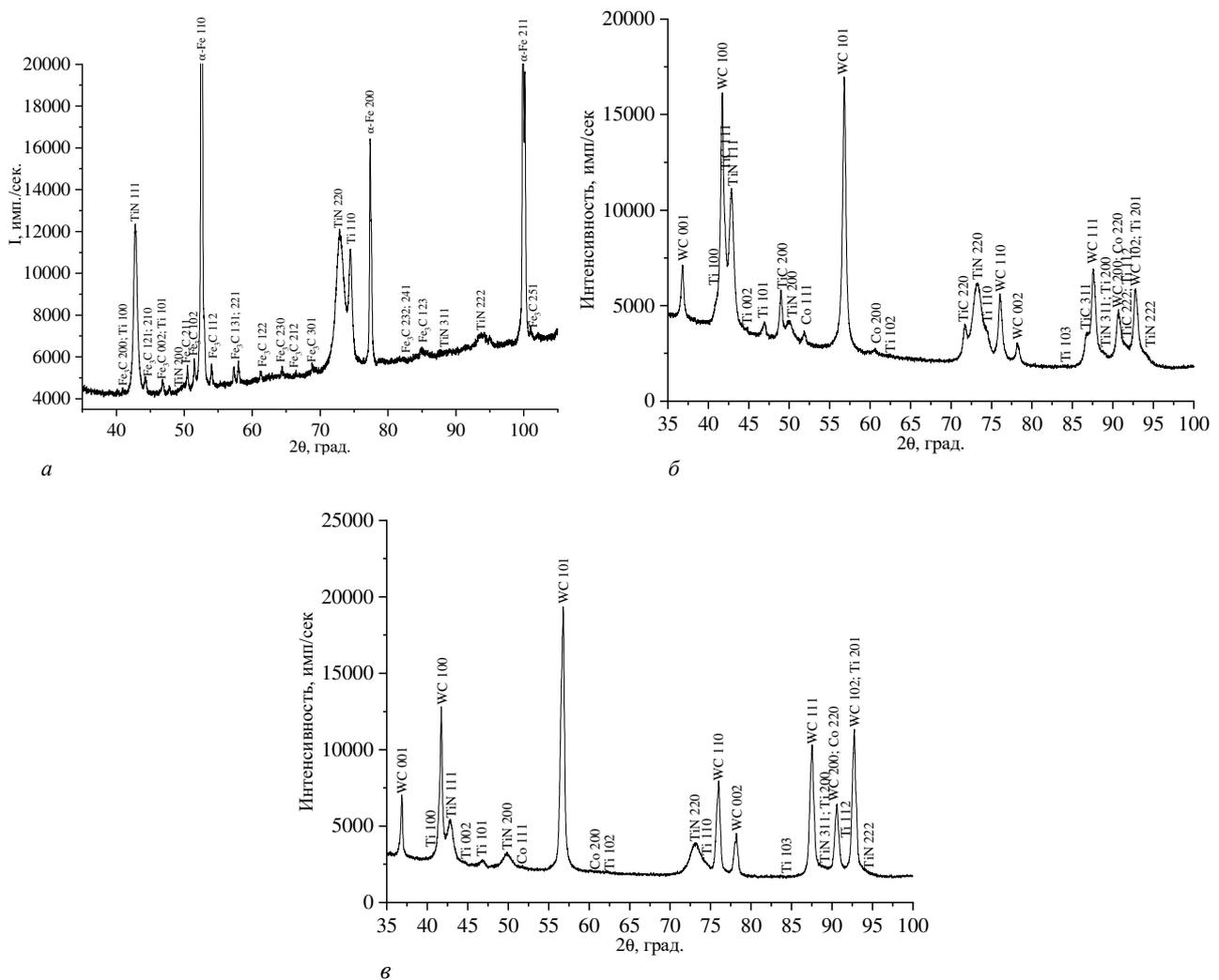
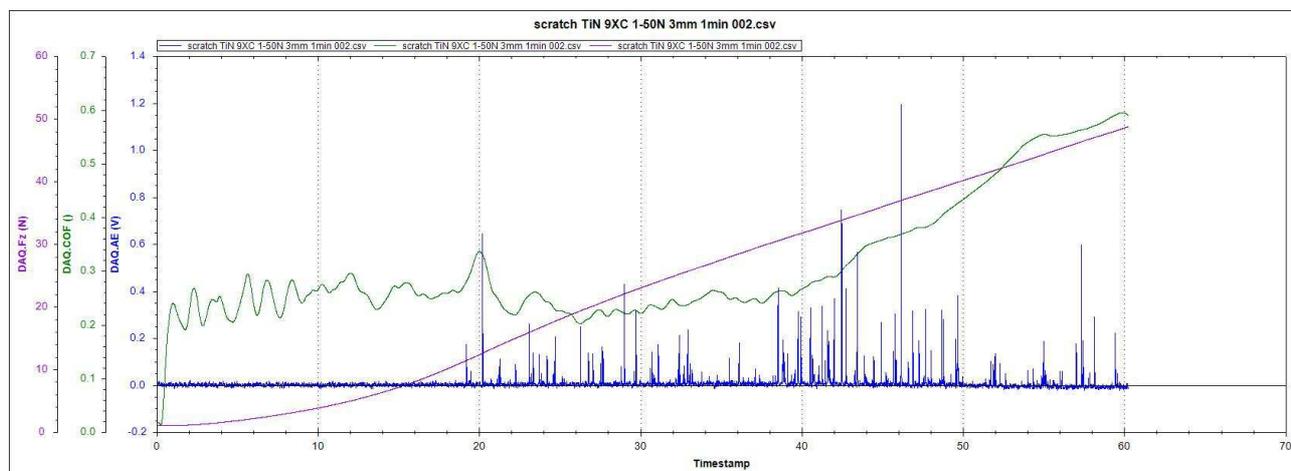


Рисунок 5. – Характерные фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKa) поверхностного слоя вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, осажденного на сталь 9ХС (а), твердые сплавы Т5К10 (б) и ВК10 (в)

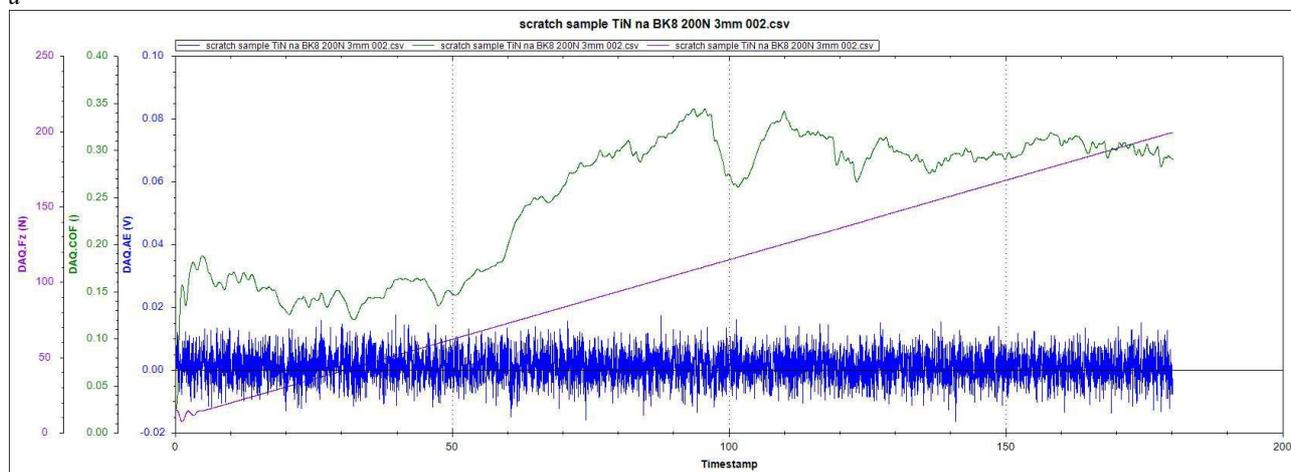
На рисунке 6 представлены результаты проведения скретч-тестирования для покрытий TiN в виде графиков зависимости приложенной нагрузки на индентор, коэффициента трения и акустической эмиссии от про-

должительности испытаний. Значения нагрузки отслаивания L_c3 покрытий TiN, нанесенных на различные подложки, представлены в таблице 3.

Согласно данным таблицы 3, L_c3 для TiN-покрытий на твердых сплавах в 2,3–3,3 раз выше, чем для покрытий на подложке из стали 9ХС. Такое различие может быть обусловлено отсутствием при испытаниях пластической деформации подложки из твердых сплавов (Т5К10 и ВК10) по сравнению со сталью 9ХС, что снижает вероятность разрушения покрытия. В случае стали 9ХС более низкие значения L_c3 могут объясняться ее сравнительно низкой прочностью, приводящей к пластической деформации подложки в процессе испытаний [10]. Согласно работе [11], отслаивание покрытия от подложки обусловлено накоплением дислокаций и последующим образованием микротрещин. Кроме того, как показано в [12], возникновение микротрещин может быть связано с несовместностью упругой деформации высокопрочного поверхностного слоя и пластической деформации более мягкой подложки при индентировании. Этот эффект усиливается при значительной разнице в твердости между покрытием и подложкой. При этом повышение твердости подложки способствует снижению скорости образования микротрещин, что улучшает адгезионную прочность системы [12].



а



б

Рисунок 6. – Зависимость акустической эмиссии (DAQ.AE), коэффициента трения (DAQ.COF), нагрузки на индентор (DAQ.Fz) от времени испытаний (Timestamp) для вакуумного ионно-плазменного покрытия TiN, осадженного на сталь 9ХС (а) и твердый сплав ВК10 (б)

Таблица 3. – Значения нагрузки полного отслаивания L_c3 покрытий TiN, нанесенных на различные подложки

Подложка	L_c3 , Н
9ХС (отжиг)	30
Т5К10	100
ВК10	70

Покрyтия TiN, нанесенные на твердые сплавы T5K10 (TiC-Co) и BK10 (WC-Co), имеют разную нагрузку отслаивания $Lc3_{T5K10} \approx 100$ Н и $Lc3_{BK10} \approx 70$ Н, что объясняется различиями в их химическом составе и структуре. В частности, основным фактором, влияющим на лучшее сцепление TiN с T5K10, является химическое сродство TiN и карбида титана (TiC). Указанные в таблице 2 фазы имеют идентичные кристаллические решетки типа NaCl с близкими значениями параметра решетки ($a_{TiN} = 0,4242$ нм, $a_{TiC} = 0,4327$). Благодаря этому TiN может формировать когерентные границы с TiC, тогда как в случае контакта покрытия TiN с WC из-за разной кристаллической структуры сопрягающихся решеток возникает несоответствие, приводящее к появлению дефектов кристаллической решетки на межфазной границе и снижению нагрузки отслаивания.

Заклyчение.

1. Разработаны кинематические схемы формирования микрорельефа поверхности основы под покрытие, отличающиеся вращательными движениями заготовки и инструментов и относительным движением подачи, а также установлены диапазоны соотношений частот вращения инструмента и заготовки в пределах $0,5 \div 0,6$ при токарной обработке и $100 \div 500$ при фрезеровании в процессах резания и выглаживания, что обеспечивает получение «сетчатой» поверхности с высотой неровностей $Ra = 0,63 \div 6,3$ мкм, повышающей адгезию покрытия с основой. Для лезвия инструмента рекомендуется форма его естественного износа, что при нанесении покрытия обеспечивает повышение износостойкости режущего инструмента.

2. Исследованы фазовый состав и твердость газотермического покрытия из порошка ПГ-Ю-НХ16СР3. Установлено повышение твердости покрытия до 2 раз по сравнению с основой.

3. Показано, что дополнительное ионно-плазменное осаждение покрытия TiN обеспечивает повышение микротвердости поверхности в 3 раза по сравнению с монопoкрытием ПГ-Ю-НХ16СР3.

4. Установлено, что вакуумные покрытия содержат фазу TiN с ГЦК решеткой (параметр $a = 0,4240$ нм) и включения титана. Твердость покрытия TiN составила ~ 29 ГПа. Показано, что максимальное значение $Lc3$, составляющее 100 Н, достигается для покрытия TiN, сформированного на подложке из твердого сплава T5K10. Для сплава BK10 нагрузка полного отслаивания покрытия TiN составила 70 Н, для стали 9ХС – 30 Н. Высокие значения $Lc3$ для покрытий TiN, осажденных на твердых сплавах, связаны с высокой прочностью подложки и структурной совместимостью TiN с карбидом титана TiC, содержащимся в сплаве T5K10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попок Н.Н., Анисимов В.С. Технологические основы ионно-плазменной обработки материалов и изделий: учеб.-метод. пособие. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – 104 с.
2. Исследование зависимости прочности сцепления покрытий от различных способов подготовки поверхностей деталей под покрытие напылением / В.А. Соколова, В.А. Марков, Г.К. Парфенопуло и др. // Тр. МАиП ПСиМ. – 2018. – № 1. – С. 104–105.
3. Инженерия поверхностей деталей нанесением регулярного микрорельефа и износостойкого покрытия / Н.Н. Попок, Я.С. Сачивко, Р.С. Хмельницкий и др. // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: в 3 кн. / МНТК, ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 2018. – Кн. 2: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 212–217.
4. Спиридонов Н.В., Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / под ред. В.Н. Чачина. – Минск: Выш. шк., 1988. – 155 с.
5. Восстановление деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов и др.; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
6. Емельянов В.А., Мрочек Ж.А., Иванов В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Минск: Интеграл, 1998. – 284 с.
7. Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Попок Н.Н. Структурно-фазовое состояние и износостойкость гиперзвуковых газотермических покрытий из проволочных высокохромистых сталей // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 3 кн. / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) и др. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. – Кн. 2: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – С. 117–122.
8. Попок Н.Н. Шероховатость поверхности детали при обработке ротационным инструментом с прерывистой режущей кромкой // Машиностроение. – 1990. – Вып. 15. – С. 18–22.
9. Технологический регламент комбинированного упрочнения деталей машин и режущих инструментов / Н.Н. Попок, Р.С. Хмельницкий, В.С. Анисимов и др. // Высокие технологии в машиностроении: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Р.Г. Гришин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 63–68.
10. Stallard J., Poulat S., Teer D.G. The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester // Tribology International. – 2006. – Vol. 39. – P. 159–266.
11. Кукареко В.А., Кушнеров А.В., Попок Н.Н. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства вакуумно-дуговых покрытий TiN, нанесенных на сталь 9ХС // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2024. – Т. 60, № 4. – С. 344–352. DOI: 10.29235/1561-2430-2024-60-4-344-352
12. Износостойкость модифицированных азотом высоколегированных сталей в условиях трения без смазочного материала / В.А. Кукареко, В.В. Можаровский, А.В. Кушнеров и др. // Трение и износ. – 2024. – Т. 45, № 6. – С. 473–485. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-6-473-485

Поступила 13.01.2026

**FORMING THE SURFACES OF PARTS AND CUTTING TOOLS
WITH REGULAR MICRORELIEF AND A WEAR-RESISTANT COATING**

**N. POPOK¹, V. KUKAREKO², R. KHMELNITSKY¹,
A. KUSHNEROV², V. ANISIMOV¹, S. DMITRIEV³**

(¹Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

*²The Joint Institute of Mechanical Engineering
of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk;*

³Pskov State University)

The purpose of the work is to increase the reliability of machine parts and cutting tools that operate under extreme conditions of frictional interaction with high pressure and temperature. To achieve this goal, the tasks of developing kinematic schemes for shaping the micro-nano relief of the base surface and the technological principles of applying combined gas-thermal and vacuum ion-plasma coatings are addressed. The research objects include plunger pair parts and cutting tools. Experimental research methods, modern instruments, and equipment are used to determine the microhardness and adhesion of the coating. The results of hardness and microhardness measurements, surface layer diffraction patterns, and acoustic emission and friction coefficient dependencies for gas-thermal, combined, and ion-plasma coatings are presented.

Keywords: *shaping, microrelief, surface, gas-thermal, ion-plasma, and combined coatings, microhardness, adhesion.*