

Горленко Александр Олегович, Тополянский Павел Абрамович,  
Тополянский Андрей Павлович, Сканцев Виталий Михайлович,  
Шупиков Игорь Леонидович, Ерохин Александр Николаевич

## **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ТВЕРДОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ**

Исследованы физико-механические и трибологические свойства износостойких антифрикционных покрытий применительно к упрочнению резьбонарезного инструмента. Рассмотрены износостойкие покрытия *Ti-Al-N* и *Cr-Mo-N*, осаждаемые в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока, и многослойное нанопокрытие *Si-O-C-N*, наносимое методом бескамерного химического осаждения при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (процесс финишного плазменного упрочнения). Приведены методики исследований, испытаний и выбора оптимального покрытия, а также результаты промышленного внедрения технологии финишного плазменного упрочнения резьбонарезного инструмента.

Ключевые слова: модификация, финишное плазменное упрочнение, износостойкое нанопокрытие, наноиндентирование, триботехнические испытания.

Gorlenko Alexander Olegovich, Topolyanskiy Pavel Abramovich,  
Topolyanskiy Andrey Pavlovich, Skantsev Vitaliy Mikhailovich,  
Shupikov Igor Leonidovich, Erokhin Alexander Nikolaevich

## **INCREASE OF WEAR RESISTANCE OF THE THREAD-CUTTING TOOL ON THE BASIS OF A CHOICE OF AN OPTIMUM FIRM ANTIFRICTIONAL COVERING**

Physical and mechanical characteristics of abrasion resistant anti-friction coating as applied to thread-cutting tools hardening are examined. Abrasion resistant coatings *Ti-Al-N* and *Cr-Mo-N*, vacuum-deposited with help of arc plasma source and plasma flow separation, and multi-walled nanocoating *Si-O-C-N*, laid off through beadless immersion plating under atmospheric pressure with the use of volatile liquid organ elemental compounds and gaseous atmosphere with simultaneous surface activation by electric arc plasma (process of finishing plasma hardening) are

studied. Research, testing, certification techniques and methods of optimum coating choice are given, as well as the results of industrial introduction of finishing plasma hardening of thread-cutting tools.

Key words: modification, finish plasma strengthening, wear-resistant nanocoating, nanoindentation, tribological tests.

*Цель поставленной задачи.* Актуальность и научная значимость исследований заключаются в реализации системного подхода, являющегося методологической основой работы, к изучению процессов формирования физико-механических свойств поверхностного слоя с твердыми антифрикционными покрытиями и выбору оптимального упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования.

*Пути решения поставленной цели.* Определение требований к покрытиям для резбонарезного инструмента. Исследование физико-механических и трибологических свойств современных твердых антифрикционных покрытий. Выбор и реализация технологии нанесения трибологических покрытий для резбонарезного инструмента, основанные на обеспечении достаточных адгезионных характеристик с основным материалом и повышении антифрикционных свойств при оптимальных физико-механических свойствах, определяемых наноиндентированием. Промышленные испытания оптимального трибологического покрытия.

Одним из приоритетных направлений развития науки и техники является создание новых материалов, в частности с многокомпонентными и нанокompозитными покрытиями. Уникальность данных покрытий заключается в высокой объемной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллитов, возможности изменения соотношения объемных долей кристаллической и аморфной фаз, взаимной растворимости металлических и неметаллических компонентов [1]. Эти свойства позволяют получать покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами, такими как высокие значения твердости, упругого восстановления, прочности, жаро- и коррозионной стойкости. При этом в последнее десятилетие уделяется повышенное внимание к трибологическим свойствам таких покрытий. В связи с этим развивается целое научное направление – трибология покрытий [2, 3], способствующее получению новых знаний, связанных с повышением долговечности и надежности узлов трения машин, механизмов и инструмента.

Одним из направлений использования трибологических (антифрикционных и износостойких) покрытий является повышение долговечности резбонарезного инструмента, который широко применяется в машиностроительном производстве. Поскольку

резьбонарезание является одной из последних операций при обработке деталей (особенно корпусных), надежность и ресурс работы резьбонарезного инструмента напрямую связаны с экономическими показателями предприятия в целом, так как поломка, заклинивание, схватывание инструмента приводит к появлению практически неисправимого брака, а дефекты резьбы (задиры, большая шероховатость, выкрашивание, заусенцы) ведут к увеличению себестоимости изделий.

Рынок импортного резьбонарезного инструмента примерно на 70 – 80% состоит из инструмента со специальными тонкопленочными ((1...3) мкм) износостойкими покрытиями, которые наносятся на заключительной стадии его изготовления. При этом известно, что резьбонарезной инструмент с покрытием является максимально эффективным и более долговечным.

В настоящее время для упрочнения резьбонарезного инструмента, изготавливаемого в большинстве случаев из быстрорежущих сталей, используются физические методы осаждения покрытий на основе тугоплавких соединений из нитридов, карбидов, карбонитридов титана, хрома, циркония, оксида алюминия. Каждая зарубежная фирма, изготавливающая резьбонарезной инструмент, наносит индивидуальное покрытие (под своей торговой маркой), которое может иметь разный состав, количество и толщину слоев.

Основными требованиями к покрытию, наносимому на рабочие поверхности резьбонарезного инструмента, являются:

- повышенная твердость, превышающая твердость инструментального и обрабатываемого материала;
- низкий коэффициент трения с обрабатываемым материалом;
- высокая адгезия к инструментальному материалу;
- химическая инертность при взаимодействии с обрабатываемым материалом;
- повышенная жаростойкость (устойчивость к окислению при повышенных температурах резания);
- высокая сопротивляемость усталостному разрушению в условиях циклических нагрузок;
- защита от водородного изнашивания;
- низкая теплопроводность для уменьшения влияния температур резания на инструментальный материал и отвод тепла в стружку;
- высокое удельное электрическое сопротивление для уменьшения электроэрозионного изнашивания при трении и резании металла.

Для эффективного упрочнения резьбонарезного инструмента в международной практике используются следующие виды покрытий, относящиеся к нанопокрытиям: с многофазной структурой различного типа; с переменным по толщине составом; со слоистой структурой; с применением твердо-растворного упрочнения; с аморфно-кристаллическим или аморфным строением.

На основании анализа свойств различных трибологических покрытий и зарубежных данных по их практическому применению для упрочнения резьбонарезного инструмента были выбраны три вида покрытий для дальнейших исследований:

- покрытие с твердо-растворным упрочнением из соединений с разным типом межатомных связей системы  $Ti-Al-N$  толщиной 3 мкм, цвет покрытия – фиолетовый;
- покрытие с многофазной структурой системы  $Mo-Cr-N$  толщиной 3 мкм, цвет покрытия – серебристый;
- нанокompозитное многослойное покрытие с аморфно-кристаллической гетерогенной структурой системы  $Si-O-C-N$  толщиной 1 мкм, цвет покрытия – радужный.

Первые два покрытия наносились в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока [4], третье покрытие – методом бескамерного химического осаждения при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (процесс финишного плазменного упрочнения) [5]. Выбор режимов осаждения покрытий базировался на получении их оптимальных адгезионных свойств на материале основы (стали P18).

Оценка износостойкости поверхностей практически сводится к рассмотрению сложного взаимоотношения двух противоречивых свойств материалов, а именно, пластичности и прочности. В идеале для изнашиваемых деталей необходимо предусматривать нанесение на их рабочие поверхности покрытий, которые должны иметь оптимизированные характеристики прочностных и пластических свойств, максимальную адгезию к основе, и не содержать дефектов, приводящих к быстрой деградации механических и функциональных характеристик.

По международным стандартам физико-механические свойства поверхностного слоя с металлическими и неметаллическими покрытиями определяются методом наноиндентирования по *ISO 14577-4:2007*. Для повышения стойкости к упругой деформации разрушения и уменьшения пластической деформации материал поверхностного слоя должен обладать высокой твердостью при низком модуле упругости. Высокая твердость материала гарантирует устойчивость к царапинам и абразивному изнашиванию, а низкий модуль

упругости обеспечивает высокую устойчивость к пластической деформации и позволяет заданной нагрузке распределяться в пределах более широкой области [1]. Для количественной оценки стойкости материала покрытия к упругой деформации разрушения используется величина отношения нанотвердости к эффективному модулю упругости  $H/E^*$ , называемая также индексом пластичности покрытия. Эффективный модуль упругости  $E^* = E/(1 - \nu^2)$ , где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Для оценки сопротивления пластической деформации применяется параметр  $H^3/E^{*2}$ . В качестве параметра, характеризующего прочность поверхностного слоя, связанного с упругим восстановлением свойств при наноиндентировании, используется параметр упругого восстановления  $W_e = (h_{max} - h_r)/h_{max}$ , где  $h_{max}$  – наибольшая глубина внедрения индентора при измерении нанотвердости,  $h_r$  – глубина внедрения индентора после снятия нагрузки.

Таким образом, выбор оптимального упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования может быть произведен на основании определения вышеназванных критериев и их сравнении. При этом более износостойким является покрытие с большими значениями критериев  $H/E^*$ ,  $H^3/E^{*2}$  и параметра  $W_e$ . Кроме этого, для минимизации упругих напряжений на границе раздела «покрытие – подложка» и внутренних остаточных напряжений в системе необходимо стремиться к получению близких значений модулей упругости основы и покрытия. Эти принципы могут быть также использованы и при оптимизации технологического процесса и выборе режимов нанесения упрочняющих покрытий.

Для наноиндентирования в исследованиях использовался нанотвердомер *TI750Ubi* (*Hysitron*, США).

При измерении нанотвердости учитывалось, что максимальная глубина индентирования не должна превышать 10% от толщины исследуемого покрытия (для исключения влияния подложки), а индентирование при малой глубине может приводить к повышенной погрешности. Для исследуемых тонкопленочных покрытий (многослойных и сложного строения), измерения осуществлялись при разных нагрузках для определения более объективных параметров измерения. Скорость приложения нагрузки постоянная – 100 мкН/сек. Тип наноиндентора – индентор Берковича. Интервал нагрузок от 100 до 1000 мкН. Перед началом серии испытаний проводилась калибровка прибора на эталонных образцах с известными модулем упругости и твердостью. В качестве эталонных образцов использовали монокристалл *Si* (100) и сапфир. Для каждого образца выполняли испытание твердости в 5 разных местах поверхности образца (расстояние между ними было 100 мкм). Таким образом, значения  $H$  и  $E^*$  каждого образца представляют собой средние значения,

полученные от пяти отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась по методу Оливера и Фара.

Результаты измерения физико-механических свойств рассматриваемых материалов покрытий и расчетные значения критериев  $H/E^*$ ,  $H^3/E^{*2}$  для разных усилий нагрузки приведены в табл. 1, где  $H$ , ГПа – нанотвердость;  $E$ , ГПа – приведенный модуль упругости;  $H/E^*$  – стойкость покрытия к упругой деформации разрушения (индекс пластичности);  $H^3/E^{*2}$  – сопротивление пластической деформации;  $W_e$ , % – доля работы упругой деформации (упругое восстановление);  $HV$  – твердость по Виккерсу;  $F$ , мН – измерительная нагрузка;  $h_{max}$ , мкм – максимальное внедрение индентора.

Таблица 1

Физико-механические свойства трибологических покрытий

Покрытие	$H$ , ГПа	$E^*$ , ГПа	$H/E^*$	$H^3/E^{*2}$	$W_e$ , %	$HV$	$F$ , мН	$h_{max}$ , нм
<i>Si-O-C-N</i>	19	127	0,14	0,41	89	1767	0,5	36
	22	140	0,15	0,57	87	2103	0,8	45
	19	128	0,15	0,44	93	1822	1,0	55
	20	123	0,16	0,54	82	1900	1,5	71
	17	112	0,15	0,41	76	1634	2,0	88
<i>Ti-Al-N</i>	25	293	0,09	0,19	99	2406	0,5	23
	37	383	0,10	0,36	85	3538	1,0	31
	38	336	0,11	0,50	77	3625	2,0	51
<i>Mo-Cr-N</i>	32	403	0,08	0,20	97	3037	0,5	17
	46	409	0,11	0,58	91	4350	1,0	28
	45	393	0,11	0,57	90	4206	2,0	46

В соответствии с полученными значениями свойства исследуемых покрытий по рассматриваемым критериям практически равнозначны. Покрытие системы *Si-O-C-N* имеет примерно на 25% более высокую стойкость к упругой деформации разрушения (критерий  $H/E^*$ ) и более близкий модуль упругости к модулю упругости материала подложки – стали P18 – (200...220) ГПа. На основании полученных физико-механических свойств сделать однозначный выбор наиболее эффективного покрытия для упрочнения и эксплуатации в условиях трения и изнашивания резьбонарезного инструмента затруднительно.

В связи с этим были проведены трибологические испытания, для которых использовались трибометр *Tribometer (CSM, Швейцария)* (рис. 1, а) и модернизированная машина трения МИ-1М (рис. 1, б)).

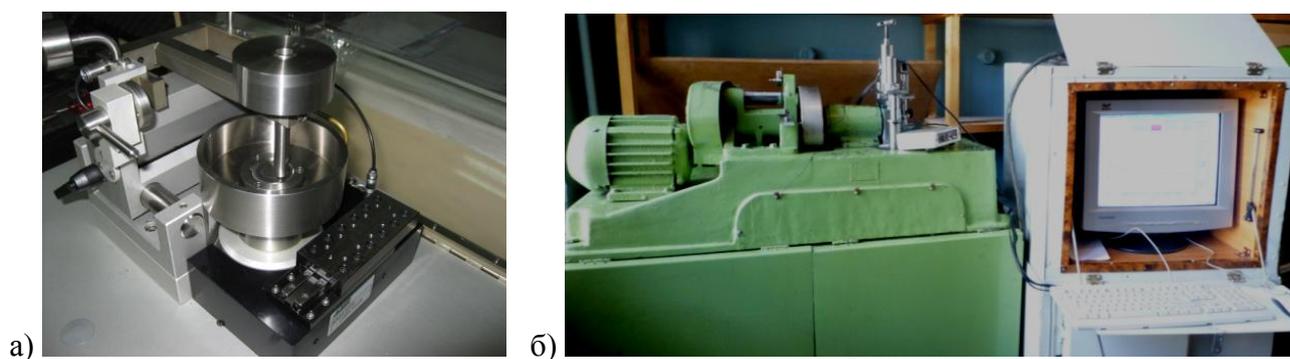


Рис. 1. Общий вид установок для трибологических испытаний.

а) трибометр *Tribometer* (CSM, Швейцария), б) модернизированная машина трения МИ-1М

Испытания при использовании трибометра основывались на измерении тензодатчиком силы трения, возникающей при скольжении прижатого с заданным усилием к образцу сферического неподвижного контртела. При этом коэффициент трения определялся как отношение измеренной силы трения к усилию нагружения. В процессе трибоиспытаний строились кривые изменения коэффициента трения и сближения индентора с поверхностным слоем испытываемого образца, коррелирующего с износом покрытия и индентора.

Трибологические измерения проводились по схеме «*pin-on-disk*» («шарик – диск») в соответствии с международными стандартами *ASTM G99-959*, *DIN50324* и *ISO 20808* с использованием контртела (шарика  $\varnothing$  3 мм), изготовленного из нитрида кремния  $Si_3N_4$ . При каждом испытании использовался новый шарик, а его износ при оценке диаметра образующейся лунки не превышал (0,1...0,2) мкм. Нагрузка на контртело составляла 5 Н. Линейная скорость – 0,1 м/с. Путь трения – 80 м. При испытаниях использовался смазочный материал *SAE5W40*. Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась с использованием инвертированного металлургического микроскопа *Olympus GX 51*.

Результаты испытаний покрытий и основного материала на трибометре *Tribometer* (CSM, Швейцария) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты триботехнических испытаний на трибометре *Tribometer* (CSM, Швейцария)

Покрытие	Основа	Средний коэффициент трения	Износ, мкм	
			По глубине	По ширине следа
–	Сталь P18 (Ø30)	0,210	6,7	617
<i>Si-O-C-N</i>	Сталь P18 (Ø30)	0,038	2,0	99,8
<i>Ti-Al-N</i>	Сталь P18 (Ø30)	0,249	5,0	75,3
<i>Mo-Cr-N</i>	Сталь P18(Ø30)	0,205	1,6	151,9

На рис. 2 приведен протокол испытаний покрытия *Si-O-C-N* с графиками изменения во времени коэффициента трения и глубины внедрения индентора в материал покрытия, а также вид полосы износа на образце с покрытиями с замераами ее ширины.

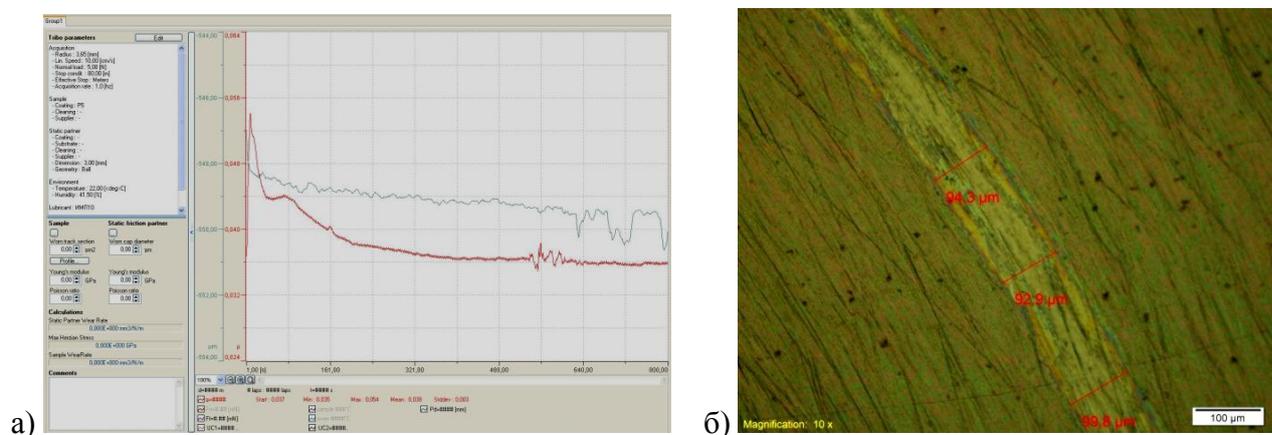


Рис. 2. Протокол испытаний покрытия *Si-O-C-N*.

- а) графики коэффициента трения и глубины внедрения индентора,  
 б) вид полосы износа покрытия

Сравнительный анализ испытаний покрытий показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы *Si-O-C-N*, и он более чем в 5 раз меньше значений коэффициентов трения покрытий *Ti-Al-N*, *Mo-Cr-N* и материала основы. Наличие резких амплитудных изменений глубины износа может определяться образующимися продуктами износа, влияющими непосредственно на процесс трения. Детальное подтверждение этого требует дополнительных статистических исследований.

Отсутствие трибологического покрытия на материале основы (стали P18) кардинально изменяет характеристики параметров трения и изнашивания. Кривая изменения коэффициента трения со временем имеет возрастающий характер, максимальную глубину и ширину полосы износа (рис. 3).

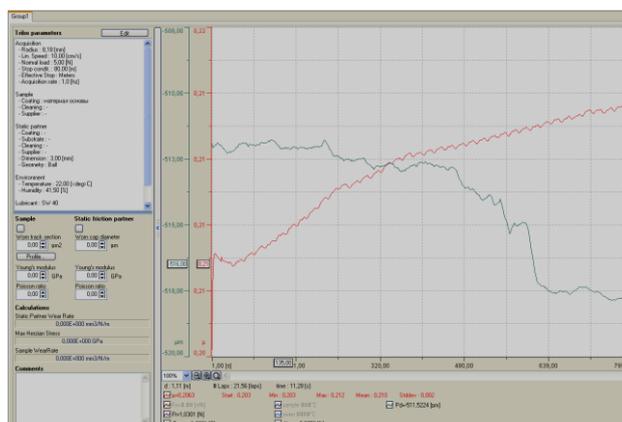


Рис. 3. Протокол испытаний материала основы (стали P18) без покрытия

Сравнительные испытания износостойкости образцов с исследуемыми покрытиями проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М и предназначенной для проведения триботехнических испытаний цилиндрических образцов из металлических материалов и сплавов, позволяющих определять триботехнические показатели поверхностей в условиях трения скольжения при граничной смазке нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480-97 [6].

При испытаниях с установленными нагрузкой и скоростью скольжения к вращающейся цилиндрической поверхности образца, частично погруженного в смазочный материал, прижимался неподвижный цилиндрический индентор. Для установки образцов и индентора использовалась схема со сменными держателями, обеспечивающая самоустановку индентора относительно испытываемой поверхности образца на промежуточной сферической опоре для реализации линейного контакта.

В процессе испытаний с помощью системы датчиков непрерывно и синхронно регистрировались время испытания, нагрузка, коэффициент трения и линейный износ. Их численные значения выводились на монитор персонального компьютера. Для измерения момента трения и нагрузки использовались тензодатчики. Для непрерывного измерения износа в процессе проведения испытаний была разработана специальная схема с применением индуктивного датчика, позволяющая исключить влияние на результаты измерений радиального биения и тепловых деформаций испытываемого образца.

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств:

- время приработки  $t_0$ , ч, определяемое как время от начала испытания до момента времени выхода кривой изнашивания на участок нормального изнашивания;
- приработочный износ  $h_0$ , мкм, как величина сближения, определяемая в момент времени окончания приработки  $t_0$ ;
- значение коэффициента трения в конце испытаний  $f$ ;
- $f_0/f$  – отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки  $f_0$  к его значению в конце испытаний  $f$ ;
- среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания

$$I_h = \frac{h - h_0}{L - L_0},$$

где  $h$ , мкм, – суммарная величина износа образца за время испытаний;  $L$ , мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний;  $L_0 = 3,6 \cdot 10^9 \cdot t_0 \cdot v$ , мкм, – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки;

- значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний  $I_{h\Sigma} = h/L$ .

Выбор оптимального упрочняющего покрытия по параметрам триботехнических испытаний может быть произведен на основании определения вышеназванных критериев и их сравнения. При этом более износостойким является покрытие с меньшими значениями интенсивности изнашивания, длительности приработки, коэффициента трения, а также при падающей характеристике кривой изменения коэффициента трения во времени.

Особое значение за рубежом уделяется трибологическим покрытиям, которые образуют продукты износа, снижающие трение и износ в паре контактирующих поверхностей и предотвращающие непосредственный перенос материала покрытия на контртело. При этом продукты износа могут заполнять микровпадины и закрепляться на микровыступах шероховатости контактирующих поверхностей, что обеспечивает снижение удельных давлений и повышение износостойкости пар трения. Противоизносные и антифрикционные действия продуктов износа таких покрытий сохраняются длительно на весь период работы пары трения и не связываются только с процессом приработки [2].

Испытания образцов проводились при следующих условиях: скорость скольжения  $v = 1$  м/с; нормальное усилие нагружения  $N = 100 \pm 0,5$  %, Н (соответствует давлениям, рассчитанным по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло промышленное И – 20А ГОСТ 20799 – 88; материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 8 ч.

Результаты испытаний исследуемых покрытий и материала основы (стали Р18) без покрытия на модернизированной установке МИ-1М представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца			
		<i>Ti-Al-N</i>	<i>Mo-Cr-N</i>	<i>Si-O-C-N</i>	Сталь Р18
Прирабатываемость	$t_0$ , ч	0,58	0,75	0,33	5,33
	$h_0$ , мкм	1,3	1,5	0,9	7,0
	$f_0/f$	1,42	1,46	4,75	1,36
Антифрикционность	$f$	0,323	0,246	0,04	0,279
Износостойкость	$h$ , мкм	9,7	9,6	6,9	10,1
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,12	3,09	2,16	3,17
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	3,35	3,32	2,38	3,49

На рис. 4 приведен протокол испытаний покрытия *Si-O-C-N* с графиками изменения износа и коэффициента трения во времени.

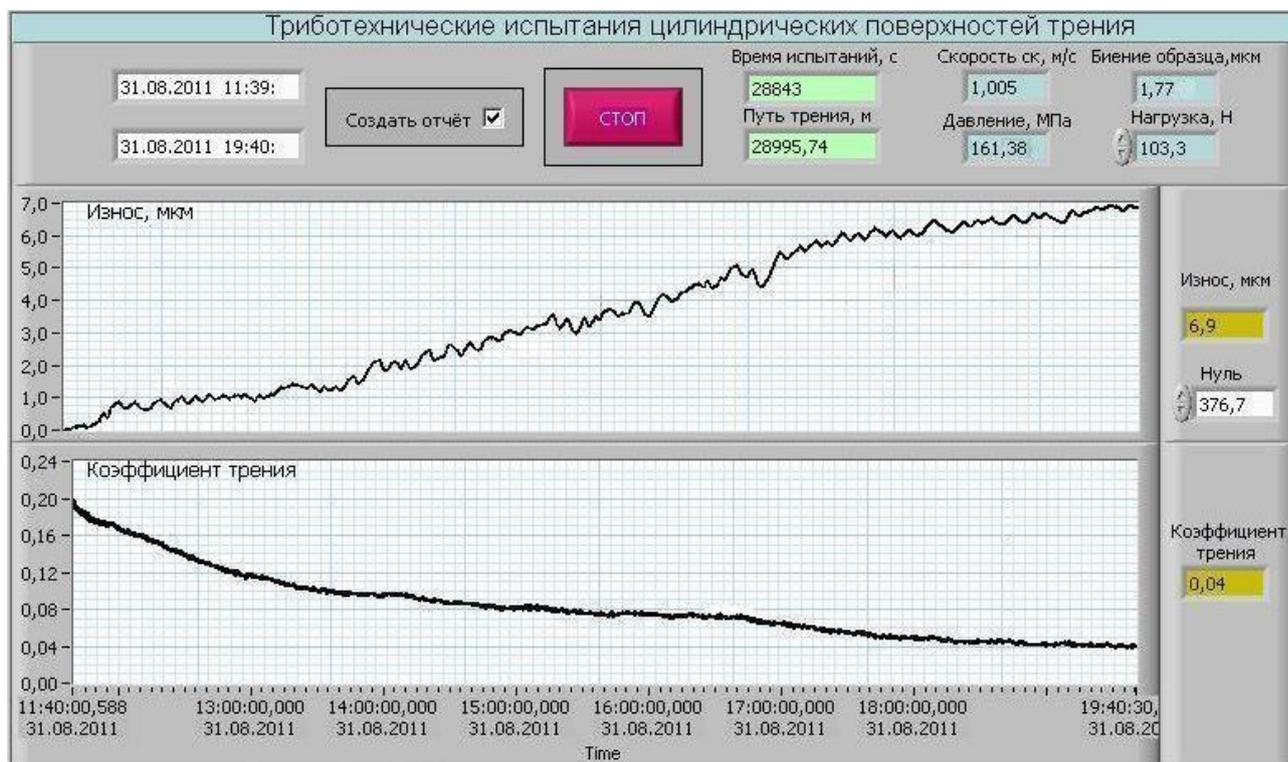


Рис. 4. Протокол испытаний покрытия *Si-O-C-N* при усилнии нагружения 100 Н

Сравнение результатов триботехнических испытаний трех покрытий и материала основы нормализованным методом показало, что минимальными значениями коэффициента трения, времени приработки и износа обладает покрытие *Si-O-C-N*. Коэффициент трения покрытия *Si-O-C-N* более чем в 6 раз меньше значений коэффициентов трения покрытий *Ti-Al-N*, *Mo-Cr-N* и материала основы. Кривые износа для покрытий *Mo-Cr-N* и *Ti-Al-N* характеризуются ускоренным ростом износа после окончания приработки, кривая износа для покрытия *Si-O-C-N* более стабильна, и имеется тенденция к уменьшению скорости роста износа после окончания приработки. При оценке кривой износа покрытия *Si-O-C-N* видно, что длительность приработки составляет 0,33 часа, далее 1,67 часа стабильного износа, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. При этом кривая изменения коэффициента трения во времени имеет падающую характеристику. Плавное снижение в течение 3 часов, а затем некоторая стабилизация с незначительным уменьшением, что свидетельствует о возможном «залечивании» дорожки трения микроскопическими продуктами износа.

Достаточно низкие значения коэффициента трения и износа основного материала (стали P18) связаны с наличием оксидной пленки на поверхности стали, имеющей толщину

(100...200) нм, нанотвердость которой составляет 20 ГПа, а модуль упругости – 250 ГПа. После износа оксидной пленки интенсивность изнашивания основного материала значительно возрастает.

На рис. 4 видно, что в пределах толщины покрытия *Si-O-C-N* (1 мкм) при усилии нагружения 100 Н кривая износа практически постоянна. Эта тенденция особенно заметна при проведении сокращенных испытаний (5 часов) с уменьшенным усилии нагружения, равным 30 Н (рис. 5).

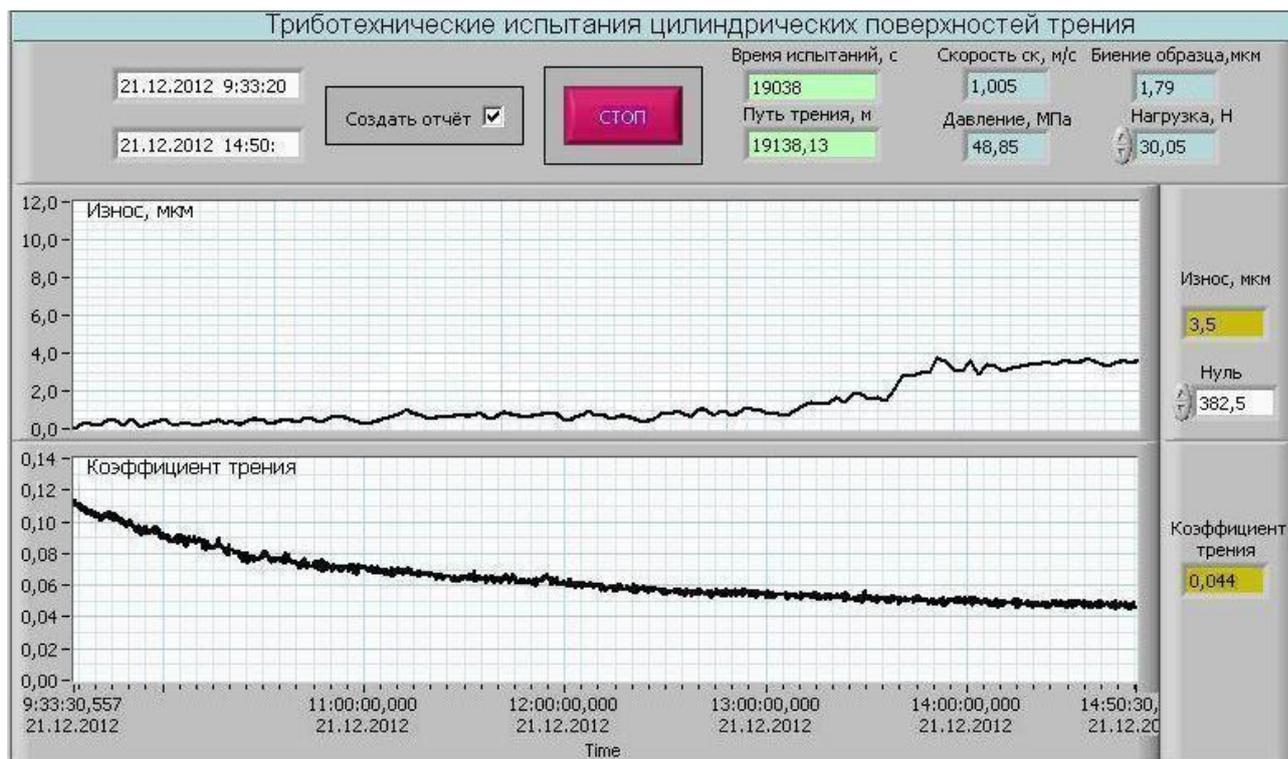


Рис. 5. Протокол испытания покрытия *Si-O-C-N* при усилии нагружения 30 Н

На основании проведенных трибологических испытаний может быть сделан вывод о том, что более эффективным по параметрам трения и изнашивания является покрытие системы *Si-O-C-N*.

В табл. 4 приведены результаты промышленных испытаний стойкости резбонарезного инструмента после финишного плазменного упрочнения с нанесением покрытия системы *Si-O-C-N*, проведенного в различных организациях. Многократное повышение стойкости резбонарезного инструмента подтвердили результаты исследований физико-механических и трибологических свойств данного покрытия. Вид процесса финишного плазменного упрочнения показан на рис. 6.

## Результаты промышленного испытания резьбонарезного инструмента

Тип инструмента	Материал обрабатываемой заготовки	Стойкость до упрочнения	Стойкость после упрочнения	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Метчик М3	ВТ1-0	5 отв.	12 отв.	2,4	НПЦ «ПО «Старт», г. Заречный
Метчик М8	40Х	2 час	6 час	3,0	«Морской завод», г. Кронштадт
Метчик М10	12Х18Н10Т	1 час	2,25 час	2,25	«Электрокомплекс», г. Минусинск
Метчик М16	35Л	8 отв.	80 отв.	10,0	«Вагоностроительный завод», г. Усть-Катав
Метчик М24	40Х	80 отв.	240 отв.	3,0	«Калужский турбинный завод», г. Калуга

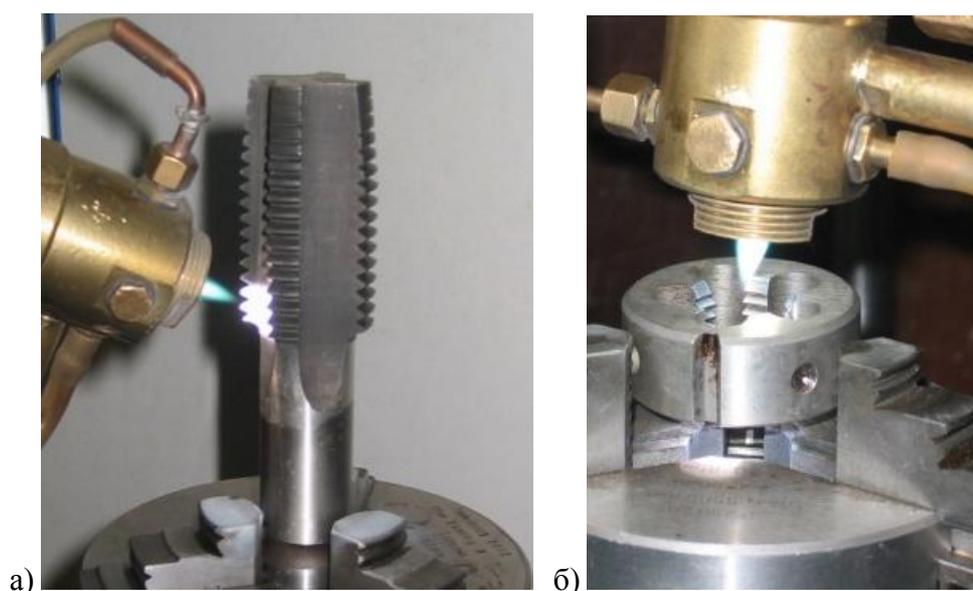


Рис. 6. Процесс финишного плазменного упрочнения резьбонарезного инструмента.

а) метчика, б) плашки

*Выводы.*

1. Разработана и апробирована методика выбора оптимального износостойкого покрытия для резьбонарезного инструмента, основанная на анализе физико-механических и трибологических свойств поверхностного слоя образцов с покрытием.

2. По результатам наноиндентирования различных покрытий выявлено, что критерии и параметры, характеризующие их износостойкость, близки между собой. Имеются некоторые преимущества покрытия *Si-O-C-N* по критерию стойкости к упругой деформации разрушения (индексу пластичности  $H/E^*$ ) и близости модулей упругости покрытия и основного материала.

3. Триботехнические испытания с использованием различных методик (по международным стандартам и нормализованным методом) показали идентификацию тенденций изменения коэффициента трения. Минимальным коэффициентом трения из исследуемых покрытий обладает многослойное нанопокрывтие системы *Si-O-C-N*, наносимое методом бескамерного химического осаждения при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (процесс финишного плазменного упрочнения). Коэффициент трения покрытия *Si-O-C-N* в 5–6 раз меньше значений коэффициентов трения покрытий *Ti-Al-N*, *Mo-Cr-N* и материала основы.

4. Производственные испытания резбонарезного инструмента после финишного плазменного упрочнения показали многократное повышение его стойкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребняк А.Д., Лозован А.А., Кирик Г.В. и др. Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий. – М.: Либриком, 2011. – 344 с.

2. Holmberg K., Matthews A. Coatings Tribology. Properties Mechanisms Techniques and Applications in Surface Engineering// Tribology and Interface Engineering. Volume 56, 2009. – p. 560.

3. Basu B., Kalin M. Tribology of Ceramics and Composites// Materials Science Perspective -Wiley-American Ceramic Society, 2011. – p. 522.

4. Тополянский П.А. Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях// Металлообработка, №1 (19), 2004 – С. 24-30.

5. Тополянский П.А., Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Исследования свойств нанопокрывтия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения// Упрочняющие технологии и покрытия, № 2, 2011. – С. 28-34.

6. Горленко А.О., Прудников М.И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом// Справочник. Инженерный журнал. Приложение №10, 2009. – С. 22-24.