СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Одним из приоритетных направлений развития науки и техники является создание новых материалов, в частности, с многокомпонентными и нанокомпозитными покрытиями. Уникальность данных покрытий заключается в высокой объёмной доле границ раздела фаз и их прочности, отсутствии дислокаций внутри кристаллитов, возможности изменения соотношения объёмных 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 твёрдости, 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 - 5], способствующее получению новых знаний, связанных с повышением долговечности и надёжности узлов трения машин, механизмов и инструмента.

Одним из направлений использования трибологических (антифрикционных и износостойких) покрытий является повышение долговечности резьбонарезного инструмента для создания резьбы в глухих и сквозных отверстиях, которое широко распространено в машиностроении. Поскольку резьбонарезание является одной из последних операций при обработке деталей (особенно корпусных), надёжность и ресурс работы резьбонарезного инструмента напрямую связаны с экономическими показателями предприятия в целом, так как поломка, заклинивание схватывание инструмента приводят к появлению практически неисправимого брака. А дефекты резьбы (задиры, большая шероховатость, выкрашивание, заусенцы) ведут к увеличению себестоимости изделий.

Выбор и использование современных трибологических покрытий для резьбонарезного инструмента основываются на обеспечении достаточных адгезионных характеристик с основным материалом и их повышенных антифрикционных свойств (низкого коэффициента трения, минимальной длительности приработки, минимального тепловыделения при трении) при оптимальных физико-механических свойствах, определяемых наноиндентированием.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПОКРЫТИЯМ

Рынок импортного резьбонарезного инструмента примерно на 70 - 80% состоит из инструмента со специальными тонкоплёночными (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 слоёв.

Основными требованиями к покрытию, наносимому на рабочие поверхности резьбонарезного инструмента, являются [2]:

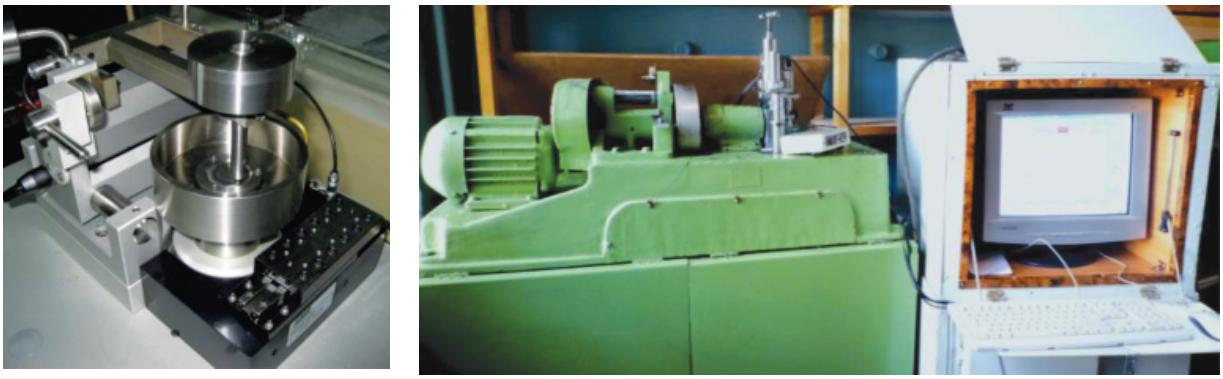
- повышенная твёрдость, превышающая твёрдость инструментального и обрабатываемого материала;
- низкий коэффициент трения с обрабатываемым материалом;
- высокая адгезия к инструментальному материалу;
- химическая инертность при взаимодействии с обрабатываемым материалом;
- повышенная жаростойкость (устойчивость 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 электромеханического износа 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 твёрдорастворного 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 твёрдорастворным 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;
- нанокомпозитное 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 [6], третье покрытие – методом бескамерного



а) б)

Рис. 1. *Общий вид установок для трибологических испытаний: а) – трибометр Tribometer (CSM, Швейцария), б) – модернизированная машина трения МИ-1М.*

химического осаждения при атмосферном давлении с применением летучих жидких элементоорганических соединений и газовых сред с одновременной активацией поверхности электродуговой плазмой (процесс финишного плазменного упрочнения) [7]. Выбор режимов осаждения покрытий базировался на получении их оптимальных адгезионных свойств на стали Р18.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

Оценка износа 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 твёрдостью при низком модуле упругости. Высокая твёрдость материала гарантирует устойчивость к царапинам и абразивному износу, 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 нанотвёрдости к эффективному модулю упругости Hplast/E*, называемая также индексом пластичности покрытия, а для оценки сопротивления пластической деформации применяется параметр Hplast3/E*2. В качестве параметра, характеризующего прочность поверхностного слоя, связанного с упругим восстановлением свойств при наноиндентировании, используется параметр упругого восстановления We. Эффективный модуль упругости E* = E/(1-v2), где E – модуль Юнга, v – коэффициент Пуассона, а величина упругого восстановления We = hm - hr/hm, где hm – наибольшая глубина погружения индентора, hr – глубина проникновения индентора после снятия нагрузки.

Таким образом, выбор оптимального упрочняющего покрытия по параметрам наноиндентирования может быть произведён на основании определения вышеназванных критериев и их сравнении. При этом более износостойким является покрытие с большими значениями критериев Hplast/E*, Hplast3/E*2 и параметра We. 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 индентирования в исследованиях использовался нанотвёрдомер TI750Ubi (Hysitron, США).

При измерении нанотвёрдости 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 тонкоплёночных 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. Шероховатость в зоне индентирования не более 25 нм. Перед началом серии испытаний проводилась калибровка прибора на эталонных образцах с известными модулем упругости и твёрдостью. В качестве эталонных образцов использовали монокристалл Si (100) и сапфир. Для каждого образца выполняли испытание твёрдости в 5 разных местах поверхности образца (расстояние между ними было 100 мкм). Таким образом, значения Hplast и E* каждого образца представляют собой среднее значение, полученное от 5 отпечатков. Обработка результатов измерений проводилась по методу

Оливера и Фара.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

Для трибологических испытаний использовались трибометр Tribometer (CSM, Швейцария, *рис. 1а*) и модернизированная машина трения МИ-1М (*рис. 1б*).

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 прижима. В процессе трибоиспытаний строились кривые изменения коэффициента трения и сближения индентора с поверхностным слоем испытываемого образца, коррелирующие с износом покрытия и индентора.

Трибологические измерения проводились по схеме «pin-on-disk» («шарик-диск») в соответствии с международными стандартам ASTM G99-959, DIN50324 и ISO 20808 с использованием контртела (шарика ø3 мм), изготовленного из нитрида кремния Si3N4. 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 – 10 см/с. Путь трения – 80 м. При испытаниях использовалась смазка SAE5 W40. Ширина следа износа после трибоиспытаний определялась с использованием инвертированного металлургического микроскопа Olympus GX 51.

Испытания на машине трения МИ-1М проводились в условиях трения скольжения при граничной смазке нормализованным методом в соответствии с ГОСТ 30480-97 [8]. Характеристика испытываемой поверхности: вид поверхности – наружная цилиндрическая диаметром 48 мм, материал – сталь Р18 с HRC 62 - 64, параметр шероховатости испытываемой поверхности – Ra = 0,32 мкм. Условия проведения испытаний: материал контртела – твёрдый сплав ВК8; вид материала контртела – кольцо с наружным диаметром 12 мм, шириной 4 мм; скорость скольжения образца относительно неподвижного индентора 1 м/с; нормальное усилие нагружения 100Н ± 0,5% (соответствует давлению порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостный; смазочный материал – масло индустриальное И-20А ГОСТ 20799-88; длительность испытаний – 8 ч, длина пути – 28,8 км. Изнашивание контртела составляло менее 5% и не учитывалось.

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; $L_0 = 3{,}6 \cdot 10^9 \cdot t_0 \cdot \upsilon$, 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 трибоиспытаний может быть произведён на основании определения вышеназванных критериев и их сравнения. При этом более износостойким является покрытие с меньшими значениями износа, длительности приработки, коэффициента трения, падающей характеристикой кривой изменения коэффициента трения со временем.

Особое значение за рубежом уделяется трибологическим покрытиям, которые образуют продукты износа, снижающие трение и износ и предотвращающие непосредственный перенос материала покрытия на контртело. При этом продукты износа могут заполнять микровпадины и закрепляться на микровыступах 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].

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Результаты измерения физико-механических свойств рассматриваемых материалов покрытий

Таблица 1. *Физико-механические свойства трибологических покрытий.*

№	Вид покрытия	H, ГПа	E*, ГПа	H/E*	H3/E*2	We, %	HV	F, мН	hmax, нм
1	Si-O-C-N	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
2	Ti-Al-N	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
3	Mo-Cr-N	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

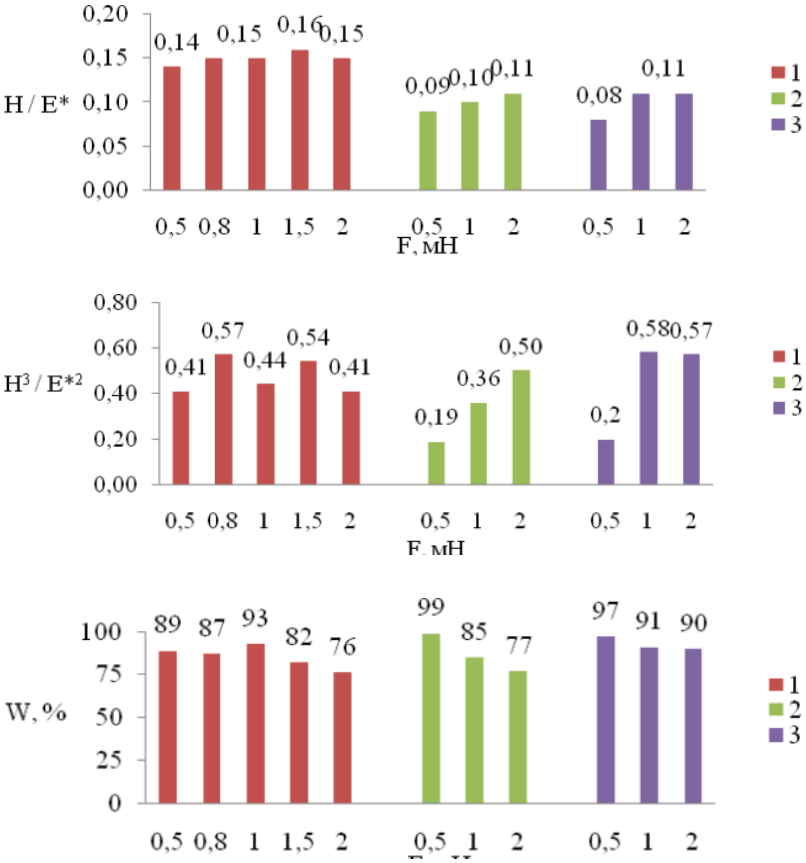
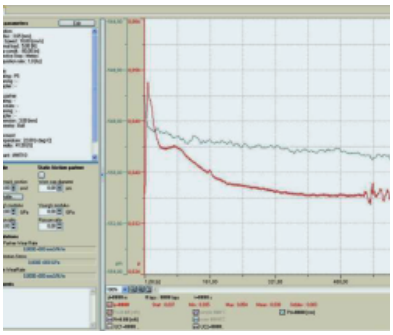
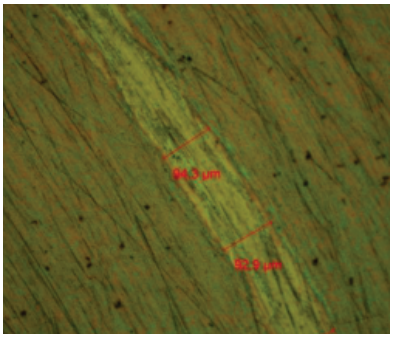


Рис. 2. *Диаграммы значений расчётных критериев H/E*, H3/E*2 и упругого восстановления We при различных измерительных нагрузках для покрытий: 1) Si-O-C-N; 2) Mo-Cr-N; 3) Ti-Al-N*



а)



б)

Рис. 3. *Протокол испытания на трение и износ (а) и вид полосы износа покрытия Si-O-C-N (б).*

и расчётные значения критериев H_{plast}/E^*, H_{plast}^3/E^{*2} для разных усилий нагрузки приведены в табл. 1, где H, ГПа – нанотвёрдость; $E^* = E/(1-v^2)$, ГПа – приведённый модуль упругости (где E – модуль Юнга, v = 0,25 – коэффициент Пуассона); H/E* – стойкость покрытия к упругой деформации разрушения (индекс пластичности); H^3/E^{*2} – сопротивление пластической деформации; We, % – доля работы упругой деформации (упругое восстановление); HV – твёрдость по Виккерсу; F, мН – измерительная нагрузка; h_{max}, мкм – максимальное заглубление индентора.

Ниже представлены значения критериев наноиндентирования рассматриваемых покрытий при различных нагрузках измерения в виде диаграмм (*рис. 2*).

В соответствии с полученными значениями, свойства рассматриваемых 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 Р18 (200-220 ГПа). На основании полученных физико-механических свойств сделать однозначный выбор наиболее эффективного покрытия для упрочнения и эксплуатации в условиях трения и износа резьбонарезного инструмента затруднительно.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

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

В качестве примера на *рис. 3* приведён протокол испытаний покрытия Si-O-C-N с графиками изменения со временем коэффициента трения и глубины заглубления индентора в материал покрытия, а также вид на образце с покрытием полосы износа с замерами её ширины.

Сравнительный анализ покрытий между собой показал, что минимальным коэффициентом трения обладает покрытие системы Si-O-C-N и он более чем в 5 раз меньше коэффициента трения ближайшего покрытия Ti-Al-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.

Таблица 2. *Значения параметров трибоиспытаний на трибометре Tribometer.*

Покрытие	Основа	Средний коэффициент трения	Износ, мкм	
			По глубине	По ширине следа
-	Р18 (Ø30)	0,210	6,7	617
Si-O-C-N	Р18 (Ø30)	0,038	2,0	99,8
Ti-Al-N	Р18 (Ø30)	0,249	5,0	75,3
Mo-Cr-N	Р18(Ø30)	0,205	1,6	151,9

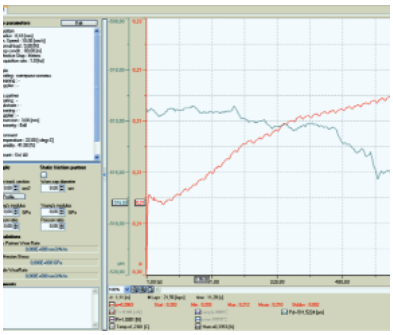


Рис. 4. *Протокол испытания на трение и износ материала основы – стали Р18 (без покрытия) со смазкой SAE5 W40.*

Отсутствие трибологического покрытия на материале основы – стали Р18 – кардинально изменяет характеристики параметров трения и износа – кривая изменения коэффициента трения со временем имеет возрастающий характер, максимальную глубину и ширину износа (*рис. 4*).

Результаты испытаний покрытий и основного материала без покрытия нормализованным методом на модернизированной установке МИ-1М представлены в *табл. 3*.

В качестве примера на *рис. 5* приведён протокол испытания покрытия Si-O-C-N с графиками изменения коэффициента трения, износа и контактной температуры со временем.

При сравнении результатов трибоиспытаний трёх покрытий нормализованным методом минимальные коэффициент трения, время приработки и температура в зоне контакта имеет пара трения с покрытием Si-O-C-N. Коэффициент трения покрытия Si-O-C-N практически в 6 - 8 раз ниже ближайшего покрытия Ti-Al-N и материала основы. Кривые износа для покрытий Mo-Cr-N и Ti-Al-N характеризуются ростом износа от момента окончания приработки, кривая износа для покрытия Si-O-C-N более стабильна и даже имеется тенденция к уменьшению износа после окончания приработки. При этом покрытие Si-O-C-N также обеспечивает минимальную длительность приработки трущихся поверхностей, например, по сравнению с покрытием Ti-Al-N, в 4 раза. При оценке кривой износа покрытия Si-O-C-N видно, что длительность приработки составляет 10 мин, далее 20 мин стабильного износа, а затем плавный (не скачкообразный) выход на износ основного материала. При этом кривая изменения коэффициента трения со временем имеет падающую характеристику. Плавный износ в течение 3 часов, а потом его стабилизация и даже некоторое его уменьшение, говорит о возможном залечивании дорожки износа продуктами износа.

Таблица 3. *Трибологические свойства образцов с различными покрытиями.*

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца			
		Ti-Al-N	Mo-Cr-N	Si-O-C-N	Сталь Р18
Прирабатываемость	t0 , ч	0,58	0,75	0,33	5,33
	h0 , мкм	1,3	1,5	0,9	7,0
	f0 / 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
	Ih •10 – 10	3,12	3,09	2,16	3,17
	Ih Σ •10 – 10	3,35	3,32	2,38	3,49

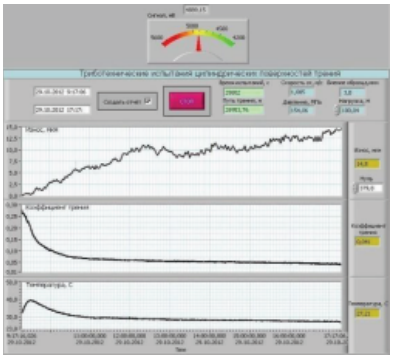


Рис. 5. *Протокол испытания покрытия Si-O-C-N при усилии нагружения 100 Н.*

Важно отметить, что температура в зоне пары трения также имеет минимальное значение на образце с покрытием Si-O-C-N.

Достаточно низкие значения коэффициента трения и времени приработки основного материала – стали Р18 – связано с наличием оксидной плёнки на поверхности стали, имеющей толщину 100 - 200 нм, нанотвёрдость которой составляет 20 ГПа, а модуль упругости – 250 ГПа. После износа оксидной плёнки интенсивность изнашивания основного материала максимальна.

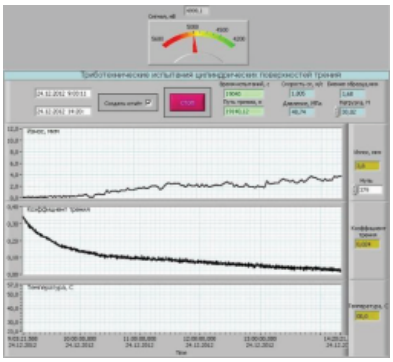


Рис. 6. *Протокол испытания покрытия Si-O-C-N при усилии нагружения 30 Н.*

На *рис. 5* 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 испытаниях с уменьшенным усилием нагружения – 30 Н (*рис. 6*).

На основании проведённых трибологических испытаний может быть сделан вывод, что более эффективным по параметрам трения и износа является покрытие системы Si-O-C-N.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В *табл. 5* приведены результаты промышленного испытания ресурса резьбонарезного инструмента (материал основы Р6М5) после финишного плазменного упрочнения с нанесением покрытия системы Si-O-C-N, проведённого в различных организациях. Многократное повышение стойкости резьбонарезного инструмента подтвердили результаты исследований физико-механических и трибологических свойств данного покрытия. Вид процесса финишного плазменного упрочнения показан на *рис. 7*.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и апробирована методология выбора оптимального износостойкого покрытия для резьбона-

Таблица 5. *Результаты промышленного испытания резьбонарезного инструмента.*

Тип	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», Заречный
Метчик М8	40Х	2 час	6 час	3,0	«Морской завод», Кронштадт
Метчик М10	12Х18Н10Т	1 час	2,25 час	2,25	«Электрокомплекс», Минусинск
Метчик М16	35Л	8 отв.	80 отв.	10,0	«Вагоностроительный завод», Усть-Катав
Метчик М24	40Х	80 отв.	240 отв.	3,0	«Калужский турбинный завод», Калуга

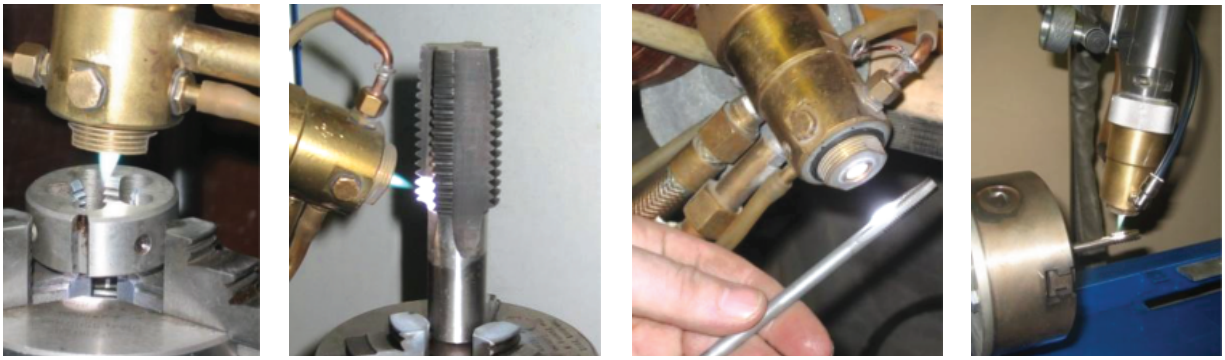


Рис. 7. *Процесс финишного плазменного упрочнения резьбонарезного инструмента.*

резного 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 незначительные преимущества покрытия Si-O-C-N по критерию стойкости покрытия к упругой деформации разрушения (индексу пластичности H/E*) и близости модулей упругости покрытия и основного материала.

3. Трибоиспытания с использованием различных методик (по международным стандартам и нормализованным методом) показали совпадающие тенденции изменения коэффициента трения. Минимальным коэффициентом трения из исследуемых покрытий обладает многослойное нанопокрытие 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). По сравнению с ближайшим аналогом – покрытием Ti-Al-N и материалом основы – коэффициент трения уменьшается в 5 - 8 раз.

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

А.О. Горленко, П.А. Тополянский, А.П. Тополянский, Н.А. Соснин, С.А. Ермаков.

Брянский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, НПФ «Плазмацентр».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Погребняк А.Д., Лозован А.А., Кирик Г.В. и др. Структура и свойства нанокомпозитных, 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. Friedrich K., Schlarb A.K. Tribology of Polymeric Nanocomposites. Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings. Tribology and Interface Engineering. – Volume 55. – 2008. – p. 55.1.
4. Basu B., Kalin M. Tribology of Ceramics and Composites Materials Science Perspective -Wiley-American Ceramic Society. – 2011. – p. 522.
5. Donnet C., Erdemir A. Tribology of diamond-like carbon films fundamentals and applications. – Springer. – 2008. – p. 664.
6. Тополянский П.А. Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях. Металлообработка. 2004, № 1 (19), с. 24 – 30.
7. Тополянский П.А., Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Исследования свойств нанопокрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Упрочняющие технологии и покрытия. № 2, 2011, 28 – 34.
8. Горленко А.О., Прудников М.И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом. Справочник. Инженерный журнал. – Приложение № 10. – 2009. – С. 22 - 24.