Технологии и оборудование для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на режущий инструмент

Тополянский П. А., НПФ «Плазмацентр», г. Санкт-Петербург

В данной статье рассмотрены современные технологии упрочнения металлорежущего инструмента – CVD и PVD-процессы, а также новая технология финишного плазменного упрочнения (ФПУ) путем безвакуумного нанесения износостойкого нанопокрытия на основе карбида, нитрида и оксида кремния.

За рубежом в качестве основных технологий нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на режущий инструмент используются процессы химического осаждения покрытий из газовой фазы CVD (chemical vapor deposition) и физического осаждения покрытий из газовой фазы PVD (physical vapor deposition) [1-3, 8].

В общем случае термин осаждение покрытий из газовой фазы (vapor deposition) можно определить как конденсацию газообразных (парообразных) элементов или их соединений с образованием твердого покрытия. При этом основное отличие процессов PVD от CVD состоит в том, что в технологиях PVD исходные твердые материалы за счет испарения или распыления переводятся в газовую (паровую) фазу, которая имеет тот же состав, что и покрытие, а сам процесс осуществляется только при низком давлении. При CVD-процессах в качестве исходных материалов используются различные газы, а состав газовой фазы и состав покрытия существенно различаются, процессы в большинстве случаев проводятся при атмосферном давлении и только в отдельных случаях – в вакууме. Летучее соединение осаждаемого элемента подается к подложке, где подвергается термическому разложению (пиролизу) или вступает в восстановительные химические реакции с другими газами (или парами). При этом нелетучие продукты реакций осаждаются на поверхность подложки, а летучие – утилизируются.

Все процессы CVD сопровождаются термической (рис. 1) или плазменной (рис. 2) активацией зоны осаждения (включая подложку) или дополнительно активацией реагента (реагентов) вне зоны осаждения. Термоактивация зоны осаждения производится с использованием индукционного, радиационного или резистивного нагрева. Покрытия образуются в результате большого количества химических реакций, протекающих в газовой фазе вблизи от поверхности подложки и на самой поверхности подложки. Известно, что при CVD-процессах материал осаждается в виде порошка, если химическая реакция образования его частиц в твердом состоянии протекает только в газовой фазе, и в виде покрытия, если реакция образования твердых частиц материала происходит на поверхности подложки. Очевидно, что для образования износостойких покрытий на инструменте используется только вторая группа процессов химического осаждения из газовой фазы. Процессы CVD, где используется плазменная активация зоны осаждения, включая подложку, называются plasma enhanced CVD (PECVD или PACVD). Плазменная активация осуществляется с помощью электродной и безэлектродной разрядных систем в реакционных камерах, выполненных на базе трубчатых или колпаковых реакторов пониженного давления.

В международной практике процессы CVD, где отсутствует плазменная термическая активация изделий, а обеспечивается только плазменная активация реагентов, называются plasma chemical CVD.

Таким образом, CVD-технологии – это группа физико-химических гетерогенных процессов осаждения покрытий, образуемых на границе раздела двух фаз: твердой (подложка) и газообразной (газа, пара или газовой низкотемпературной неравновесной плазмы) с участием большой совокупности инертных и химически активных нейтральных и заряженных газовых частиц, электронов и фотонов в широком диапазоне энергий (от 0.025 до 500 эВ) [4].

Выбор метода нанесения покрытия (PVD или CVD) определяется условиям эксплуатации инструмента и следующими факторами:

– свойствами материала наносимого покрытия;

– скоростью нанесения покрытия;

– ограничениями, вносимыми видом и материалом инструмента, например, максимально допустимой температурой нагрева инструмента, габаритными размерами инструмента;

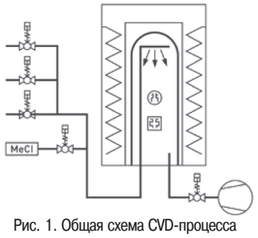


Рис. 1. Общая схема CVD-процесса

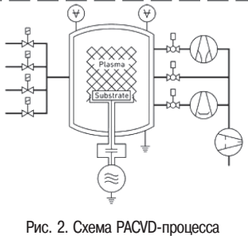


Рис. 2. Схема PACVD-процесса

– величиной адгезионной прочности сцепления покрытия с основным материалом инструмента;

– величиной когезионной прочности самого материала покрытия;

– энергозатратами (затрачиваемой мощностью оборудования для нанесения покрытия);

– доступностью оборудования и необходимостью специальных средств технологического обеспечения;

– стоимостью процесса;

– дефицитностью исходных материалов,

– ремонтопригодностью, возможностью вторичного нанесения после переточки, простотой снятия предшествующего покрытия;

– экологическими аспектами.

В России разработка технологии и оборудования для нанесения износостойких покрытий на твердосплавные пластины методом CVD проводилась во ФГУП «ВНИИТС» в 80-х годах прошлого столетия. Предложений по изготовлению и поставке российских установок для нанесения покрытий на инструмент методом CVD в настоящий момент нет.

За рубежом оборудование для CVD-процессов выпускается, например, фирмами: RICHTER PRECISION INC. (США), TI-COATING, INC. (США), HI-TECH FURNACE SYSTEMS, INC. (США), RÜBIG & Co KG GmbH (Германия), для процессов PA-CVD – PLATEG GmbH (Германия), OC OERLIKON BALZERS AG (Лихтенштейн), IONBOND AG OLTEN (Швейцария), KOLZER (Италия) и др.

В России для нанесения покрытий на режущий инструмент методами PVD разработано оборудование, которое выпускается, например, фирмами: ОАО «СИБЭЛЕКТРОТЕРМ», ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», ОАО «ЦНИИТМАШ», ООО НПФ «ЭЛАН-ПРАКТИК», МГТУ «СТАНКИН», ЗАО «ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» и др. Данное оборудование реализует процессы термического испарения и ионного распыления материалов, где используются тлеющие и дуговые разряды в вакууме.

За рубежом оборудование для нанесения покрытий на режущий инструмент методами PVD выпускается, например, фирмами: SULZER METAPLAS GmbH (Германия), VTD VAKUUMTECHNIK DRESDEN GmbH (Германия), PLATIT AG (Швейцария), IONBOND AG OLTEN (Швейцария), HAUZER TECHNO COATING (Нидерланды), OC OERLIKON BALZERS AG (Лихтенштейн) и др. Данное оборудование предназначено для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на крупные партии различного металлообрабатывающего инструмента. Стоимость его составляет от 800 до 2000 тысяч евро.

Следует отметить, что в таком крупном промышленном центре, как Санкт-Петербург, нет ни одного крупного или среднего производственного предприятия, имеющего работающее оборудование для процессов PVD или CVD. В последнее время имеется тенденция к внедрению оборудования для PVD и CVD-процессов на инструментальных заводах. Так в ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» в 2007 г. внедрены две установки: Platit – для нанесения PVD-покрытий и Bernex BPX Pro 530L для нанесения CVD-покрытий. В Рыбинске при поддержке ГК РОСНАНО организовано производство твердосплавного инструмента с наноструктурированным покрытием, наносимым методом PVD на основе тугоплавких соединений при применении оборудования, разработанного ФГУП РНЦ «Курчатовский институт». Важно отметить, что тенденция к приобретению сложного импортного оборудования для PVD и CVD-процессов потребует для поддержания его функциональных свойств использование дорогостоящих зарубежных материалов, реагентов, комплектующих изнашиваемых элементов, обслуживанию по главным проблемам иностранными специалистами.

Любая крупная иностранная фирма, изготавливающая режущий инструмент, обязательно предлагает инструмент и с покрытием, например, из TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, HfC, CrN, Al_2O_3. Кроме этого многочисленными иностранными фирмами предлагается различный металлорежущий инструмент с тонкопленочными износостойкими покрытиями индивидуальных торговых марок и обозначений, наносимыми методами PVD и CVD. В качестве примера ниже приводятся фирмы и названия покрытий, которые они наносят: WALTER – покрытие PVD-TIGER; BALZERS TOOL COATING INC. (США) – покрытия BALINIT и BALINIT FUTURE NANO; CEMECON GmbH (Германия) – покрытие ALOX; SAS INTERNATIONAL INC. (США) – покрытие RAINBOW; BALZERS VERSCHLEIßSCHUTZ GmbH (Германия) – покрытие BALINIT FUTURA TOP; FRAISA (Германия) – покрытия UNICUT-4X, UNICUT-DURO, UNICUT-CELERO, UNICUT-TRIBO; GUHRING (Германия) – покрытия F, MOVIC и FIREX; COURCELLE-GAVELLE (Франция) – покрытие OPTIMAL; GCDC TOOL (Великобритания) – покрытие DRYCUT; PRAMET DEUTSCHLAND (Германия) – покрытие DIADUR; RICHTER PRECISION INC. (США) – покрытие TITANKOTE; UNION TOOL EUROPE (Швейцария) – покрытие HARD MAX; CEMECON AG (Германия) – покрытие TINALOX SNJ и др.

Использование индивидуальных видов покрытий говорит о многочисленных их вариантах, наносимых на режущий инструмент. Производители инструмента не приводят данных о конкретных составах покрытий и их точных характеристик. В основном, указывается только сфера рационального применения конкретного инструмента с покрытием и рекомендуемые режимы резания.

Мировой прогресс в этой области обошел Россию, в которой не существует такого разнообразного отечественного рынка инструмента с покрытиями и, соответственно, отсутствует конкуренция. В основном, это связано с развалом и закрытием отечественных предприятий и институтов, отсутствием государственной поддержки этого направления, отъездом из страны ученых и специалистов, низкими зарплатами преподавателей российских вузов и, соответственно, минимальным количеством научно-исследовательских работ по данной тематике, отсутствием современной иностранной переводной литературы. Кроме этого, инструментальным производством занято ничтожно малое количество предприятий среднего и малого бизнеса. В наследство от Советского Союза остались в основном крупные инструментальные заводы, выпускающие дешевый массовый инструмент.

За рубежом компании – производители технической продукции используют покупной режущий инструмент и главная их задача – выбрать на рынке наиболее подходящий инструмент в соответствии с условиями его эксплуатации. При этом зарубежный рынок предлагает как инструмент с покрытием, так и без покрытия. Многие иностранные фирмы предпочитают использовать более дорогой инструмент с покрытием, цена которого примерно на 20-50% выше цены на аналогичный инструмент без покрытия. Приобретение и использование дорогостоящего оборудования для нанесения износостойких покрытий методами CVD и PVD у себя на фирмах для зарубежных компаний является нецелесообразным. Это обусловлено как экономическими соображениями и развитой системой кооперационных услуг, так и значительным количеством предложений по поставке инструмента с разнообразными покрытиями.

В России объем рынка отечественного инструмента с покрытиями минимален. При покупке даже импортного инструмента многие предприятия выбирают более дешевый инструмент, на котором отсутствуют износостойкие покрытия. До сих пор существует значительное количество предприятий, которые самостоятельно изготавливают инструмент для нужд собственного производства.

На этом основании использование на отечественных промышленных предприятиях современных технологий для нанесения тонкопленочных износостойких покрытий для повышения эффективности режущего инструмента является актуальной задачей. При этом применение сложного, требующего высокой квалификации обслуживающего персонала, дорогостоящего оборудования для PVD или CVD-процессов даже на крупных российских предприятиях не перспективно. Для российского менталитета промышленных предприятий наиболее рационально использовать безвакуумное, малогабаритное, недорогое и простое в обслуживании оборудование, похожее на известные и широко применяемые сварочные установки.

В соответствии с этой концепцией в России разработаны два новых метода безвакуумного нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на режущий инструмент, а именно: высокочастотное плазменное напыление кремнийсодержащего покрытия [5] и финишное плазменное упрочнение (ФПУ) путем нанесения покрытия на основе карбида, нитрида и оксида кремния [6].

Сравнительные характеристики основных методов нанесения тонкопленочных износостойких покрытий для процессов CVD, PVD и ФПУ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные характеристики основных методов нанесения тонкопленочных износостойких покрытий

Характеристика	Метод нанесения покрытия		
	CVD	PVD	ФПУ
Характер непрерывности режима осаждения покрытия	Прерывистый (с обязательными остановками на загрузку (выгрузку), охлаждение и чистку камеры	Прерывистый (с обязательными остановками на загрузку (выгрузку), охлаждение и чистку камеры	Непрерывный
Рабочее давление при нанесении покрытия на инструмент	Атмосферное (для CVD) или вакуум (для PECVD)	Вакуум	Атмосферное
Температура инструмента при нанесении покрытия, °С	700-1100 (при CVD-процессах) 400-500 (при PECVD процессах)	200-500	100-120
Зона поверхности инструмента, на которую наносится покрытие	Все поверхности инструмента, в том числе внутренние с внешним доступом	При неподвижном инструменте – только зона, непосредственно обращенная к источнику ионов, при вращении – вся рабочая поверхность, кроме закрытых внутренних зон	Покрытие может быть нанесено на любые локальные зоны, в том числе и внутренние с внешним доступом
Максимальные габариты и форма обрабатываемого инструмента	Габариты ограничены размерами реакционных и вакуумных камер. Возможно нанесение на разнотипный инструмент	Габариты ограничены размерами вакуумных камер. Сложность нанесения покрытий на разнотипный инструмент, паяный инструмент, инструмент из разнородных материалов, сложнопрофильный инструмент, на внутренние поверхности, протяженные и глухие полости, отверстия.	Без ограничений
Исходный материал инструмента	Нельзя наносить покрытия на инструмент с низкой температурой отпуска (например, из стали У10, быстрорежущей стали при CVD-процессе)	Нельзя наносить покрытия на инструмент с низкой температурой отпуска (например, из стали У10)	Без ограничений
Предварительная подготовка инструмента	Многооперационная подготовка (обезжиривание, виброабразивная обработка, ультразвуковая мойка, промывка, сушка, обезвоживание)	Тщательная многооперационная подготовка (мойка, сушка, обезвоживание, подогрев)	Достаточным является обезжиривание и подогрев до 60-80°С
Толщина наносимого покрытия, мкм	2-10 (покрытия увеличивают радиус скругления режущей кромки)	0.1-6 (покрытия толщиной 3-6 мкм увеличивают радиус скругления режущей кромки)	0.01-2
Состав наносимого покрытия	TiC, TiN, TiCN, Al_2O_3	TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, HfC, CrN, Al_2O_3 и др.	На основе карбида, нитрида и оксида кремния
Микротвердость наносимого покрытия, ГПа	20-24	21-35	52
Коэффициент трения	0.4-0.6	0.1-0.5	0.07-0.15
Температура окисления, °С	400-600	400-1100	1100
Остаточные напряжения в поверхностном слое металла	Высокие растягивающие	Растягивающие	Сжимающие
Необходимость проведения термической обработки после нанесения покрытия	Требуется дополнительная термическая обработка для снятия остаточных напряжений	Не требуется	Не требуется
Расходные материалы	Дорогостоящие высокочистые химические материалы	Дорогостоящие катоды (мишени) вакуумного переплава	Доступные и дешевые материалы: аргон, жидкий технологический препарат Сетол (расход при односменной работе – 0.5 л/год)
Объем камеры, мм	∅ 325x1250 (Bernex BPX 325S) ∅ 530x1250 (Bernex BPX Pro 530L)	Ш - 400, Г - 380, В - 520 (PLATIT PL70); ∅400 - UNICOAT 600 («ЭЛАН-ПРАКТИК»), ∅600, Н 600 (ННВ 6,6-И1)	Процесс осуществляется без применения камер
Максимальная загрузка, кг	По твердосплавным пластинам: – 200 кг (установка Bernex BPX 325S) – 400 кг (установка Bernex BPX Pro 530L)	Осевой инструмент ∅10x70 – 162 шт. (установка PLATIT PL70) Червячные фрезы ∅80x180 – 6 шт. (установка PLATIT PL70) Пластины ∅20x6 –1248 шт. (установка PLATIT PL70) Осевой инструмент ∅20x60 – 108 шт. (установка UNICOAT 600 («ЭЛАН-ПРАКТИК») Червячная фреза ∅80x80 – 32 шт. (установка UNICOAT 600 («ЭЛАН-ПРАКТИК»)	Не ограничивается
Типичное время цикла	3-5 час.	Для PLATIT PL70: Откачка+нагрев – 50 мин, очистка+травление – 10-20 мин, осаждение (2 мкм) – 1.5 ч., охлаждение (в Не) – 20-30 мин. Для UNICOAT 600 («ЭЛАН-ПРАКТИК»): откачка – 25 мин., очистка – 20 мин., осаждение (3 мкм) – 120 мин., охлаждение – 15 мин.	От 3 сек. до 20 мин.
Производительность	3-5 час. на загрузку	3.25 час. на 162 шт. ∅10x70 (PLATIT PL70) 6 ч. на 6 шт. червячных фрез ∅80x180 (PLATIT PL70) 3 ч. на 1248 шт. пластин ∅20x6 (PLATIT PL70)	От 15 до 200 мм²/с упрочняемой поверхности
Экологические проблемы	Токсичность используемых реагентов, взрывоопасность	Необходимость постоянной вытяжки, обеспечивающей отсутствие паров масла в рабочих помещениях и местной вытяжной вентиляции, включаемой при открытии вакуумной камеры и выгрузке инструмента	Использование местной вытяжной вентиляции при профилактике плазмотрона и плазмохимического генератора
Потребляемая мощность установки, кВт	20-40	60 (ННВ 6,6-И1) 40 (Станкин АПП-950) 60 (Станкин АПП-1600) 15 (PLATIT PL70)	5
Масса, кг	2000	2000 (Станкин АПП-950) 3200 (Станкин АПП-1600)	110
Минимальная площадь под оборудование, м²	100-150 (под напыление) 100-150 (для подготовки инструмента)	100-150 (под напыление) 100-150 (для подготовки инструмента)	20
Обслуживающий персонал	Оператор установок вакуумного напыления (PECVD), вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента	Слесарь, оператор установок вакуумного напыления, вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента	Оператор, рабочий для подготовки инструмента

Для реализации высокочастотного плазменного нанесения тонкопленочного кремнийсодержащего покрытия в настоящее время ОАО «ВНИИТВЧ» выпускает две установки – ПЛАЗМА-401 и ПЛАЗМА-403. К недостаткам данного оборудования относятся: сложность технологических процессов и аппаратуры, значительные габариты, высокое энергопотребление, трудности автоматизации технологии и др.

При новой технологии ФПУ упрочняющее нанопокрытие толщиной 10…200 нм на основе карбида, нитрида и оксида кремния наносится без использования вакуума при атмосферном давлении из низкотемпературной плазмы электродугового плазмотрона с генератором плазмохимических реакций. Локальная плазменная струя, содержащая аргон, кремний, углерод, водород, азот и кислород с оптимальными параметрами перемещается вдоль обрабатываемой поверхности по заданной программе, обеспечивая формирование непосредственно на упрочняемой поверхности нанопокрытия требуемой толщины. Отклонение толщины покрытия от заданной, как правило, не превышает 10% и обеспечивается постоянством технологических параметров при автоматизированном поддержании заданных характеристик процесса и соблюдением параметров перемещения плазмотрона с плазмохимическим генератором относительно изделия. Принципиально данная технология относится к плазмохимическим процессам химического осаждения покрытий из газовой фазы. Если в традиционных PECVD-процессах в основном используются высокочастотные или дуговые плазменные разряды, горящие при низком давлении, то в процессе ФПУ применяется дуговой разряд при атмосферном давлении.

Исследования толщины наносимого покрытия проводились в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН с использованием голографического цифрового длинномера ДГ-100, предназначенного для прецизионных измерений с использованием линейных датчиков, имеющего точность измерений ±10 нм. При этом покрытие наносилось на одну из сторон плоскопараллельных плиток размером 10x35x100 мм, изготовленных из инструментального материала, через специальную маску, обеспечивающую нанесение покрытия только на диаметр 7 мм. Измерение осуществлялось путем установки датчика длинномера в центре пятна покрытия и исходной поверхности, расположенной под маской. Разность между этими значениями соответствовала толщине покрытия.

Толщина покрытия оценивалась также снятием профилограмм на ИВК «Профиль», разработанном в Санкт-Петербургском государственном институте машиностроения. ИВК «Профиль» включает стандартный профилограф-профилометр 201, IBM-совместимый персональный компьютер, интерфейс связи профилографа с компьютером и пакет прикладных программ. Покрытие наносилось на плоскопараллельные поверхности плиток через маску со щелью 2-3 мм. При этом профилограммы снималась на базовой длине 5 мм.

Следует отметить, что при безвакуумном плазменном нанесении нанопокрытия имеет место весьма кратковременное протекание отдельных этапов взаимодействия плазмы с обрабатываемым материалом, отвечающее за качество покрытий, связанное со скоростями нагрева и охлаждения основного металла. Так, поверхность подложки под покрытием в слое глубиной до 1000 нм (1 мкм) нагревается приблизительно на 200°С за 10^{-2} нс, после чего остывает до исходной температуры металла за 1 нс [7].

Субмикрорельеф рабочих поверхностей образцов (рис. 3), исследовавшийся на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную топографию, присущую поверхностям после безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия (в то время как субмикрорельеф поверхностей до нанесения покрытия имеет явно выраженные многообразные следы – риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки). Изменение топографии поверхности после безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия является подтверждением того, что покрытие осаждается на микродефектах поверхности, залечивая тем самым дефектные зоны, образованные при предшествующей шлифовальной операции.

В отличие от общеизвестных и широко применяемых процессов CVD и PVD, новая технология обеспечивает нанесение нанопокрытия без использования вакуума, является высокоэффективной при сроке окупаемости затрат на внедрение менее 1 года.

Значительным преимуществом новой безвакуумной технологии плазменного нанесения упрочняющего нанопокрытия является простота и минимальное время предварительной подготовки обрабатываемых поверхностей – только обезжиривание и подогрев до температуры 50-100°С. Условия формирования покрытия при безвакуумном плазменном нанесении нанопокрытия характеризуются также повышенной адгезией нанопокрытия к основе за счет активных хемосорбционных процессов. Это подтверждается проведенными исследованиями адгезионных свойств покрытия с использованием склерометрического метода. Испытанию подвергались образцы из термообработанной стали Р6М5 с покрытием, нанесенным безвакуумным плазменным методом, и покрытием нитрида титана, нанесенным ионно-плазменным напылением в вакууме. В качестве индентора применялся алмазный конус Роквелла с углом при вершине 120°, передвигаемый по поверхности покрытий со скоростью 3 см/мин. Вертикальная нагрузка на индентор увеличивалась до тех пор, пока не достигалась ее критическая величина, при которой покрытие отслаивалось от подложки. Данную критическую нагрузку определяли, исследуя полученные царапины под металлографическим микроскопом. В результате данных исследований выявлено, что критическая нагрузка, при которой появлялись первые сколы и отслоение покрытия из нитрида титана, составляла 35 Н, а для покрытий, нанесенных безвакуумным плазменным методом ФПУ – 65 Н.

При плазменном безвакуумном нанесении упрочняющего нанопокрытия осуществляется перевод жидких технологических препаратов в парообразное состояние и их перенос в плазму дугового разряда. Образуемые продукты плазмохимических реакций, конденсируясь на поверхности подложки, образуют прочно сцепленную с основой пленку покрытия. Процессы конденсации, предшествующие адгезии, непосредственно влияют на величину адгезионной прочности. Для усиления адгезии покрытия может использоваться предварительный подогрев подложки до 100°С, обеспечивающий испарение молекул воды с поверхности подложки.

Различие температур наносимого нанопокрытия и основы при высокой адгезии покрытия обеспечивает образование в поверхностном слое металла на глубине до 10 мкм остаточных сжимающих напряжений, что повышает усталостную прочность материала. С целью определения влияния безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия, как окончательного, на технологические остаточные напряжения в поверхностном слое инструментальных сталей, прошедших механическую, термическую и абразивную обработку были проведены измерения остаточных напряжений. Для этих целей использовалась аппаратура неразрушающего контроля остаточных и эксплуатационных напряжений в металлах и сплавах «Ситон», которая позволяет определять механические напряжения при измерении амплитудно-фазочастотных характеристик. На основании анализа полученных эпюр напряжений было доказано, что после окончательной шлифовальной операции на поверхности образуются растягивающие остаточные напряжения. После безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия в подпленочной зоне образуются сжимающие остаточные напряжения порядка 80 МПа. На этом основании технология безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия может быть рекомендована как окончательный финишный процесс обработки поверхностей, работающих в условиях трения и износа, препятствующий распространению трещин и повышающий усталостную прочность.

Таблица 2. Результаты испытаний режущего инструмента с покрытием на основе карбида, нитрида и оксида кремния, нанесенного методом ФПУ

Тип штампа, инструмента, пресс-формы	Материал штампа, инструмента, пресс-формы	Материал обрабатываемой заготовки	Стойкость до упрочнения	Стойкость после упрочнения	Относительное повышение стойкости	Организация, проводившая испытания
Сверло ∅2.0	Р6М5	Д16	-	-	2.5	«НПО Автоматики», Екатеринбург
Сверло ∅2.1	Р6М5	30ХГСА	1600 отв.	5000 отв.	3.0	«Электромаш. завод «Лепсе», Киров
Сверло ∅3.0	Р6М5	ВЧ 70	0.08 часа	0.46 часа	5.75	«Моторостроительный завод», Харьков
Сверло ∅4.2	Р6М5	12ХН3А	1 час	5 часов	5.0	«Завод технологической оснастки», Николаев
Сверло ∅5.0	Р6М5	АК7	300 шт.	4080 шт.	13.6	«Топливные системы», Санкт-Петербург
Сверло ∅8.9	Р6М5	Ст45	0.045	0.183	4.0	«Турбомеханический завод», Полтава
Метчик М3	Р6М5	ВТ1-0	5 отв.	12 отв.	2.4	НПЦ «ПО «Старт», Заречный
Метчик М8	Р6М5	Ст40Х	2 часа	6 часов	3.0	«Кронштадский морской завод», Кронштадт
Метчик М10	Р6М5	12Х18Н10Т	1 час	2.25 часа	2.25	«Электрокомплекс», Минусинск
Метчик М16	Р6М5	Ст35Л	8 отв.	80 отв.	10.0	«Вагоностроительный завод», Усть-Катав
Метчик М 24	Р6М5	40Х	80 шт.	240 шт.	3.0	«Калужский турбинный завод», Калуга
Развертка ∅8	Р6М5	Силумин	2.5 часа	15.3 часа	6.5	«Прогресс», Санкт-Петербург
Развертка ∅14	Р6М5	У8А	4 часов	9 часов	2.25	«Царскосельский завод», Пушкин
Развертка ∅20	Р6М5	Ст40Х	2.8 часа	6.8 часа	2.4	«Киевтрактородеталь», Киев
Твердосплавные пластины	Т15К6	34ХН1М	5 часов	10 часов	2.0	«Уралмаш», Екатеринбург
Твердосплавные пластины	ВК6	Ст25Л	2 корпуса	20 корпусов	10.0	«Знамя Труда», Санкт-Петербург
Фреза концевая ∅10	Р6М5	Х12	571 мм	2320 мм	4.1	«НПО им. Коминтерна», Санкт-Петербург
Фреза шпоночная ∅12	Р6М5	Ст45	16 часов	39 часов	2.4	«Царскосельский завод», Пушкин
Фреза чистовая	Р18	СтР2МА (241 НВ)	5 пазов	8 пазов	1.6	«ЛМЗ», Санкт-Петербург
Фреза фасонная	Р6М5	Ст АС-14	550 дет.	1650 дет.	3.0	«ДААЗ», Димитровград
Зенкер	Р6М5	Ст45	3 часа	6 часов	2.0	«Кронштадский морской завод», Кронштадт
Резец фасонный круглый	Р6М5	СЧ20	1.5 часа	4 часа	2.7	«Моторный завод», Ульяновск
Резец фасонный	Т15К6	АК7	510 дет.	1015 дет.	2.0	«Топливные системы», Санкт-Петербург
Резец отрезной	Р6М5	Ст45	2 часа	16 часов	8.0	«Кронштадский морской завод», Кронштадт
Резец канавочный	Р6М5	Ст45	6 часов	17 часов	2.5	«Промтрактор», Чебоксары

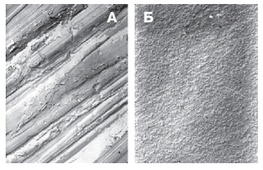


Рис. 3. Микрорельеф поверхности до (А) и после (Б) безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытия (×5000)

Рис. 4. Прибор контроля нанесения покрытия

Рис. 5. Установка для финишного плазменного упрочнения УФПУ-112

Измеренное удельное электрическое сопротивление характеризует данное упрочняющее нанопокрытие как диэлектрик: $\rho = 10^{-6}$ Ом·м.

Проведенные исследования диэлектрических свойств наносимого нанопокрытия [7] позволили выявить закономерности изменения микротока, протекающего по цепи: дополнительный источник питания – анод плазмотрона – плазменная струя – изделие при использовании в качестве датчика самой плазменной струи. Это дает возможность автоматизации процесса и измерения толщины наносимого нанопокрытия в реальном времени. Экспериментальная проверка показала эффективность данного метода и позволила разработать прибор (рис. 4), предназначенный для измерения в процессе нанесения покрытия его электрического сопротивления, зависящего от толщины покрытия. Прибор позволяет контролировать наноразмерную толщину покрытия на различных поверхностях.

Получаемое в процессе безвакуумного плазменного нанесения нанопокрытие обладает уникальными свойствами: имеет высокую адгезию к подложке, минимальное контактное схватывание при взаимодействии с материалом контртела, обладает высокой жаростойкостью, является диэлектриком, обеспечивает низкий коэффициент трения (порядка 0.07 по стали ШХ15) и высокую микротвердость (до 20 ГПа).

При низкой себестоимости технологии, изделия с нанесенным нанопокрытием обеспечивают многократное повышение долговечности (до 10 раз), повышение надежности и качества за счет комплекса физико-механических свойств поверхности, а именно: улучшения параметров шероховатости, создания в подпленочной зоне остаточных сжимающих напряжений, возможности нанесения наноразмерного износостойкого покрытия на детали из сталей с низкой температурой отпуска, детали в сборе, паяные изделия, детали из разнородных материалов, имеющие любые габариты, обладающие повышенной газопроницаемостью и др. Отдельные результаты испытаний упрочненного инструмента методом ФПУ приведены в таблице 2.

При реализации разработанной технологии используется малогабаритное и недорогое оборудование с низким потреблением электроэнергии и расходных материалов (рис. 5).

ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа использования известных технологий нанесения тонкопленочных износостойких покрытий на режущий инструмент, новая технология финишного плазменного упрочнения путем нанесения нанопокрытия на основе карбида, нитрида и оксида кремния является наиболее перспективной для широкомасштабного внедрения на предприятиях крупного, среднего и малого бизнеса, а также при массовом выпуске высококачественного инструмента с упрочняющим покрытием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Hard Coatings, Deposition Technolgies, Properties and Applications Edited by Rointan F. Bunshah, 2001.

2. Handbook of Thin Film Materials. By Hari Singh Nalwa. Contributor Hari Singh Nalwa Published by Academic Press, 2002.

3. Mattox D. M. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. 1998.

4. Handbook of Chemical Vapor Deposition. Principles, Technology and Applications. By Hugh O. Pierson, Sandia National Laboratories. 1999., 506 p.

5. *Киреев В.Ю., Столяров А.А.* Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. – М: Техносфера, 2006. 192 с.

6. *Тополянский П.А.* Нанесение износостойкого покрытия на инструментальные стали и сплавы с использованием высокочастотного индукционного плазмотрона // Металлообработка. 2003. №5 (17) С. 27-33.

7. *Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.* Плазменные технологии. Руководство для инженеров. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2008. 406 с.

8. *Григорьев С.Н., Ильичев Л.Л., Волосова М.А.* Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. 393 с.

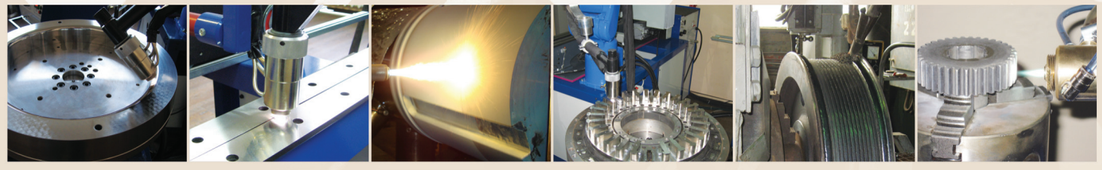
14 – 17 апреля 2015 г. г. Санкт-Петербург

17-я Международная научно-практическая конференция

«ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ, НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И РЕМОНТА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

В рамках конференции пройдут школы-семинары:

- НАПЛАВКА, НАПЫЛЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ – ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ
- УПРОЧНЕНИЕ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И РЕМОНТ ИНСТРУМЕНТА, ШТАМПОВ, ПРЕСС-ФОРМ И ДРУГОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ



Организаторы:
- Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
- НПФ «Плазмацентр»

• УПРОЧНЕНИЕ • ПОКРЫТИЯ • РЕМОНТ

ПЛАЗМАЦЕНТР

www.technoconf.ru

Заявки на участие принимаются:
тел.: +7 (812) 444 93 37, +7 (921) 973 46 74
факс: +7 (812) 444 93 36
e-mail: info@plasmacentre.ru