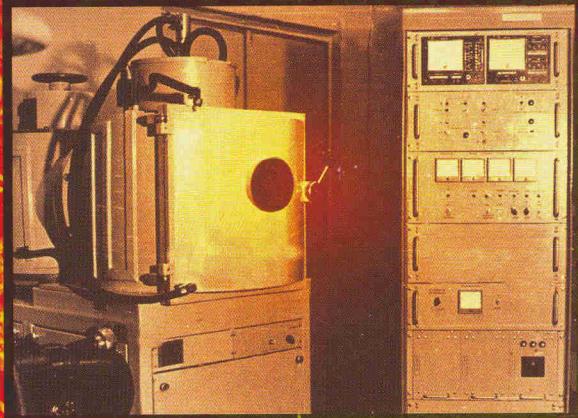


МЕТАЛЛООБРАБОТКА

Обработка материалов резанием

1



Электрофизические и электрохимические методы обработки

2

Обработка металлов давлением

3

Новые материалы и технологий производства

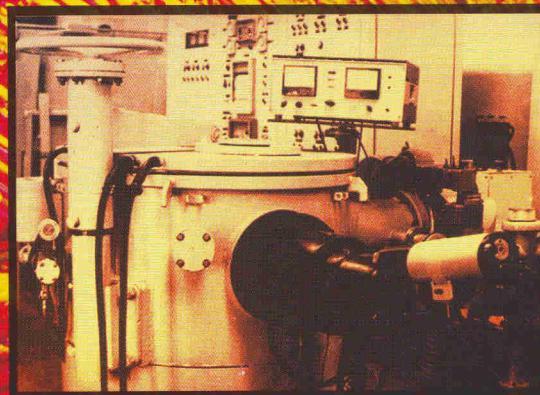
4

Новое в металлургии

5

Станки и оборудование

6



Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях (читайте с. 24–30)

УДК 621.793.18

Исследование ионно-плазменных износостойких покрытий на инструментальных сталях

П. А. Тополянский, инженер,

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Рассмотрен процесс ионно-плазменного напыления методом КИБ тонкопленочных покрытий для упрочнения режущего инструмента и деталей технологической оснастки. Приведены характеристики процесса и исследованы свойства износостойкого покрытия TiN. Дан анализ недостатков метода для разработки и создания новых упрочняющих технологий.

Физическое осаждение износостойких покрытий в вакууме (метод конденсации с ионной бомбардировкой — КИБ, магнетронное распыление, прямое электронно-лучевое испарение, реактивное электронно-лучевое испарение) — это наиболее распространенный процесс упрочнения режущего инструмента и технологической оснастки [1–13]. Данные методы позволяют наносить тонкопленочные покрытия (1–10 мкм) на основе карбидов, нитридов, карбонитридов, окислов, обладающих высокой твердостью, теплостойкостью, износостойкостью. При этом получаемые покрытия позволяют снизить силу трения при резании конструкционных сталей на 20–30 %, уменьшить коэффициент усадки стружки и усилия резания на 15–20 %, снизить температуру при резании и значительно (в 2–6 раз) повысить стойкость инструмента с одновременным увеличением производительности [3, 10–12].

Среди известных методов нанесения тонкопленочных износостойких покрытий наибольшее распространение в России получил процесс КИБ, основанный на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги с одновременной подачей в вакуумное пространство реактивных газов (азота, ацетилена, метана и др.). Процесс формирования покрытия протекает в две стадии. На первой стадии к инструменту прикладывается напряжение порядка 1,0–1,5 кВ при давлении в вакуумной камере порядка 10^{-3} Па (10^{-5} мм рт. ст.). В результате ионной бомбардировки происходит очистка, активация и разогрев поверхности инструмента. Оптимальная температура изделий при напылении с точки зрения высоких адгезионных свойств покрытия составляет 200–700 °C [6, 11]. На второй стадии в камеру поступает реактивный газ, напряжение на поверхности инструмента снижается до 100–200 В и происходит собственно процесс осаждения покрытия за счет прохождения плазмохимических реакций. На рис. 1 представлена

схема установки для ионно-плазменного напыления износостойких покрытий методом КИБ.

С целью определения некоторых зависимостей свойств наиболее распространенного покрытия — TiN на инструментальных сталях были разработаны методики оценки качества наносимого покрытия и оптимизирована технология его нанесения. В качестве основных свойств покрытия были выбраны толщина, шероховатость, микротвердость, фазовый состав покрытия и подпленочной основы. Свойства покрытий в зависимости от технологических параметров их нанесения исследовались на образцах, изготовленных из штамповых сталей X12M, У8 и быстрорежущей стали Р6М5. Эксперименты проводились на установке ВУ-1Б. Режим нанесения покрытия был оптимизирован с точки зрения наилучших адгезионных свойств и повышения эксплуатационных характеристик инструмента.

Оценка адгезионных свойств производилась на приборе для измерения твердости по методу Роквелла 2140 ТР с использованием алмазного конуса с углом при вершине 120° (радиус закругления 0,2 мм) при нагрузке 150 кгс методом вдавливания в композицию покрытие—основа. При этом в основе вокруг отпечатка индентора происходит локальная упруго-пластическая деформация, которая может вызвать разрушение покрытия. Сравнительная характеристика адгезии покрытия, нанесенного при разных режимах напыления, определялась по трем признакам: 1) отслаивание не наблюдается; 2) имеются отдельные участки отслаивания; 3) полное отслаивание. При наличии отдельных участков отслаивания определялось отношение величины площади скола (вспучивания) к площади зоны локальной упруго-пластической деформации. Этот способ использовался для качественной оценки адгезии с целью выбора оптимального режима процесса напыления при данных исследованиях. По результатам этого

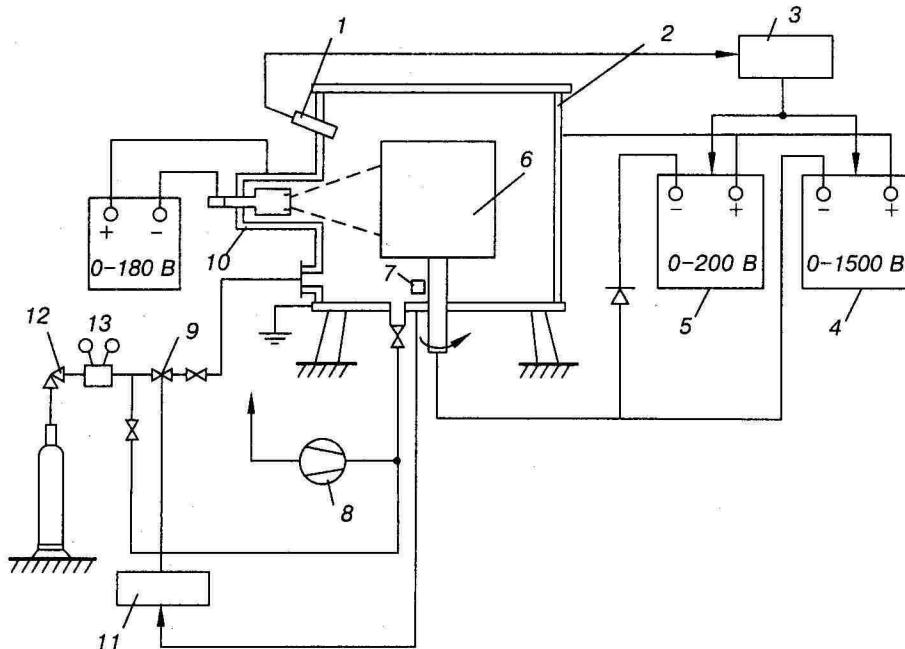


Рис. 1. Схема установки для ионно-плазменного напыления методом КИБ:

1 — пиrometer; 2 — вакуумная камера, являющаяся анодом при дуговом разряде; 3 — блок индикации и контроля температуры; 4 — высоковольтный источник тока; 5 — источник питания опорного напряжения; 6 — изделие; 7 — подвод реакционного газа; 8 — вакуумная система; 9 — вентиль подачи реакционного газа; 10 — электродуговой испаритель с испаряемым катодом; 11 — автоматический натекатель газа; 12 — вентиль баллонный с редуктором и манометрами; 13 — источник питания вакуумной дуги

качественного анализа были определены параметры процесса, которые поддерживались постоянными (ионная очистка и нагрев: высокое напряжение 1 кВ, ток дуги 90 А, давление в камере $5 \cdot 10^{-3}$ Па, время нагрева для используемых сталей было различным и определялось температурой отпуска изделий; нанесение покрытия: напряжение на изделии 150 В, давление в камере 0,8 Па, ток дуги 90 А).

Толщина покрытия

Измерение толщины покрытия производилось с помощью оптического микроскопа «Неофот-2» фирмы «Карл Цейс» (Германия) на специально изготавливаемых косых шлифах. Для определения зависимостей толщины покрытия от расположения плоскостей напыления относительно катода использовались образцы в виде куба с размерами 20×20×20 мм. Образцы устанавливались в вакуумной камере таким образом, чтобы один из торцов образца был параллелен поверхности катода, причем расстояние между катодом и торцом образца было постоянным (270 мм).

Для определения влияния температуры на толщину покрытия использовались специальные разнотолщинные образцы длиной 150 мм, максимальным сечением 15×15 мм и минимальным сечением 1×15 мм, обеспечивающие различные условия теплоотвода. Температура контролировалась при помощи хромель-копелевых термопар, зачеканенных в четырех зонах по длине разнотолщинного образца.

В процессе исследований первых образцов было установлено, что покрытие наносится как на поверх-

ность, обращенную к испарителю, так и на боковые поверхности. При этом толщина покрытия на поверхности, обращенной к катоду, максимальна и практически равномерна. Данная величина зависит от соотношения технологических параметров — времени очистки и разогрева поверхности (путем распыления атомов мишени и конденсации ионов титана на поверхности изделий) и времени напыления. Толщина покрытия росла от 2 до 10 мкм с увеличением времени напыления от 15 до 60 мин (рис. 2). При этом толщина покрытия на боковых поверхностях образца не превышала 2 мкм и практически не зависела от времени напыления. Увеличение времени очистки и разогрева позволяет уменьшить время напыления, необходимое для нанесения покрытия заданной толщины.

Толщина покрытия также зависит от температуры нагрева изделия, которая определяется техноло-

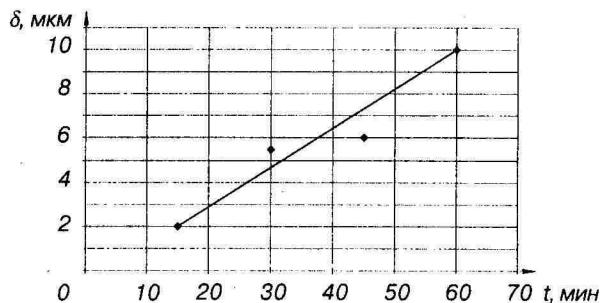


Рис. 2. Изменение толщины покрытия на торцовой поверхности образца в зависимости от времени напыления

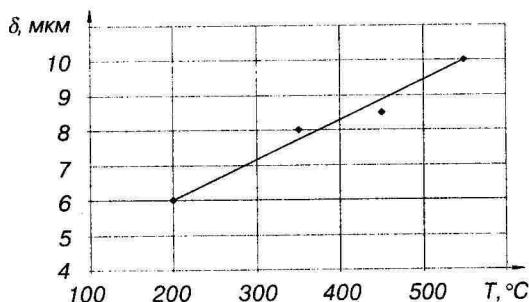


Рис. 3. Изменение толщины покрытия на торцовой поверхности разнотолщинного образца в зависимости от температуры его нагрева в четырех зонах

гических параметрами процесса и условиями теплоотвода (при использовании оснастки для крепления изделий). Разнотолщинный образец в рабочей камере располагался в плоскости, перпендикулярной оси распыляемого катода на расстоянии 270 мм. Напыление в течение 60 мин производилось при нагреве образца сечением 15×1 мм до температуры 550 °C, при этом температура в сечении 15×15 мм не превышала 200 °C. Как показали измерения, увеличение температуры в исследованном диапазоне (200–550 °C) приводит к увеличению толщины покрытия (рис. 3). На разнотолщинном образце толщина покрытия увеличивается от большего сечения образца в месте крепления до консольного конца в пределах от 6 до 10 мкм.

В исследованиях [2] толщина ионно-плазменных покрытий определялась с помощью рентгеновских методов, основанных на измерении интенсивности флюоресцентного и дифрагированного рентгеновского излучения. Также были установлены колебания толщины покрытия, нанесенного при одном и том же режиме. При этом изменение толщины покрытия от 0,5 до 2,0 мкм, по мнению авторов, может изменять эксплуатационную стойкость инструмента до 70 %. Такой разброс стойкости инструмента с разной толщиной покрытия обусловлен колебаниями структуры и фазового состава покрытия, что связывается с поглощением кислорода в процессе осаждения и образования TiO_2 . Этому может активно способствовать и взаимодействие материала покрытия с кислородом при выгрузке из камеры неохлажденного инструмента, а также процентное содержание микрокапельной фазы в покрытии, представляющей собой легко окисляемый титан.

Низкая эксплуатационная стойкость инструмента из стали Р6М5 с покрытием TiN за счет окисления подтверждается исследованиями [8]. Авторы методом рентгеноэлектронной спектроскопии исследовали процесс окисления покрытия толщиной 5 мкм на воздухе при температурах 300–900 °C в течение 1 ч. При этом в покрытиях, кроме TiN, был обнаружен его монооксид. При нагреве выше 350 °C доля азота в TiN уменьшается, а доля кислорода, связанного с титаном, увеличивается. При 500 °C азот практически полностью замещается кислородом. Аналогичный процесс наблюдается при увеличении времени отжига покрытия до 2,5 ч в муфельной печи

на воздухе при температуре 375 °C. Таким образом, установлено, что одной из причин недостаточной износостойкости и низкой адгезии покрытия может быть превращение TiN в его оксиды как во время нанесения покрытия (в результате несоблюдения оптимального технологического процесса и получения разнотолщинного покрытия), так и на воздухе в условиях разогрева от процесса резания.

С целью обеспечения равномерности толщины покрытия инструмент в вакуумной камере должен располагаться так, чтобы покрываемые поверхности были перпендикулярны к испарителю. В одной загрузке инструмент должен быть однотипным как по конструкции, так и по материалу. При обработке изделий типа тел вращения, а также имеющих сложную конфигурацию, необходимо применять приспособления и устройства, обеспечивающие вращение или колебательное движение. С целью уменьшения окисляемости покрытия требуется увеличение времени остывания инструмента (до температуры 100–200 °C) в вакуумной камере.

Шероховатость покрытия

Для определения зависимости шероховатости покрытия от расположения плоскостей напыления относительно катода использовались те же образцы, что и для измерения толщины покрытия. Аналогичный тип образцов использовался и для определения зависимости влияния исходной шероховатости основы на параметры шероховатости наносимого покрытия. Профилограммы снимались на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр».

Шероховатость покрытия на торцовой поверхности по параметру R_a имеет большую величину, чем шероховатость боковых поверхностей. Это связано с наличием увеличенного количества микрокапельной фазы на торцовой поверхности.

Изменение шероховатости покрытия в зависимости от исходной шероховатости показано на рис. 4, где видно, что при исходных значениях $R_a \leq 0,32$ шероховатость увеличивается, а при $R_a \geq 0,8$ — уменьшается. В диапазоне $0,8 \geq R_a \geq 0,32$ шероховатость покрытия изменяется незначительно. Изменение исходной шероховатости, в основном, определяется длительностью процесса ионной очистки.

В [5] отмечается, что на шероховатость покрытия наибольшее влияние оказывают исходная шероховатость изделия, ток дуги, давление газа, материал

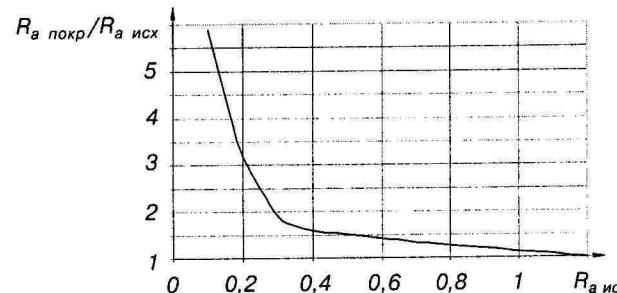


Рис. 4. Изменение шероховатости покрытия в зависимости от исходной шероховатости образцов

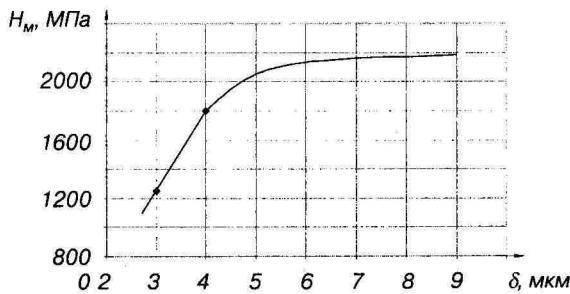


Рис. 5. Изменение микротвердости покрытия TiN в зависимости от толщины

катода и толщина покрытия. С увеличением тока дуги шероховатость возрастает в результате увеличения микрокапельной фазы в покрытии. На шероховатость покрытия практически не влияют температура подложки и ускоряющее напряжение в процессе осаждения покрытия. При устранении микрокапельной фазы шероховатость покрытия определяется исходной шероховатостью подложки и практически не зависит от режимов напыления.

Микротвердость покрытия и подпленочной зоны

Микротвердость определялась на микротвердомере с процессором «Микромет» фирмы «Buehler» (США) при нагрузке 20 гс. Исходная микротвердость исследуемой штамповой стали X12M равнялась $(0,8-0,85) \cdot 10^3$ МПа. Как показали замеры, микротвердость зависит только от толщины покрытия. Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что с увеличением толщины до 5 мкм микротвердость покрытия непрерывно возрастает и свыше этой величины становится практически постоянной.

В подпленочной зоне наблюдается уменьшение микротвердости основы на расстоянии более 100 мкм от покрытия вглубь до $(0,3-0,4) \cdot 10^3$ МПа при толщине наносимого покрытия свыше 2 мкм. Это связано с разупрочнением основы в связи с нагревом образцов выше критической температуры структурных превращений для данной стали ($200-300^\circ\text{C}$). Одновременно с этим в слое основы на глубине до 10 мкм от покрытия наблюдается увеличение микротвердости до $0,9 \cdot 10^3$ МПа, что объясняется легированием этого слоя титаном в процессе предварительной очистки, активации и подогрева. При толщинах покрытия до 2 мкм изменение микротвердости основы не наблюдалось. У образцов из быстрорежущих сталей Р6М5 подпленочная зона сохраняла микротвердость $(7,2-9,5) \cdot 10^3$ МПа независимо от толщины наносимого покрытия.

Фазовый и химический состав покрытия

Исследования фазового и химического состава покрытий TiN, нанесенных при оптимальном режиме, производились электронографическим и рентгеноструктурным методами на образцах из стали У8. Электронографические исследования, проводимые

на установке ЭМР-100 при ускоряющем напряжении 100 кВ, показали, что покрытие имеет кристаллическую структуру, представляющую собой поликристалл с простой кубической решеткой.

Микрорентгеноспектральные исследования проводились на установке «Самеса» со снятием спектрограмм, показывающих процентное содержание и характер распределения титана в основном металле и покрытии. В основном металле процентное содержание титана равняется нулю, за исключением участка толщиной 8–10 мкм, прилегающего к покрытию. В этой зоне процентное содержание титана увеличивается от 0 до 30–40 %. В слое покрытия толщиной от 0 до 4 мкм содержание титана составляет 70–75 %. Толщине покрытия 3–4 мкм соответствует наибольшее процентное содержание титана. В слое от 4 до 10 мкм количество титана в покрытии уменьшается, а количество азота возрастает. Таким образом, упрочнение основы в зоне, прилегающей к покрытию, определяется внедрением титана в материал подложки, а изменение микротвердости покрытия в зависимости от его толщины вызвано колебаниями процентного содержания титана и азота.

Рентгеноструктурные исследования проводились на установке ДРОН-2. В качестве материала анода использовался кобальт, длина характеристического излучения которого равна 1,76892 Å. Анализ подтвердил наличие в покрытии соединения TiN и титана в металлическом виде.

С целью повышения физико-механических свойств (твердости, износстойкости, теплостойкости) и долговечности неперетачиваемых многогранных твердосплавных пластин из материала марки Т5К10, Т15К6, ВК8, а также повышения производительности процессов механической обработки конструкционных сталей и цветных сплавов, разработан технологический процесс нанесения тонкопленочного покрытия TiN методом ионно-плазменного напыления на установке типа ИЭТ-8И2 («БУЛАТ»).

Технологический процесс изготовления пластин с покрытием TiN состоит из пяти этапов.

1. Шлифование опорных поверхностей пластин до значения параметра шероховатости R_a не более 0,63 мкм для увеличения площади контакта с корпусом державки, а также передних поверхностей для улучшения условий схода стружки.

2. Контроль качества поступающих под напыление твердосплавных пластин на наличие дефектов поверхности (трещин, пор, раковин и других несплошностей), осуществляется методом капиллярной дефектоскопии.

3. Предварительная очистка пластин перед напылением, включающая ультразвуковое обезжикивание в моющем растворе, ультразвуковую промывку в горячей воде, промывку в дистиллированной воде, сушку и промывку гидролизным спиртом.

4. Предварительный подогрев оснастки с установленными пластинами до температуры 300–350 °C и выдержка в течение 15–20 мин для последующего уменьшения времени откачки вакуумной камеры и времени разогрева пластин, а также снижения коли-

чества микродуг в процессе ионно-плазменного травления.

5. Процесс ионно-плазменного напыления, проводимый в три этапа: 1) очистка поверхности пластин от загрязнений бомбардировкой ионами аргона в тлеющем разряде (ионно-плазменное травление); 2) распыление, активация и нагрев поверхности пластин бомбардировкой ионами титана в дуговом разряде; 3) напыление TiN на поверхности пластин путем осаждения в вакууме из высокоскоростного плазменного потока в условиях бомбардировки пластин ионами титана при одновременном прохождении плазмохимической реакции их с реакционным газом — азотом.

Процесс ионно-плазменного напыления осуществляется следующим образом. Предварительно прошедшие заточку, контроль, очистку и подогрев твердосплавные пластины вместе с приспособлениями устанавливаются в вакуумную камеру на расстоянии 270 мм от испарителя. При помощи вакуумной системы создается давление $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). Затем в камеру подается аргон до значения давления 2,66 Па ($2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.). На пластины через выполняющие роль катода приспособления и механизмы вращения подается отрицательный потенциал, равный 300 В, который в процессе очистки повышается до 1000 В. При этих условиях в вакуумной камере за счет ионизации молекул аргона происходит явление лавинообразного нарастания потока электронов, сопровождающееся свечением газа между электродами и возникновением самостоятельного тлеющего разряда. За счет кинетической энергии ускоренных в электрическом поле положительных ионов аргона, бомбардирующих катод (в данном случае — изделие), происходит процесс ионно-плазменного травления поверхностных слоев твердосплавных пластин, сопровождающийся повышением их температуры до 300–340 °C. Оптимальное время ионно-плазменного травления составляет 10–20 мин, что отвечает отсутствию микродуг в вакуумной камере и, соответственно, пропаданию бросков напряжения в цепи разряда.

По окончании процесса очистки прекращается подача аргона, и вакуумная камера откачивается до

давления $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). На твердосплавные пластины подается отрицательный потенциал, равный 1,0 кВ, устанавливается ток дуги 90–100 А и с помощью устройства бесконтактного поджига дуги инициируется вакуумный электродуговой разряд. Весь ток дуги концентрируется на микроскопических участках, называемых катодными пятнами, хаотически перемещающимися по торцовой поверхности катода. Температура в катодном пятне достигает температуры кипения и составляет несколько тысяч градусов [1], что приводит к эрозии и испарению материала катода за счет выброса его из катодного пятна в виде высокоскоростных плазменных микроструй, ионов титана и нейтральных частиц (капельной фазы и пара). Использование ускоренных пучков большой плотности, получаемых из плазменного потока, позволяет осуществлять очистку и разогрев поверхности твердосплавных пластин путем распыления атомов мишени, а также конденсацию ионов титана на поверхности изделий. При достижении температуры пластин 700 °C напряжение на камере снижается до 200–250 В, и в камеру подается реакционный газ — азот особой чистоты до давления 0,5–0,8 Па ($4 \cdot 10^{-3}$ – $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.), которое поддерживается постоянным в течение всего процесса напыления (20–40 мин). При этом за счет плазмохимической реакции между ионами азота и ионами титана образуется соединение TiN, которое конденсируется в виде тонкопленочного покрытия (7–8 мкм).

Таким образом, весь технологический цикл упрочнения режущего инструмента состоит из следующих операций: многоступенчатая подготовка инструмента (время на инструмент для одной загрузки составляет 15–20 мин); загрузка партии инструмента (7–10 мин); обеспечение вакуума в камере (30–45 мин); ионная очистка, подогрев и осаждение упрочняющих покрытий (10–40 мин); охлаждение инструмента (25–45 мин); открытие камеры, удаление паров и металлической пыли, съем и выгрузка инструмента (5–10 мин). При этом трудоемкость работ, связанных с непосредственным получением износостойких покрытий, составляет 10–20 % от общей трудоемкости всего производственного цикла. Уве-

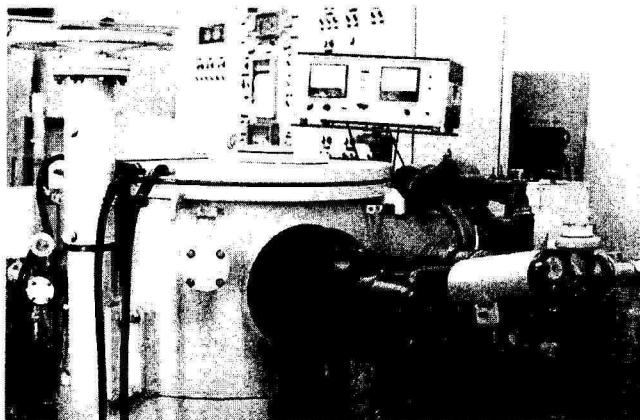


Рис. 6. Установка ИЭТ-8И2

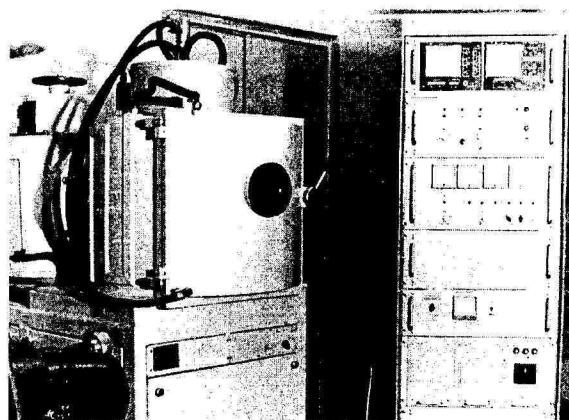


Рис. 7. Установка ВУ-1Б

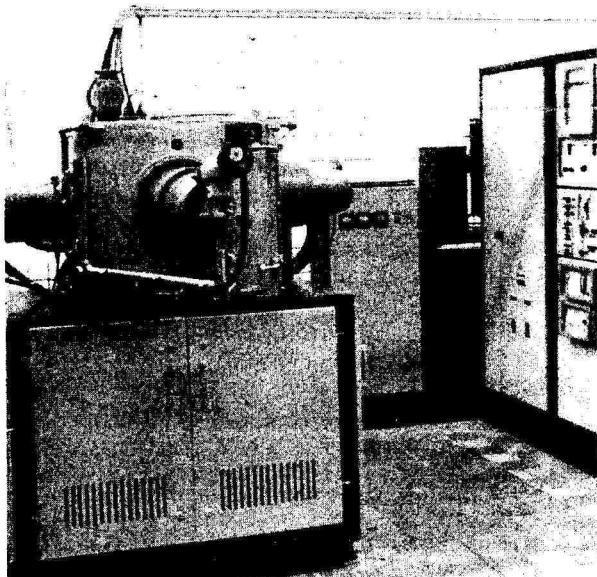


Рис. 8. Установка ННВ-6,БИ1

личение объема вакуумных камер с целью повышения производительности установок ведет, как правило, к увеличению времени достижения вакуума до необходимых величин.

Внедрение на ОАО «Электросила» трех установок (рис. 6, 7, 8) для ионно-плазменного напыления с разными технологическими возможностями (ИЭТ-8И2, ВУ-1Б, ННВ-6, БИ1) позволило повысить долговечность отдельных групп инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, добиться экономии за счет использования импортного инструмента, приобретаемого без покрытия, и нанесения на него износостойкого покрытия на отечественном оборудовании по разработанной технологии.

Испытание данного метода упрочнения произошло на дисковых трехсторонних фрезах диаметром 950×30 мм с 32 твердосплавными пластинами фирмы «Walter». Инструмент использовался при фрезеровании поковки вала ротора ТВВ-8002, изготовленного из материала 38Х2НМА. При этом инструментом без упрочнения обрабатывалось 24 паза, после упрочнения — 36 пазов.

Анализ данных исследований ионно-плазменного напыления методом КИБ TiN покрытий с целью определения путей совершенствования и разработки новых технологий упрочнения инструмента и оснастки приводит к следующим выводам.

Выводы

- Повышение стойкости режущего инструмента с покрытием TiN возможно только при соблюдении строго оптимизированного технологического процесса. При этом температура нагрева инструмента с учетом адгезионных свойств должна находиться в диапазоне 200–700 °C.

Новые технологии упрочнения должны обеспечивать нанесение износостойких покрытий на интеграль-

но холодную основу (температура нагрева поверхности не превышает 100 °C). При этом будут полностью отсутствовать изменения физико-механических свойств подложки, а эффект упрочнения будет достигаться только за счет покрытия.

- Толщина покрытий из TiN зависит от расположения инструмента относительно испарителя в вакуумной камере. На торцовой и боковой поверхностях она может отличаться до пяти раз (это же относится и к задним, закрытым поверхностям). Толщина покрытия также зависит от разнотолщинности изделия и условий его крепления к оснастке, что определяет разную температуру нагрева в различных зонах. При этом толщина покрытия может отличаться на одном и том же изделии на 50 %. Отсутствие на отечественном оборудовании контроля толщины покрытия в процессе напыления предопределяет низкую воспроизводимость качества процесса и эффективность упрочнения.

Принципиально необходимо обеспечивать в процессах упрочнения нанесение равномерного по толщине покрытия, а также осуществлять контроль свойств наносимого покрытия в процессе его осаждения (возможно, по параметрам электрического со- противления покрытия).

- Микротвердость покрытия из TiN зависит от его толщины и стабилизируется при толщине покрытия свыше 5 мкм, составляя $2,1 \cdot 10^3$ МПа. На штамповых сталях с низкой температурой отпуска наблюдается разупрочнение основы при неоптимальной температуре ионной очистки и подогрева. В зоне, прилегающей к покрытию, микротвердость основы увеличивается примерно в два раза. Таким образом, по изменению микротвердости в различных зонах можно судить о термическом воздействии инструмента на основу. Добиться отсутствия последнего на существующем оборудовании практически сложно.

Целесообразно использовать такие технологии упрочнения, где отсутствует термическое влияние на основу материала, и повышение стойкости инструмента обеспечивается только за счет нанесенного покрытия.

- Рентгеноструктурные и электронографические исследования показали, что основу покрытия составляет химическое соединение TiN. Микрорентгеноспектральные исследования выявили, что в состав покрытия входит также титан в металлическом виде. Наносимое покрытие TiN имеет кристаллическую структуру, представляющую собой поликристалл с простой кубической решеткой. Исследования фазового состава покрытия показали его неоднородность. С увеличением толщины покрытия до 4 мкм процентное содержание титана возрастает до 75%; при дальнейшем росте толщины покрытия содержание титана постепенно уменьшается при одновременном увеличении содержания азота. Это объясняет значительное повышение микротвердости покрытия TiN на глубине 4,5–5 мкм. Исследование фазового состава подложки показало, что в слое, прилегающем к покрытию, происходит внедрение титана на глубину 8–10 мкм. Наличие микрокапельной фазы титана на поверхности инструмента требует не допускать кон-

такта с атмосферой при высоких температурах во избежание образования TiO_2 , имеющего низкую стойкость в условиях резания. С целью уменьшения окисляемости покрытия, влияющей на стойкость и адгезионные свойства при резании, необходимо контролировать время остывания инструмента в вакуумной камере. Выгрузка инструмента по окончании процесса напыления должна осуществляться после его остывания до температуры 100–200 °C.

Начиная с 1970-х гг. покрытия на инструменте, как в России, так и за рубежом, состояли только из тугоплавких химических соединений типа TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, HfC, CrN, Al_2O_3 . Позднее, в 1980–90-х гг., инструмент изготавливается с многослойными покрытиями, наносимыми чередующимися слоями из этих же материалов (в настоящее время изготавливается инструмент, имеющий до 12 различных слоев покрытий типа карбидов, нитридов и оксидов) [13]. Ресурс и эффективность этих покрытий практически исчерпаны. Известно, что данные тугоплавкие соединения благодаря кристаллическим структурам обеспечивают повышенную твердость с одновременно высокой хрупкостью (особенно для покрытий толщиной более 4–5 мкм).

При создании новых упрочняющих технологий перспективой является возможность нанесения композиционных поликристаллических или аморфных покрытий, обладающих повышенной химической стойкостью и твердостью при высоких пластических свойствах, которые способны релаксировать эксплуатационные напряжения за счет пластичности покрытия.

5. Процесс КИБ реализуется на сложном и дорогостоящем оборудовании. Инструмент перед загрузкой в вакуумную камеру должен пройти тщательную предварительную обработку. Необходимая площадь для данного оборудования составляет приблизительно 80–100 м², требуется отдельная площадь для подготовки инструмента порядка 100–150 м². Для обслуживания оборудования необходим отдельный персонал — слесарь, оператор установок вакуумного напыления, вакуумщик, электрик, электронщик, рабочие для подготовки инструмента. Для несерийного специального инструмента, изготавливаемого или приобретаемого в небольших количествах, метод КИБ имеет низкую производительность из-за длительности подготовительных и вспомогательных операций.

Имеются существенные ограничения по номенклатуре упрочняемого инструмента, в связи с использованием материалов с низкой температурой отпуска, а также связанные с габаритами вакуумной камеры (нельзя упрочнять длинномерные ножи пресс-ножниц, крупногабаритные детали вырубных и гибочных штампов). Несмотря на то, что метод КИБ относится к вакуумным технологиям, не влияющим на окружающую среду, для данного процесса необходимо использовать постоянную вытяжку, обеспечивающую отсутствие паров масла в рабочих поме-

щениях, и местную вытяжную вентиляцию, включаемую при открытии вакуумной камеры и выгрузке инструмента.

Для машиностроительных предприятий, имеющих инструментальные цеха (изготавливающие инструмент второго порядка, индивидуальный инструмент, штамповую и литьевую оснастку), а также механические и штамповочные цеха (имеющие в своем составе заточные мастерские), целесообразно использовать малогабаритное оборудование для упрочнения различной номенклатуры инструмента и штампов.

Литература

1. Дороднов А. М., Петросов В. А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств // Журнал технической физики. — 1981. — Т. 51. — № 3. — С. 504–524.
2. Бедунекевич В. В., Гордон М. В., Миркин Л. И. Структура и толщина ионно-плазменных покрытий нитрида титана на быстрорежущей стали // Физика и химия обработки материалов. — 1986. — № 3. — С. 57–61.
3. Мацевитый Б. М. Покрытия для режущих инструментов. — Харьков: Вища школа: Изд-во Харьковского ун-та, 1987. — 128 с.
4. Гольцов В. П., Ходасевич В. В., Карпенко Г. Д. и др. Ионно-плазменная технология получения износостойких покрытий. — Минск: БелНИИНТИ, 1987. — 39 с.
5. Будилов В. В., Мельников С. А., Асадуллина Р. М. Основные закономерности формирования шероховатости поверхности при вакуумном напылении покрытий: Оптимизация технологических процессов по критериям прочности. — Уфа, 1987. — С. 42–48.
6. Юрьев О. Б. Ионно-плазменное напыление: опыт западноевропейских фирм // Машиностроитель. — 1987. — № 1. — С. 37–40.
7. Мелкова Г. А. Упрочнение инструмента нанесением износостойких покрытий. — М.: ВНИИТЭМР, 1989. — 31 с.
8. Канунников М. Ф., Баянкин В. Я., Гильмутдинов Ф. З. и др. Окисление покрытий на основе нитрида титана на воздухе при умеренных температурах // Физика и химия обработки материалов. — 1989. — № 5. — С. 118–121.
9. Вершина А. К., Бельчин И. А., Пителько А. А. и др. Защитно-декоративные свойства электродуговых вакуумных Ti и TiN-покрытий, осажденных в потоках плазмы. — Физика и химия обработки материалов. — 1990. — № 5. — С. 93–96.
10. Внуков Ю. Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент. — Киев: Техника, 1992. — 143 с.
11. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. — М.: Машиностроение, 1993. — 336 с.
12. Полянсков Ю. В., Табаков В. П., Тамаров А. П. Технологические методы повышения износостойкости режущего инструмента и деталей машин. — Ульяновск, 1999. — 69 с.
13. Панфилов Ю. В., Беликов А. И., Иванчиков И. В. Тонкопленочные покрытия на инструменте: анализ современного состояния и тенденции развития // Электронные, ионные и плазменные технологии: Приложение. Справочник. — Инженерный журнал. — 2000. — № 1. — С. 12–16.