

СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ
ПОСЛЕ ИМПЛАНТАЦИИ, СВЕТОЛУЧЕВОГО И
КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Проведем анализ возможных методов повышения стойкости инструмента и влияния технологических параметров установок на износостойкость инструмента.

I. Плазменно-ионная обработка

При плазменно-ионной обработке одним из наиболее важных параметров, определяющих стойкость инструмента с нитридными покрытиями, является давление реакционного газа [I], для которого представлены зависимости стойкости инструмента по износу 0,5 мм по задней поверхности от давления азота при напылении покрытия из нитрида титана и нитрида циркония. Показано, что при точении стали ХН77ТУР резцом из твердого сплава ВК6 и ТТ10К86 при симметричном фрезеровании стали 40Х (НВ 220) фрезами из ТТ10К86 и ВК6 и при точении стали 45 (НВ 180) резцами из Р6М5, ТТ10К86 и Т5К10 с покрытием из нитрида титана наиболее эффективно работают инструменты, напыленные при давлении $6,6 \cdot 10^{-1}$ - 1,3 Па, в то же время максимальная твердость обнаружена при давлении азота $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, тогда как для покрытия из нитрида циркония при точении стали 45 (НВ = 200-220) резцами из ТТ10К86 и Т5К10 максимальная стойкость реализуется при давлении 9 - 11 Па, а для покрытия из нитридов титана и хрома при давлениях 1,3 - 8 Па. Несоответствие давлений, обеспечивающих максимальную микротвердость и стойкость инструмента, объясняется тем, что максимальная микротвердость соответствует условиям максимальных микроискажений, которые приводят к разрушению покрытия при переменных нагрузках, в то время при увеличении давления азота получают покрытия с меньшими микроискажениями кристаллической решетки, растет его пластичность, параметр решетки увеличивается до уровня, соответствующего стехиометрическому составу нитридотитанового соединения, что связано со снижением скорости

конденсации покрытия и его формированию в более равновесных условиях. При этом значительно снижается хрупкость покрытия, а его твердость еще значительна и покрытие эффективно защищает контактные поверхности от изнашивания.

Толщина покрытия существенно влияет на стойкость инструмента с покрытием. Так, для случая фрезерования стали 40Х (НВ = 220), $B = 140$ мм, $t = 2$ мм, $S_z = 0,32$ мм/зуб, $V = 170$ м/мин, $Z = 1$ зависимость стойкости инструмента при износе 0,5 мм по задней поверхности от толщины покрытия представлена в работе [1]. Показано, что наилучшие результаты по стойкости реализуются в диапазоне толщин покрытий 3 - 6 мкм, но большей стойкостью обладает твердый сплав ТТ10К8Б с покрытием из нитрида титана (КИБ), затем ТТ10К8Б с TiN (IT), далее Т17К12 с TiN (КИБ), и наименьшая стойкость реализуется для сплава ВК6 с TiN (КИБ).

Обобщение результатов испытаний, приведенных в [1], дает возможность построить зависимость отношения стойкости инструмента с покрытием из нитрида титана к его стойкости без покрытия от толщины покрытия для большей гаммы инструментальных материалов и условий обработки. Показано, что диапазон наиболее эффективных толщин покрытий по стойкости лежит в диапазоне 4-7 мкм. Наибольшей стойкостью обладает сплав ТТ10К8Б, как при фрезеровании, так и при точении для других материалов, видов и режимов обработки повышение стойкости составляет 2,1-3 раза, тогда как для сплава ТТ10К8Б увеличение стойкости может составлять 5-3,5 раза.

Применение покрытия из нитрида циркония повышает стойкость инструмента по сравнению с нитридом титана в 1,5-3 раза [2], тогда как использование нитрида титана для покрытия режущего инструмента дает повышение его стойкости в 2-3 раза.

Покрытие из нитридов хрома и титана повышает стойкость твердосплавных пластин в 6-10 раз или позволяет увеличить скорость резания в два раза при точении конструкционных сталей Х12Ф1 и 12Х18Н10Т [3]. Покрытие из нитридов хрома и титана повышает стойкость твердосплавных пластин в 6-10 раз или позволяет увеличить скорость резания в два раза при точении конструкционных сталей Х12Ф1 и 12Х18Н10Т [3]. Покрытие из нитрида ниобия на твердый сплав позволяет повысить его стойкость в 2-6 раз или увеличить скорость резания в 1,5 раз при обрабо-

тке никелевого сплава ЗП1741 и коррозионностойких и жаропрочных сплавов [3] .

В [4] показано, что нанесение многослойных покрытий из титана с хромом и нитрида титана и хрома (десять и более слоев) на твердый сплав ВК6 при обработке сталей 08Х18Н10Т, 45, 20Х, 40Х стойкость инструмента повышается в 2,5 раза по сравнению с обработкой пластинами из М 3210. В случае инструмента из Р6М5 с тем же покрытием при точении резьб резцом на стали 08Х18Н10Т стойкость повышается в 5-6 раз [4] .

При нанесении покрытия из титана и нитрида титана (многослойного) на твердый сплав КНТ-16 при получистовом и чистовом фрезеровании стойкость увеличивается в 1,7-2 раза [4] .

Нанесение многослойного покрытия из титана и хрома, нитридов титана и хрома на фрезы при фрезеровании стали 9ХС стойкость повышается в 3-3,5 раза [4] .

Это же покрытие на резцы из ВК6 при точении стали 20Х повышает стойкость в 3-4 раза по сравнению с Т15К6 с тем же покрытием [4] . Это многослойное покрытие повышает стойкость пластин из Т15К6 в 4-6 раз по сравнению с покрытием из нитрида титана.

В работе [5] показано, что нанесение нитрида титана толщиной 5-10 мм на быстрорежущие стали Р6М5 и Р6М5КТ повышает их стойкость в 2,3 раза при точении сталей 18ХНВА и 18Х2НЧМА; нанесение карбида титана той же толщины на Р9К5, Р18, ВК6, ВК8, Т15К6, Т5К10 увеличивает стойкость в 2,5 раза; для метчиков М12 - в 1,7 раза; нанесение многослойного покрытия из карбида титана - карбонитрида титана и нитрида титана на твердосплавные пластины марки ВК повышает их стойкость в 3,1-5 раз по сравнению с ВК6; в 2,3-3,1 раза по сравнению с покрытием из нитрида титана при точении стали Х12Н3Т3МР.

В [6] наблюдалось, что для обработки углеродистых сталей для повышения стойкости быстрорежущей стали Р6М5 в 4 раза и более необходимо покрытие из нитридов циркония, титана и ниобия, а при обработке нержавеющей сталей необходимо покрытие из карбидов циркония и титана.

Повышение стойкости червячных фрез более чем в два раза наблюдалось в работе [7] за счет применения покрытий из нитрида титана; карбонитрида титана и нитрида хрома.

2. Ионная имплантация и ионное легирование

При ионной имплантации и ионном легировании возможно упрочнение поверхностного слоя режущего инструмента, что повышает его стойкость. Так, в работах [8, 9] показано, что при имплантации ионов азота с энергией 50 кэВ и дозой $8 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ в сверла для обработки пластических масс приводит к повышению их стойкости в 4 раза. Фреза из быстрорежущей стали (18% W + 4% Cr + 1% V) при имплантации ионов аргона повышает стойкость в 2,7 раза [9], твердый сплав ВК6 при обработке ионами азота с энергией 50 кэВ и дозой $8 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ увеличивается в 12 раз, а при энергии 110 кэВ и дозах $(3-8) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ стойкость увеличивается только в 1,5 раза.

Авторами работы [10] на ускорителе Диана-1, работающем в частотноимпульсном режиме, при энергии 60-80 кэВ, дозе $5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2}$ за счет имплантации ионами титана, вольфрама, циркония, совместно с ионами углерода, бора и азота позволило повысить стойкость инструментальных материалов в 2-3 раза (табл. I).

Анализ результатов влияния имплантации на стойкость инструмента показал, что за счет имплантации можно повысить стойкость инструмента в 2-3 раза.

3. Электронно-лучевая обработка

Очевидно, что электронная обработка инструментальных и быстрорежущих сталей может приводить к образованию мелкодисперсной карбидной фазы; за счет этого эффекта возможно повышение износостойкости сталей. Так, авторы работы [11] наблюдали, что облучение электронами с энергией 2 мэВ стали У8 приводит к уменьшению коэффициента трения. Обработка этим пучком стали Р6М5 и Р18 уменьшает износ в 2,5 и 4 раза соответственно. Начало интенсивного разрушения смещалось в область больших нагрузок для стали Р18 - на 70%, а для стали Р6М5 - на 40% (при облучении инструмент нагревался до 470 К). Наблюдается увеличение стойкости твердых сплавов типа ВК при сухом трении после воздействия электронного пучка.

Математических исследований стойкости инструмента после электронной обработки в настоящее время не проведено, но можно предположить, что на стойкость инструмента будут влиять

энергия электронов, плотность электронного тока и эффективное время действия пучка в одном месте.

4. Светолучевая обработка

Светолучевая обработка позволила повысить стойкость режущего инструмента. Так, в работе [12] обнаружено повышение стойкости инструмента из P6M5 в 2,1 раза.

По данным работы [13] наблюдается повышение стойкости концевой фрезы из стали P6M5 при обработке нержавеющей стали 12X18H10T в 2,7 раза.

Упрочнение фасонных резцов, фрез, сверл, разверток показало, что стойкость инструмента при черновой обработке увеличивается в 2 - 2,5 раза, а при чистовой - в 3 раза [13].

В работе [14] дан анализ возможности лазерного упрочнения различных металлорежущих инструментов из различных материалов при обработке различных конструкционных материалов. Показано, что реализуется повышение стойкости инструмента в 2,3-3 раза.

Анализ показал, что возможно существенное повышение стойкости режущих инструментов из быстрорежущих сталей за счет светолучевой обработки.

5. Комбинированные технологии

Комбинированные технологии могут существенно повысить стойкость режущего инструмента. Так, в работе [15] показано, что толстое покрытие из титана и нитрида титана совместно с ионным азотированием, а также нитрид титана с имплантированием тугоплавких металлов на пластины из ВК6 и быстрорежущую сталь при обработке сталей 40X и 30XГСА точением и фрезерованием повышает стойкость в 2,5-4 раза по сравнению с покрытием нитридом титана.

Покрытие нитридом титана с ионным легированием различными металлами приводит к повышению стойкости режущего инструмента в 2,5-4 раза по сравнению с нитридтитановым покрытием.

Авторами работы [16] предложена комбинированная технология, состоящая из двух: 1) химикотермическая обработка в плазме газового разряда, где осуществляется диффузионное

насыщение азотом и углеродом; 2) нанесение износостойкого покрытия. В результате такой обработки стойкость инструмента повышается в 4-8 раз и 1,5-3 раза по сравнению с монослойным покрытием.

Износостойкость режущего инструмента может быть повышена:

- за счет нанесения плазменно-ионных покрытий, получены повышения износостойкости в 1,7-3 раза в исследованиях, в производстве 1,2-1,85, в перспективе можно достигнуть 2-6 раз;

- за счет ионной имплантации и ионного легирования, получены повышения износостойкости в 1,5-2,6 раз в исследованиях, в производстве 1-2 раза и в перспективе можно достигнуть 2-7 раз;

- за счет электронной обработки можно повысить износостойкость в 1,4 раза в исследованиях, результатов промышленных испытаний нет, в перспективе возможно 1,7-2,5 раз;

- за счет лучевой обработки получены повышения стойкости в 2,1 раза в исследованиях, в производстве получено 1,5-1,8 раз, а следует ожидать в 2-3 раза;

- комбинацией этих технологий можно ожидать для плазменно-ионной и лучевой обработки в 3-8 раз;

- для плазменно-ионной и ионно-лучевой в 2-12 раз, для плазменно-ионной, ионно-лучевой и лучевой обработки - в 4-12;

- для плазменно-ионной, ионно-лучевой и электронно-лучевой - в 3,5-11 раз, ионно-лучевой и лучевой обработки - в 2,5-12 раз, для электронно-лучевой, ионно-лучевой, плазменно-ионной обработки - в 3-14 раз.

Обобщенные результаты возможного повышения стойкости режущего инструмента представлены в табл. , где показано, что повышение стойкости при комбинированной обработке может достигать десятков раз.

Важным является вопрос о прогнозировании стойкости режущего инструмента в зависимости от технологических параметров установок.

На стойкость режущего инструмента влияет величина напряжения на подложке при осаждении покрытия:

$$T(I_n) = A_T I_n^n e^{-B_T I_n^k} + C_T$$

На стойкость режущего инструмента оказывает влияние величина толщины покрытия при ионно-плазменной технологии.

Стойкость инструмента может быть аппроксимирована с помощью зависимости микротвердости от соответствующего технологического параметра $H_v [X]$ для всех технологий

$$T [X] = K_{кп} K_{Hv} \frac{H_{vp} [X]}{H_v} T_{би} + C_T,$$

где A_T, B_T, A_H, B_H, C_T — определяются дополнительным условием; H_v — микротвердость материала без покрытия; $T_{би}$ — стойкость инструмента без покрытия; $K_{кп}$ — коэффициент учитывает наличие трещин в покрытии, адгезию покрытия, наличие жидкой фазы и др.; K_{Hv} — коэффициент, влияющий на стойкость и зависящий от микротвердости и толщины режущего инструмента перед нанесением покрытия.

Зависимость стойкости инструмента от давления азота при нанесении покрытия может быть представлена в виде

$$T [P_m] = A_p P^n e^{-B_p P^k} + C_p.$$

При ионном легировании и ионной имплантации можно воспользоваться зависимостями для микротвердости, которая зависит от сорта иона, его энергии и дозы облучения, что позволяет получить зависимости для стойкости инструмента. Так, например, для случая бомбардировки ионами азота, аргона, фтора, углерода и бора зависимость стойкости инструмента от дозы облучения может быть представлена в виде

$$T [D] = T_{би} + K_{ки} K_{Hv} \frac{I}{H} (A_i D e^{-B_i D^k}),$$

где $T_{би}$ — стойкость инструмента, не подверженного имплантации.

Также получены зависимости от других технологических параметров. Ряд зависимостей представлен на рис.

Влияние технологических параметров установок
на износостойкость материалов режущего инструмента

Показано, что на износостойкость материала режущих инструментов влияет величина напряжения на подложке

$$\frac{V_{\text{изн}} \cdot n}{V_{\text{изн}}} = A_{\text{изн}} I_{\text{и}}^{\text{ч}} e^{-B_{\text{и}} I_{\text{и}}^{\text{к}}} + C_{\text{изн}}$$

Зависимость износостойкости от давления азота в камере аппроксимируется (вблизи реальных значений давления) с помощью зависимости микротвердости от давления

$$\frac{V_{\text{изн}} \cdot n}{V_{\text{изн}}} = (A_{\text{в}} h^2 + B_{\text{и}} + C) \frac{K_{\text{ки}} K_{\text{нв}}}{H_{\text{в}}}$$

Для случая имплантации ионов и ионного легирования износостойкость зависит от дозы облучения

$$\frac{V_{\text{изн}} \cdot n}{V_{\text{изн}}} = A_{\text{вД}} (D - D_{\text{к}})^{\text{н}} e^{-B_{\text{о}} (D - D_{\text{к}})^{\text{к}}} + C_{\text{п}}$$

где $D_{\text{к}}$ - критическая доза облучения.

Для износостойкости полученные зависимости представлены на рис.

Окисляемость, коррозионная стойкость материалов

На окисляемость $V_{\text{ок}}$ при плазменно-ионном покрытии определяющей является толщина покрытия, и эта зависимость может быть представлена в виде

$$V_{\text{ок}} = A_{\text{и}} h^2 + B_{\text{и}} h + C.$$

Изменение окисляемости за счет имплантации зависит от дозы облучения

$$\frac{V_{\text{ок}} \cdot \text{об}}{V_{\text{ок}}} = I + K (\text{e}^{\text{г}} (D - D_{\text{кр}})),$$

Технология обработки	Материал деталей	Вид покрытия или упрочнения	Повышение износостойкости, раз		
			В исследованиях	на производстве	в перспективе (прогноз)
ПИО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытия TiN, TiC, MoN, MoC, Cr ₂ N, NbN, WC, Ti, B ₂ , ZrO ₂ , HfO ₂ .	1,3-6,8	1,25-1,3	1,267
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N ⁺ , C ⁺ , Ag ⁺ , W ⁺ , Ae ⁺ , B ⁺ , Mg ⁺ Cu, Na, Sm	1,2-4	1,2-1,25	1,5-5
ЛО	Конструкционные стали и сплавы	Лазерное упрочнение	1,3-4,3	1,2-1,3	1,4-4,7
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевое упрочнение	1,5	нет	1,7
ПИО+ ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытие: нитриды, карбиды, имплантация Mo ⁺ , Cu ⁺ , N, W, Zr, Ti.	2-10	нет	2,5-35
ПИО+ ЛО	Конструкционные стали	Покрытие TiN, Al ₂ O ₃ лазерное упрочнение	2,3-3	нет	2,8-11
ПИО+ ИЛО+ ЛО	Конструкционные стали	Покрытие TiN, MoN, Al ₂ O ₃ имплантация B, W, C.	5-8	нет	5,5-34
ПИО + ИЛО + ЭЛО + ЛО	Конструкционные стали	Электронная очистка, покрытие TiN, MoN имплантация C и W лазерное упрочнение.	7-10	нет	8-35

где D_k — критическая доза облучения.

Окисляемость для случая лазерного облучения образцов обычно снижается, но лазерные покрытия могут повышать стойкость к окислению.

Некоторые полученные закономерности представлены на рис.

Переход от одного покрытия к другому или от одной подложки к другой при прогнозировании качественных характеристик материалов с покрытиями следует учитывать режимы работы деталей в натуральных условиях, рабочие температуры, напряженное состояние и условия нагружения, условия нанесения покрытия и релаксацию свойств покрытий после их нанесения, адгезионные и когезионные характеристики покрытий, условия подготовки деталей под покрытие (промывка, ионная очистка и др.). Учет перечисленных факторов при прогнозировании осуществляется за счет введения соответствующих коэффициентов, количество которых определяется в зависимости от материалов покрытия и подложки.

Проведенные исследования позволяют рассмотреть два варианта прогнозирования качественных характеристик покрытий и поверхностных слоев.

1. В случае, когда действие факторов разнесено во времени и пространстве, можно получать качественные характеристики покрытий и поверхностных слоев комбинированной технологии суперпозицией соответствующих характеристик простых технологий с учетом соответствующего коэффициента взаимовлияния.

2. В случае, когда соответствующие технологии реализуются одновременно в комбинированной технологии, тогда выбираем преобладающую технологию и проводим расчеты для этой технологии при эффективных технологических параметрах, учитывающих влияние других технологий.

Такой подход к прогнозированию свойств поверхностных слоев позволяет на научной основе выбирать технологические параметры установок, используемых в комбинированной технологии, которые обеспечат требуемые, иногда даже противоречивые, свойства деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. Машиностроение. М., 1986. – 190 с.
2. Иршоров И.А., Редчик В.В. Опыт применения вакуумных ионно-плазменных покрытий в производственных условиях. Тез. докл. коорд. Совета "Разработка оборудования и технологических процессов многофункциональных вакуумных ионно-плазменных покрытий на металлические поверхности. НИИТ, 1990. – 70 с.
3. Лещинер А.Н., Малышев А.А., Тихоненко Ю.В., Носенко А.С. Многослойные композиционные покрытия на режущие инструменты. Материалы семинара "Ионно-плазменная технология упрочнения изделий инструментального производства". М., 1980. – 74-76 с.
4. Болин Э.М., Волотников Т.В., Суров И.С. Вопросы технологии получения методом КИБ сложнолегированных износостойких покрытий для режущего инструмента. II Всес. научно-техн. симп. "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов". Саратов, 4-6 сент., 1990. М., Информэлектро, 1990. – С. 45-46.
5. Дымов В.С., Белик С.С., Лесничий К.Т. Участок для ионно-плазменного нанесения покрытий на металлорежущий инструмент. Там же, с. 88-89.
6. Сальников А.С., Внуков Ю.Н., Марков А.А. Нитриды переходных металлов, полученные методом вакуумно-плазменного напыления. II Всес. научно-техн. симп. "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов". Саратов, 4-6 сент. 1990. М., Информэлектро, 1990, с. 68-69.
7. Бродянский А.П., Дударчик А.В. Особенности технологии нанесения износостойких покрытий на высокоточный инструмент. Тез. докл. I Всес. научно-техн. симп. "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов". М., Информэлектро, 1988, с. II-12.
8. Charter S.J. Thonson J.B. Dearnally C. Thin Solid films 1981, vol 84, № 4, p. 355-360.
9. Wiftkower A. Hirvonen J.K. Instrum and meth. 1986, vol 86, p. 79-87.

10. Грищенко В.Н., Диамант В.М., Колобов Ю.Р., Новожаев А.Д., Тинкин В.А., Савченко А.О. Применение ионной имплантации для упрочнения инструмента. II Всес. научн.-техн. симп. "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов". М., Информэлектро, 1988, с. 89-90.
11. Мельникова Н.А., Кулик И.П., Петренко В.П., Макчанин Л.Ю., Мироненко А.И. Тез. докл. У Всес. совета по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. М., 1990, ЦНИИАтоминформ.
12. Станишевский В.К., Ларев В.К., Кратько С.А., Попко В.И. Сравнение методов упрочнения режущего инструмента. Там же. С. 21-25.
13. Коваленко В.С. лазерные технологии. К., Бица школа. Главное изд-во. 1985. - 289 с.
14. Коваленко Д.С., Петляков Р.П., Дятел Д.П. Спр. по технологии лазерной обработки. К., Техніка, 1985. - 167 с.
15. Габанов В.П., Уваров В.О., Николаев В.К. Повышение работоспособности инструмента с покрытием на основе нитрида титана. Материалы семинара "ионно-плазменная технология упрочнения инструментального производства", Москва, 1987. 67-68 с.
16. Григорьев С.Н. Разработка принципов комплексной обработки режущего инструмента. Тез. докл. II Всес. научн.-техн. симпозиума "Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов". Саратов, 4-6 сент. 1990, М., Информэлектро, 1990, с.31-32.