

УДК 621.9.025

Ю.Н. ВНУКОВ, д-р техн. наук,

Е.Б. КОЗЛОВА,

Э.В. КОНДРАТЮК, канд. техн. наук, Запорожье, Украина

КОНСТРУИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЗАНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

У статті представлені методи оцінки основних експлуатаційних властивостей покриттів: товщини, мікротвердості, міцності зчеплення з підкладкою (інструментальним матеріалом), оцінки зносостійкості покриття в умовах різання. Запропоновані конструкції багатослойних покриттів для інструменту зі швидкорізальної сталі, описані результати порівняльних випробувань на зносостійкість інструменту з різними покриттями для обробки железо-углеродистого матеріалу Сталь 45.

В статье представлены методы оценки основных эксплуатационных свойств покрытий: толщины, микротвердости, прочности сцепления с подложкой (инструментальным материалом), оценки износостойкости покрытия в условиях резания. Предложены конструкции многослойных покрытий для инструмента из быстрорежущей стали, описаны результаты сравнительных испытаний на износостойкость инструмента с различными покрытиями для обработки железоуглеродистого материала Сталь 45.

Methods of an assessment of the main operational properties of coverings are presented in article: thickness, microhardness, durability of coupling with a substrate (tool material), an assessment of wear resistance of a covering in the conditions of cutting. Designs of multilayered coverings for the tool from quick cutting steel are offered, results of comparative tests for wear resistance of the tool with various coverings for processing of the iron-carbonaceous material Steel 45 are described.

Совершенствование современных составов и конструкций вакуумно-плазменных пленочных покрытий ведут путем разработки композиционных или многослойных покрытий с целью получения комплекса их характеристик, превышающих свойства однослойного покрытия.

На рис. 1 приведена принципиальная схема фрикционного узла при резании.

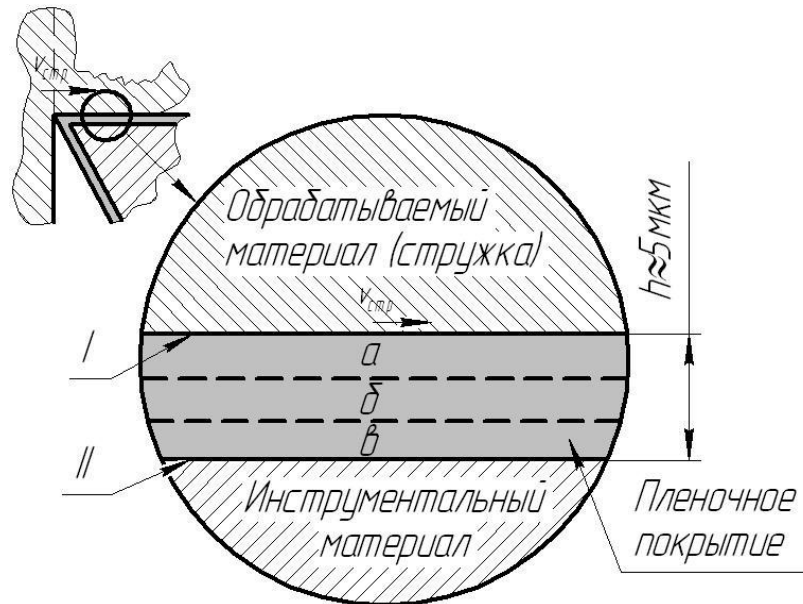


Рисунок 1 – Схема фрикционного узла при резании инструментом с покрытием:

- I – граница контакта со стружкой (обрабатываемым материалом);
- II – граница сцепления покрытия с инструментальным материалом

У покрытия имеется две контактных границы: со стружкой и с материалом инструмента. На границе I происходят процессы схватывания и износа с подвижной стружкой, а граница II является местом прочного закрепления покрытия на поверхности инструмента.

Если обрабатывается железоуглеродистый материал (Сталь 45) инструментом из быстрорежущей стали, которая по химическому составу также является железоуглеродистым легированным материалом, то к покрытию одновременно предъявляются противоречивые требования. На границе со стружкой схватывание должно быть минимальным, а на границе с инструментальным материалом максимальным. Это техническое противоречие можно решить, создав покрытие с различным комплексом свойств на этих двух границах, либо путем чередования слоев – *многослойное покрытие*, либо постепенным изменением состава по толщине – *композиционное покрытие*.

К верхнему слою (а), контактирующему со стружкой, предъявляется требование минимальной адгезионной активности к обрабатываемому материалу, обеспечивающее минимальное схватывание. К нижнему слою (в), соединенному непосредственно с инструментальным материалом предъявляются требования прочного сцепления. Слои (б) должен иметь высокий уровень износостойкости и прочности и надежно соединять слои (а) и (в). Естественно, слои (а) и (в) также должны обладать достаточной прочностью и износостойкостью.

1 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Среди многих видов покрытий тонкие вакуумно–плазменные износостойкие покрытия (пленки) занимают особое место. Эта особенность определяется их незначительной толщиной (не более 5 мкм), высокой микротвердостью, прочностью сцепления с подложкой, а также условиями эксплуатации на режущем инструменте – характеристиками трения в условиях схватывания с обрабатываемым материалом, износостойкостью и др. [1].

1.1 Определение толщины покрытия

Определение толщины покрытия возможно путем прямого обмера размеров напыляемой поверхности перед и после нанесения покрытий, методом металлографических шлифов и целым рядом различных физических методов.

В металлографическом методе образцы или инструмент плотно прижимают напыленными поверхностями к другой поверхности с твердостью, равной твердости подложки (инструмента), и в плоскости перпендикулярной к поверхности напыления изготавливают металлографический шлиф. После его травления (для инструмента из быстрорежущей стали) в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте износостойкий слой проявляется в виде светлой нетравящейся зоны (рис. 2), который измеряют на металлографическом микроскопе при увеличении $\times 1000$ – 2000 . Недостатком этого метода является необходимость разрушения изделия.

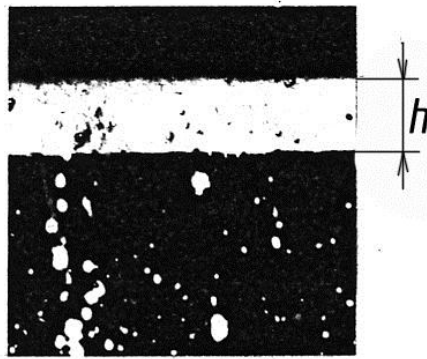


Рисунок 2 – Металлографический метод определения толщины износостойкого слоя (2000 х)

Среди физических методов наиболее распространенным является метод **рентгеноструктурного анализа**. Определение толщины покрытий этим методом основано на ослаблении интенсивности рентгеновского излучения, отраженного от поверхности основного материала инструмента на двух участках с покрытием и без него.

На заводах для определения толщины покрытия TiN используют прибор «Micro-DEEM» модели MP-700 (США). Принцип работы прибора следующий (рис. 3).

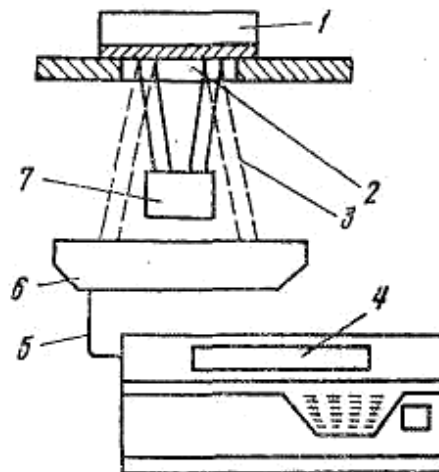


Рисунок 3 – Измерение толщины покрытия с помощью обратного бета-рассеяния на приборе «Micro-DEEM» модели MP-700:

1 – образец с покрытием; 2 – отверстие; 3 – бета-лучи; 4 – ЭВМ; 5 – провод зонда; 6 – счетчик Гейгера-Мюллера; 7 – источник бета-излучения

Бета-лучи, испускаемые радиоактивным источником 7, направляются на поверхность образца 1, на которую нанесено покрытие. Некоторые бета-лучи поглощаются образцом, а другие – 3 подвергаются обратному рассеянию или отражаются. Рассеянные бета-лучи обнаруживаются с помощью счетчика Гейгера-Мюллера 6 и передаются в виде электрических импульсов на ЭВМ прибора 4. Зависимость скорости обратного бета-рассеяния от толщины покрытия позволяет проводить непосредственное измерение толщины покрытия.

1.2 Определение микротвердости покрытий

ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» устанавливает два метода испытаний: основной – по восстановленному отпечатку и дополнительный – по невосстановленному.

На отечественных приборах ПМТЗ и ПМТ5 можно корректно оценивать микротвердость покрытий с толщиной более 4 мкм, так как минимальная толщина покрытия должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз. Поэтому, для оценки микротвердости тонких покрытий (пленок) необходимо использовать ультрамикротвердомер типа МИКРО–ДЮРОМАТ – 4000. На этом приборе возможно наносить микро и ультрамикротвердые отпечатки в диапазоне усилий от 0,0005 до 2 Н при использовании алмазного наконечника с формой рабочей части в виде бицилиндра.

1.3 Определение прочности сцепления покрытия с подложкой (инструментальным материалом)

В настоящее время наиболее принятым количественным методом определения прочности сцепления твердых тонких покрытий (пленок) с подложкой является метод царапания с переменной нормальной нагрузкой – P (рис. 4).

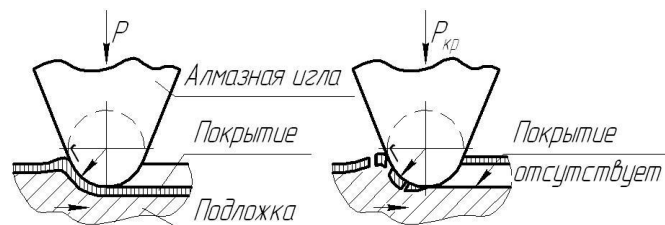


Рисунок 4 – Определение прочности сцепления покрытия с подложкой методом царапания с переменной нормальной нагрузкой – P

Царапающее устройство снабжено алмазной иглой в форме конуса Роквела с радиусом заточки $r = 0,2$ мм. Во время движения (царапания) на алмазную иглу последовательно с шагом в 1 Н от 1 до 150 Н прикладывается нормальная нагрузка P . С ростом нормальной нагрузки, наступает момент, когда покрытие разрушается. **Нагрузка, при которой теряется сцепление покрытия с подложкой называется критической – $P_{кр}$. Величина критической нагрузки является критерием прочности сцепления покрытия с инструментальным материалом.**

1.4 Определение адгезионных свойств покрытий к обрабатываемому материалу

Считается, что общая сила трения, а следовательно, и коэффициент трения складывается из двух составляющих: деформационной и адгезионной. Исходя из этого коэффициент трения равен:

$$f = f_{деф} + f_{адг} \quad (1)$$

где $f_{деф}$ – деформационная составляющая коэффициента трения;

$f_{адг}$ – адгезионная составляющая коэффициента трения.

Применяя метод определения тангенциальной прочности адгезионной связи полированных поверхностей под нормальной нагрузкой, считают, что деформационная составляющая бесконечно мала и ею можно пренебречь. Тогда при условии сжатия сферы двумя образцами (рис. 5) / 2/ и ее повороте можно определить адгезионную составляющую коэффициента трения по формуле

$$f_{адг} = \frac{3 F_{экс} R_{экс}}{4 r_{л} N} \quad (2)$$

где $F_{экс}$ – экспериментально определяемое усилие для поворота индентора, Н;

$R_{экс}$ – радиус поворотного диска, в котором крепится образец со сферическими поверхностями, мм;

$r_{л}$ – радиус лунки от внедрения сферической поверхности образца, мм;

N – нормальная нагрузка, Н.

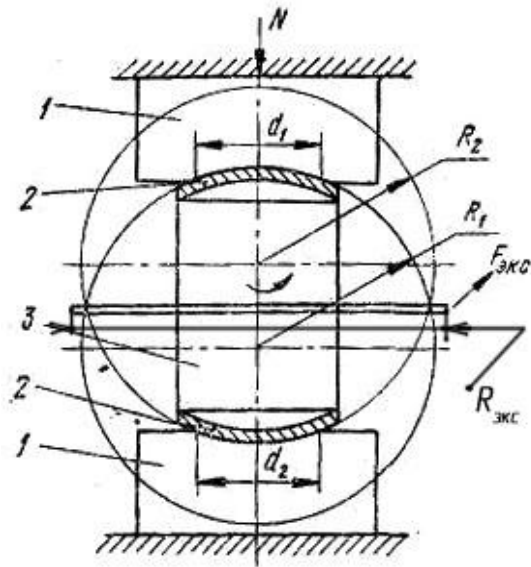


Рисунок 5 – Узел трения:

- 1 – образцы из обрабатываемого материала, 2 – износостойкое покрытие,
 3 – образец из инструментального материала (индентор),
 d_1 d_2 – диаметры лунок вдавливания,
 R_1 , R_2 – радиусы шарового индентора, $F_{экс}$ – измеряемая сила трения

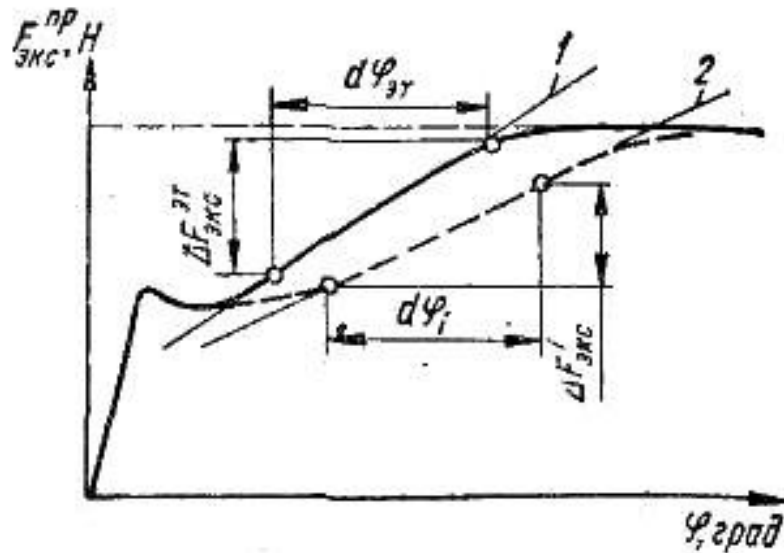


Рисунок 6 – Диаграммы силы трения для различных пар трения:

- 1 – Р6М5 – обрабатываемый материал
 2 – TiN – обрабатываемый материал

В предлагаемом методе адгезионная активность фрикционного контакта оценивается уровнем прироста поверхности фактического сдвига при его перемещении:

$$\Delta s = \Delta F_{\text{экс}} / (s \tau_{\text{сд}}) \quad (3)$$

где $\Delta F_{\text{экс}}$ – прирост силы трения при постоянной для всех случаев величине угла поворота $d\varphi_i$ индентора 2 (рис. 6) (определяется экспериментально); $\tau_{\text{сд}}$ – сопротивление обрабатываемого материала сдвигу.

$$\tau_{\text{сд}} = F_{\text{экс}}^{\text{пр}} / s \quad (4)$$

$F_{\text{экс}}^{\text{пр}}$ – предельная сила трения, определяется экспериментально; s – площадь поверхности трения (общая поверхность сферических отпечатков на образцах) фрикционного контакта, рассчитывается по формуле:

$$s = s_1 + s_2 \quad (5)$$

s_1, s_2 – площади поверхности трения индентора с верхним и нижним образцами:

$$s_i = \pi D_i (D_i - \sqrt{D_i^2 - d_i^2}) / 2 \quad (6)$$

D – диаметр шаровой поверхности индентора; d – диаметр отпечатка; $i = 1, 2$.

Для оценки коэффициента относительной адгезионной активности покрытия к обрабатываемому материалу по сравнению с адгезионной активностью подложки к обрабатываемому материалу эксперимент необходимо проводить дважды. Первый раз записывают кривую роста нагрузки $F_{\text{экс}}$ при вращении индентора без покрытия, а второй раз – с покрытием. Измеряя прирост силы трения $F_{\text{экс}}$ на одинаковом угле поворота индентора $d\varphi$, а также диаметры шаровых поверхностей D_1 и D_2 и лунок d_1 и d_2 , рассчитывают **коэффициент относительной адгезионной активности** – $K_{\text{адг}}$.

$$K_{\text{адг}} = \frac{\Delta s_i}{\Delta s_{\text{эТ}}} \quad (7)$$

где $s_i, s_{\text{эТ}}$ – адгезионная активность соответственно индентора с износостойкой пленкой и подложкой (быстрорежущей сталью) к обрабатываемому материалу.

Контактные поверхности образцов получают по методике изготовления металлографических шлифов. Перед экспериментом поверхности образцов тщательно обезжиривают четыреххлористым углеродом и протирают пудрой из активированного угля.

1.5 Оценка износостойкости покрытия в условиях резания

На рис. 7 показана схема испытаний на износостойкость инструментального материала 3 или покрытия 4 с различной адгезионной активностью при трении стружкой 5 в условиях постоянства формы и размера застойной зоны 2. Измерение износа производят профилографированием на профилографе-профилометре модели ВЭИ-201 «Калибр» при вертикальном увеличении 1000 х и горизонтальном 80 х.

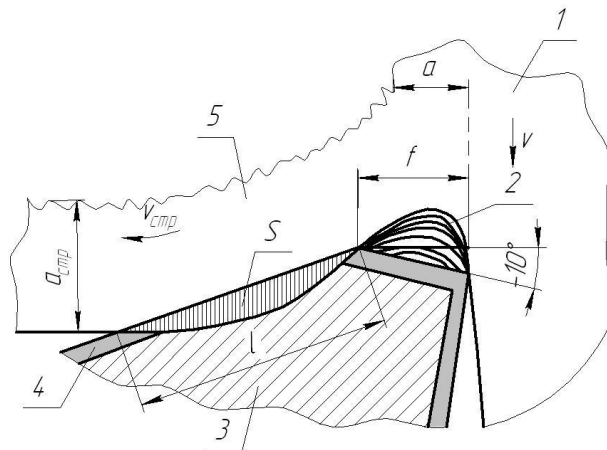


Рисунок 7 – Схема испытаний покрытий на износостойкость при резании:
 1 – обрабатываемый материал, 2 – застойная зона,
 3 – резцовая пластина из быстрорежущей стали, 4 – покрытие, 5 – стружка,
 S – площадь очага износа

Сохранение постоянства формы и размеров застойной зоны – 2 для инструментальных материалов с различной адгезионной активностью достигается путем создания на передней поверхности отрицательной фаски - $f = (1,5 - 2)a$. Это является важнейшим условием повышения точности определения способности пленки противостоять износу при трении стружкой.

Для определения износостойкости покрытий разных составов, нанесенных на быстрорежущую подложку, рекомендуют следующие

условия испытаний: точение Стали 45, скорость – $v=0,5\text{ м/с}$, глубина резания – $t=1,5\text{ мм}$, подача – $s=0,43\text{ мм/об}$ ($a = 0,3\text{ мм}$ при $\varphi = 45^\circ$), угол фаски – (-10°) , величина фаски $f = 0,5\text{ мм}$, время испытаний – 10 мин, без СОЖ. Площадь очага износа – S определяют планиметрированием.

Относительную интенсивность износа J при резании Стали 45 определяют отношением $J = \frac{S_{\text{покp}}}{S_{\text{P6M5}}}$, где $S_{\text{покp}}$ - площадь очага износа инструмента с покрытием, S_{P6M5} – площадь очага износа инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 без покрытия.

2. СОЗДАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТОГО МАТЕРИАЛА СТАЛЬ 45

Возможности вакуумно-плазменных технологий осаждения различных покрытий очень широки, поэтому целесообразно определить важнейшие эксплуатационные свойства карбидных и нитридных монопленок, нанесенных на инструментальную подложку из быстрорежущей стали Р6М5 на основании которых можно конструировать многослойные или композиционные покрытия.

Свойства нитридных и карбидных покрытий переходных металлов IV-VI групп, измеренные по описанным выше методикам приведены в таблицах 1 и 2. Покрытия наносили в вакуумно-плазменной установке «Булат-3У» толщиной $h=5\text{ мкм}$.

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что нитриды переходных металлов в большей мере, чем карбиды отвечают требованиям, предъявляемым к свойствам покрытий по следующим причинам:

1. Из-за более высокой микротвердости карбидных покрытий они проявляют большую склонность к разрушению, чем нитридные при пластическом деформировании инструментальной подложки в условиях измерения ее твердости по шкале HRC.

2. Нитридные пленки имеют более высокую прочность сцепления с инструментальной основой по сравнению с карбидами. А нитрид циркония ZrN из всех исследованных соединений обладает наиболее высокой критической нагрузкой разрушения, $P_{\text{кр}}=130\text{ Н}$.

3. Более низкое схватывание $K_{адг}$ по отношению к Стали 45 также приходится в основном на нитриды. Аномально низкое схватывание со Сталью 45 получено при трении нитридом ниобия NbN и карбидом молибдена Mo₂C. Однако, существенного повышения износостойкости в процессе резания инструментом с покрытием из карбида молибдена не получено, вследствие его низкой термической устойчивости.

4. Высокими свойствами по износостойкости обладают покрытия TiN, ZrN и NbN, поэтому на их основе были нанесены и испытаны различные многокомпонентные покрытия.

Таблица 1 – Свойства нитридных покрытий (на подложке P6M5)

№ № пп	Тип покрытия	Микро- твердость H_{μ} , Н/мм ²	Прочность сцепления с инстру- ментальным материалом, $P_{кр}$, Н	Коэффициент адгезии с обрабаты- ваемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относи- тельная интенсив- ность износа, J при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	–	1,00	1,000
2	TiN	21750	85	0,33	0,305
3	ZrN	18490	130	0,71	0,309
4	HfN	25000	110	0,54	0,552
5	VN	28140	105	0,37	0,674
6	NbN	31460	70	0,06	0,333
7	CrN	26600	110	0,51	0,536
8	Mo ₂ N	27400	80	0,82	1,003

Таблица 2 – Свойства карбидных покрытий (на подложке P6M5)

№ № пп	Тип покрытия	Микро- твердость H_{μ} , Н/мм ²	Прочность сцепления с инструмен- тальным материалом, $P_{кр}$, Н	Коэффициент адгезии с обрабаты- ваемым материалом Сталь 45, $K_{адг}$	Относи- тельная интенсив- ность износа, J при резании Стали 45
1	P6M5 без покрытия	9360	–	1,00	1,000
2	TiC	23860	55	0,58	0,365
3	ZrC	33000	80	2,46	0,375
4	HfC	28650	80	2,14	0,268
5	VC	35230	70	1,05	0,275
6	NbC	37800	55	0,25	0,249
7	CrC	19250	70	0,52	0,622
8	Mo ₂ C	30380	60	0,04	0,781

В табл. 3 представлены результаты испытаний на износостойкость инструмента с многокомпонентными покрытиями. Максимальной износостойкостью при резании Стали 45 обладает покрытие **ZrN-TiN-NbN**, у которого нижний слой выполнен из нитрида циркония, обладающего высокой прочностью сцепления с инструментом, а верхний слой, имеет самое низкое схватывание с обрабатываемым материалом, состоит из нитрида ниобия. Лучший результат показывает покрытие, если между нижним слоем ZrN и верхним – NbN расположен нитрид титана TiN, характеризующийся полной взаимной растворимостью с этими нитридами.

Получено повышение износостойкости инструмента с трехслойным покрытием более 4 раз по сравнению с инструментом без покрытия.

Таблица 3 – Результаты сравнительных испытаний на износостойкость инструмента с различными покрытиями

№ № пп	Тип покрытия	Относительная интенсивность изнашивания, $J=S/S_{P6M5}$
1	P6M5 (без покрытия)	1,000
2	TiN	0,305
3	(Ti, Nb)N - композит	0,315
4	NbN-TiN	0,368
5	TiN-NbN	0,278
6	ZrN-NbN	0,312
7	ZrN-TiN-NbN	0,241

В табл. 4 и 5 приведены результаты промышленных стойкостных испытаний метчиков при нарезании резьбы в Стали 45. Метчики с покрытием **ZrN-TiN-NbN** показали многократное повышение стойкости.

Таблица 4 – Результаты испытаний метчиков M12 при $n_1 = 680$ об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
P6M5 без покрытия	215	1,0
TiN	574	2,7
ZrN-TiN-NbN	976	4,5

Таблица 5 – Результаты испытаний метчиков M12 при $n_2 = 960$ об/мин

Тип покрытия	Количество обработанных отверстий	Коэффициент повышения стойкости
P6M5 без покрытия	22	1,0
ZrN	75	3,4
TiN	126	5,7
ZrN-TiN-NbN	215	9,8

Условия испытаний.

1. Испытания выполнены на вертикально-сверлильном станке модели 2A125 при двух режимах резания.
2. Обрабатываемый материал – сталь 45 твердостью HB210.
3. Диаметр отверстий 10,2 мм, глубина резьбы 15 мм. Нарезание резьбы на проход.
4. Критерий износа – заедание метчика и остановка шпинделя.
5. СОЖ не применяли.

Промышленные испытания сверл, долбяков, а также холодно- и горячевысадочных пуансонов с многослойным покрытием **ZrN-TiN-NbN** при обработке изделий из железоуглеродистых материалов показала повышение стойкости в 1,5 и выше раз по сравнению с однослойным покрытием из нитрида титана – TiN и многократное повышение стойкости по сравнению с инструментом без покрытия.

Список использованных источников: 1. Внуков Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследований условий их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей : дисс. доктора техн. наук / Внуков Юрий Николаевич. – М., 1992. – 371 с. 2. Нанесение износостойких покрытий на режущий инструмент / Под ред. Внукова Ю.Н. – К.: Техника, 1992. –143 с.

Bibliography (transliterated): 1. Vnukov Ju.N. Povyshenie iznosostojkosti bystrorezhushhih instrumentov na osnove issledovaniy uslovij ih trenija s obrabatyvaemymi materialami i realizacii novyh tehnologicheskikh vozmozhnostej : diss. doktora tehn. nauk / Vnukov Jurij Nikolaevich. – M., 1992. – 371 p. 2. Nanesenie iznosostojkih pokrytij na rezhushhij instrument / Pod red. Vnukova Ju.N.–K.: Tehnika, 1992. –143 p.