

## **Повышение эффективности твердосплавного инструмента для резания труднообрабатываемых материалов**

Твердохлебов А.С., д.т.н. проф. Максимов Ю.В., д.т.н. проф. Верещака А.С.

Университет машиностроения  
8 (495) 223-05-23, доб. 1283, 1353

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы выбора рациональных свойств твердого сплава, значительно повышающего эффективность наноразмерного многослойно-композиционного покрытия (НМКП), осажденного на рабочие поверхности инструмента. Сбалансированное сочетание свойств твердого сплава и НМКП позволило существенно повысить стойкость инструмента при точении жаропрочного никелевого сплава.

*Ключевые слова:* твердый сплав рационального состава, наноразмерные многослойно-композиционные покрытия, фильтруемое катодное вакуумно-дуговое осаждение.

### **Введение**

Интенсивное изнашивание твердосплавного инструмента при обработке резанием заготовок из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов в значительной степени определяется термическим разупрочнением кобальтовой связки и «вырывом» карбидных зерен из твердого сплава (адгезионный износ) [1]. Повышение работоспособности лезвийных режущих инструментов из стандартных твердых сплавов с кобальтовой связкой даже при нанесении износостойких покрытий многослойно-композиционного типа последнего поколения оказывается в ряде случаев недостаточно эффективным вследствие повышенной склонности таких сплавов к потере формоустойчивости при температурах резания, что является одной из главных причин интенсивного разрушения относительно хрупких покрытий [2].

Одним из оптимальных решений задачи повышения работоспособности твердосплавного инструмента с покрытием при обработке резанием жаропрочных сплавов является использование высокопрочных и жаростойких связок, содержащих, кроме кобальта, тугоплавкие металлы, не образующие устойчивых карбидов. Ещё одним средством повышения работоспособности твердосплавного инструмента является применение наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий, обладающих сбалансированным сочетанием твердости и износостойкости в сочетании с достаточной прочностью, препятствующей термомеханическому деформированию режущего клина инструмента [3]. Наноструктурированные покрытия, кроме того, обеспечивают снижение контактных термомеханических напряжений, способствуют более благоприятному перераспределению тепловых потоков и повышению сопротивляемости разрушению покрытия даже при значительных деформациях твердосплавного субстрата.

Таким образом, цель настоящей работы состояла в разработке твердого сплава с покрытием, обладающим повышенной эффективностью при резании жаропрочных сплавов.

### **Методика экспериментальных исследований**

Объектом исследования служили режущие сменные многогранные пластины (СМП) из твердого сплава квадратной формы (SNUN, ISO) с наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием (НМКП), разработанным для высокоскоростного резания труднообрабатываемых материалов. Была изготовлена экспериментальная партия режущих пластин формы SNUN (стандарт ISO) из твердых сплавов марок BK10XOM, BPK13 (ISO K30-K40, S10-S20) с радиусом при вершине  $r=0,8$  мм. Пластины были разделены на группы, одну из которых использовали для проведения исследований физико-механических и кристаллохимических свойств, другую – для исследования режущих свойств инструмента, оснащенного твердосплавными пластинами.

Использовали режущий инструмент с механическим креплением пластин с разработан-

ными НМКП, со стандартным покрытием и без покрытия, который имел следующие значения параметров режущей части:  $\gamma = -(8-10)^{\circ}$ ;  $\alpha = (6-8)^{\circ}$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$ ; радиус округления режущей кромки  $\rho = 15 \text{ мкм}$ ; размеры фаски –  $0,2 \times 45^{\circ}$ .

Исследования проводили при продольном точении на универсальном токарном станке 16К20 с тиристорным приводом, позволяющим поддерживать скорость резания на заданном уровне при изменении диаметра заготовки. При обработке стали 45 использовали следующие режимы резания  $v = 150-250 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,1 - 0,15 \text{ мм/об}$ ;  $t = 1,0-2,0 \text{ мм}$ . Для жаропрочного сплава ХН77ТЮР (Cr; 2,4-2,8 Ti; 1% Al,  $\sigma_b = 930-1080 \text{ МПа}$ ) использовали следующие режимы резания:  $v = 20-40 \text{ м/мин}$ ;  $S = 0,1 - 0,15 \text{ мм/об}$ ;  $t = 0,5-1,0 \text{ мм}$ . Критерием отказа инструмента, оснащённого твердосплавными пластинами (СМП) служила фаска износа задней поверхности  $h_3 = 0,5 \text{ мм}$ .

Использовали режущий инструмент с механическим креплением СМП с наноструктурированным, многослойно-композиционным покрытием (НМКП), со стандартным покрытием и без покрытия, который имел следующие значения параметров режущей части:  $\gamma = -(8-10)^{\circ}$ ;  $\alpha = (6-8)^{\circ}$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$ ; радиус округления режущей кромки  $\rho = 15 \text{ мкм}$ ; размеры фаски –  $0,2 \times 45^{\circ}$ .

**Выбор твердого сплава.** Исследования по определению оптимального состава связки для однокарбидных твёрдых сплавов проводились в ФГУП ВНИИКС. Было установлено [5,6], что легирование рением (Re) металлов группы железа способствуют повышению температуры разупрочнения твердых сплавов, увеличивает их твердость и износостойкость при повышенных температурах, а также снижает адгезию с обрабатываемым жаропрочным материалом. Рений помимо высокой температуры плавления и рекристаллизации обладает рядом уникальных свойств - высоким модулем упругости, прочностными и пластическими свойствами, близкими к кобальту. Очень важным является то, что рений сохраняет высокий уровень свойств при повышенных температурах. Рений отвечает также ряду требований, предъявляемых к легирующим добавкам: не образует устойчивых карбидов, взаимодействует с кобальтом с образованием непрерывного ряда твердых растворов.

Установлено, что введение рения в кобальтовую связку сплавов на основе WC повышает их сопротивление окислению при нагреве на воздухе до  $950^{\circ}\text{C}$ . Максимальное сопротивление окислению наблюдали у сплава ВРК15, жаростойкость которого была в 2 раза выше, чем у стандартного сплава WC-Co с эквивалентным содержанием связки.

В результате проведенных ВНИИТС исследований было определено соотношение Re:Co в связке твердого сплава, чтобы получить в итоге оптимальное сочетание требуемых свойств твердого сплава. Основные свойства твердого сплава ВРК-13 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства твердого сплава ВРК-13

Сплав	Легирующие добавки	H <sub>c</sub> , кА/м	$\sigma_{изг}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	HRA	Микроструктура	
					Общая пористость %	Кол-во зерен до 1 мкм, %
ВРК-13	Re	14,3	2000	91,5	0,04	83

Физико-механические свойства сплава ВРК-13 соответствуют необходимым требованиям к твердосплавным субстратам для нанесения покрытий при обработке жаропрочных сплавов.

**Износостойкое покрытие.** Для формирования функциональных покрытий на рабочих поверхностях СМП из твердых сплавов использовали процессы и технологию фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) покрытий [3, 4, 5]. Процессы ФКВДО являются наиболее приемлемыми для формирования покрытий различного функционального назначения, соответствующих новейшим концепциям градиентных, метастабильных, многокомпонентных, многослойных или суперрешетчатых покрытий. Среди перечисленных

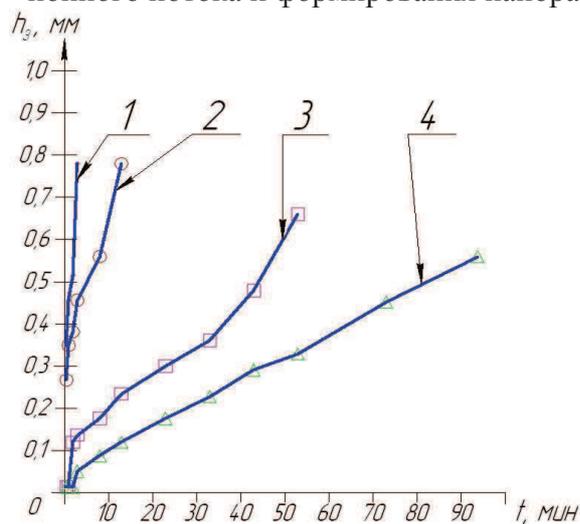
направлений совершенствования функциональных покрытий наиболее многообещающим является концепция многослойных покрытий с наноразмерными зёрнами и толщинами слоёв, так как такие покрытия удовлетворяют гамме зачастую противоречивых требований (низкое трение между инструментальным и обрабатываемым материалами, высокая износостойкость, барьерные функции диффузия, тепловые потоки в системе резания при соблюдении высокой прочности межслойной адгезии, снижение уровня внутренних напряжений, сбалансированность твердости и вязкости и т.д.). Кроме того, появляется возможность формирования комбинированных покрытий, включающих чередующиеся метастабильные и многокомпонентные структуры и сочетающих различные свойства отдельных слоёв в одном покрытии [7].

Исходя из концептуальной роли покрытия, как некоторой промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалом, было принято положение о формировании многослойно-композиционной архитектуры покрытия с максимальной сопротивляемостью хрупкому разрушению. Кроме того, использовали наноструктуры покрытий, которые имели оптимальное сочетание высокой твёрдости, теплостойкости и соответственно износостойкости с высокой прочностью и вязкостью при разрушении.

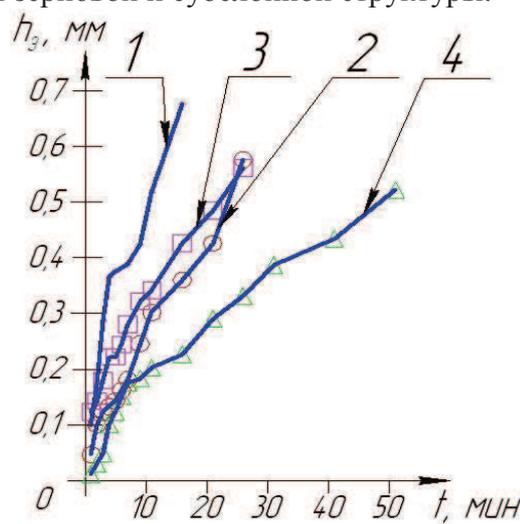
Для формирования покрытий использовали процесс фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) на плазменно-дуговой установке ВИТ-2, позволяющей реализовать указанный процесс.

Основными преимуществами процесса ФКВДО являются [2,8,9]:

- возможность получения качественных покрытий при температуре 300-800°C;
- отсутствие переходной (охрупчивающей) зоны ( $\epsilon$ -фаза) между покрытием и твёрдым сплавом;
- возможность получения широкой гаммы различных типов покрытий однослойных и многослойных покрытий;
- получение покрытий равномерных по толщине, что обуславливает возможность их нанесения на сложнопрофильные режущие инструменты;
- возможность залечивания поверхностных дефектов инструментального материала, а также способность отфильтровывания макро- и микрокапельной составляющих пароионного потока и формирования наноразмерной зерновой и субслойной структуры.



**Рисунок 1.** Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин от времени при точении стали 45 с  $t=1,0$  мм;  $S=0,3$  мм/об;  $v=150$  м/мин: 1-ВК10ХОМ; 2-ВПК-13; 3-ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN); 4-ВПК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN)



**Рисунок 2.** Зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин от времени при точении сплава ХН77ТЮР с  $t=1,0$  мм;  $S=0,15$  мм/об;  $v=50$  м/мин: 1-ВК10ХОМ; 2-ВПК-13; 3-ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN); 4-ВПК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN)

Проведенные исследования позволили установить марку твердого сплава оптимального состава, а также состав и архитектуру НМКП, которые были использованы при проведении аттестационных исследований режущих свойств инструмента. В качестве оптимальной марки кобальто-рениевого твердого сплава был выбран сплав ВРК-13, который имел более высокое значение прочности при изгибе по сравнению с более дорогим сплавом ВРК-15. В качестве покрытия использовали нанодисперсное многослойно-композиционное покрытие Ti-TiN-TiCrAlN, которое формировали на субстрате ВРК-13 при использовании процессов и технологии ФКВДО.

Таблица 2

**Результаты испытаний пластин ВК10ХОМ и ВРК-13 при продольном точении стали 45**

Время резания, мин	Величина износа задней поверхности пластины $h_3$ , мм			
	ВК10ХОМ	ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN)	ВРК-13	ВРК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN)
0,5	0,34	0,01	0,27	0,01
1	0,46	0,01	0,34	0,01
2	0,52	0,12	0,38	0,01
3	0,78	0,13	0,46	0,05
8	-	0,18	0,56	0,09
13	-	0,23	0,78	0,12
23	-	0,3	-	0,18
33	-	0,36	-	0,22
43	-	0,48	-	0,29
53	-	0,66	-	0,32
73	-	-	-	0,44
93	-	-	-	0,56

Таблица 3

**Результаты испытаний пластин ВК10ХОМ и ВРК-13 при продольном точении сплава ХН77ТЮР**

Время резания, мин	Величина износа задней поверхности пластины $h_3$ , мм			
	ВК10ХОМ	ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN)	ВРК-13	ВРК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN)
1	0,1	0,05	0,12	0,01
2	0,18	0,1	0,14	0,03
3	0,29	0,12	0,18	0,05
4	0,37	0,13	0,22	0,1
5	0,38	0,14	0,22	0,12
6	0,39	0,16	0,24	0,15
7	0,42	0,18	0,28	0,17
9	0,51	0,24	0,32	0,18
10	0,68	0,3	0,34	0,20
11	-	0,36	0,42	0,22
12	-	0,42	0,48	0,29
13	-	0,58	0,56	0,32
14	-	-	-	0,38
15	-	-	-	0,42
16	-	-	-	0,51

В таблице 2 и на рисунках 1 и 2 представлены результаты исследований режущих свойств контрольных пластин ВК10ХОМ, пластин ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN), а также контрольных пластин ВРК-13 и пластин ВРК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN) при продольном точении

стали 45 с  $t=1,0$  мм;  $S=0,3$  мм/об;  $v=150$  м/мин, при продольном точении сплава ХН77ТЮР с  $t=1,0$  мм;  $S=0,15$  мм/об;  $v=50$  м/мин.

На рисунке 1 приведена зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин от времени при точении стали 45 с  $t=1,0$  мм;  $S=0,3$  мм/об;  $v=150$  м/мин: 1-ВК10ХОМ; 2-ВРК-13; 3-ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN); 4-ВРК-13- Ti-(Ti-TiN-TiCrAlN).

На рисунке 2 приведена зависимость износа задней поверхности  $h_3$  твердосплавных пластин при точении сплава ХН77ТЮР с  $t=1,0$  мм;  $S=0,15$  мм/об;  $v=50$  м/мин: 1-ВК10ХОМ; 2-ВРК-13; 3-ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN); 4-ВРК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN).

### Выводы

Анализ данных рисунков 1 и 2 позволяют отметить следующее.

Лучшие результаты при точении стали 45 обеспечивали резцы, оснащённые СМП из ВРК-13 с наноструктурированным композиционно-многослойным покрытием Ti-TiN-TiCrAlN, которые существенно превосходили стойкость контрольных пластин ВРК-13 и ВК10ХОМ без покрытия, в 1,9 раза превосходили стойкость пластин ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN) во всем диапазоне исследованных условий обработки. При точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР резцы, оснащенные пластинами ВРК-13-(Ti-TiN-TiCrAlN), имели стойкость в 2,2 раза превышающую стойкость контрольных пластин ВК10ХОМ-(Ti-TiN-TiCrAlN) и более чем в 4 раза стойкость контрольных пластин ВК10ХОМ без покрытия.

Сильное изменение поверхностных свойств инструментального материала и возможность их варьирования в достаточно широких пределах путем использования покрытий различного состава, строения и структуры позволяют управлять важнейшими функциональными параметрами процесса резания. К таким параметрам можно отнести характеристики стружкообразования, контактных и тепловых процессов, изнашивания контактных площадок инструмента. Наконец, направленное изменение основных показателей процесса резания позволяет в значительной степени влиять и на такие важные параметры, как стойкость инструмента, производительность, точностные и качественные показатели изготовленных деталей.

Внедрение в различных отраслях промышленности инструмента повышенного качества позволяет снизить затраты по его эксплуатации и уменьшить себестоимость производства единицы конечной продукции за счет повышения производительности труда.

### Литература

1. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивание и разрушение инструмента. – М.:Машиностроение, 1992. – 240 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием. – М.; Машиностроение, 1993. – 368 с.
3. Верещака А.С. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий. / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. М. 2005, № 9, с. 9-19.
4. Максимов Ю.В. Высокоэффективные слоистые инструментальные материалы с нанодисперсными многослойными покрытиями широкой области применения. / Максимов Ю.В., Верещака А.С., Верещака А.А., Бубликов Ю.И., Крючков К.В., Козлов А.А. // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 2(14), 2012, т. 2, с. 222-229.
5. Верещака А.С., Анисеев А.И., Дачева А.В. Повышение эффективности резания труднообрабатываемых материалов с применением инструмента с наноструктурированным износостойким покрытием. // Технология машиностроения. –2010. –№ 3 (93). - С. 17-22.
6. Иютин И.А., Куприна В.В., Соколовская Е.М., Спасов И.А. Исследование и применение сплавов резания. / Сборник, М., 1975.
7. Максимов Ю. В. Нанодисперсные многослойно-композиционные покрытия для режущих

инструментов. / Ю. В. Максимов, Ю. И. Бубликов, А. А. Верещака, А. С. Верещака, О. Ю. Хаустова, А. А. Козлов, О. Х. Хожаев // Известия МГТУ «МАМИ». – М., МГТУ «МАМИ», № 2(14), 2012, т. 2, с. 222-229.

8. Верещака А.С. Исследование характеристик качества поверхностного слоя при использовании экологически дружелюбной технологии сухой обработки // А.С. Верещака, О.Ю. Хаустова, Л.Г. Дюбнер. / «Современные технологии в машиностроении» Том 2. Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – с. 306-319.
9. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating. Key Engineering Materials 2012. Vol.496 pp.67 – 74.

### **Определение свойств листового демпфирующего материала с упруговязким соединительным слоем при сдвиговой деформации**

к.т.н. доц. Типалин С.А., к.т.н. проф. Шпунькин Н.Ф., Сапрыкин Б.Ю.  
Университет машиностроения  
495 223-05-23, доб. 1393

*Аннотация.* Для измерения свойств многослойного материала с упруго-вязким соединительным слоем при проведении опытов на сдвиг, предложена схема испытаний с равномерной деформацией. Приведены экспериментальные результаты, показывающие особенности больших сдвиговых деформаций упруго-вязкого слоя и упругого слоя в образцах.

*Ключевые слова:* многослойный материал, сдвиг слоев, деформация, сила сдвига, кручение, оснастка

Современный уровень развития технологии производства автомобилей во многом сдерживается свойствами материала, применяемого для изготовления и сборки изделий. В связи с этим все большее распространение получают композиционные материалы, сочетающие в себе преимущества каждого компонента, образующего составную заготовку [1-5].

Перспективными композиционными материалами являются так называемые «сэндвич-панели», состоящие из металлических листов с полимерной связующей прослойкой. Такой материал способен нести такую же нагрузку, как и обычный листовой металл, и в то же время гасить вибрации в полимерной составляющей панели и уменьшать звуковые колебания от работающих агрегатов. Использование данного материала не утяжеляет общий вес конструкции, не ухудшает ее прочностные и жесткостные характеристики. Трудозатраты и время на сборку снижаются, поскольку не возникает необходимости в дополнительном покрытии листового металла шумопоглощающим слоем для снижения уровня шума и в установке защиты от вибрации.

Использование такого материала в первую очередь будет направлено на изготовление деталей, защищающих от шума и вибрации, таких как картеры, кожухи, перегородки, капот автомобиля и др.

Деформирование таких материалов имеет существенное отличие от однослойных, так как граничные условия, возникающие при штамповке деталей, могут приводить к сдвигу одного металлического слоя относительно другого [4-6]. Для выявления особенностей деформирования проведены испытания на сдвиг полимерной связующей прослойки. Использовались образцы с поперечными пропилами по ширине металлических листов с разных сторон. Схема деформирования представлена на рисунке 1. В результате экспериментов получены данные изменения силы сдвига от перемещения траверсы испытательной машины. Пересчет относительной силы сдвига  $\tau$  и угловой деформации  $\gamma$  производился по формулам: