

Обоснование выбора инструментального материала из твердого сплава рационального состава и структуры для обработки труднообрабатываемых материалов

А.С. Твердохлебов, Д.Н. Русаков, М.И. Владимиров

*Университет машиностроения, г. Москва, Россия*

*Аннотация.* В статье рассмотрены вопросы выбора рационального состава, структуры и свойств твердого сплава с более высоким уровнем физико-механических и режущих свойств. В частности, рассмотрены свойства твердого сплава со связкой повышенной теплостойкости для обработки резанием труднообрабатываемых материалов на основе жаропрочных сплавов на основе сплавов никеля, хрома, титана и др. В процессе изучения была выявлена актуальность создания принципиально новых композиционных инструментальных материалов на основе твёрдых сплавов с функциональными покрытиями, у которых оптимально сочетаются поверхностные (твердость, теплостойкость, износостойкость и т.д.) и «объемные» (вязкость, прочность при изгибе, сжатии и т.д.) свойства.

*Ключевые слова:* твердый сплав рационального состава, твердосплавной субстрат повышенной теплостойкости, труднообрабатываемые материалы, композиционные материалы, теплостойкость, износостойкость.

### Введение

На сегодняшний день все чаще используют конструкционные материалы, обладающие повышенными технологическими свойствами, такими как жаропрочность, коррозионная стойкость и т.д. это является особенностью современного производства в технологически развитых странах. Составы подобных инструментальных материалов различны, так как для некоторых из них ключевым свойством будет жаропрочность, в других - коррозионная стойкость.

Главными факторами при формировании свойств изготавливаемого изделия являются условия механической обработки резанием при варьировании параметров резания и инструмента, изготовленного из инструментальных материалов с повышенными функциональными свойствами. Анализ физико-химических, технологических и экономических аспектов наиболее широко применяемых для окончательного формирования свойств и параметров изготавливаемых изделий методов лезвийной обработки резанием, позволяет отметить, что наиболее слабым звеном таких методов является режущий инструмент. Таким образом, совершенствование свойств инструментальных материалов и, прежде всего свойств наиболее широко применяемых для обработки резанием твердых сплавов, является чрезвычайно важной научной задачей направленной на повышения эффективности технологических операций обработки резанием.

Одним из значимых решений задачи повышения работоспособности твердосплавного инструмента при обработке резанием жаропрочных сплавов

является использование высокопрочных и жаростойких связок, содержащих, тугоплавкие металлы, не образующие устойчивых карбидов. [1]

За последние десятилетия ведущими производителями твердосплавного инструмента разработано несколько новых марок твердых сплавов для резания труднообрабатываемых материалов с кобальт-рениевыми жаропрочными связками (ВРК-15, ВРК-13 и др), однако проблема относительно низкой эффективности твердосплавного инструмента остаётся весьма острой. В этой связи чрезвычайно актуальным является повышение эффективности инструмента при резании труднообрабатываемых материалов путем создания твердого сплава с более высоким уровнем физико-механических и режущих свойств. [2]

#### Задачи и методика исследования

В настоящее время все большее применение получают конструкционные материалы, обладающие повышенными технологическими свойствами, такими как жаропрочность, коррозионная стойкость и т.д. Указанное является особенностью современного производства в технологически развитых странах.

С учетом особенностей механизма отказа инструмента при резании труднообрабатываемых материалов, повышение режущих свойств инструмента следует базировать на разработке инновационных инструментальных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. Наиболее эффективно указанная проблема может быть решена путем разработки композиционного твердого сплава с ультрадисперсной структурой, а также связкой повышенной жаропрочности [3,4].

В качестве одного из основных легирующих элементов, определяющий уровень жаростойкости сталей и сплавов, является хром. Легирование конструкционного материала хромом способствует при резании образованию защитной пленки, состоящей из  $Cr_2O_3$  или более сложного состава, что и обеспечивает и коррозионную стойкость сталей и сплавов. Улучшение характеристик хромистой основы достигается путем легирования материала 2,5 – 3,5 % Al, что позволяет повысить жаростойкость за счет образования в окалине защитных фаз  $Al_2O_3$  и  $FeO \cdot (Al, Cr)_3O_3$ .

Так же следует отметить материалы на основе титана и его сплавов, которые имеют низкую обрабатываемость резанием, хорошо свариваются, обрабатываются давлением в холодном и горячем состоянии, термически упрочняются, а твердость титановых сплавов находится в широком диапазоне (НВ 1800 - 4000) [5].

Главным преимуществом титана и титановых сплавов относительно конструкционных сталей является высокая удельная прочность, практическое отсутствие хладноломкости и жаропрочность в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью, которая обеспечивается за счет мгновенного формирования на его поверхности плотной термодинамически устойчивой оксидной пленки  $TiO_2$  обычно именуемой «рутил» [6].

Несмотря на высокую температуру плавления, чистый технический титан не обладает жаропрочностью, поэтому обычно используют сплавы на его осно-

ве, обладающие более высокими характеристиками прочности и жаростойкости, при этом сохраняя свою пластичность и коррозионную стойкость.

В табл. 1 показаны механические свойства титановых сплавов [7]. Наибольшее применение нашли сплавы на основе титана, легированного алюминием, оловом, марганцем, хромом и ванадием.

Таблица 1

Механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	КСУ, кДж/м <sup>2</sup>	Вид полуфабриката
BT5	750...950	10	500	Отливки, профили, поковки
BT5-1	800...1 000	10	400	Литы, профили, трубы
BT4	700...900	11	400	Листы, полосы, ленты
BT6	950...1700	8	400	Поковки, листы, трубы
BT8	1 050...1250	11	300	Поковки

Сплавы на основе кобальта и никеля характеризуются высокой жаропрочностью, они не теряют своих свойств при нагревании до 800 – 850 °С. Высокую жаропрочность этих сплавов обеспечивают легирующие карбидообразующие тугоплавкие элементы (молибден, вольфрам, ниобий, тантал и др.), которые сдерживают рост размеров зерна при нагреве.

Основываясь на проведенном анализе можно сделать вывод, что труднообрабатываемые материалы существенно различаются по свойствам и назначению (высокопрочные и сверхпрочные, коррозионно-стойкие, жаропрочные, жаростойкие тугоплавкие и др.), строению и основному элементу, входящему в его состав (титановые, никелевые, кобальтовые, алюминиевые, вольфрамовые и др.). Из всего этого многообразия наиболее широко применяются жаропрочные коррозионностойкие сплавы на основе кобальта, никеля, железа и титана.

#### Особенности обработки резанием труднообрабатываемых материалов

При резании труднообрабатываемых материалов основным недостатком является высокая температура в зоне резания, что приводит к разупрочнению твердых сплавов, снижению стойкости режущего инструмента и как следствие уменьшению скорости резания и производительности обработки. Для большинства труднообрабатываемых сталей и сплавов скорость резания снижается в 2 — 20 раз по сравнению со скоростью резания для обычных конструкционных сталей. Так, например, если принять скорость резания для стали 45 за 100%, то для нержавеющей стали 12Х18Н9Т она составит 50%, для жаропрочной стали 4Х12Н8Г8МФБ — 30%, для марганцевой стали Г13Л — 10%, а для некоторых жаропрочных сплавов — менее 1%.

Следует отметить, что в первую очередь обрабатываемость резанием труднообрабатываемых сталей и сплавов зависит от химического состава, который после полной термообработки определяет такие эксплуатационные характеристики изделий из этих материалов как: механическая прочность, жаропрочность, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д.

Высокая химическая активность большинства труднообрабатываемых материалов при температурах, возникающих при резании, приводит к протеканию активных физико-химических процессов на контактных площадках инструмента (граничная адгезия, диффузионные реакции между инструментальным и обрабатываемым материалами) и является главной причиной интенсификации таких видов изнашивания режущего инструмента, как адгезионно-усталостный, химико-окислительный и диффузионный. Склонность труднообрабатываемых материалов к механическому упрочнению в процессе пластического деформирования при резании (наклепу) приводит к росту интенсивности абразивного изнашивания. Помимо этого, увеличивается тепловыделение за счет трения, что в совокупности со склонностью к адгезии инструментального и обрабатываемого материала приводит к изнашиванию контактной площадки задней поверхности режущего инструмента.

Таким образом, при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов возникает задача разработки инструментального материала улучшенного состава с учетом приведенных особенностей процесса резания труднообрабатываемых материалов. Одним из важнейших показателей инструментального материала в данном случае является повышенная теплостойкость, которая может быть достигнута за счет применения твердого сплава рационального состава, включающего твердосплавной субстрат повышенной теплостойкости.

#### Особенности вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов

В соответствии с международным стандартом DIN ISO 513-2014 «*Материалы твердые режущие для снятия стружки с определенными режущими кромками. Классификация и применение. Обозначение основных групп по снятию стружки и групп по применению*» для обработки резанием труднообрабатываемых материалов (жаропрочные сплавы на основе титана и никеля, нержавеющие и жаропрочные стали) рекомендуется использовать вольфрамокобальтовые твердые сплавы группы ВК (WC-Co) с добавками (TaC и др.).

Сплавы групп ВК и ТТК с высоким содержанием кобальта ВК10, ВК15, ТТ10К8Б и др. являются наиболее вязкими и прочными, а сплавы с пониженным содержанием кобальта ВК2 и ВК3 напротив обладают высокой износостойкостью и твердостью при малой вязкости.

Для сплавов этих групп также характерна сильная зависимость свойств от состава и размеров зерен, особенно WC-фазы. В частности, с увеличением размера зерен WC-фазы твердость, модуль упругости, сопротивляемость абразивному изнашиванию снижаются, а предел прочности при изгибе увеличивается (табл. 2). Эта особенность широко используется при разработке сплавов с определенными свойствами для заданных условий обработки.

Технология изготовления сплавов с уменьшенным размером зерен предусматривает небольшие добавки карбидов тантала (TaC), роль которых состоит в сдерживании роста размеров зерен WC при высокотемпературном спекании сплава.

Состав, свойства (по ГОСТ 3882-74) и области применения (по ISO 513:2012)  
твердых сплавов группы ВК

Марка сплава	Состав, %			$\sigma_{и}$ , МПа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	HRA, не менее	Области применения по ISO
	WC	Другие со-единения	Co				
ВК3	97	-	3	1176	15,0-15,3	89,5	K01
ВК3-М	97	-	3	1186	15,0-15,3	91,0	K01-K05
ВК4	96	-	4	1519	15,9-16,0	89,5	K10- K20,
ВК6-ОМ	92	2% TaC	6	1274	14,7-15,0	90,5	M10
ВК6-М	94	-	6	1421	14,8-15,1	90,0	K05, M10
ВК6	94	-	6	1519	14,6-15,0	88,5	K10-K20
ВК8	92	-	8	1666	14,4-14,8	87,5	K20
ВК10-ХОМ	88	2% TaC	10	1600	14,3-14,6	89	K30-K40, M30 M40

Твердые сплавы из ультра- и особомелкозернистой структуры считаются наиболее пригодными для изготовления мелкогабаритного цельнотвердосплавного инструмента (сверла, концевые фрезы, резьбонарезной инструмент и т.д.). При этом конечно нужно учитывать содержание связки в твердом сплаве.

Традиционные методы упрочнения инструментов, основанные на легировании инструментальных материалов, считаются ограниченными из-за дефицитности ряда элементов. В связи с этим актуальным считается создание принципиально новых инструментальных материалов, так называемых композиционных, у которых оптимально сочетаются поверхностные (твердость, теплоустойчивость, износостойкость и т.д.) и «объемные» (вязкость, прочность при изгибе, сжатии и т.д.) свойства. Таким образом, полученный инструменту будет отвечать самым высоким требованиям, предъявляемым к качеству, надежности и производительности.

#### Требования к разработке инструментального материала

Для того чтобы режущий клин инструмента, не деформируясь, мог срезать слой обрабатываемого материала, твердость инструментального материала  $HV_{им}$  должна быть выше твердости обрабатываемого материала  $HV_{ом}$ . Однако увеличение твердости  $HV_{им}$ , приводит к увеличению хрупкости, снижению трещиностойкости и вязкости разрушения, поэтому в зависимости от условий обработки, следует соблюдать отношение  $HV_{им}/HV_{ом}$ .

Если рассмотреть требования к инструментальному материалу с позиций предельной сопротивляемости, то следует обратить внимание на то, что твердость инструментального материала  $HV_{им}$  при относительно низких температурах превосходит твердость формируемой при резании стружки, благодаря чему инструмент не подвергается пластическому разрушению при любых скоростях резания. Но, к сожалению, такую твердость при высоких температурах не имеет ни один материал, за исключением алмаза и кубического нитрида бора. Однако

алмаз при высоких температурах ( $T \geq 1000$  °С) интенсивно растворяется в никеле, следовательно, по показателям "диффузионная стойкость", "хрупкая прочность" непригоден для обработки сталей и высокопрочных сплавов. Также непригоден и кубический нитрид бора, обладающий высокой твердостью, но относительно низкими прочностными характеристиками, особенно при больших сечениях среза и ударных нагрузках.

Помимо увеличения твердости инструментального материала, необходимо так же повышать прочность и теплостойкость связки. Добиться данного результата можно за счет легирования стандартной связки тугоплавкими металлами. Основными легирующими элементами выступают карбиды хрома, ванадия, ниобия, тантала, титана. А поскольку размер зерна карбида вольфрама играет в этом большую роль, то легирование должно рассматриваться, как средство, препятствующее росту зерна карбида вольфрама в процессе спекания, т.е. как замедлитель роста зерна.

Интенсивность роста зерна зависит от способа введения замедлителей в сплав. Одним из способов является ввод легирующих добавок в смесь при размоле. В данном случае, равномерное распределение замедлителей роста будет обеспечено лишь при достаточно длительном размоле субмикронных порошков легирующих элементов. Имеются сведения о благоприятном влиянии введения легирующих добавок на стадии восстановления оксидов или при изготовлении смеси для карбидизации основного карбида. При таком способе введения наблюдается более равномерное распределение ингибиторов, поскольку материал будет перемешиваться на последующих технологических операциях, а также ингибиторы, разделяя частицы, будут препятствовать росту зерна за счет собирательной кристаллизации и при осаждении через газовую фазу.

В качестве замедлителей роста зерна для субмикронных и ультрадисперсных твердых сплавов применяют в основном карбиды ванадия, хрома и тантала.

В качестве легирующего элемента, наиболее подходящего по требованиям, следует использовать редкоземельный металл рений (Re). В табл. 3 показаны основные свойства данного элемента в сравнении с другими элементами, применяемыми для легирования твердого сплава.

Таблица 3

Некоторые металлы, применяемые в твердых сплавах в качестве легирующей добавки

Металл	Группа	Порядковый номер	Атомный вес	$T_{пл},$ °С
V	V	23	50,95	1720
Cr	VI	24	51,99	1890
Mo	VI	42	95,94	2622±10
Re	VII	75	186,207	3180±20

Рений обладает рядом уникальных свойств:

- высокая температура плавления и рекристаллизации;

- высокий модуль упругости;
- прочностные и пластические свойства, близкие к кобальту;
- не образует устойчивых карбидов;
- взаимодействует с кобальтом с образованием непрерывного ряда твердых растворов.

Особенно важно, что рений сохраняет высокий уровень свойств при повышенных температурах, что способствует повышению температуры рекристаллизации связки. Также рений обладает очень хорошими технологическими свойствами. При производстве твердых сплавов большое значение имеет его способность непосредственно не реагировать с азотом и водородом [8].

Благодаря легированию связующей фазы рением происходит увеличение ее прочности, сопротивляемости высокотемпературной ползучести, а также легирование предотвращает формирование хрупкой  $\eta$ -фазы. В результате появление жидкой фазы твердого раствора Co - Re происходит при температуре выше на 100 - 300°C, а твердость сплава с Co-Re-связкой возрастает на 200 - 300 HV выше, чем у твердого раствора Co - W - C. Рений выступает в роли замедлителя роста зерен, а также увеличивает смачиваемость зерен WC, благодаря чему рост прочности адгезионной связи между WC и Co возрастает. Сплавы с (Co - Re) - связкой хорошо сопротивляются термической усталости и механическим ударам.

Таким образом, для обработки труднообрабатываемых материалов следует использовать твердые сплавы группы ВРК с Co - Re - связкой. Но для этого необходимо правильно подобрать содержание легирующего элемента рения в кобальтовой связке твердого сплава с целью увеличения теплостойкости режущего инструмента.

#### Выводы

На основе краткого анализа можно отметить, что одним из перспективных направлений в разработке твердых сплавов для обработки труднообрабатываемых материалов является комплексное использование твердого сплава рационального состава с высокопрочной связкой повышенной теплостойкости, содержащей, кроме кобальта, тугоплавкие металлы, не взаимодействующие с углеродом с образованием устойчивых карбидов.

#### Библиографический список

1. Твердохлебов А.С. Повышение эффективности твердосплавного инструмента для резания труднообрабатываемых материалов / Верещака А.С., Максимов Ю.В. // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», №2 (20), 2014, т. 1, с. 94-99.
2. Верещака А.С. Разработка и исследование твёрдых сплавов с Co-Re связкой повышенной жаропрочности и наноструктурированным многослойно-композиционным покрытием для резания труднообрабатываемых никелевых сплавов / Дачева А.В., Анисеев А.И. // 65-ая Международная научно-техническая конференция Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и

подготовки инженерных и научных кадров" Международного научного симпозиума «Автотракторостроение – 2009». Книга 7, Москва, МГТУ «МАМИ», 2009 г., 248-257 с.

3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойким покрытием – М.; Машиностроение, 1993. с.368.
4. Верещака А.С. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущих инструментов. В кн. «Современные технологии в машиностроении, - Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210-231.
5. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: Учеб. для технических вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. - 448 с.
6. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, В.А. Горелов, Д.А. Негров, О.Ю. Бургонова Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. - 520 с.
7. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др.— М.: Издательский центр «Академия», 2009. 448 с.
8. Barnett, S. A. Physics of Thin Films / S.A. Barnett, M. H. Francombe, J. L. Vossen (ets.) //Academic Press, New York (1993) 1-77.