Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Машинобудівний факультет
Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Пупань Л.І.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Формування структури та властивостей сучасних інструментальних матеріалів»

Харків

Модуль №1/0,5. Инструментальные материалы и прогресс механической обработки

ТЕМА №1. ХРОНОЛОГИЯ СТАНОВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ

ЛЕКЦИЯ №1

1. **Роль режущего инструмента в повышении эффективности производства**
2. **Роль инструментальных материалов в современном инструменте как системе**
3. **Основные требования к свойствам инструментальных материалов**

1.Интенсификация производства, внедрение новых прогрессивных технологических процессов, современного высокопроизводительного оборудования (станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, автоматических линий), создание новых труднообрабатываемых материалов приводит к ужесточению условий эксплуатации режущего инструмента и возрастанию требований, предъявляемых к его качеству.

Режущий инструмент во многом определяет эффективность использования как универсального, так и автоматизированного станочного оборудования.

Развитие технологий машиностроения в значительной степени зависит от технического уровня инструментального производства. Срок службы инструмента, число промежуточных перезаточек существенно влияют на стоимость готовых деталей.

Повышение работоспособности инструмента за счет роста периода стойкости и надежности является одним из главных резервов повышения эффективности производства.

К числу важнейших факторов, определяющих работоспособность режущего инструмента, относят свойства инструментального материала.

2. *Современный инструмент принято рассматривать как систему, на функционирование которой влияют геометрия инструмента, материал рабочей части* (покрытие в инструменте с покрытием).

Эти элементы дополняют друг друга, неправильный выбор одного из них может значительно ухудшить общие результаты. Тем не менее, ***основополагающим в системе является материал рабочей части – его структура и свойства.***

Требования к сокращению цикла обработки, улучшению качества получаемой поверхности, увеличения ресурса работы повышают требования к инструментальным материалам.

В общих чертах любой инструмент при достаточной твердости и способности сохранять твердость при нагреве, при необходимой износостойкости должен обладать достаточной прочностью на изгиб, сжатие и срез.

Эксплуатационные свойства инструментальных материалов влияют на надежность инструментов, что особенно важно для автоматических линий. Эти свойства, так же как и механические, определяются структурой материалов, зависят от химического состава, способа производства, типа технологии изготовления инструмента и термической обработки.

3. Борьба за производительность, качество продукции, заставляет металлургов и инженеров создавать все более совершенные инструментальные материалы, которые должны отвечать основным физико-механическим свойствам, определяющим режущую способность инструмента.

Создание новых инструментальных материалов – одно из важнейших направлений развития технологии обработки материалов резанием. Каждый новый класс инструментальных материалов знаменует новую веху в механической обработке, производит революционные изменения, состоящие в преодолении очередного скоростного и теплового барьера, возможности обработки новых видов материалов, повышения эффективности обработки.

Эффективность работы режущего инструмента во многом определяется свойствами инструментального материала.

При резании на контактных поверхностях режущего инструмента возникают существенные давления (тысячи атмосфер) и одновременно выделяется значительное количество тепла (температура резания составляет сотни, а иногда и тысячи градусов). Также в процессе обработки происходит скольжение и трение обрабатываемого материала по контактным поверхностям режущего инструмента. Поэтому материал режущего инструмента должен обладать свойствами, «создающими» ему необходимую работоспособность. Качество инструментального материала оценивается физико-механическими

и эксплуатационными свойствами, зависящими от структурного состояния и химического состава.

Исходя из условий эксплуатации (высокие напряжения и температуры), для обеспечения качественной и высокопроизводительной обработки ***инструментальные материалы должны отвечать следующим требованиям:***

1)иметь высокие механические характеристики (твердость, прочность, ударную вязкость, трещиностойкость);

2) иметь высокую износостойкость (способность инструментального материала сопротивляться истирающему действию обрабатываемого материала);

3) быть химически инертными к обрабатываемому материалу;

4) иметь высокую теплостойкость (способность материала сохранять твердость при нагреве) ***и достаточную теплопроводность***;

5) иметь определенный коэффициент трения (зависит от химического состава инструментального и обрабатываемого материала);

6) быть достаточно технологичным и относительно дешевым.

Инструментальный материал должен обладать ***технологическими свойствами***, обеспечивающими оптимальные условия изготовления из него инструментов.

Например, для инструментальных сталей подобными свойствами являются высокая обрабатываемость резанием и давлением; благоприятные особенности термической обработки (малая чувствительность к перегреву и обезуглероживанию, высокие закаливаемость и прокаливаемость, минимальные деформирование и образование трещин при закалке и т.д.); хорошая шлифуемость после термической обработки.

ЛЕКЦИЯ №2

1. **Классификация инструментальных материалов**
2. **Этапы становления современных инструментальных материалов в связи с ростом эффективности механической обработки**

1. Инструментальные материалы достаточно разнообразны по своему назначению.

В частности, по назначению различают материалы для режущих инструментов, материалы для измерительных инструментов, материалы для инструментов холодной и горячей обработки давлением.

Каждая из указанных групп инструментальных материалов обладает

спецификой структуры и превалирующих свойств, подвергается определенным видам (и режимам) термической обработки, имеет особенности технологических свойств для изготовления инструмента.

Основными группами инструментальных материалов для режущих инструментов являются следующие.

▲ ***Инструментальные стали.*** В качестве инструментальных применяют и углеродистые, и легированные стали; отдельную группу легированных сталей составляют быстрорежущие стали, которые наиболее распространены. По твердости в холодном состоянии все эти стали мало отличаются друг от друга, основное их отличие – в теплостойкости.

▲ ***Твердые сплавы*** положили начало новому этапу в механообработке, связанному с преодолением очередного скоростного и теплового барьера.

Области применения твердых сплавов: черновая, получистовая и чистовая обработка конструкционных малолегированных и легированных сталей, чугунов, некоторых цветных сплавов.

▲ ***Минералокерамика (режущая керамика)*** – перспективный класс материалов, основними областями применения которых являются чистовая и получистовая обработка материалов повышенной твердости и прочности на высоких скоростях резания без ударов (обточка и расточка заготовок из высокопрочных чугунов, труднообрабатываемых сталей, некоторых цветных металлов и сплавов).

▲ ***Абразивные материалы*** – САМ. РАБ. №1.

▲***Синтетические сверхтвердые материалы на основе алмаза и нитрида бора*** по своей твердости превышают обрабатываемый материал в 2…5 раз, в значительной мере соответствуют требованиям, предъявляемым к режущим инструментам современными отраслями промышленности.

▲Перспективным направлением в создании высокоэффективных инструментов для металлообработки является применение ***инструментов с износостойкими покрытиями***.

В качестве материала износостойких покрытий используются нитридные, карбидные, карбонитридные, оксидные, боридные соединения тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы элементов.

Применение износостойких покрытий обеспечивает экономию дефицитных и дорогостоящих металлов, используемых при объемном сложном легировании для повышения режущих свойств инструмента; создает возможность создания новых материалов – композиций – с высокой конструкционной прочностью (высокой долговечностью и надежностью); повышает

эксплуатационную стойкость инструментов; обеспечивает особые свойства поверхности - жаростойкость, теплопроводность, заданный коэффициент трения и т.д.

Основные группы инструментальных материалов для режущих инструментов и некоторые их характеристики представлены на рис.1, в табл.1.

Наиболее распространенная из различных групп инструментальных материалов – быстрорежущая сталь, из которой изготавливается около 60% инструмента, из металлокерамических твердых сплавов – около 30%, из остальных групп материалов – около 10 % лезвийного инструмента.

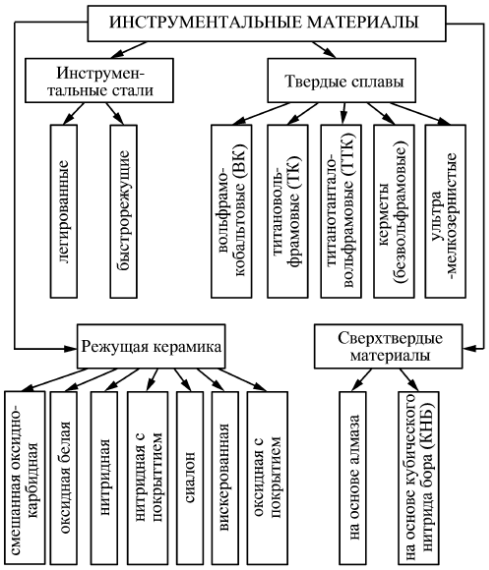


Рисунок 1 – Основные группы инструментальных материалов

Таблица 1 – Характеристики инструментальных материалов

Инструментальный материал	Структура	Теплостойкость, ^{O}C	Скорость резания V, м/мин
Углеродистые и легированные стали	Твердый раствор + карбиды (15%)	200 – 250	10…25
Быстрорежущие стали	Твердый раствор + карбиды (30%)	600 - 650	40…80
Твердые сплавы	Карбиды (более 90%) + твердый раствор	900 - 1000	до 800
Режущая керамика и СТМ	Оксиды, карбиды, нитриды, алмаз	1100 – 1200	до 900

2. Хронология становления и развития инструментальных материалов связана с различными периодами развития обработки материалов резанием, обусловленными необходимостью повышения эффективности обработки,

улучшением качества и повышением точности, обработкой растущего круга новых конструкционных материалов с разнообразными свойствами для различных отраслей промышленности.

Можно выделить следующие периоды, табл.2:

Таблица 2 – Хронология становления инструментальных материалов

№ периода	Название и характеристика периода	Время и место создания инструментального материала	Основные свойства
I	Бронза, ручные технологии	Энеолит, трипольская культура	Низкие твердость и износостойкость
II	Первые черные неупрочненные металлы (сталь, чугун), ручные технологии	Начало I тыс. до н.э.	Средние твердость и прочность, низкая износостойкость
III	Углеродистые термоупрочненные стали, ручные и первые машинные технологии	Середина XVIII ст. – промышленно развитые страны Европы, Россия	Твердость до 62 HRC , теплостойкость 200 °С, прочность на изгиб до 3000 МПА
IV	Легированные стали, машинные технологии	Середина XIX ст., государства Европы, США, Россия	Твердость до 64 HRC , теплостойкость 220 °С, прочность на изгиб до 3200 МПА
V	Быстрорежущие стали	Начало XX ст., США	Твердость до 64 HRC , теплостойкость до 620 °С, прочность на изгиб до 3200 МПА
VI	Металлокерамические твердые сплавы	1927-1928 гг., Германия, 1929 г. - СССР	Твердость до 91 HRC , теплостойкость до 1100 °С, прочность на изгиб до 1800 МПА
VII	Синтетические алмазы	1952 г. – Швеция, 1953 г. – США, 1960-1961 гг. – СССР, Украина	Твердость 10 по Моосу , теплостойкость 800 °С
VIII	Сверхтвердые материалы – поликристаллы, композиты	1965-2000 гг. – США, государства Европы, Россия, Украина, Беларусь	Твердость 8…10 по Моосу , теплостойкость 800…1300 °С

ТЕМА №2. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЛЕКЦИЯ №3

1. **Инструментальный материал как интегральное понятие**
2. **Основные направления развития инструментальных материалов**

3. Методы оптимизации структуры и повышения физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств инструментальных материалов путем оптимального подбора соотношения компонентов, легирования и термической обработки

1. Условием производства качественного и долговечного инструмента является выбор инструментального материала, соответствующего назначению и нагрузкам, возникающим при его работе. При этом следует учитывать структурные, металлургические, эксплуатационные и технологические факторы, определяющие поведение материала в процессе эксплуатации.

Материал изделия целесообразно рассматривать как ***интегральное понятие***, объединяющее в себе вещество, технологию его получения, конструкцию, технологию изготовления и обработки.

Мировая практика свидетельствует о том, что для получения гарантированных необходимых эксплуатационных свойств инструмента целесообразно создавать специализированные предприятия, осуществляющие проведение в полностью автоматизированном режиме всех видов объемной и поверхностной термической и химико-термической обработки (вакуумный отжиг, упрочнение и отпуск в вакууме и в атмосфере защитных газов, насыщение поверхности углеродом, азотом, углеродом и азотом), а также упрочнение поверхности с использованием высококонцентрированных источников энергии (лазерных и плазменных технологий).

Это обеспечит высокое качество на каждом этапе технологического процесса, что позволит практически отказаться от контроля готовых изделий, обеспечит более полную загрузку оборудования и, следовательно, снижение стоимости обработки материалов.

2. Современный инструмент является инновационной, наукоемкой продукцией. Весьма важной составляющей его частью как системы, см. Л. №1, является инструментальный материал, который прошел достаточно длинный исторический этап развития от камня до сверхтвердых материалов, искусственного алмаза и нитрида бора, наноструктурных материалов.

Несмотря на широкое применение «классических» инструментальных материалов (Л. №2), продолжается их совершенствование, поиск новых материалов с новым уровнем свойств.

Расположение основных групп инструментальных материалов по их свойствам приведено на рис.2.

Из рис.2 видно, что некоторые из предъявляемых требований, в частности, твердость и прочность – это свойства-антагонисты, т.е. чем выше твердость материала, тем ниже его прочность. Поэтому набор основных свойств и определяет область и условие рационального использования инструментального материала в режущем инструменте.

Ни один из типов инструментальных материалов не является универсальным и занимает свою нишу в соответствии с показателями вязкости, прочности, износостойкости и твердости.

Например, инструмент из сверхтвердых инструментальных материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора (СТМ) или из режущей керамики (РК), используют исключительно для чистовой обработки изделий на высоких и сверхвысоких скоростях резания, но при весьма ограниченных сечениях среза.

При обработке конструкционных сталей на малых и средних скоростях резания в сочетании со средними и большими сечениями среза большие преимущества получают инструменты из быстрорежущей стали.

Анализ основных направлений совершенствования инструментальных материалов, см. рис.2, позволяет отметить, что они связаны с ростом твердости, теплостойкости, износостойкости при снижении прочностных характеристик, вязкости и трещиностойкости. Эти тенденции не соответствуют идее создания идеального инструментального материала с оптимальным сочетанием свойств по твердости, теплостойкости, ударной вязкости, трещиностойкости, прочности.

Очевидно, что *решение этой проблемы должно быть связано с разработкой* ***композиционного инструментального материала****, у которого высокие значения поверхностной твердости, теплостойкости, физико-химической инертности сочетались бы с достаточными значениями объемной прочности при изгибе, ударной вязкости, предела выносливости.*

Формирование оптимальных свойств инструментальных материалов с заданными свойствами может осуществляться как на стадии получения самого инструментального материала благодаря применению различных материаловедческих технологий, так и в результате последующей его обработки с применением современных технологий – лазерных, плазменных, технологий модификации поверхности, осаждения покрытий.

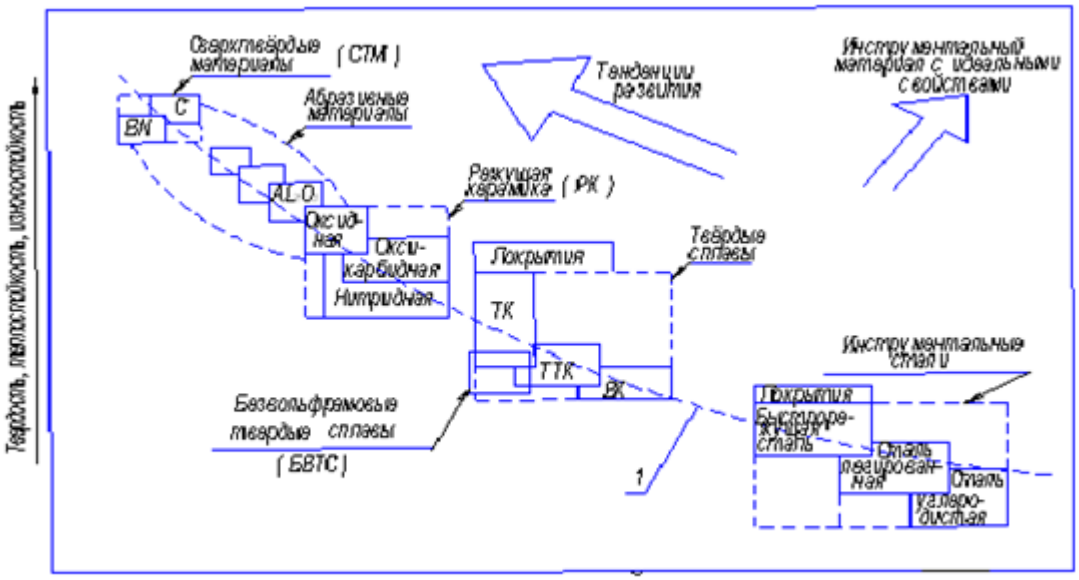


Рисунок 2 - Классификация инструментальных материалов по их свойствам

3. Основными технологиями, обеспечивающими получение оптимального сочетания свойств инструментальных материалов на стадии их изготовления, являются технологии оптимального выбора исходного состава компонентов сплава, легирования, выбора соответствующего вида и режима термической обработки.

♦ ***Технология легирования*** позволила существенно улучшить свойства инструментальных сталей и решать такие задачи, как повышение твердости, износостойкости, красностойкости (характерное свойство инструментальных сталей, определяющее способность сплава при нагреве до красного каления, т.е. 600…650 ºС, сохранять высокую твердость и износостойкость).

Так, увеличение износостойкости инструментальных сталей обеспечивается легированием вольфрамом, хромом, кремнием и марганцем.

Увеличение красностойкости достигается легированием сталей вольфрамом, молибденом, ванадием, хромом.

Особую роль в развитии инструментальных материалов сыграли *высоколегированные стали*, в частности, быстрорежущие.

Повышенная теплостойкость данных сталей предопределяется комлексным легированием – введением в их состав легирующих элементов (W, Mo, Cr, V, Co), образующих сложные карбиды, которые связывают практически весь углерод.

♦ Весьма перспективным направлением в получении инструментальных сплавов с требуемым комплексом свойств является термическая обра-

ботка, которая в сочетании с легированием позволяет получить оптимальные свойства сплавов.

Основными видами ТО инструментальных сталей *являются отжиг* (промежуточный вид ТО, если инструменты после обработки резанием термически упрочняются); *термическое упрочнение, состоящее из закалки и последующего отпуска.*

Особенности ТО инструментальных сталей связаны с выбором режима термообработки (температуры, времени выдержки, скорости охлаждения), применением специальных сыпучих или газовых защитных сред, применением вакуумной ТО, специальных охлаждающих сред, скорости охлаждения и т.д.

Важнейшими характеристиками сталей, формируемыми на стадии термической обработки (закалки) являются закаливаемость и прокаливаемость.

Закаливаемость определяется твердостью поверхности закаленной детали и зависит главным образом от содержания углерода. При повышении содержания углерода увеличивается число атомов, «насильственно» удерживаемых в кристаллической решетке железа, т.е. увеличивается степень пересыщения твердого раствора углерода в железе. При закалке поверхность инструментов охлаждается, как правило, с большей скоростью, чем скорость кристаллизации, и на поверхности образуется *мартенсит*, обладающий высокой твердостью.

Прокаливаемостью называют способность стали закаливаться на определенную глубину. Прокаливаемость зависит от химического состава. Для улучшения прокаливаемости в сталь вводят Mn, Cr, Ni, Mo и другие элементы. Особенно эффективно комплексное легирование. Для повышения прокаливаемости карбиды должны быть растворены в аустените, поэтому температуру нагрева при закалке значительно увеличивают.

ЛЕКЦИЯ №4,5

1. **Роль поверхностного слоя режущего инструмента в обеспечении его высоких эксплуатационных свойств**
2. **Химико-термическая обработка инструментальных материалов**
3. **Применение плазменных и лазерных технологий в инженерии поверхности инструментальных материалов**
4. **Комбинированные способы обработки поверхности**
5. **Формирование универсальных инструментальных материалов с заданными свойствами на основе модификации поверхности методом осаждения покрытий**

1. Режущий инструмент работает в чрезвычайно тяжелых условиях под воздействием высоких давлений на поверхностях контакта и в условиях высоких температур.

Интенсивность изнашивания инструмента в тысячи и десятки тысяч раз превосходит интенсивность изнашивания трущихся деталей машин.

В результате изнашивания режущее лезвие инструмента теряет свою первоначальную форму и, как следствие, режущую способность.

Для восстановления режущей способности инструмента производится заточка его рабочих поверхностей, в процессе чего с рабочей части срезаются достаточно большие слои дорогостоящего инструментального материала.

Кроме того, на смену затупившегося инструмента затрачивается время, которое увеличивает продолжительность всей операции механической обработки, а, следовательно, и ее стоимость.

В целом все это существенно удорожает механическую обработку и ограничивает ее эффективность.

Поэтому, задача уменьшения интенсивности изнашивания режущих инструментов и увеличения срока их службы была и остается одной из главных задач металлообработки.

Особое внимание при этом уделяется ***поверхностным слоям инструмента***, с которых начинается процесс разрушения в подавляющем большинстве случаев.

Прочность, износостойкость поверхностных слоев играют значительную роль в обеспечении необходимых эксплуатационных свойств изделия – инструмента в целом.

Получение поверхности с высокими функциональными параметрами требует, как правило, дополнительной обработки с использованием комбинированного энергетического и физико-химического воздействия.

Улучшение свойств поверхностного слоя достигается поверхностной термической обработкой (закалкой токами высокой частоты), химико-термической обработкой, использованием плазменных и лазерных технологий и т.д.

Это позволяет повысить стойкость инструментов в 1,5…3 и более раз при следующих условиях:

1) слой, созданный обработкой, прочно связан с основным металлом и имеет высокие значения твердости, теплостойкости или стойкости против коррозии, более высокие антифрикционные свойства, чем нижележащие слои;

2) учитывается характер износа, переточки и сечение инструмента;
3) учитывается вид действующих нагрузок (статические, динамические, знакопеременные).

Выбор способа упрочнения поверхности обусловлен не только требованиями, предъявляемыми к поверхностному слою, но и температурой, при которой выполняется эта обработка, и теплостойкостью соответствующего инструментального материала.

2. Одним из наиболее эффективных и наиболее применяемых в промышленности методов повышения надежности и долговечности ответственных деталей машин, *инструмента* и технологической оснастки является ***химико-термическая обработка***.

Химико-термическая обработка (ХТО) заключается в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя, которое позволяет существенно повысить стойкость инструментов в эксплуатации.

При химико-термической обработке инструментов происходит поверхностное насыщение поверхностных слоев сплава (например, стали) тем или иным элементом или комплексом элементов (углеродом, азотом, кремнием, бором и т.д.) путем их диффузии в атомарном состоянии из внешней газовой, твердой или жидкой среды при повышенных температурах.

В результате образуются насыщенные твердые растворы и износостойкие химические соединения диффундируемого элемента с основным компонентом сплава.

Применение химико-термической обработки обеспечивает формирование иного по сравнению с исходным состоянием материала у контактной поверхности, обеспечивающего существенное повышение работоспособности инструмента в условиях высоких давлений и температур.

Толщина образующегося в результате химико-термической обработки диффузионного слоя, его фазовый состав и свойства (твердость, износостойкость и т.д.) определяют степень повышения стойкости инструментов в эксплуатации.

Из различных видов химико-термической обработки в инструментальном производстве на специализированных инструментальных заводах наиболее легко внедряются процессы химико-термической обработки, протекающие в условиях нагрева в обычных камерных печах с окислительной атмосферой без использования специального оборудования и устройств.

При этом целесообразно применение диффузионноактивных сред, которые могут быть нанесены на рабочие поверхности деталей тонким слоем, обеспечивая наряду с химико-термической обработкой и защиту поверхностных слоев от окисления и обезуглероживания. В большинстве случаев химико-термическая обработка инструментов проводится после их шлифования и заточки, но иногда совмещается с закалкой.

Широко известными и применяемыми методами ХТО инструментальных сталей являются *цианирование* (насыщение поверхностного слоя азотом и углеродом в жидкой среде), *азотирование* (насыщение поверхностного слоя азотом), *борирование* (насыщение бором), *нитроцементация* (совместное насыщение азотом и углеродом в газообразных средах), *сульфоцианирование* (насыщение серой, углеродом и азотом).

Методы ХТО позволяют получать покрытия толщиной 10 мкм…1 мм, что дает возможность увеличить стойкость различных типов инструментов из быстрорежущих и углеродистых сталей в 1,5…2 раза.

3. К перспективным процессам упрочнения, которые могут применяться при изготовлении инструмента, относят ***плазменные технологии.***

Повышение износостойкости с использованием плазменных процессов может производиться по двум направлениями: 1) получение необходимой структуры и свойств в поверхностном слое плазменной закалкой (без изменения состава материала); 2) создание поверхностного слоя с новым химическим составом и структурой, отличающейся от материала основы.

Сущность *плазменной закалки* (ПЗ) состоит в высокоскоростном нагреве потоком плазмы поверхностного слоя материала и быстром его охлаждении в результате передачи тепла в глубинные слои материала детали.

После ПЗ инструмент имеет упрочненный поверхностный слой.

Эксплуатационные свойства инструмента повышаются за счет изменения структуры (увеличения дисперсности) и фазового состава сплавов, возрастания твердости и остаточных сжимающих напряжений на поверхности.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон или его смеси с азотом, а также воздух.

Средняя ширина закаленной зоны колеблется от 1 до 10 мм. Плазменной закалке могут быть подвергнуты многие материалы, в т.ч. инструментальные стали, твердые сплавы, стали после ХТО.

ПЗ повышает твердость поверхностного слоя, износостойкость, красностойкость, вязкость, в т.ч. параметр динамической вязкости разрушения.

В инструментальном производстве используют также *плазменные порошковые покрытия*, которые, например, могут быть применены при изготовлении режущего инструмента из конструкционных сталей с наплавкой его рабочих поверхностей быстрорежущими сталями.

Технология позволяет экономить дорогостоящие инструментальные материалы, обеспечивает получение материала с требуемыми составом и свойствами, экологична; ограниченное ее применение связано с недостаточной адгезионной прочностью наплавленного материала с основой.

Одно из перспективных направлений развития инструментальной техники связано с изменением свойств рабочих поверхностей инструмента посредством создания на них *специальных многофункциональных тонкопленочных покрытий* (толщиной 1…5 мкм) с помощью плазменных технологий, что позволяет существенно повысить качество изделий.

Финишное плазменное упрочнение (ФПУ) состоит в нанесении на последней стадии обработки тонкопленочного износостойкого покрытия с возможностью одновременного осуществления плазменной закалки приповерхностного слоя (на глубину порядка нескольких микрометров).

Упрочняющая лазерная поверхностная обработка – направление, которое активно развивается в мировой практике и представляет собой достаточно простой способ повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя материала в 2…3 раза без термического деформирования изделий, типичного для традиционных методов термообработки. Применяется для упрочнения различных инструментов – резцов, фрез, сверл, а также для различных деталей машин, в т.ч. для крупногабаритных деталей химического и энергетического машиностроения.

Использование различных видов лазерного упрочнения в машиностроении и приборостроении дает возможность существенно сократить расход дефицитных высоколегированных сталей при изготовлении инструментов, ответственных деталей машин, повысить надежность и долговечность выпускаемых изделий.

Эффект упрочнения при лазерном воздействии на металлические материалы наблюдается вследствие сверхвысоких скоростей нагрева и последующего охлаждения облучаемого материала, частичного легирования поверхностного слоя элементами окружающей среды, роста плотности дислокаций в зоне облучения и т.д.

Наиболее широкая область применения лазерного упрочнения – изготовление и эксплуатация режущего инструмента, элементов штамповой

оснастки; упрочнение рабочих поверхностей деталей различных машин и приборов. Важной и многообещающей областью использования лазерного упрочнения является изготовление и эксплуатация породоразрушающего инструмента для машин горнодобывающей промышленности.

4.При создании новых видов упрочняющих технологий перспективно сочетание в одном процессе лазерного упрочнения и локального пластического деформирования – ***комбинированные способы обработки***.

При реализации такого процесса по обрабатываемой поверхности одновременно перемещаются лазерный луч и раскатывающий шарик или ролик. Прикатывание быстро остывающего слоя материала инструментом снижает шероховатость, повышает микротвердость поверхности.

Вариантом такой комбинированной обработки является сочетание лазерного воздействия с воздействием раскатывающих шарика или ролика с последующим или совмещенным ультразвуковым упрочнением материала.

Примером технологии повышения эксплуатационных свойств инструментальных материалов на основе комбинированных средств воздействия является *аэротермоакустическая обработка*.

Как известно, свойства материала связаны с его структурой. При этом формирование структуры обусловлено изменениями термодинамического состояния системы, происходящими как под воздействием внешних факторов (тепловые потоки, пластическая деформация, физические поля и т.д.), так и внутренних, наведенных внешним воздействием и стремящихся вернуть систему в равновесное состояние (при этом в материале протекают процессы самоорганизации).

Перспективным является использование возможности управления характеристиками металлов и сплавов (твердостью, пластичностью, коррозионной стойкостью и т.д.) с помощью структурных и фазовых изменений, которые осуществляются в металлах под воздействием мощных акустических полей.

Аэротермоакустическая обработка (АТАО) инструментальных материалов относится к числу комбинированных средств воздействия на материалы. При ее проведении осуществляется воздействие температурных и акустических полей с целью формирования свойств материалов в желаемом направлении как во всем объеме, так и в поверхностном слое благодаря формированию оксидных структур или применению АТАО после одного из видов ХТО.

АТАО как упрочняющая обработка представляет собой организованную определенным образом термообработку в мощном акустическом поле звукового диапазона частот при одновременном воздействии потока газа в диапазоне скоростей от десятка до сотен метров в секунду.

5. Стойкость инструмента и срок его службы существенно возрастают (в несколько раз) в результате осаждения покрытий на его поверхность. В промышленно развитых странах доля инструмента с покрытиями в настоящее время составляет 90…95 %.

Например, тонкие «пленочные» покрытия толщиной от 2 до 10 мкм наносят на поверхность заточенного и доведенного инструмента из быстрорежущей стали, твердого сплава и режущей керамики, что позволяет улучшить ряд служебных характеристик инструмента и значительно изменить условия его работы.

Снижение сил и температур резания на 20…40% позволяет повысить стойкость режущего инструмента в 2 и более раз, увеличить скорость резания от 20 до 60% и значительно улучшить качество (снизить шероховатость) обработанной поверхности.

К износостойким покрытиям для режущего инструмента предъявляется ряд требований:

1) высокая микротвердость, в 1,5…2 раза превышающая твердость инструментального материала;
2) высокая износостойкость;
3) низкая склонность к адгезии с обрабатываемым материалом;
4) сохранение основных свойств при высоких температурах (устойчивость против коррозии и окисления);
5) минимальная способность к диффузионному растворению в обрабатываемом материале;
6) высокая прочность сцепления с инструментальным материалом.

Ряд требований носит противоречивый характер, например низкая адгезия к обрабатываемому материалу и высокая прочность сцепления с инструментальным материалом. Поэтому при резании сталей, в основе которых содержится железо, инструментом из быстрорежущей стали, в основе которой также присутствует данный элемент, целесообразнее всего наносить *многослойные* или *композиционные* покрытия, т.е. покрытия с переменным составом и свойствами по глубине.

Наибольшее распространение для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент получили методы химического (газофазного) осаждения покрытий (ХОП) или методы *CVD* (*Chemical Vapour Deposition*) и физическое осаждение покрытий в вакууме (ФОП) или *PVD (Physical Vapour Deposition)*, см. далее Л. №13,14.

Модуль №2/1,5. Основные группы современных инструментальных материалов: структура, свойства, производство, области применения

ТЕМА №3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

ЛЕКЦИЯ №6

1. **Углеродистые и низколегированные инструментальные стали: состав, структура, свойства, маркировка**
2. **Быстрорежущие стали: состав, структура, особенности легирования, свойства, маркировка, основные группы, области рационального применения**
3. **Особенности термической и термомеханической обработки инструментальных сталей для оптимизации структуры и повышения эксплуатационных свойств**

1. ***Углеродистые инструментальные стали***. Ранее других материалов (конец XVIII…начало XIX ст.) для изготовления режущих инструментов начали применять ***высокоуглеродистые*** заэвтектоидные качественные и высококачественные ***инструментальные стали*** (ДСТУ 3833-98, ГОСТ 1435-99). Помимо железа и углерода (0,65…1,3% С), эти стали содержат 0,2…0,4% марганца, табл.3.

Таблица 3 – Химический состав углеродистых инструментальных сталей

Химический состав сталей, %

Марка стали	C	Si	Mn	S, V	P, V
У7	0,65–0,74	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У8	0,75–0,84	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У8Г	0,80–0,90	0,17–0,33	0,33–0,58	0,028	0,03
У9	0,85–0,94	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У10	0,95–1,04	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У11	1,05–1,14	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У12	1,15–1,24	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03
У13	1,25–1,35	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,03

Примечание. В металлопродукции 1-й группы содержание Cr не более 0,2 %, Ni и Cu не более 0,25 %; 2-й группы — содержание Cr и Ni не более 0,12 %, Cu не более 0,2 %; 3-й группы — содержание Cr не более 0,4 %, Ni и Cu не более 0,25 %.

Маркируют данные стали буквой «У» и цифрой, обозначающей содержание углерода в десятых долях процента; в конце марок высококачественных сталей добавляют букву «А»: У7, У8…У13, У7А…У13А. Наиболее распространены марки У10А, У12А.

Некоторые марки имеют повышенное содержание марганца: У8Г, У8ГА.

Углеродистые стали поставляют после отжига на зернистый перлит. Благодаря невысокой твердости в состоянии поставки (187…217 HB) углеродистые стали хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что позволяет применять накатку, насечку и другие высокопроизводительные методы изготовления из них инструментов.

Режущие инструменты изготавливают из заэвтектоидных сталей У10, У11, У12, У13. Их подвергают неполной закалке и низкому отпуску при 150…180 °С на структуру мартенсита с включениями цементита.

Такие инструменты обладают повышенной износостойкостью и достаточной твердостью при комнатной температуре (твердость сталей после термообработки HRC 60…64), но теплостойкость их невелика, так как при сравнительно невысоких температурах (200…250°С) их твердость резко уменьшается. В связи с этим инструменты пригодны для обработки при небольших скоростях резания – до 15…18 м/мин.

Механические свойства некоторых марок приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Механические свойства углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	Предел прочности на растяжение $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Ударная вязкость KCU, Дж/см^2	Твердость по Роквеллу HRC
У7	980…1590	10…18	31…93	3…63
У12	760…1570	9…18	20…44	64

Данные материалы применяются преимущественно для изготовления ручных инструментов – пил, мелких метчиков, плашек, сверл, зенкеров, напильников, плоскогубцев, надфилей.

Углеродистые инструментальные стали также могут быть применены для изготовления измерительных инструментов – калибров простой формы, а также для небольших штампов холодной высадки и вытяжки, работающих при невысоких нагрузках.

Низколегированные инструментальные стали (начали применять с середины XIX в.), ДСТУ 3953-2000 (ГОСТ 5950-2000), содержат примерно такое же количество углерода (0,65…1,35%), но отличаются от углеродистых повышенным содержанием (до 5%) кремния или марганца или наличием одного либо нескольких легирующих элементов – хрома, никеля, вольфрама, ванадия, кобальта, молибдена, что способствует некоторому повышению их теплостойкости до 250…300 °С (в некоторых случаях до 400 °С), прочности, износостойкости, вязкости в закаленном состоянии, уменьшению склонности к деформациям и появлению трещин при закалке.

По структуре низколегированные инструментальные стали относятся к заэвтектоидным сталям перлитного класса. Их подвергают неполной закалке и низкому отпуску, в результате формируется структура мартенсита и избыточных карбидов (легированный цементит), что обеспечивает твердость HRC 62…69 и высокую износостойкость.

Однако вследствие невысокой теплостойкости низколегированные инструментальные стали имеют практически одинаковые с углеродистыми сталями эксплуатационные свойства. Их применяют для изготовления инструментов, предназначенных для обработки при небольших скоростей резания – 15…25 м/мин: метчиков, плашек, ручных разверток, сверл малого диаметра, зенкеров, протяжек, напильников.

В отличие от углеродистых эти стали менее склонны к перегреву и позволяют изготавливать инструменты больших размеров и более сложной формы.

В марках легированных инструментальных сталей цифра в начале марки указывает содержание углерода в сотых долях процента. Если содержание углерода более 1 %, то цифры в начале марки не ставят. Расшифровка легирующих элементов в составе марки аналогична конструкционным сталям, т.е. А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, К – кобальт,

М – молибден, Н – никель, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ю – алюминий).

Наиболее распространены стали: 9ХС (0,9 % С, 1 % Cr, 1 % Si); ХВГ (1 % С, 1 % Cr, 1 % W, 1 % Mn); 6ХС, Х6ВФ, ХВСГ.

Следует отметить, что за последние 15…20 лет существенных изменений этих марок не произошло, наблюдается устойчивая тенденция снижения их доли в общем объеме используемых инструментальных материалов.

2. В настоящее время быстрорежущие стали являются основным материалом для изготовления лезвийного режущего инструмента, несмотря на то, что инструмент из твердого сплава, керамики и СТМ обеспечивает более высокую производительность обработки.

Широкое использование быстрорежущих сталей для изготовления сложнопрофильных инструментов определяется сочетанием высоких значений твердости и теплостойкости при высоком уровне хрупкой прочности и вязкости, значительно превышающих соответствующие значения для твердых сплавов. Кроме того, быстрорежущие стали обладают достаточно высокой технологичностью, хорошо обрабатываются давлением и резанием в отожженном состоянии.

Быстрорежущие стали, предназначенные для изготовления инструментов высокой производительности, – это высоколегированные стали, важнейшим легирующим элементом которых является вольфрам (6…18%) совместно с другими карбидообразующими элементами – Cr (до 4,5%), Co (до 10%), Mo, V.

В результате комплексного легирования после термообработки (закалки с высоких температур и трехкратного отпуска, см. далее) твердость сталей составляет 62…69 HRC, теплостойкость – 620…720 °С, возрастает износостойкость, что позволяет работать со скоростями резания до 100 м/мин, т.е. в 3…5 раз выше скорости резания инструментами из углеродистых и низколегированных сталей.

В марках этих сталей (ГОСТ 19265-73) на первой позиции стоит буква «Р» (от англ. *rapid* – быстрый, скорый; вначале эти стали называли рапидами), а за ней цифра, которая показывает содержание вольфрама в процентах. В марках также указаны легирующие элементы. Углерод (0,7…1,5 %) и хром (около 4 %) не указываются.

Указанный ГОСТ предусматривает 14 марок быстрорежущих сталей, которые делят по эксплуатационным свойствам на группы нормальной и повышенной производительности.

Быстрорежущие стали применяют для изготовления всех видов лезвийного инструмента: резцов, фрез, сверл, зенкеров, разверток, протяжек, фасонных и сложных инструментов для нарезания резьбы и зубьев.

С целью экономии быстрорежущих сталей режущий инструмент выполняют составным: рабочая часть из быстрорежущей стали, хвостовик – из конструкционной стали (сталь 45, 50, 40Х). Часто используют пластинки из быстрорежущей стали, которые приваривают к державкам или корпусам инструментов.

Наиболее распространены:

1). *Быстрорежущие стали умеренной (нормальной) теплостойкости* (до 620…630 °С): Р9, Р18, Р12, Р6М5, Р8М3. Эти стали имеют твердость в закаленном состоянии 63…64 HRC, предел прочности при изгибе 2900…3400 МПа, ударную вязкость 2,7…4,8 Дж/м^2 и теплостойкость 600…620°С. Указанные марки стали получили наиболее широкое распространение при изготовлении режущих инструментов.

2). *Быстрорежущие стали повышенной теплостойкости* (до 650 °С): Р9К5, Р9К10, Р6М5К5, Р6М5Ф3, Р12Ф3; характеризуются повышенным содержанием углерода, ванадия и кобальта. Ванадиевые быстрорежущие стали находят применение для инструментов несложных форм при чистовых и получистовых условиях резания для обработки материалов, обладающих повышенными абразивными свойствами. Введение кобальта в состав быстрорежущей стали наиболее значительно повышает ее твердость (до 66…68 HRC) и теплостойкость (до 640…650°С). Кроме того, повышается теплопроводность стали, так как кобальт является единственным легирующим элементом, приводящим к такому эффекту.

Это дает возможность использовать их для обработки жаропрочных и нержавеющих сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности. Период стойкости инструментов из таких сталей в 3…5 раз выше, чем из сталей Р18, Р6М5.

3). *Быстрорежущие стали высокой теплостойкости* (до 730 °С): Р11М7К23, Р14М7К25, 3Р20К20Х4Ф.

Стали высокой теплостойкости имеют твердость 69…70 HRC и теплостойкость 700…720°С. Наиболее рациональная область их использования –

резание труднообрабатываемых материалов и титановых сплавов. В последнем случае период стойкости инструментов в 60 раз выше, чем из стали Р18, и в 8…15 раз выше, чем из твердого сплава ВК8.

Значительными недостатками этих сталей является их низкая прочность при изгибе (не выше 2400 МПа) и низкая обрабатываемость резанием в отожженном состоянии (38…40 HRC) при изготовлении инструмента.

В связи со все более возрастающей дефицитностью вольфрама и молибдена – основных легирующих элементов, используемых при производстве быстрорежущей стали, все большее применение находят ***экономнолегированные марки.*** Среди сталей этого типа наибольшее применение получила сталь 11Р3АМ3Ф2, которая используется при производстве инструмента, так как обладает достаточно высокими показателями твердости (HRC 63…64), прочности ($\sigma_и$=3400 МПа) и теплостойкости (до 620°С).

Стоимость быстрорежущих сталей приблизительно в 5 раз выше, чем других легированных инструментальных сталей.

3. Важнейшими технологиями оптимизации структуры и свойств инструментальных сплавов являются термическая и термомеханическая обработка.

Основными видами ТО инструментальных сталей *являются отжиг* (промежуточный вид ТО, если инструменты после обработки резанием термически упрочняются); *термическое упрочнение, состоящее из закалки и последующего отпуска*, см. Л.№3.

Как известно, *отжиг* – термическая обработка, в результате которой металлы и сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной; отжиг вызывает разупрочнение, сопровождающееся повышением пластичности и снятием остаточных напряжений.

Закалка – вид термической обработки, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура. Основное назначение данного вида термообработки для инструментальных сталей – упрочнение. Прочность возрастает преимущественно в результате мартенситного фазового превращения, т.е. в большинстве случаев закалка сталей предполагает получение структуры наивысшей твердости – мартенсита. В зависимости от температу-

ры нагрева и формирующейся структуры различают полную и неполную закалку.

Отпуск (и старение) – вид термической обработки, в результате которой в предварительно закаленных сплавах происходят фазовые превращения, приближающие структуру к равновесной.

Отпуск сталей, следующий после закалки, способствует некоторому снижению твердости и повышению пластичности.

Сочетание закалки с отпуском предполагает получение более высокого уровня свойств (твердости, характеристик прочности и т.д.) по сравнению с отожженным состоянием.

Режущие инструменты из заэвтектоидных ***углеродистых инструментальных сталей*** У10, У11, У12 и У13 подвергают *неполной закалке и низкому отпуску* при 150…180 ºС, в результате чего формируется структура мартенсита с включениями цементита. Стали У7, У8,У9, имеющие более высокую вязкость и применяемые для инструментов, подвергающихся ударам, после полной закалки отпускают на структуру троостита при 275…325 ºС или при 400…450 ºС.

Режимы термообработки и свойства углеродистых инструментальных сталей приведены в табл.5,6

Таблица 5 – Режимы термообработки углеродистых инструментальных сталей

Режимы термической обработки и свойства сталей

Марка стали	Отжиг		Твердость НВ не менее	Температура закалки, °С	Твердость образцов после закалки в воде $HRC_э$ (HRC), не менее	Критический диаметр при закалке, мм
	$t_н$, °С	$t_в$, °С				
У7, У7А,	690–710	–	187	800–820	63 (62)	15– 20/4–6
У8, У8АУ8Г, У8ГА	690–710	–	187	780–800	63 (62)	15–20/4–6
У9,У9А	740–750	600– 650	192	760–780	63 (62)	10–20/4–6
У10, У10А			207	770–800	63 (62)	10–20/4–6
У11, У11А	750–780	620– 660	212	770–800	63 (62)	10–20/4–6
У12, У12А			212	760–790	64 (63)	10–20/4–6
У13, У13А			217	760–790	64 (63)	10–12/4–6

Примечания. 1. Критический диаметр приведен в числителе для охлаждения в воде, в знаменателе — в масле. 2. Балл прокаливаемости устанавливается по глубине прокаливаемости (мм) образцов, закаленных от температуры 800 °С: I балл 1–2 мм, II балл 2–3,5 мм, III балл 4–6 мм, IV балл — 7–9 мм, V балл — сквозная прокаливаемость. 3. $t_н$ — температура нагрева стали при отжиге; $t_в$ — температура изотермической выдержки при проведении изотермического отжига.

Таблица 6 – Твердость закаленных углеродистых инструментальных сталей в зависимости от температуры отпуска

Твердость (HRC) закаленных углеродистых сталей в зависимости от температуры отпуска

Марка стали	Температура отпуска				
	160–200 °С	200–300 °С	300–400 °С	400–500 °С	500–600 °С
У7, У7А	63–58	58–54	54–43	43–35	35–27
У8, У8А, У8Г	64–60	60–55	55–45	45–35	35–27
У9, У9А	64–62	62–56	56–46	46–37	37–28
У10, У10А	64–61	61–56	56–47	47–38	38–28
У11, У11А	65–61	61–57	57–49	49–38	–
У12, У12А	65–62	62–57	57–49	49–38	–
У13, У13А	65–62	–	–	–	–

Быстрорежущие стали поступают от производителей в состоянии ковки от температур 1150…1200 °С и последующего изотермического отжига для снижения твердости (с выдержкой 6…8 ч).

Структура отожженных сталей состоит из сорбитообразного перлита, вторичных и более крупных первичных карбидов (в стали Р18 – 28 %). Основным карбидом в стали Р18 является сложный карбид вольфрама Fe_3W_3C (Me_6C), который растворяет в себе часть ванадия и хрома.

Термическая обработка инструмента из быстрорежущих сталей включает *закалку и отпуск*.

Особенностями термообработки данных сталей являются следующие.

В связи с низкой теплопроводностью и опасностью образования трещин необходим медленный, постепенный, равномерный нагрев сталей. Для этого преимущественно используют электрические печи, соляные ванны.

Быстрорежущие стали подвергают закалке при весьма высоких температурах – 1200 °С …1300 °С, рис.3. Это связано с обеспечением теплостойкости и выполнением основной задачи закалки – растворением карбидов в аустените. Как правило, карбиды на основе вольфрама и хрома растворяются при 1200 °С, ванадий требует еще более высоких температур.

От температуры закалки мелкие инструменты охлаждают на воздухе, крупные – в масле.

После закалки структура стали представляет собой высоколегированный мартенсит, остаточный аустенит (в количестве 30…40%), карбиды.

Следующая операция термообработки – отпуск, который способствует превращению мартенсита закалки в мартенсит отпуска, остаточного аустенита – в мартенсит (т.к. первый не обладает достаточной твердостью), снятию остаточных напряжений.

Как правило, отпуск инструментов из быстрорежущих сталей является многократным, см. рис.3, что в совокупности с закалкой обеспечивает высокий уровень эксплуатационных свойств.

Отпуск проводят при температуре 550…570 °С . При этом из мартенсита и остаточного аустенита выделяются дисперсные карбиды Me_6C, остаточный аустенит превращается в мартенсит, твердость сплавов повышается.

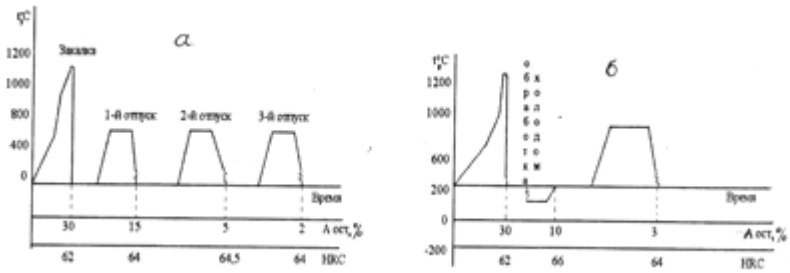


Рисунок 3 – Схемы ТО инструментов из быстрорежущих сталей:
а – без обработки холодом; б – с обработкой холодом

Для превращения всего остаточного аустенита однократного отпуска недостаточно, поэтому применяют двух- и трехкратный отпуск, см. рис.3,*а*, количество аустенита при этом снижается до 3…5%.

В термически обработанном состоянии быстрорежущие стали имеют структуру, состоящую из мартенсита отпуска и карбидов.

Таким образом, процесс термообработки инструментов из быстрорежущих сталей является достаточно длительным, трудоемким и требует строгого соблюдения всех этапов технологического процесса.

Сокращение цикла термической обработки возможно за счет применения обработки холодом после закалки, см. рис.3,*б*.

В результате комплексного легирования и особенностей термообработки инструменты из быстрорежущей стали способны работать, нагреваясь до температур красного каления, и не только не терять своих режущих свойств, но и показывать при этом большую стойкость, чем при работе с более низкими скоростями (красностойкость).

Режущие свойства некоторых видов инструментов (фасонные резцы, сверла, фрезы, протяжки) дополнительно улучшают созданием на неперетачиваемых поверхностях тонкого (10…50 мкм) слоя нитридов или карбонитридов. Такой слой характеризуется высокой твердостью (более 1000 HV) и износостойкостью. Его получают газовым или ионным азотированием, которое проводят непродолжительное время (20…30 мин) при температуре не выше $T_{отпуска}$ (470…550 ºС). Используют также другие способы: низкотемпературное цианирование, карбонитрацию, напыление нитридов титана.

Существенным недостатком деформированных быстрорежущих сталей является карбидная неоднородность, что отрицательно влияет на эксплуатационную стойкость инструментов, способствует выкрашиванию рабочих кромок. Эффективный способ устранения – применение технологии порошковой металлургии.

ТЕМА № 4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

ЛЕКЦИЯ №7

1. **Твердые сплавы как класс современных инструментальных материалов**
2. **Состав, технология производства, структура и свойства твердых сплавов**
3. **Основные группы твердых сплавов, маркировка, области рационального применения**

1. ***Твердые сплавы (ТС)*** положили начало новому этапу в механообработке, связанному с преодолением очередного скоростного и теплового барьера.

Их применение позволило значительно повысить скорость резания – до 500…800 м/мин, что существенно превышает скорости резания, принятые для инструментов из быстрорежущей стали (в 5…10 раз). *Твердые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку резанием.*

Общее количество твердосплавного инструмента, применяемого в механообрабатывающем производстве, составляет до 50%, причем этим инструментом снимается до 80% стружки, что связано с высокими значениями реализуемой скорости резания.

Области применения твердых сплавов: черновая, получистовая и чистовая обработка конструкционных малолегированных и легированных сталей, чугунов, некоторых цветных сплавов.

2. ТС представляют собой композиционный материал, основным компонентом которого являются высокотвердые тугоплавкие карбиды вольфрама, титана, тантала, карбонитрида титана; в качестве связки (цементирующего металла, более мягкого и менее тугоплавкого) используются кобальт, никель, молибден.

Твердые сплавы *изготавливают методом порошковой металлургии*.

Порошки карбидов смешивают с порошком кобальта в определенной пропорции, прессуют и спекают при 1400…1500 °С. При спекании кобальт растворяет часть карбидов и плавится. В результате получается плотный материал (пористость не превышает 2 %), структура которого на 80…95 % состоит из карбидных частиц, соединенных связкой.

Твердые сплавы выпускают в виде пластин определенной формы и размеров, которыми оснащают режущий инструмент – резцы, сверла, фрезы и т.д. Пластины припаивают к державкам или корпусам инструмента медными, латунными припоями или крепят механическим способом.

В промышленности применяют многогранные неперетачиваемые (3-х, 4-х, 5-ти, 6-тигранные) пластинки, которые после изнашивания одной из режущих кромок поворачивают и ведут обработку следующими кромками.

Используют также и монолитный инструмент (отрезные фрезы, развертки небольшого диаметра, зенкеры, спиральные сверла, дисковые фрезы, фасонные резцы). Из твердых сплавов выполняется ~ 95% резцов, ~ 4,5% фрез, ~1% осевого инструмента.

Твердые сплавы обладают высокой твердостью (85…92 HRA), износостойкостью, теплостойкостью до 800…1000 °С; отличаются также высоким модулем упругости (до 6,8 $\cdot 10^5$ МПа) и пределом прочности на сжатие (до 6000 МПа). Недостатком твердых сплавов является низкая пластичность (хрупкость), а также сложность изготовления фасонных изделий.

3. ***В зависимости от состава и области применения твердые сплавы делят на 4 группы:***

▲ *вольфрамо-кобальтовые (однокарбидные*) – группа ВК – состоят из карбида вольфрама WC и связующего – Co в количестве 3…15%: ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15 и т.д. (цифра указывает содержание кобальта в процентах). В условном обозначении сплава цифра показывает процентное содержание кобальтовой связки. Например обозначение ВК6 показывает, что в сплаве 6% кобальта и 94% карбидов вольфрама.

При увеличении в сплавах содержания кобальта предел прочности, ударная вязкость и пластическая деформация возрастают, в то время как твердость и модуль упругости уменьшаются. С ростом содержания кобальта повышаются теплопроводность сплавов и коэффициент термического расширения, рис. 4.

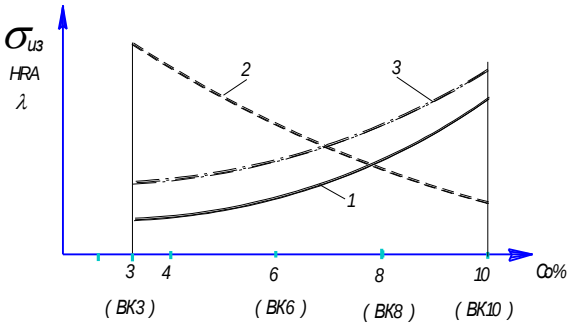


Рисунок 4 – Механические свойства твердых сплавов:
1) прочность на изгиб $\sigma_{изг;}$ *2)* твердость HRA; *3)* теплопроводность λ

Сплавы данной группы имеют наибольшую прочность и наименьшую твердость из всех групп. Теплостойки до 800 °С.

Из сплавов группы ВК изготавливают инструменты для обработки чугунов, цветных сплавов (на основе W, Mo, Ni, Ti), конструкционных полимерных материалов (пластмасс, угле- и боропластиков), дерева. В то же время они не рекомендуются для обработки заготовок из высокоуглеродистых и легированных сталей, т.к. при этом интенсивно изнашиваются зерна карбида вольфрама.

Сплавы ВК10 и ВК15, обладающие из-за повышенного содержания кобальта более высокой вязкостью, используют для волочильных и буровых инструментов.

Сплавы с высоким содержанием кобальта ВК20, ВК25 применяют для изготовления штамповых инструментов.

При одинаковом содержании кобальта физико-механические и режущие свойства сплавов в значительной мере определяются средним размером зерен карбида вольфрама WC. Разработанные технологические приемы позволяют получать твердые сплавы, в которых средний размер зерен карбидной составляющей может изменяться от долей микрометра до 10…15 мкм.

Созданы также твердые сплавы с нанокристаллической структурой.

В табл. 7 приведены состав и характеристики основных физико-механических свойств твердых сплавов в соответствии с ГОСТ 3882-74.

Таблица 7 - Состав и характеристики основных физико-механических свойств сплавов на основе WC-Co (группа ВК)

Сплав	Состав сплава, %			Характеристики физико-механических свойств		
	WC	TaC	Co	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа, не менее	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	HRA, не менее
ВК3	97	-	3	1176	15,0...15,3	89,5
ВК3-М	97	-	3	1176	15,0-15,3	91,0
ВК4	96	-	4	1519	14,9-15,2	89,5
ВК6	94	-	6	1519	14,6-15,0	88,5
ВК6-М	94	-	6	1421	14,8-15,1	90,0
ВК6-ОМ	92	2	6	1274	14,7-15,0	90,5
ВК8	92	-	8	1666	14,4-14,8	87,5
ВК10	90	-	10	1764	14,2-14,6	87,0
ВК10-М	90	-	10	1617	14,3-14,6	88,0
ВК10-ОМ	88	2	10	1470	14,3-14,6	88,5

▲ *титано-вольфрамовые (двухкарбидные*) – группа ТК, состоят из WC,TiC + Co: Т15К6 (15% TiC + 6%Co, ост. - WC), Т5К10 и т.д.

По сравнению со сплавами группы ВК обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии и окислению, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью, большей износостойкостью при обработке сталей, но меньшей прочностью удержания зерен карбида в матрице.

Применяются при обработке конструкционных сталей на средних и высоких скоростях резания.

В табл. 8 приведены состав и характеристики основных физико-механических свойств сплавов в соответствии с ГОСТ 3882-74.

Таблица 8 - Состав и характеристики физико-механических свойств сплавов на основе WC-TiC-Co, группа ТК

Сплав	Состав, %			$\sigma_{изг}$, МПа	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	HRA не менее
	WC	TiC	Co			
Т30К4	66	30	4	980	9,5-9,8	92,0
Т15К6	79	15	6	1176	11,1-11,6	90,0
Т14К8	78	14	8	1274	11,2-11,6	89,5
Т5К10	85	6	9	1421	12,4-13,1	88,5
Т5К12	83	5	12	1666	13,1-13,5	87,0

▲ *титано-тантало-вольфрамовые (трехкарбидные*) – группа ТТК, состоят из зерен WC, зерен тройных карбидов (Ti, Ta, W) и связующей кобальтовой фазы: ТТ20К9 (20% - суммарная доля TiC+TaC, 9% Co), ТТ8К6 и т.д.

Сплавы ТТК отличаются меньшей хрупкостью, большей прочностью удержания карбидных зерен связкой, лучшей сопротивляемостью высокотемпературной текучести и большим пределом прочности при циклическом нагружении, чем сплавы групп ТК и ВК.

Инструмент из ТТК особенно эффективен в процессе прерывистого резания (фрезеровании, строгании, прерывистом точении); для операций черновой обработки с большими сечениями срезаемого слоя; при обработке труднообрабатываемых сталей аустенитного класса.

В табл. 9 приведены состав и характеристики основных физико-механических свойств сплавов в соответствии с ГОСТ 3882-74.

Таблица 9 - Состав и характеристики физико-механических свойств сплавов на основе TiC-WC-TaC-Co (группа ТТК)

Сплав	Состав, %				$\sigma_{изг}$, МПа, не менее	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	HRA, не менее
	WC	TiC	TaC	Co			
ТТ7К12	81	4	3	12	1666	13,0-13,3	87,0
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8-13,3	90,5
ТТ10К8Б	82	3	7	8	1617	13,5-13,8	89,0
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	12,0-13,0	91,0

▲ *В связи с дефицитностью вольфрама и кобальта промышленность выпускает безвольфрамовые твердые сплавы* (БТТС) на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой, табл. 10: КНТ 16 (74 % TiC, 19,5 % Ni, 6,5 % Mo), ТН 20 (79 % TiC, 16 % Ni, 5 % Mo), ТН30.

Данные сплавы значительно дешевле титаносодержащих сплавов; имеют более низкую теплопроводность, прочность, но при этом более низкий коэффициент трения, меньшую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом.

Таблица 10 - Состав и характеристики физико-механических свойств безвольфрамовых твердых сплавов

Сплав	Состав, %				ρ, г/см^3
	Карбид титана	Карбо-нитрид титата	Никель	Мо-либден	
КНТ16	-	74	19,5	6,5	5,5-6,0
ТН20	79	-	15	6,0	5,5-6,0

Сплав	λ, Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, К$^{-1}$	$\sigma_{изг}$, МПа, не менее	HRA, не менее
КНТ16	12,6-21,0	8,5-90	1200	89
ТН20	8,4-14,7	8,5-90	1050	90

ЛЕКЦИЯ №8

1. **Основные тенденции совершенствования твердосплавного инструмента**
2. **Твердые сплавы с субмикро- и нанокристаллической структурой. Твердосплавные наноструктурные инструментальные материалы на основе монокарбида титана без связующего**

1. ***Твердосплавный режущий инструмент относится к наукоемкой, постоянно совершенствующейся продукции***.

Современными тенденциями его развития являются: 1) разработка и освоение производства новых марок режущих материалов; 2) широкое применение износостойких покрытий; 3) разработка новых и совершенствование существующих конструкций инструмента и технологий его изготовления.

Так, *совершенствование конструкций твердосплавного инструмента* идет по пути усложнения рабочих поверхностей и, в первую очередь, передних поверхностей сменных режущих пластин (СРП). Оптимизация конструкций режущих пластин позволяет повысить стабильность и надежность механической обработки.

В последние годы номенклатура СРП существенно расширилась. Лидируют в области совершенствования конструкций режущих пластин иностранные концерны и их филиалы (фирма *Korloy*, Южная Корея; *Impero*, Италия; *Mitsubish*i, Япония; *Safety S.A.*, Франция; *Sumitomo*, Япония; *Sandvik Coromant* , Швеция и т.д.).

В настоящее время пластины со сложной формой передней поверхности рекомендуются для обработки всех групп материалов.

Основной тенденцией совершенствования СРП является *универсализация геометрии* с целью расширения диапазона стружкодробления, а также противоположная тенденция – разработка СРП со специальной геометрией для сравнительно узких областей применения при обработке специальных сплавов, например, с высоким содержанием никеля, титановых, жаропрочных сплавов и т.д.

2.*Создание новых марок твердых сплавов связывают, прежде всего, с формированием субмикро- и нанокристаллического состояния сплавов.*

Некоторые перспективные направления создания твердосплавных инструментов с наноструктурой приведены в табл. 11.

Таблица 11 - Перспективные нанотехнологии в производстве обрабатывающего инструмента из твердых сплавов

Вид инструмента	Перспективные нанотехнологии (прогноз удельного веса в сегменте инструмента, созданного на основе нанотехнологий, в 2020 г., %)
Монолитный твердосплавный инструмент	– нанесение наноструктурных покрытий (53%) – компактирование нанодисперсных порошков и производство инструмента из объемных наноструктурных материалов (30%) – детонационные, плазмохимические и другие технологии синтеза сверхтвердых материалов с наносвязками (15%) – наномодификация поверхностного слоя (2%)
Сборный и составной твердосплавный инструмент	– нанесение наноструктурных покрытий (36%) – компактирование нанодисперсных порошков и производство инструмента из объемных наноструктурных материалов (35%) – детонационные, плазмохимические и другие технологии синтеза сверхтвердых материалов с наносвязками (18%) – наномодификация поверхностного слоя (11%)

Например, на основе нанопорошков карбида вольфрама WC и кобальта Co, а также на основе TiC/Fe разработаны нанокомпозитные металлокерамические материалы, значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой.

Некоторые фирмы уже используют подобные материалы для изготовления металлообрабатывающего инструмента, например, микросверл для обработки печатных плат.

Существует также опыт производства и применения твердосплавных наноструктурных инструментальных материалов на основе монокарбида вольфрама без кобальтовой связки (ВОЛКАР), которые перспективны для применения в процессах высокоскоростной обработки различных труднообрабатываемых металлов и сплавов и могут заменить дорогостоящие инструменты на основе алмаза и кубического нитрида бора.

Несмотря на несколько большую энергоемкость шлифования сплава ВОЛКАР по сравнению со сплавом ВК6, суммарная технологическая себестоимость его использования существенно ниже, так как заточенные им инструменты обладают более высокой износостойкостью.

Основные области применения данных материалов – износостойкие инструменты для различных технологий обработки, например, режущие инструменты (сверла, фрезы), микросверла и другие виды инструмента для электронной промышленности, инструменты для обработки давлением (прокатные валки, штампы), горнорудное оборудование, деревообрабатывающие инструменты, фрезы для стоматологии и т.д.

Если учесть, что повышение твердости инструмента в 1,3…1,5 раза обеспечивает увеличение его стойкости в десятки раз, то можно представить, какова будет экономическая эффективность от внедрения наноструктурных инструментальных твердых сплавов в промышленность.

Одна из новых разработок в данной области – создание спеченных безвольфрамовых твердых сплавов (керметов) с наноструктурой.

Шихта твердого сплава на основе плакированных никелем частиц, ядро которых состоит из нитрида титана, содержит плакированные наноразмерные частицы с размером не более 100 нм. Соотношение ядра и оболочки, масс.%: нитрид титана 45,5…46,5; никель 52,5…53,5. Шихта обеспечивает получение твердого сплава на основе нитрида титана нано-ультрадисперсной структурной морфологии.

ТЕМА № 5. МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

ЛЕКЦИЯ №9

1. **Общая характеристика минералокерамики как инструментального материала**
2. **Технологии получения, состав и структура минералокерамики, ,основные группы**

1. Режущие свойства лучшего современного инструментального материала, каким являются твердые сплавы, можно считать в значительной степени исчерпанными в условиях скоростной обработки, когда температура в зоне резания достигает 800…900°.

Задача дальнейшего прогресса в области резания металлов выдвинула необходимость изыскать такие инструментальные материалы, которые превосходили бы твердые сплавы по режущим свойствам, главным образом в отношении теплостойкости, и в то же время не содержали дорогостоящих легирующих элементов, какие входят в состав твердых сплавов (вольфрам, кобальт и т.д.).

Подобным материалом стала ***минералокерамика (режущая керамика),*** которая может быть применена для резания стали и чугуна, других материалов и имеет значительные преимущества перед быстрорежущим и твердосплавным инструментом в отношении допускаемых скоростей резания и стойкости резцов.

По сравнению с твердыми сплавами минералокерамика обладает следующими достоинствами:

а) повышенной красностойкостью (до 1100…1200°С), обеспечивающей обработку сталей большой твердости;

б) высокой износоустойчивостью, позволяющей применять ее для таких инструментов, к которым предъявляются особые требования в отношении размерной стойкости;

в) малым сродством с обрабатываемым металлом, меньшим наростообразованием, повышенным качеством обработки, что позволяет применять ее для сталей и сплавов, обладающих пониженной обрабатываемостью;

г) большой экономичностью благодаря дешевизне материала, отсутствию таких ценных компонентов, как вольфрам, титан, кобальт и т.д.

Некоторые свойства инструментальной керамики по сравнению с другими материалами приведены в табл.12,13.

Таблица 12 – Сравнительные значения свойств инструментальных материалов

Свойство	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Керамика на основе Al_2O_3
Твердость HV	850	1700	2100
Температура размягчения, °С	550	1100	1500
Температура начала образования окалины,°С	800	800	–

Таблица 13 – Сравнительные значения скоростей резания при точении минералокерамическим инструментом и инструментом из твердого сплава

Обрабатываемый материал	Твердость НВ (HRC)	Скорость резания, м/мин, инструментом, оснащенным	
		керамикой	твердым сплавом
Углеродистая сталь	100–250	250–300	100–200
Легированная сталь	(46–56)	100–160	25–65
Серый чугун	120–240	300–400	100–200
Высокопрочный чугун	160–300	200	50–100

Основной особенностью режущей керамики является отсутствие связующей фазы, что значительно снижает степень ее разупрочнения при нагреве в процессе изнашивания, повышает пластическую прочность, что предопределяет возможность применения высоких скоростей резания, намного превосходящих скорости резания инструментом из твердого сплава.

Отсутствие связующей фазы оказывает и определенное отрицательное влияние на эксплуатационные свойства керамического инструмента. В частности, снижаются хрупкая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость.

Поэтому керамический инструмент рекомендуют для чистовой и получистовой обработки без ударов серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, низко- и высоколегированных сталей, в том числе улучшенных, термообработанных, цветных сплавов, конструкционных полимерных материалов. В указанных условиях инструмент, оснащенный пластинами из режущей керамики, заметно превосходит по работоспособности твердосплавный инструмент.

2. Основой режущей керамики является корунд Al_2O_3 (оксидная керамика), смесь Al_2O_3 с карбидами, нитридами и другими соединениями (оксидно-карбидная и оксидно-нитридная керамика), нитрид кремния (нитридная керамика) и т.д.

Корунд, служащий основой оксидной керамики, представляет собой минерал кристаллического строения, состоящий из оксида алюминия Al_2O_3. Получают корунды из технического глинозема в электропечах при высокой температуре, в связи с чем их принято называть электрокорундами. Кристаллы электрокорунда имеют высокую природную теплостойкость, это качество передается и минералокерамике.

Порошкообразная смесь исходных материалов формуется и прессуется (холодное или горячее прессование) под большим давлением в специальных стальных (или графитовых) пресс-формах определенной формы и размеров. Процесс изготовления минералокерамических пластинок завершается спеканием.

Исходное сырье для получения режущей керамики является относительно дешевым и доступным материалом, однако технологический процесс изготовления инструмента достаточно дорогостоящий, поэтому пластины минералокерамики не дешевле твердосплавных.

Чтобы уменьшить чувствительность к разрушению, изготовители режущего инструмента добавляют к корунду либо окись циркония для увеличения прочности, либо сплав карбида (нитрида) титана, что повышает сопротивление к ударам.

Введение в оксид алюминия карбидов или нитридов тугоплавких элементов (оксидно-карбидная и оксидно-нитридная керамика) обеспечивает эффект подавления процесса рекристаллизации при спекании, что способствует получению мелкозернистой структуры и повышению прочности. Механические свойства данных видов минералокерамики могут быть дополни-

тельно повышены, аналогично керамике на основе Al_2O_3, технологиями измельчения зерна (горячее прессование) и легированием диоксидом циркония.

Подобно окиси алюминия нитрид кремния имеет более высокую горячую твердость, чем твердый сплав. Он также лучше противостоит тепловым и механическим ударам. Его главный недостаток по сравнению с окисью алюминия состоит в том, что его химическая стабильность при обработке стали невысока.

В зависимости от химического состава, метода производства и области рационального применения инструментальные керамические материалы делят на 4 группы.

– *Оксидная («белая») керамика* – состоит на 90% из Al_2O_3 с добавками MgO, ZrO_2. Основные марки – ЦМ332, ВО-13 (Маркировка в соответствии с Евростандартом – A_1 – *pure ceramic*). Применяется для чистовой и получистовой обработки незакаленных сталей и серых чугунов.

– *Оксидно-карбидная («черная») керамика* – состоит из смеси Al_2O_3 (до 60%), TiC (20…40%), ZrO_2 (20…40%), других карбидов тугоплавких металлов: ВОК-60, ВОК-63. (Евростандарт – A_2 – *mixed ceramic*). Процесс получения данной керамики более трудоемок, чем оксидной. По эксплуатационным свойствам оксидно-карбидная керамика занимает промежуточное положение между твердыми сплавами и оксидной керамикой. Добавки металлических соединений повышают вязкость и теплопроводность, снижают трещинообразование и хрупкость, однако при этом снижается износостойкость. Применяется для чистовой и получистовой обработки ковких, высокопрочных, отбеленных модифицированных чугунов, закаленных сталей.

– *Оксидно-нитридная керамика* – на основе Si_3N_4 или Al_2O_3 с добавками TiN (например, инструментальный материал «картинит» ОНТ-20). Имеет мелкозернистую структуру. Применяется для получистовой обработки чугунов, чистовой или получистовой обработки (точения, фрезерования) закаленных сталей.

– *Нитридная (нитридокремниевая) керамика* – на основе Si_3N_4 : силинит –Р, (Евростандарт – В – *reinforced ceramic*).

Составы основных типов режущей керамики, некоторые физико-механические свойства, области применения представлены в табл.14,15.

Таблица 14 – Состав и свойства керамики

Марки керамики		Состав	$\sigma_и$,, ГПа	ρ, г/см^3	Средний размер зерен, мкм	HRA, не менее
Оксидная	ЦМ332 (Россия)	Al_2O_3 – 99% MgO – 1%	0,3-0,35	3,88	3,9	91
	ВО-13 (Россия)	Al_2O_3 – 99%	0,45-0,5	3,96	3,9	92
	ВШ-75(Россия)	Al_2O_3	0,25-0,3	3,98	4,6	91-92
Оксидно-карбидная	В-3 (Россия)	Al_2O_3 – 60% TiC – 40%	0,6	4,2		94
	ВОК-60 (Россия)	Al_2O_3 – 60% TiC – 40%	0,65-0,7	4,3	4,2	94
	ВОК-71 (Россия)	Al_2O_3 – 60% TiC – 40%	0,7-0,75	4,5		94
Оксидно-нитриая	ОНТ-20 (кортинит) (Россия)	Al_2O_3 > 60% TiN – 30%	0,64	4,3	2,0	90-92
Нитридная	РК-30(силинит-Р) (Россия)	Si_3N_4, Y_2O_3, TiC	0,7-0,8	3,3	2,1	94

Таблица 15 – Области применения режущей керамики

Марка	Состав	Область применения	Изготовитель
ВОК60	Al_2O_3+TiC	Чистовая и получистовая обработка закаленных (30-50 HRCэ) сталей, чугунов с малыми сечениями среза.	РОССИЯ
Кортинит	Al_2O_3+TiN	Получистовая, чистовая обработка чугунов, в том числе в условиях прерывистого резания, обработка жаростойких никелевых сплавов.	РОССИЯ
CC620	Al_2O_3+ZrO_2	Обработка чугунов с высокими скоростями резания, углеродистых и легированных сталей.	SANDVIK Coromant (Швеция)
CC650	Al_2O_3+TiN+TiC	Чистовая обработка с охлаждением для уменьшения тепловых деформаций.	SANDVIK Coromant (Швеция)
CC680	Si_3N_4+ Al_2O_3	Черновая, прерывистая обработка чугунов, жаростойких никелевых сплавов.	SANDVIK Coromant (Швеция)
SN60	Al_2O_3+ZrO_2	Черновое и чистовое точение чугуна, чистовое точение стали	ГЕРМАНИЯ Фирма «Фельдмюле»
SN80	Al_2O_3+ZrO_2	Черновая обработка стали, фрезерование чугуна.	ГЕРМАНИЯ Фирма «Фельдмюле»
SN1	Al_2O_3+TiC	Точение и фрезерование твердых материалов, фрезерование чугуна, тонкое фрезерование стали.	ГЕРМАНИЯ Фирма «Фельдмюле»
SL100	Al_2O_3+Si_3Ni	Черновое точение, фрезерование серого чугуна и материалов с высоким содержанием никеля.	ГЕРМАНИЯ Фирма «Фельдмюле»

ЛЕКЦИЯ №10

1. **Методы повышения прочности минералокерамики**
2. **Минералокерамика, армированная нитеподобными кристаллами**
3. **Режущая керамика с субмикро- и нанокристаллической структурой**

1. Недостаточная исходная механическая прочность минералокерамики дополнительно снижается при изготовлении инструментов и их заточке до эксплуатации.

Тепловое и механическое воздействия на пластинки минералокерамики в процессе их пайки и заточки часто приводят к недопустимо большим вре-

менным и остаточным внутренним напряжениям и, следовательно, образованию микротрещин, уменьшению прочности в процессе резания, интенсификации износа. Это является одной из причин нестабильности прочностных свойств минералокерамических инструментов. В результате этого инструмент, оснащенный минералокерамикой, выходит из строя не столько вследствие истирания, сколько из-за выкрашивания в процессе эксплуатации.

Особенно большое значение эти недостатки имеют при обработке минералокерамическими инструментами при недостаточной жесткости системы СПИД и резании с интенсивными вибрациями.

Поэтому дальнейшее расширение области применения этих наиболее производительных инструментальных материалов определяется изысканием новых марок минералокерамики, обладающих возможно большими пределами прочности при изгибе и ударной вязкостью.

Основными направлениями повышения прочности и снижения хрупкости минералокерамики являются следующие.

♦ ***Введение соответствующих компонентов в порошковую шихту***. Чтобы уменьшить чувствительность к разрушению, изготовители режущего инструмента вводят в состав керамики различного типа *добавки – оксиды, карбиды, бориды различных элементов* для увеличения прочности, что повышает сопротивление к ударам. Значительное повышение ударной вязкости и удельной теплоемкости дает введение при горячем прессовании малых добавок окисей Mg, Zr, Cr, Co.

Еще одним направлением совершенствования керамики на основе многокомпонентной системы Al_2O_3-TiC является введение в ее состав карбидов вольфрама и тантала, которые сдерживают рост зерен карбида титана и повышают прочность материала. Другим дополнительным компонентом, заметно улучшающим свойства черной керамики, является диборид титана TiB_2.

♦ ***Создание минералокерамических инструментальных материалов на основе нитридов – нитридная керамика.*** Такой керамический материал имеет высокую прочность на изгиб ($\sigma_{изг}$= 700…800 МПа), см. табл.14, низкий коэффициент термического расширения, что выгодно отличает его от оксидных керамических материалов. Это позволяет с успехом использовать нитридокремниевый инструмент при черновом точении, получистовом фрезеровании чугуна, а также чистовом точении сложнолегированных и термообработанных сталей и сплавов.

♦ Одним из методов улучшения свойств минералокерамики является ***нанесение на рабочие поверхности керамического инструмента износостойких покрытий***.

Например, для повышения износостойкости минералокерамики применяют плакирование – покрытие защитными пленками; нанесение вакуумно-плазменных покрытий.

♦ Для повышения надежности инструмента из режущей керамики используют также следующие методы: увеличение толщины пластин, формирование упрочняющей фаски на режущей кромке и изготовление слоистых режущих пластин (керамика – твердый сплав, керамика – твердый сплав – керамика и т.д.).

♦ ***Совершенствование технологии получения режущей керамики.*** В частности, наиболее удовлетворительные свойства по прочности имеют керамические пластины, полученные методом предварительного холодного прессования и последующего горячего изостатического прессования (ГИП).

Применение технологии ГИП позволяет обеспечить высокую плотность изделия (до уровня теоретической) и исключает анизотропию свойств в объеме пластины.

♦ Совершенствование технологии заточки и доводки инструмента из минералокерамики.

2. В последние годы появились новые марки оксидной керамики, ***армированной «нитевидными» кристаллами карбида кремния (SiC).*** Армированная керамика имеет высокую твердость (HRC_A-92) и повышенную прочность ($\sigma_{изг}$ до 800 МПа), табл.16.

Таблица 16 – Изменение свойств оксидной керамики при добавлении в ее состав различных соединений

Свойства	Al_2O_3	Al_2O_3-ZrO_2	Al_2O_3-TiC	Al_2O_3, нитевидный SiC
HV_{30}	2000	2000	2200	2400
E, ГПа	390	380	400	390
$\sigma_{изг}$, МПа	350	600	600	от 600 до 800
K_{1C}, МПа/м$^{-1/2}$	4,5	5,8	5,4	от 6 до 8
$a_к \cdot 10^{-5}$, 1/К	7,5	7,4	7,0	-
Θ, Вт/($м \cdot К$)	30	28	35	35

Степень повышения прочности и твердости керамического материала подобного композиционного типа определяется большим числом факторов. Наибольшее влияние оказывают объемная доля, размеры (отношение длины к диаметру) и свойства нитевидных кристаллов.

Режущий инструмент из армированной керамики является дорогостоящим, его применение экономически эффективно только в определенных областях, например, при обработке заготовок из жаропрочных никелевых сплавов.

Анализ тенденций развития керамического режущего инструмента свидетельствует о достаточных перспективах его применения в ближайшем будущем, причем увеличение общего объема выпуска керамического инструмента взаимосвязано с совершенствованием технологии производства, оптимизацией состава традиционных марок керамики, широким применением армированной керамики и расширением области применения инструмента на основе нитрида кремния, созданием микералокерамики с субмикро- и нано-кристаллическим строением.

2. Аналогично твердым сплавам, большие надежды на повышение необходимых свойств и эффективности применения минералокерамики связывают с нанотехнологиями, с созданием наноструктурного состояния.

Весьма перспективны в качестве инструментальных керамические материалы в наноструктурном состоянии на основе оксида алюминия Al_2O_3, оксида циркония ZrO_2, карбидов тугоплавких металлов.

Все более широкое применение в последнее время находит ***нано-структурная керамика****, полученная компактированием нанопорошков тугоплавких и хрупких в обычных условиях веществ различной физико-химической природы: оксидов (алюминия, циркония, кремния, бериллия, титана, магния), нитридов (кремния, бора, алюминия), карбидов (тугоплавких металлов – W, Ti, V, Ta, а также кремния, бора), боридов, силицидов и т.д.*

Нанокерамика обладает рядом преимуществ: наряду с высокой твердостью и прочностью она имеет высокую жаропрочность, не подвержена коррозии, обладает меньшим удельным весом.

Основная проблема при создании изделий из традиционной керамики – повышение пластичности, поиск оптимальных методов формования изделий из исходных порошков, улучшение качества и производительности механической обработки.

Подобные проблемы могут быть решены при уменьшении размеров зерен керамики до нанодиапазона – керамика становится достаточно пластич-

ной, что позволяет применять методы ОМД для получения изделий (например, штамповку, прокатку) и даже проявляет эффект сверхпластичности (при повышенных температурах).

В частности, получена керамика (США), пластичность которой составляет 1/3 пластичности свинца. Эта керамика имеет достаточную пластичность для получения изделий горячей прокаткой, штамповкой. В Японии получена сверхпластичная керамика (SiC-SiN) с относительным удлинением 250 %.

Кроме высокой пластичности, нанокерамика имеет также высокие показатели вязкости, трещиностойкости, износостойкости. Не случайно появился термин «керамическая сталь».

Кроме перспективы создания режущего инструмента для механообработки, с созданием нанокерамики связывают многие перспективные направления: производство легких, прочных, термостойких материалов для различных изделий – корпусных деталей автомобилестроения, строительства (трубы, детали облицовки строений), бытовой промышленности (облицовка холодильников, мебель, электроприборы); лопаток турбин, ракетных обтекателей, защитных покрытий космических кораблей; топливных элементов, сенсоров, солнечных батарей, элементов микроэлектроники и микромеханических систем; прецизионных инструментов типа микротонных пластин и хирургических скальпелей.

ТЕМА № 6. СТРУКТУРНЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСОВЕ АЛМАЗА И НИТРИДА БОРА

ЛЕКЦИЯ №11

1. **Критерии сверхтвердых материалов**
2. **Особенности структуры и свойств алмаза и нитрида бора**
3. **Алмаз и нитрид бора как инструментальные материалы**

1. Сверхтвердыми принято считать материалы, имеющие микротвердость выше микротвердости природного корунда (Al_2O_3) (т.е. твердость по Виккерсу более 20 ГПа).

Этому определению соответствует целый ряд веществ, однако наибольший интерес представляют материалы на основе алмаза и нитрида бора, твердость которых существенно превышает все остальные материалы.

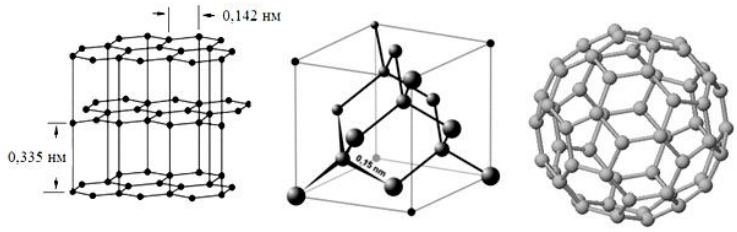
Из природных материалов к сверхтвердым относится только алмаз.

Природный алмаз – самый твердый материал на Земле (10 баллов по шкале Мооса), который издавна применяется в качестве режущего инструмента.

Принципиальное отличие монокристаллического природного алмаза от всех других инструментальных материалов, имеющих поликристаллическое строение, состоит в возможности получения практически идеально острой и прямолинейной режущей кромки.

Поэтому в конце XX века с развитием электроники, прецизионного машиностроения и приборостроения применение резцов из природных алмазов для микроточения зеркально чистых поверхностей оптических деталей, дисков памяти, барабанов копировальной техники и т.д. существенно возросло. Однако из-за дороговизны и хрупкости природные алмазы не применяются в общем машиностроении, где требования к обработке деталей не столь высоки; основное применение нашли синтетические алмазы.

2.Алмаз представляет собой кубическую аллотропную форму углерода, рис.5, плотность алмаза составляет 3,47…3,55 г/см³.



а *б* *в*

Рисунок 5 – Аллотропные формы углерод: *а* – графит; *б* – алмаз; *в* – фуллерен

Элементарная ячейка алмаза, см. рис.6, *б*, представляет собой тетраэдр, в центре и четырех вершинах которого расположены атомы углерода. Координационное число углерода в решетке алмаза, т.е. число атомов, расположенных на равном наименьшем расстоянии от данного атома, равно четырем. Все атомы удалены друг от друга на расстояние 0,154 нм.

Все четыре валентные электрона атомов углерода образуют высокопрочные ковалентные связи С-С, благодаря чему алмаз характеризуется высокой прочностью, твердостью (самый твердый из известных в природе минералов). Для алмаза также характерны самый высокий (по сравнению с другими известными материалами) модуль упругости и самый низкий коэффициент сжатия. Энергия кристалла составляет 10^5 Дж/г·ат, энергия связи 700 Дж/г·ат – менее 1 % от энергии кристалла.

Электроны проводимости отсутствуют, алмаз является диэлектриком. Особенностью алмаза, связанной с его структурой, является высокая темпера-

тура плавления (3550 °С), химическая инертность. Алмаз также имеет наиболее высокую теплопроводность среди всех твердых тел – 900…2300 Вт/(м·К), высокие значения показателя преломления и дисперсии (способность кристаллов разлагать белый свет на отдельные составляющие).

У алмаза низкий коэффициент трения по металлу на воздухе – всего 0,1, что связано с образованием на поверхности кристалла тонких пленок адсорбированного газа, играющих роль своеобразной смазки. Высокая твердость обусловливает исключительную износостойкость алмаза на истирание.

Алмаз менее стабилен, чем графит, и превращается в графит при температуре ~ 1970 К и нормальном давлении (графит, не плавясь, возгоняется при температуре ~ 4100 К).

Нитрид бора, BN – соединение бора с азотом. Нитрид бора (НБ) получают при температурах выше 2000°С или при нагревании смеси B_2O_3 с восстановителями (углем, магнием) в атмосфере аммиака; при этом образуется обычная α-форма BN – белый порошок, по кристаллической структуре подобный графиту. При давлениях выше 6200 МН/м^2 и температурах выше 1350°С в присутствии катализаторов (щелочных и щелочноземельных металлов) графитоподобная гексагональная а-форма превращается в кубическую алмазоподобную (β-форму (боразон), резко отличающуюся по свойствам.

Гексагональный нитрид бора **- α-BN** кристаллизируется в гексагональной структуре, аналогичной структуре графита. Кристаллическая структура а-BN состоит из графитоподобных сеток, расположенных, в отличие от структуры графита точно одна под другой с чередованием атомов бора и азота по оси Z. Расстояние между сетками в решетке нитрида бора равно 3,34 А, т. е. меньше, чем у графита (3,40А), что свидетельствует о более прочной связи между сетками в структуре нитрида бора по сравнению с графитом. Из-за близости структуры и некоторых физических свойств нитрида бора и графита а-BN часто называют «белым графитом».

Температура плавления α-BN составляет 3000 °С. Плотность частиц порошка равна 2,3 г/см^3. По смазочным свойствам а-BN превосходит графит. В спрессованном состоянии нитрид бора обладает полупроводниковыми свойствами.

Нитрид бора при комнатной температуре химически инертен, не реагирует с кислородом или хлором, кислотами или щелочами. Взаимодействует с кислородом, хлором, фтором температурах выше 700 °С; горячие растворы щелочей разлагают его с выделением NH_3.

При температуре выше 1000°С начинает разлагаться на элементы.

Алмазоподобная форма β-BN (боразон) кристаллизуется в структуре сфалерита с периодом решетки 3,615 Aº при 25 °С. (При определенном сочетании температур и давления может произойти образование кристаллов нитрида бора в структуре вюрцита).

Плотность боразона равна 3,45 г/см^3. Твердость его при оценке по шкале Мооса соизмерима с твердостью алмаза (около 10 баллов), однако боразон существенно превосходит алмаз по термостойкости (до 2000 °С) и ударной прочности.

Химическая стойкость боразона значительно выше, чем гексагональной формы нитрида бора.

Кристаллы боразона не изменяются при нагреве в вакууме до температуры выше 2000 °С. При нагреве на воздухе медленное окисление боразона наблюдается лишь при 2000 °С, тогда как алмаз сгорает на воздухе уже при 875 °С.

При температуре 2500 °С и давлении 40000 атм происходит переход боразона в гексагональный нитрид бора.

Ромбоэдрическая модификация γ-BN обнаружена наряду с гексагональной при получении нитрида бора взаимодействием бората натрия с цианистым калием. Эта форма имеет структуру, подобную структуре графита с разным смещением между гексагонами в последовательных слоях. Периоды решетки a=2,504 Aº, c=10,01Aº.

3. Алмаз является самым твердым из известных материалов (HV= 100 ГПа, HV_{wc}=17 ГПа, HV_{p18}=13 ГПа), обладает высокой износостойкостью, хорошей теплопроводностью, низким коэффициентом трения и низкой адгезией к металлам (за исключением железа и его сплавов). Поверхности деталей, обработанные алмазным инструментом, имеют низкую шероховатость и высокую точность размеров. Стойкость этих инструментов значительно выше стойкости твердосплавных инструментов.

К недостаткам алмаза как инструментального материала относятся сравнительно низкая теплостойкость (до 800 °С), что требует использования станков высокой жесткости и виброустойчивости, а также малоэффективность при обработке сплавов на основе железа, что объясняется проявляемой к нему высокой химической активностью, сопровождающейся интенсивным износом.

Чаще всего для изготовления режущих инструментов используют синтетические алмазы (90% из всех СТМ), которые синтезируют из графита, Р ~ 4,5…6,5 ГПа, Т~ 1200…1800 °С.

Синтетические алмазы аналогичны природным по химическим, физико-механическим свойствам, имеют одинаковые параметры кристаллической решетки; при этом дешевле, их свойства можно варьировать, изменяя параметры синтеза.

Промышленностью выпускаются синтетические алмазы в виде *порошков* (монокристаллических), *поликристаллов, полученных фазовым переходом графита в алмаз* – баллас АСБ, карбонадо АСПК и *получаемых спеканием алмазных зерен* – СКМ, карбонит и т.д., а также *композиционных материалов* (например, АТП; в ИСМ НАН Украины разработаны также технологические процессы получения сменных многогранных неперетачиваемых пластин из сверхтвердых композитов).

Крепление заготовок (пластин) из ПСТМ в режущих инструментах производится как механически, так и с помощью пайки.

ПСТМ на основе алмаза широко используются для оснащения лезвийного инструмента – резцов, сверл, торцовых фрез; используются для высокоскоростной чистовой обработки ($V_{рез}$ = 10…15 м/с): тонкого точения и растачивания цветных сплавов (сплавов титана, алюминия, бронз, латуней), пластмасс, горных пород (гранита, кварца), полупроводниковых материалов, керамики и других материалов. Применение алмазных резцов позволяет также реализовать сверхскоростное точение с Vрез до 110000 м/мин (1800 м/с; для сравнения: 1-я космическая скорость составляет 7900 м/с).

Уникальным сверхтвердым инструментальным материалом является нитрид бора, поликристаллы которого (на основе кубического нитрида бора - КНБ) получают синтезом из графитоподобного (и других модификаций нитрида бора, например, вюрцитоподобного) нитрида бора при Р ~ 10 МПа, Т ~ 1700 °С) – эльбор-Р, белбор, гексанит-Р; композиты на основе нитрида бора получают спеканием порошков кубического нитрида бора с активирующими добавками (например, киборит, композит 05).

ПСТМ на основе нитрида бора, незначительно уступая алмазу по твердости, отличаются высокой термостойкостью (до 1500 ºС), стойкостью к циклическому воздействию высоких температур и, что особенно важно, химической инертностью к железу и его сплавам.

Основным направлением в применении лезвийного инструмента на основе КНБ является обработка сталей и чугунов различной твердости. Чем выше твердость стали или чугуна, а также скорость резания, тем значительнее преимущества инструментов из СТМ на основе нитрида бора.

Перспективным классом сверхтвердых инструментальных материалов являются композиционные сверхтвердые композиционные материалы, в т.ч. двухслойные – ДСКМ, полученные спеканием порошков сверхтвердых материалов (алмаза, нитрида бора) на подложке из твердых сплавов (на основе карбидов вольфрама, титана, тантала и др.), в результате чего образуется слой ПСТМ толщиной 0,5…2 мм, прочно связанный с материалом подложки.

Преимущества ДСКМ по сравнению с однородными по объему СТМ: упрощение технологии крепления режущего инструмента в корпусе державки путем пайки к твердосплавной подложке; повышенная ударная прочность благодаря наличию подложки, прочно соединенной со слоем СТМ; большая экономичность.

Наиболее известные отечественные ДСКМ: ДАП, диамет, АТП; композит 05-ИТ-2С, композит 10Д и т.д.

Поликристаллические сверхтвердые инструментальные материалы являются принципиально новыми, как по технологии изготовления, так и по условиям эксплуатации, инструментальными материалами, которые позволяют обрабатывать изделия при скоростях резания на порядок выше скоростей, допускаемых при использовании твердосплавного инструмента. Сравнительные свойства СТМ на основе алмазов и КНБ представлены в табл. 17.

Таблица 17 - Усредненные показатели физико-механических свойств современных СТМ и твердых сплавов

Свойства	Поликристаллические СТМ		Вольфрамо-кобальтовые твердые сплавы
	На основе нитрида бора	На основе алмаза	
HV, ГПа	40-45	70-100	17-19
E, ГПа	700-800	800-900	400-600
$\sigma_и$, МПа	600-800	800-1100	1400-2000
K_{1C}, МПа/м$^{-1/2}$	6,5-8,5	-	10-17
Работа излома G_{1C}, Дж/м$^{-2}$	130-160	-	220
Θ, Вт/(м·К)	5,0-10	7,0-15,0	10,0
$\alpha \cdot^{10-5}$, ^{1}/К	5-7	3,5-5	5-6
Жаропрочность, °С	1000-1200	700-750	80-900
Характеристика W_4^{**}	2	2	2

**Эмпирическая характеристика износостойкости $W_4 = K_{1C}^{0,5} E^{0,8} H^{1,3}$

ЛЕКЦИЯ №12

1. Классификация ПСТМ. Основные методы производства инструментальных поликристаллических материалов на основе алмаза и нитрида бора. Марки и состав

1. К настоящему времени различными фирмами США, Японии, стран ЕС, Украины, Беларуси, России создано большое количество разновидностей сверхтвердых поликристаллических материалов (СТПМ).

В основе технологии изготовления поликристаллов диаметром 4…40 мм лежат два различных процесса: фазовый переход вещества из одного состояния в другое (собственно синтез) и спекание мелких частиц заранее синтезированного порошка СТМ.

Например, первым способом получают поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ) марок композит 01 (эльбор-Р) и композит 02 (белбор), а также поликристаллический алмаз (ПКА) марок АСПК (карбонадо) и АСБ (баллас) и т.д.

Крупнейшими фирмами по технологии спекания являются «*General Electric*» (США), «*De Beers*» (ЮАР) и «*Sumitomo Electric*» (Япония) (на основе алмаза – *Syndite* 025, *Megadiamond, Sumidia, Compax* и другие, а на основе спекания зерен КНБ – *Amborite, BZN, Sumiboron, Wurzin* и т.д.).

Поликристаллические сверхтвердые материалы систематизируют по таким определяющим признакам, как состав сверхтвердой основы поликристаллов (алмаз, нитрид бора), способ получения, структура продукта синтеза или спекания, поскольку именно эти признаки определяют эксплуатационные свойства, области применения (являются наиболее важными для потребителя).

Вся гамма поликристаллов разделяется на пять основных групп:

1) СТМ на основе алмаза (СПА);
2) СТМ на основе плотных модификации нитрида бора (СПНБ);
3) композиционные сверхтвердые материалы (КСТМ);
4) двухслойные сверхтвердые композиционные материалы (ДСКМ) на основе алмаза;
5) … на основе НБ.

В табл. 18 приведена классификация СТПМ, состав, способы получения; в табл.19,20 – основные физико-механические свойства.

Таблица 18 – Основные способы получения, состав и марки СТПМ

Группа	Способ получения	Состав	Марка	Страна-изготовитель
Синтетические поликристаллические материал на основе алмаза (СПА)	Синтез из графита	Алмаз, графит, металл-катализатор, его карбиды и оксиды	АСБ5,АСБ6, АСБР, АСПК1,АСПК2,АСПК3, АСПВ, АСФ, АКА1	Россия
	Спекание алмазных порошков, сопровождающееся промежуточным фазовым переходом	Алмаз и связка	СКМ, карбонит, алмет, СВ20, СВС, СВВВ, СВК, СВПК	
			Мегадаймонд	США
			Новотипс	Германия
Синтетические поликристаллические материал на основе нитрида бора (СПНБ)	Синтез из смеси гексагонального и других модификаций нитрида бора	Кубический нитрид бора (преимущественно), нитриды и бориды металла-катализатора	Композит 01 (Эльбор-Р)	Россия
			Композит 02 (белбор)	Беларусь
			Композит 09 (ПТНБ)	Россия
			Композит 10 (Гексанит-Р)	Украина
Композиционные поликристаллические материалы (КСПМАНБ)	Спекание смеси порошков алмаза и КНБ или гексагонального нитрида бора, сопровождающееся частичным фазовым переходом	Алмаз и КНБ	СВАБ, ПКНБ, АС	
			Компакт	Япония
Двухслойные композиционные материалы (ДСКМ) на основе алмаза	Спекание порошков алмаза с металлической или твердосплавной подложкой	Рабочий алмазный слой, металлическая или твердосплавная основа	ДАП, АМК, АТП, диамет, СВБН-1,СВБН-10, СВБН-20	Украина
			Сумидиа-200	Япония
			Мегапакс, стратопакс, синпакс, компакс	США
			Полиблок	Гермния
			Серопакс-Р	Бельгия
			Диатипт	Франция
			Синдит	ЮАР
Двухслойные композиционные материалы (ДСКМ) на основе нитрида бора	Спекание порошков КНБ с твердосплавной подложкой	Рабочий слой – плотные модификации нитрида бора (кубический или вюрцитный нитрид бора) на твердосплавной подложке	СВБН,СВБН-20, СВБН-050, композит 10Д, БПК, композит 05ИТ-2С	Россия, Украина
			Сумиборон	Япония
			амборит	ЮАР

Таблица 19 – Физико-механические свойства материалов на основе ПКА

Марка материала	Свойства ПКА								
	Твердость по Кнуппу, ГПа	Плотность, г/см^3	Прочность, ГПа		Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент трещиностойкости K_{IC}, МПа·м^{10}	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Термостойкость на воздухе, К	Коэффициент линейного расширения α, 1/К·10^{-4}
			на сжатие	на изгиб					
АСБ	50-90	3,5-3,9	0,4-0,6	0,78	800-850		290-300	873-993	0,9-1,2
АСПК	80-100	3,5-4,0	0,4-0,8	0,5-1,0	900		-	1073-1173	0,9-1,2
СКМ	60-70	-	0,6-0,8	-	850		150-250	973-1073	
АТП	50	3,74-3,77	0,3-0,4	0,80-0,85		10-13	-	950-1000	
АКТМ	52	3,46	0,49	-	970	8	260	1473	
СВБН	70-100	3,30-3,45	8,0-10,0	-			-	1073-1223	
Карбонит	40-45	3,2-3,4	4,5-6,0	-			-	1473	
Алмет	94-96 HRA	-	5,0-10,0	-	500-600		-	973	
СВ	65-100	-	5,0-10,0	-	850		-	1573-1673	

Таблица 20 – Физико-механические свойства материалов на основе КНБ

Марка КНБ	Свойства ПКА									
	Твердость по Кнуппу, ГПа	Плотность, г/см^3	Прочность, ГПа			Коэффициент трещиностойкости K_{IC}, МПа·м^{10}	Модуль Юнга, ГПа	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Термостойкость на воздухе, К	Размер зерен, мкм
			на сжатие	на растяжение	на изгиб					
Композит 01	32-38	3,31-3,45	2,25-3,15	0,43-0,49	0,70-0,98	3,7-4,2	680-720	60-80	1343-1473	5,20
Композит 02	38	3,42-3,50	4,00-6,50	-	0,68-0,70	10,8	720	85	1273-1423	0,2-5
Композит 10	30-38	3,34-3,50	2,00-4,00	0,26-0,39	1,20-1,50	7,1	650-780	30-60	1273-1373	0,1-0,3
Киборит	32-36	3,20-3,34	2,60-3,20	0,32-0,37	0,55-0,65	13,5	850-910	100	1573	3-14
КТП	25-33	-	-		-	14,5-16,1	-	80	-	-

ТЕМА №7. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ КАК ФАКТОР ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ТЕХНОЛОГИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

ЛЕКЦИЯ №13

1. **Роль покрытий в создании требуемого комплекса свойств изделий**
2. **Общая характеристика покрытий в эволюции инструментальных материалов**
3. **Основные методы осаждения покрытий на режущий инструмент. PVD-технология**

1. В последние 25…30 лет особое внимание в определении комплекса эксплуатационных свойств изделий уделялось роли поверхностных слоев и методам их модификации.

Практическое использование этого обстоятельства позволило разработать различные способы модификации поверхности материалов. Наиболее эффективный из них – нанесение покрытий толщиной 0,01…100 мкм из различных материалов с заданными структурой и физико-механическими свойствами.

При помощи покрытий можно существенным образом изменить механические, физические и химические свойства исходного материала и получить изделия с требуемыми функциональными свойствами, например, с высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью. В этом направлении уже накоплен достаточно большой опыт исследований и разработок.

Покрытие – искусственно сформированный на поверхности изделия или конструкции слой, отличающийся от материала основы по составу и физико-механическим свойствам, служащий для ее защиты от внешних воздействий и (или) повышения и (или) придания новых эксплуатационных свойств.

В зависимости от назначения покрытий их заданные функциональные параметры могут быть различными, однако есть ряд общих характеристик и требований, присущих всем покрытиям: равнотолщинность, адгезионная прочность, определенные параметры структуры (размер зерен, направленность кристаллитов и т.д.).

Осаждение покрытия означает не просто повышение или улучшение эксплуатационных характеристик изделия, а создание, по существу, принципиально новой композиции, обладающей не суммой характеристик основы и покрытия, а качественно иными, часто весьма высокими свойствами, кото-

рые позволяют изменить конструкцию детали или узла, значительно повысить производительность машин, механизмов, инструментов при увеличении их надежности и долговечности.

Будучи основанными не на отделении объемов материала от заготовки, а на послойном наращивании деталей до достижения необходимых характеристик, технологии осаждения покрытий по своей сути относятся к генеративным технологиям микроуровня, т.е. формируют поверхностные слои материала в микрометрическом диапазоне размеров.

2. Работоспособность режущего инструмента является функцией сложных процессов контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов, определяемых большим числом различных факторов.

К ним относятся свойства обрабатываемого и инструментального материалов, зависимость их от условий процесса резания, геометрия режущей части инструмента, наличие смазочно-охлаждающих технологических средств и условия их применения, режимы обработки и кинематика перемещения взаимодействующих поверхностей инструмента и заготовки и т. д. К числу важнейших факторов, определяющих работоспособность режущего инструмента, относятся свойства инструментального материала.

При этом следует отметить, что некоторые из них являются взаимоисключающими, см. Л. №3. Например, рост твердости и теплостойкости приводит к снижению прочностных характеристик и ударной вязкости. Поэтому сочетать такие свойства в объеме монолитного тела, составляющего режущую часть инструмента, практически невозможно.

Работоспособность режущего инструмента во многом определяется условиями контактного взаимодействия на его рабочих поверхностях. В связи с этим большое внимание уделяется *методам поверхностного упрочнения режущего инструмента.* Применение данных методов позволяет получить высокую твердость и износостойкость его поверхностного слоя в сочетании с высокой прочностью и вязкостью основы, что обеспечивает существенное повышение эксплуатационных свойств.

Одним из перспективных способов повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности ***износостойких покрытий***.

Из разработанных в нашей стране и за рубежом методов осаждения покрытий наиболее широкое применение ***получил метод конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (метод КИБ)***. Данный метод уни-

версален с точки зрения нанесения износостойких покрытий различного состава и строения, позволяющих изменять свойства поверхностного слоя как твердосплавного, так и быстрорежущего инструмента в широких пределах.

В промышленно развитых странах выпуск режущих пластин с износостойкими покрытиями составляет 60…90% от общего выпуска твердосплавных пластин и около 70% всех типов инструментов из быстрорежущей стали.

3. ***По критерию сущности процессов формирования все методы получения покрытий на рабочих поверхностях машиностроительных деталей и инструментов можно разделить на три основные группы.***

▲К первой группе относят ***химико-термические методы (ХТМ)*** образования покрытий, основанные на твердофазовом, жидкостном или газофазовом насыщении поверхностей изделия (*TCVD - Thermo-Chemical Vapour Deposition*).

Данные методы основаны на формировании покрытий преимущественно за счет диффузионных реакций между насыщаемыми элементами и основой. Их общая черта – *насыщение поверхностных слоев инструмента различными элементами за счет диффузии из окружающей среды при повышенных температурах с образованием насыщенных твердых растворов и износостойких химических соединений диффундируемого элемента с основным компонентом сплава*.

Примеры: *цементация, азотирование, борирование, силицирование, алитирование, хромирование, титанирование* и т.д.

Методы ХТМ позволяют получать покрытия толщиной 10 мкм…1 мм, что дает возможность увеличить стойкость деталей, различных типов инструментов из быстрорежущих и углеродистых сталей в 1,5…2 раза.

▲ ***Методы химического осаждения покрытия из паровой (парогазовой) фазы – методы ХОП (***в мировой практике – ***CVD - Chemical Vapour Deposition*).

Формирование покрытия по этой технологии происходит по комплексному механизму: покрытие образуется в результате химических реакций между парогазовыми смесями, содержащими соединения насыщающего элемента-металлоносителя, и термодиффузионных реакций между насыщающим элементом (конденсатом) и материалом изделия. Методы ХОП получили широкое распространение для нанесения покрытий на лезвийные инструменты, например, на неперетачиваемые твердосплавные пластинки.

Основным недостатком данной группы методов является необходимость нагрева изделий, на которые осаждается покрытие, до высоких температур, что, с одной стороны, отрицательно влияет на механические свойства и структуру подложки, а, с другой, вызывает дополнительные проблемы при получении требуемого структурного состояния (высокие температуры осаждения ограничивают возможности регулировки размеров зерен).

▲ ***К третьей группе могут быть отнесены методы физического осаждения покрытий, которые получили название в мировой практике PVD (PVD - Physical Vapour Deposition***).

Эта группа объединена общей схемой нанесения покрытия и использованием вакуума, рис.6.

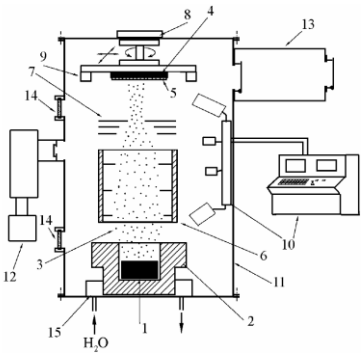


Рисунок 6 – Типичная схема установки для нанесения покрытия *PVD*-методом: *1*- материал для покрытия, *2*- система перевода материала в паровую фазу, *3*- поток испарившегося вещества, *4* - подложка, *5* - формирующееся покрытие, *6* - система транспортировки материала покрытия в паровой фазе к подложке, *7*- система фокусировки (и/или сканирования) потока вещества, осаждающегося на подложку, *8* - система закрепления подложки и ее контролируемого перемещения, *9* - система регулирования температуры нагрева подложки, *10* - система управления и контроля технологическими параметрами (температура подложки, скорость перевода материала в паровую фазу, давление в камере, скорость осаждения покрытия, толщина покрытия и др.), *11*- вакуумная камера, *12*- система создания и поддержания высокого вакуума (система вакуумных задвижек, форвакуумных и высоковакуумных насосов, азотная ловушка и др.), *13* - шлюзовая камера и система подачи и смены подложек, *14*- смотровые контрольные окна, *15* - система охлаждения

Материал покрытия переводится из конденсированного состояния в состояние пара (испарением или распылением), затем проводится его транспортировка к подложке (материалу, на который наносится покрытие), где и происходит осаждение материала покрытия из паровой фазы и формирование собственно покрытия.

Т.о., основными стадиями осаждения покрытия методом *PVD* являются:

♦ генерация (образование) корпускулярного потока вещества (испарением или распылением);

♦ его активизация, ускорение и фокусировка;

♦ конденсация на поверхность детали (подложки).

Все методы осаждения покрытий характеризуются такими параметрами, как скорость получения покрытий и диапазон достигаемых толщин. Например, для CVD и PVD это обычно от 1 до 1000 мкм/час и 10^{-2}…10 (100) мкм. Для химических методов – 100…1000 мкм/час и 10^{-1}…1000 мкм.

Первая группа TCVD скорее принадлежит к методам модификации приповерхностного слоя, нежели к методам формообразования. Т.о., ***послойное наращивание изделий реализуется методами CVD и PVD***. Они позволяют в той или иной последовательности наращивать слои разной толщины, разного функционального назначения и т.о. конструировать приповерхностную область изделия, обеспечивая его необходимыми свойствами.

Методы физического осаждения из паровой фазы (PVD) обладают рядом преимуществ, основными из которых являются:

- возможность получения равномерных слоев широкого диапазона толщин – от 1 нм до 200 мкм;
- достаточно большой диапазон площадей подложки, на которую наносится покрытие;
- возможность нанесения покрытия на селективные (избирательные) участки подложки;
- широкое сочетание вариантов материалов подложка-покрытие;
- гибкость к требованиям по температуре подложки;
- возможность получения многослойных покрытий;
- изменение состава, структуры и свойств покрытия благодаря изменению технологических параметров осаждения покрытия;
- экологическая чистота.

PVD- методы позволяют также более эффективно, по сравнению с методами 1) и 2), управлять процессами получения покрытий с заданными свойствами, предупреждать образование геометрических, кристаллохимических и физико-механических дефектов на поверхностных слоях изделия.

Преимущества методов, которые относятся к третьей группе (PVD), а также их высокая степень управляемости делают данные технологии нанесения износостойких покрытий наиболее перспективными.

PVD-технологии синтеза покрытий получили широкое распространение в мировой практике производства благодаря своей универсальности, возможности синтеза покрытий разнообразного состава и конструкции в широком температурном диапазоне (100…1000°С). При низкой дефектности слоев возможна реализация «теоретической» прочности материала и получе-

ние покрытий, которые обеспечивают максимальное повышение эффективности и надежности изделий.

Назначение и области применения *PVD*-покрытий достаточно широки – от бытовой промышленности до машиностроения, авиации, космической промышленности.

ЛЕКЦИЯ №14

1. **КИБ-технология осаждения покрытий на режущий инструмент**
2. **Основные материалы покрытий и их физико-механические свойства**
3. **Многослойно-композиционные покрытия**

1. Методы *PVD*, получившие широкое распространение при нанесении функциональных покрытий на режущий инструмент, достаточно разнообразны по способам реализации, в т.ч. по типу генерации потока частиц, его транспортировке, механизмам осаждения на подложку и т.д.

Широкое распространение в инструментальной практике получил метод конденсации в вакууме на поверхность подложки вещества из плазменной фазы с ионной бомбардировкой – ***метод КИБ (arc-PVD- вакуумно-дуговое нанесение покрытий).***

Этот метод дает возможность наносить высокопрочные и износостойкие покрытия на рабочие грани инструмента, изготовленного из твердых сплавов, быстрорежущих и инструментальных сталей.

Метод реализуется разными способами, например, на установках, обеспечивающих испарение генерируемого материала катодным пятном вакуумной дуги с холодным катодом, рис. 7.

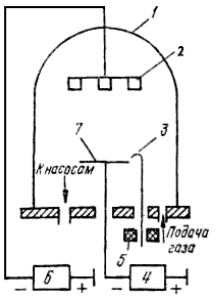


Рисунок 7 – Схема синтеза покрытий из плазмы злектродугового разряда с холодным катодом *(метод КИБ):*

1 - корпус вакуумной камеры (анод); *2* - обрабатываемые детали;
3 - электромеханический поджег дуги; *4* - источник питания дуги;
5 - электромагнит; *6* - источник питания для подачи отрицательного потенциала на подложку; *7* - напыляемый материал (катод)

Вакуумно-дуговой процесс испарения начинается с зажигания вакуумной дуги, характеризующейся высоким значением тока и низким напряжением. Далее дуга формирует на поверхности катода (мишени) одну или несколько точечных (размером от единиц до десятков микрометров) эмиссионных зон, так называемых «катодных пятен», в которых концентрируется вся мощность разряда. Результатом этого является высокий уровень ионизации (30…100%) образующихся плазменных потоков, состоящих из многократно заряженных ионов, нейтральных частиц, кластеров.

При подаче в вакуумную камеру соответствующего газа-реагента во время электродугового испарения тугоплавкого металла можно получать покрытия на основе нитридов, карбидов и других соединений металлов IV…VI групп Периодической системы элементов (Ti, Zr, Hf, Va, Nb, Ta, Cr, Mo, W).

При помощи данной технологии может быть синтезирован широкий спектр сверхтвердых и нанокомпозитных покрытий, включая TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN и TiAlSiN.

Также эта технология достаточно широко используется для осаждения алмазоподобных углеродных пленок.

Важной особенностью данного метода является возможность проведения эффективной ионной очистки поверхности изделия путем интенсивной бомбардировки ее ускоренными ионами распыленного вещества, что создает условия для высокой адгезии покрытия к подложке.

Улучшать качество нанесения износостойких покрытий позволяет ***разработка комплексной технологии, включающей предварительную химико-термическую обработку подложки с последующим нанесением покрытия, например, предварительное ионное азотирование контактных площадок инструмента и осаждение покрытий по методу КИБ***.

Преимущество комплексного технологического процесса заключается в возможности совмещения обеих операций в одном технологическом цикле при использовании вакуумно-плазменных установок нового поколения.

Анализ вакуумных методов нанесения покрытий показывает, что производительность наращивания слоев методом КИБ превосходит другие методы, обеспечивает высокое качество покрытий, гарантирует приоритетное положение и преимущественное развитие технологии в условиях серийного производства.

2. *Исходя из функционального назначения основными требованиями (с точки зрения физико-химических, механических и эксплуатационных*

свойств) к материалу износостойких покрытий, наносимых на поверхность инструментального материала ионно-плазменным синтезом, являются следующие:

1) *высокий уровень механических свойств* – твердости, прочности, пластичности, усталостной прочности;

2) *высокая износостойкость* (свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения);

3) *высокие теплофизические свойства* – теплостойкость, теплопроводность;

4) *определенное значение коэффициента термического расширения*. Знание к.т.р. дает возможность выбирать оптимальное сочетание материала покрытия и основного металла для работы при повышенных температурах; рассчитывать одну из основных важнейших характеристик покрытия – величину остаточных напряжений, прогнозировать работоспособность изделий с покрытиями при термоусталостном нагружении;

5) одним из основных требований при выборе материала покрытия и метода его нанесения является *высокая прочность соединения материала покрытия с основой (адгезионная прочность* – сила связи между основным металлом и покрытием, отнесенная к единице их общей поверхности). *Эта характеристика считается одним из самых основных критериев, которые определяют как область применения, так и эксплуатационные характеристики покрытия;*

6) *стабильность указанных свойств в рабочем диапазоне температур, временная стабильность свойств;*

7) дополнительными требованиями к выбору материала покрытия могут быть требования *обеспечения особых свойств поверхности, определяемых условиями эксплуатации изделия, - жаростойкость, заданный коэффициент трения, химическая инертность к обрабатываемому материалу, коррозионная стойкость, биоинертность* и т.д.

Определенные требования также предъявляются к инструментальному материалу с покрытием - как единому композиционному материалу. Материалы покрытия и основы должны иметь:

1) *сродство кристаллохимического строения, при котором возможно обеспечить прочную адгезионную связь между ними*;

2) *оптимальное соотношение основных физико-механических и теплофизических характеристик* (модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент термического расширения, тепло- и температуропроводность);

3) *снижение склонности указанной пары к твердофазным диффузионным реакциям во всем диапазоне температур и напряжений в условиях эксплуатации*.

Кроме того, *одним из общих требований является возможность получения покрытия простым и экономичным способом*.

Наиболее полно указанным требованиям при синтезе покрытий (износостойких, упрочняющих, фрикционных) ***на режущем инструменте отвечают нитридные, карбидные, карбонитридные, боридные, силицидные и другие соединения переходных тугоплавких металлов IV-VI групп периодической системы элементов, осаждаемые с помощью ионно-плазменной технологии.***

Уникальность свойств соединений металлов IV-VI групп Периодической системы элементов обусловлена особенностями их кристаллохимического строения, высокой энергией связи в кристаллической решетке.

Характерной особенностью этих металлов является наличие у них дефицита электронов на внутренних электронных орбитах *s, p, d*, что делает их весьма восприимчивыми к приобретению электрона из любого источника. Таким источником могут быть межузельные атомы углерода, азота, кислорода.

Большинство соединений указанных металлов имеет широкие области гомогенности, что позволяет в зависимости от содержания кислорода, азота и углерода достаточно сильно изменять их физико-механические свойства. Последнее обстоятельство очень важно с точки зрения возможности *варьирования свойств покрытий в зависимости от условий применения.*

Переходные металлы и некоторые их соединения имеют высокую температуру плавления, причем наибольшую температуру плавления имеют соединения с простой кубической структурой типа TiC, TiN, ZrC, ZrN, HfC, HfN, VC, NbC, TaC.

Некоторые физико-механические свойства наиболее распространенных материалов покрытий, наносимых на режущий инструмент, приведены в таблице 21.

Таблица 21 - Физико-механические свойства материалов покрытий на режущем инструменте

Соединение	Период кубической решетки, нм	Плотность, г/см^3	Температура плавления, ^{0}C	Микротвердость H, ГПа	Предел прочности, МПа		
					на растяжение	на сжатие	на изгиб
TiC	0,4319	4,93-4,96	□ 3250	31,7	65	1380	5
ZrC	0,4698	6,9	3330-3530	29,5	76	834	75,1
HfC	0,4641	12,2	3740-4040	28,3	-	-	-
TiN	0,4230	5,44	2950	20,5	-	1298	240
ZrN	0,4575	7,35	2980	15	-	1000	-
HfN	0,4520	13,39	3310	16	-	-	-

3. Наряду с рядом бесспорных преимуществ покрытия из соединений тугоплавких металлов имеют и определенные недостатки и не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам покрытий. Поэтому в настоящее время все большее применение находят ***многослойные композиционные покрытия с переменными свойствами и химическим составом.***

Целесообразность их применения обусловлена следующими факторами.

▲Открывается возможность использования хрупких и кристаллохимически несовместимых с инструментальным материалом систем, *обладающих наибольшей термодинамической устойчивостью* среди известных соединений. К таким системам можно отнести: окислы (например, Al_2O_3), некоторые бориды и нитриды. *Указанные системы наиболее целесообразно использовать в многослойных композиционных покрытиях в качестве* ***барьерных слоев****, которые эффективно сдерживают диффузионные процессы, служат своеобразным термоизолирующим слоем, снижают склонность к коррозии и окислению при высоких температурах.*

▲Основной объем металлообработки составляют стали и чугуны. Быстрорежущая сталь, один из основных инструментальных материалов, также имеет железную основу, поэтому необходимо, чтобы внешняя сторона покрытия обладала низкой схватываемостью с железом, а внутренняя, наоборот, сильной. Менее наглядно, но столь же остро стоит проблема адгезии покрытия и для твердосплавного инструмента. Естественный способ ее решения заключается в нанесении на инструменты *многослойных покрытий, в которых нижний слой должен состоять из материала с высокой адгезионной активностью по отношению к инструментальной подложке, внешний – из материала, имеющего слабое адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом, а промежуточный (или переходной) должен гарантировать плавный переход по химическому и фазовому составу от нижнего слоя к внешнему.*

▲ *На принципе многослойности основано решение проблемы повышения прочности покрытий*. Современная физика прочности кристаллических тел, основанная на дислокационных представлениях, связывает получение высокопрочных состояний с малой толщиной объекта. По сравнению с массивным состоянием твердого тела при переходе к тонким слоям ($\delta < 1$ мкм) прочность возрастает, а склонность к хрупкому разрушению снижается. Вме-

сте с тем столь тонкие покрытия, даже весьма износостойкие, быстро истираются. Физика прочности дает рецепт получения массивного высокопрочного покрытия в виде сэндвича, в котором тонкие слои одного состава перемежаются столь же тонкими слоями другого состава. При этом образующаяся между слоями межфазная граница обладает высокой энергией; прочностные свойства покрытия в целом повышаются.

Идеализированная схема многослойного покрытия для режущего инструмента, которая позволяет понять общий подход к проблеме создания многослойного композиционного покрытия, приведена на рис.8.

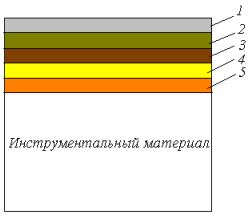
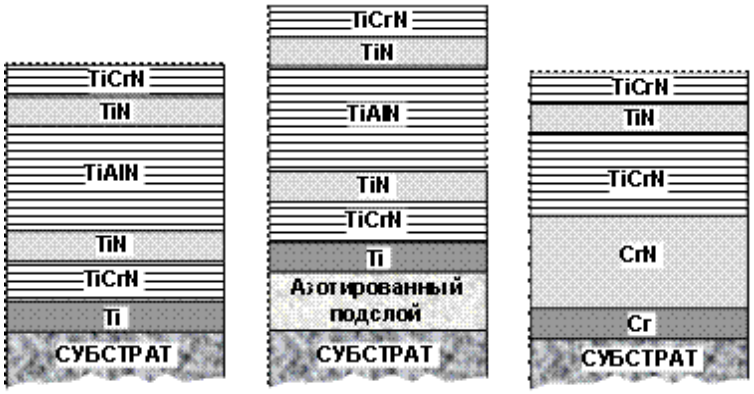


Рисунок 8 – Идеализированная схема композиционного многослойного покрытия:
1 - наружный слой, осуществляющий контактное взаимодействие с обрабатываемым материалом; *2,4* - □ промежуточные слои с переменными свойствами, осуществляющие связь между слоями *1,3,5; 3* □- барьерный слой, увеличивающий термодинамическую устойчивость покрытия или выполняющий другие функции; *5* □ - слой, связывающий покрытие с инструментальной основой

Некоторые варианты многослойно-композиционных составов, рекомендуемые для режущих инструментов, приведены на рис.9, в табл. 22.



а *б* *в*

Рисунок 9 – Износостойкие комплексы на твердосплавном инструменте для обработки заготовок из конструкционных сталей (*а*), инструменте из быстрорежущей стали (*б*), для штампового инструмента (*в*)

Таблица 21 – Рекомендуемый состав покрытий для нанесения на режущие инструменты, предназначенные для обработки труднообрабатываемых материалов

Обрабатываемый материал	Покрытие	Рекомендуемый инструментальный материал	Ориентировочное значение скорости резания *V*, м/мин.		Повышение стойкости инструмента при нанесении покрытия (резание при оптимальной скорости)
			без покрытия	с покрытием	
Коррозионно-стойкие стали ферритного, мартенситного классов (типа 08Х13,12Х13, 1Х12Н2ВМВ)	(Ti,Cr)-(Ti,Cr)N-TiN (Ti,Zr)-(Ti,Zr)N-ZrN Zr-(Nb,Zr)-ZrN Ti-(Ti,Al)N-Al_2O_3	ВК6-М, ВК6, ТТ10К8-Б	140-160	170-200	2,5-3,5
Коррозионно-стойкие, жаропрочные стали аустенитного класса (типа Х18Н10Т, Х18Н12Т, Х23Н18, Х15Н5)		ВК6-М, ВК6, ТТ10К8-Б	120-150	155-180	2,0-2,8
		Р6М5К5, Р12Ф4К5	10-20	15-28	1,5-2,2
Жаропрочные, жаростойкие хромоникелевые стали (типа Х12Н20Т3Р)		ВК6, ТТ10К8-Б	50-60	60-70	1,8-2,2
Сплавы на титановой основе (типа ВТ1, ВТ3, ВТ6, ВТ14, ВТ20, ВТ22)	Zr-(Nb,Zr)-ZrN Cr-(Mo,Cr)N-CrN Zr-(Zr,Cr)N-(Zr,Cr,Al)N	ВК6	40-50	55-80	1,8-2,5
Жаропрочные деформированные сплавы (типа ХН60В, ХН77ТЮ, ХН77ТЮР, ХН35ВТЮ)	(Ti,Cr)-(Ti,Cr)N-TiN (Ti,Cr)-(Ti,Cr,Al)N-(Ti,Al)N Cr-(Mo,Cr)N-CrN	ВК6, ТТ10К8-Б	20-45	25-60	1,8-2,5

ТЕМА №8. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА НА БАЗЕ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

ЛЕКЦИЯ №15,16

1. **Особенности структуры, механических и эксплуатационных свойств наноматериалов**
2. **Основные группы наноматериалов инструментального назначения**
3. **Наноструктурные покрытия**
4. **«Интеллектуальные» материалы**

1. *Разработка новых материалов и технологий их получения и обработки общепризнанно относится к ключевым или критическим направлениям современного этапа развития цивилизации.*

Создание материалов с принципиально новым уровнем функциональных свойств как результата наноразмерности (в т.ч. конструкционных и инструментальных материалов, покрытий с наноструктурой, «интеллектуальных» материалов) *является приоритетным направлением развития нанотехнологий – одной из ведущих инновационных тенденций современной науки, техники, технологий*, рис. 10.

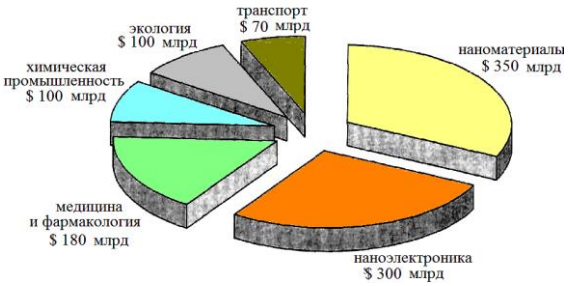


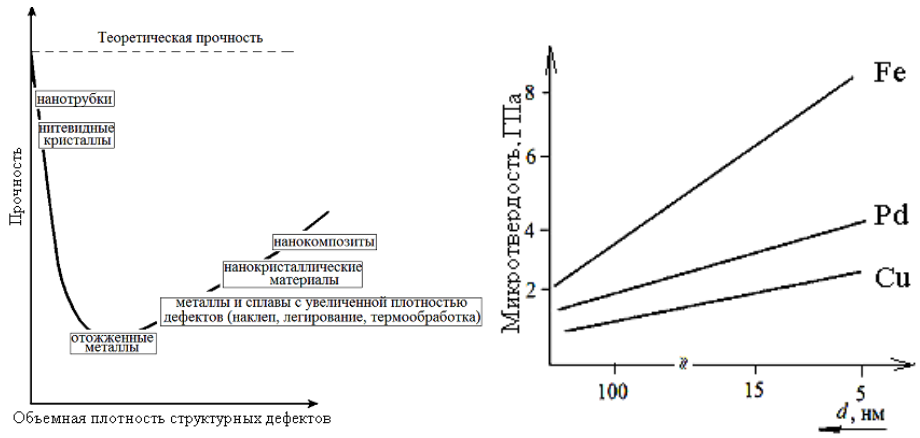
Рисунок 10 – Основные секторы рынка продукции нанотехнологий (миллиардов долларов в ближайшие годы)

На основе нанотехнологических принципов уже реализованы образцы наноструктурированных сверхтвердых, сверхпрочных, сверхлегких, коррозионно- и износостойких материалов и покрытий.

Наноматериалы доминируют на мировом нанотехнологическом рынке: их доля в объеме продаж превышает 90 %.

Одним из важнейших направлений создания принципиально нового класса инструментальных материалов с заданным уровнем свойств, возможное решение проблемы свойств-«антагонистов», см. Л.№3, является нанотехнологический подход.

Наноструктурные материалы (и нульмерные – дисперсные, кластерные, и одномерные – нанотрубки, нановолокна, и двумерные – нанослойные покрытия, и трехмерные или объемные – с размером зерна нанометрического диапазона, нанокристаллические покрытия) демонстрируют значительно более высокие по сравнению с традиционными аналогами значения многих характеристик механических свойств – предела текучести, временного сопротивления, твердости, ударной вязкости, усталостной прочности и т.д., рис.11.



а *б*

Рисунок 11– Прочность современных материалов (*а*); влияние размера зерна на микротвердость материалов (*б*)

Поскольку большинство механических свойств являются структурно чувствительными, ***подобная «аномалия» механических свойств у наноматериалов объясняется особенностями их структуры,*** совокупностью размерных эффектов, характерных для материала в наносостоянии:

- *существенным увеличением доли приповерхностных атомов* (это особенно актуально для дисперсных и кластерных структур), что вызывает искажения кристаллической решетки, приводит к эффективному стоку дефектов кристаллической решетки и, в итоге, предопределяет особые поверхностные эффекты механических свойств;

- *большой объемной долей границ зерен*, что наиболее ярко проявляется в объемных наноматериалах, где доля межзеренных границ составляет 50…90 % при уменьшении размера зерна от 100 до 1 нм. Данная особенность структуры приводит к эффектам скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы, изменению механизмов прочности и пластичности в наноматериалах, обусловливает повышение микротвердости;

- *совпадением размеров кристаллитов с «характерными» размерами для различных физических явлений и свойств*, что сказывается на изменении явлений теплопереноса, пластической деформации и т.д.

Уникальной особенностью наноматериалов является то, что присущая им высокая прочность дополняется зачастую и высокой пластичностью или даже сверхпластичностью, т.е. достигается оптимальное сочетание свойств прочность-пластичность, рис.12.

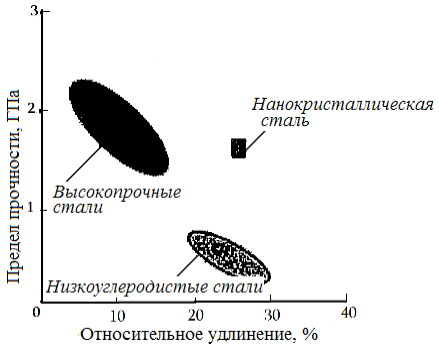


Рисунок 12 – Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей

Уменьшение структурных элементов (размеров зерен) ниже критических приводит к проявлению специфических недислокационных механизмов пластической деформации, т.к. благодаря малому размеру зерен вероятность появления подвижных дислокаций в зерне чрезвычайно мала. «Включается» особый механизм деформации в виде зернограничного некристаллографического скольжения, уже при низких температурах конкурирующий с действием стандартного кристаллографического внутризеренного дислокационного скольжения и двойникования.

Наряду с увеличением механических характеристик наблюдается также рост многих показателей эксплуатационных свойств наноматериалов, в частности, износостойкости, что весьма важно для инструментальных материалов.

2. *Наноматериалы представляют значительный интерес с точки зрения использования их в качестве* ***инструментальных.*** *Предпосылками для этого являются их высокие механические свойства (в частности, прочность, твердость), более высокие по сравнению с традиционными материалами износостойкость, термостойкость, сочетание высокой прочности и пластичности.*

♦ Например, *нанопорошки уже применяются в качестве абразива для сверхтонкой механической обработки поверхностей деталей*. Так, нанопорошки металлов с включениями карбидов используют в качестве шлифующего и полирующего материала на конечных стадиях обработки полупроводников, диэлектриков.

♦ *Составы на основе наноалмазов применяются для полировки материалов для электроники, оптики, медицины, машиностроения, ювелирной промышленности* и позволяют получать бездефектную зеркальную поверх-

ность твердых тел любой геометрической формы с высотой неровностей поверхности до 2…8 нм.

♦ *Весьма перспективны в качестве инструментальных керамические материалы в наноструктурном состоянии* на основе оксида алюминия Al_2O_3, оксида циркония ZrO_2 , карбидов тугоплавких металлов, см. Л.№8.

Например, на основе нанопорошков карбида вольфрама WC и кобальта Co, а также на основе TiC/Fe разработаны нанокомпозитные металлокерамические материалы, значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой.

Некоторые фирмы уже используют подобные материалы для изготовления металлообрабатывающего инструмента, например, микросверел для обработки печатных плат.

Существует также опыт производства и применения твердосплавных наноструктурных инструментальных материалов на основе монокарбида вольфрама без кобальтовой связки (ВОЛКАР), которые перспективны для применения в процессах высокоскоростной обработки различных труднообрабатываемых металлов и сплавов и могут заменить дорогостоящие инструменты на основе алмаза и кубического нитрида бора.

Основные области применения данных материалов – износостойкие инструменты для различных технологий обработки, например, режущие инструменты (сверла, фрезы), микросверла и другие виды инструмента для электронной промышленности, инструменты для обработки давлением (прокатные валки, штампы), горнорудное оборудование, деревообрабатывающие инструменты, фрезы для стоматологии и т.д.

♦ *Существуют разработки по применению упрочняющих нанодобавок (углеродных нанотрубок) для алмазно-абразивного инструмента на металлических связках.* Введение в состав связки углеродных нанотрубок существенно повышает ее физико-механические свойства и адгезию к алмазным зернам.

♦ *Возможно также создание новых высокотвердых инструментальных материалов и прецизионных инструментов на основе углеродных кластеров – фуллеренов, нанотрубок для испытания материалов*. Например, на основе фуллеренов созданы пирамидальные инденторы для измерения твердости алмазов и алмазных пленок; нанотрубки используются в качестве игл (диаметром порядка нескольких атомов) сканирующих зондовых микроскопов и т.д.

3. Уровень свойств, обеспечиваемых нанесением на инструментальный материал износостойких покрытий, может быть также существенно повышен благодаря нанотехнологическому подходу.

Разработка технологий конструирования (инженерии) поверхности применительно к созданию функциональных покрытий в настоящее время является одной из наиболее важных задач науки о материалах, большие перспективы в этом направлении связаны именно с ***наноструктурными (нанокристаллическими) покрытиями***.

Методы формирования (путем наращивания на поверхности объектов) покрытий или модифицирования поверхностных слоев достаточно изучены и широко применяются на практике. *Усовершенствованные варианты данных технологий могут рассматриваться как методы нанотехнологии*.

Нанокристаллические покрытия, т.е. покрытия микронной толщины с нанометровым размером кристаллитов, представляют интерес с точки зрения придания материалам (конструкционным, инструментальным) определенных функциональных свойств (высокой твердости, прочности, износостойкости, коррозионной стойкости, трибологических, оптических, декоративных, биологических характеристик), позволяют экономить дорогостоящие металлы, конструировать композиционные материалы. Это обеспечивает широкие возможности их применения в инструментальной промышленности, в микроэлектронике, в медицине.

Некоторые характеристики нанокристаллических покрытий приведены в табл.22.

Таблица 22 – Характеристики нанокристаллических покрытий

Состав	Толщина покрытия, мкм	Размер зерна, нм	Микротвердость *HV*, ГПа
TiN	1…2	5…30	35…50 (21…26)*
TiB_2	1…4	2…8	50…70
Ti(B,N,C)x	2…5	1…5	60…70
TiN/Si_3N_4	2	9	50
TiN/NbN	2	10	78
TiN/NbN	2	10	70 (34)*
TiC/TiB_2	3	1…2,5	71

*В скобках указаны значения микротвердости для покрытий с микрокристаллической структурой

Большое многообразие методов осаждения нанокристаллических покрытий и модифицирования поверхностных слоев, т.е. наноориентированные

технологии обработки поверхности, можно условно разделить на две большие группы – методы, основанные на химических и физических процессах.

Наиболее приемлемы для получения покрытий с нанокристаллической структурой *методы химического и физического осаждения из паровой (парогазовой) фазы – CVD* и *PVD*-технологии, см. Л.№13.

В последнее время среди рассматриваемых технологий растет также роль газотермического метода, использующего в качестве исходного сырья нанопорошки различного состава, в том числе композиционные (оксидные Al_2O_3-TiO_2, Al_2O_3-ZrO_2, Cr_2O_3-TiO), а также осаждение из коллоидных растворов (для получения полупроводниковых покрытий ZnO, SnO_2, TiO_2 и т.д.)

Методы физического осаждения из паровой фазы наиболее распространены.

Размер кристаллитов в ионно-плазменных конденсатах составляет 10…20 нм (и даже менее 10 нм).

Основными технологиями, позволяющими управлять размерами зерен покрытий, осаждаемых PVD-методами, и создавать нанокристаллическую структуру, являются низкоэнергетическая ионная бомбардировка и процесс смешивания (модифицирования).

Ионная бомбардировка заключается в управлении механизмом роста формирующихся покрытий при помощи воздействия на поверхность энергии ионов, что приводит к локальному нагреву, экстремально быстрому охлаждению (со скоростью ~ 10^{14} К/с) и способствует увеличению центров зародышеобразования и подвижности атомов, уменьшению количества поверхностных дефектов (вакансий, пор).

Процесс смешивания заключается в добавлении одного или нескольких элементов в основной материал покрытия, которые не растворяются в базовом веществе и сегрегируются (скапливаются) на границах зерен основного компонента в виде мелкозернистого или аморфного слоя, препятствуя росту основной фазы.

Так формируются *нанокомпозитные покрытия*, состоящие из основной нанокристаллической фазы, на границах зерен которой располагается тонкий слой (~ 1 нм) второй нанокристаллической или аморфной фазы (содержание второй фазы ~ нескольких процентов), рис.13.

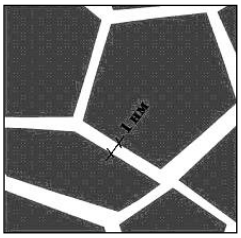


Рисунок 13 – Покрытие с нанокомпозитной структурой

Примеры составов подобных композиций – TiN/TiB_2, TiN/ZrN, TiN/Si_3N_4, ZrN/BN и т.д. (вторая фаза – твердая); TiN/Cu, ZrN/Cu, AlN/Cu, ZrN/Ni и т.д. (вторая фаза – мягкая).

Высокая объемная доля границ раздела, практическая бездефектность нанокристаллитов в покрытии, контролируемое соотношение объемных долей различных фаз – все эти факторы приводят к уникальным свойствам нанокомпозитных покрытий, их *многофункциональности*, что проявляется в высоких значениях твердости, величины упругого восстановления, прочности, устойчивости к ударным воздействиям, термической стабильности, жаростойкости и коррозионной стойкости.

Еще один аспект модификации поверхностных слоев инструментальных материалов с помощью нанотехнологий связан с формированием ***многослойной наноразмерной структуры*** в покрытии, что приводит к возникновению качественно новых свойств по сравнению с однослойными покрытиями. Подобные покрытия имеют традиционную толщину (порядка нескольких микрометров, но состоят из большого количества подслоев нанодиапазона, т.е. слоев толщиной до 100 нм).

К числу необычных свойств многослойных наноструктурных покрытий, прежде всего, нужно отнести более интенсивное возрастание прочности, твердости по сравнению с аддитивной (суммарной) прочностью и твердостью отдельных компонентов (слоев), что обусловлено большой удельной долей межфазных поверхностей раздела с присущими для них явлениями, связанными с несоответствием решеток, двусторонней диффузией, торможением дислокаций на межфазных поверхностях и т.д.

Кроме возрастания прочности и твердости, многослойные структуры из пленок нанометровой толщины проявляют ряд других необычных свойств (химических, физичес-ких) и, в зависимости от сочетания материалов слоев, могут быть интересны для различных практических применений.

Получение многослойных наноструктурных сверхтвердых покрытий на основе чередующихся нанослоев тугоплавких соединений (TiN/NbN, TiN/ZrN, (TiAl)N/CrN и т.д.), наиболее перспективных для повышения стой-

кости режущих инструментов, износостойкости различных изделий машиностроения, основано на применении методов физического осаждения вещества в вакууме.

Число слоев в подобных МНП может варьироваться в больших пределах, выбирается в зависимости от решаемых технологических задач и в ряде случаев может достигать двухсот. При этом от их количества (т.е. от толщины каждого слоя) существенно зависят механические свойства, в частности, микротвердость, рис. 14.

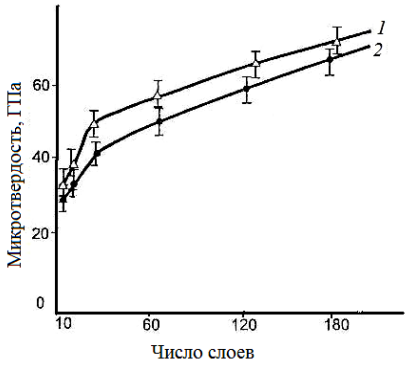


Рисунок 14 – Зависимость микротвердости многослойных покрытий толщиной 2 ± 0,3 мкм TiN/NbN (*1*), TiN/ZrN (*2*) от количества слоев в покрытии (толщины слоя)

С уменьшением толщины слоев твердость многослойных покрытий увеличивается и достигает, например, для TiN/NbN и TiN/ZrN ~ 70 ГПа при толщине слоев ~ 10 нм. Твердость однослойных покрытий этих же материалов составляет 20…30 ГПа.

4. В последние годы особое внимание уделяется созданию так называемых ***«интеллектуальных» наноматериалов*** и интеллектуализации промышленных технологических процессов производства.

«Интеллектуальные» материалы представляют собой логический результат исторического развития в ряду: конструкционный материал → композиционный материал → функциональный материал → «интеллектуальный» материал.

Формирующиеся в настоящее время концепции «интеллектуальных» материалов связывают его функциональные свойства с качествами, присущими живому организму, т.е. со способностью объекта при внешнем воздействии распознавать возникшую ситуацию, реагировать на изменение окружающей среды (сенсорная функция); вырабатывать стратегию поведения, т.е. оценивать ситуацию и делать выводы (процессорная функция); возбуждать

необходимую реакцию, т.е. проявлять исполнительное свойство, при котором материал совершает действие или подает сигналы (эффекторная функция).

Подобные классы «интеллектуальных» материалов позволяют реализовать новые подходы в создании материалов с заранее заданными свойствами.

Предполагается, что *существенный вклад в разработку и развитие указанной концепции должны внести нанотехнологии.*

Примерами проявления «интеллектуальности» материалов, формируемой с помощью нанотехнологий, могут быть следующие свойства.

♦ *Самодиагностика и самовосстановление* поврежденных структур в наномасштабе (выявление различного рода дефектов и их устранение).

♦ *Перестройка наноструктур при внешнем воздействии*.

♦ *Избирательная реакция* на различные внешние воздействия на молекулярном уровне и т.д.

♦ *Проектируемый катализ*, т.е. контроль химической активности веществ на наноуровневом локальном масштабе, что позволяет значительно экономить сырье и получать заданную структуру материала.

Таким образом, проектирование на наноуровне позволяет создавать материалы, которые могут динамически реагировать на внешнее воздействие («ремонтировать» себя или изменять свои функциональные характеристики), их поведением можно управлять по заранее созданной программе, и в этом плане они являются «интеллектуальными».

Многие из указанных проявлений «интеллектуальности» наноматериалов могут быть реализованы для создания инструментальных материалов с новым уровнем свойств.