

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

**А. М. Капитонов, С. Г. Теремов, В. Е. Редькин**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
ДИНАМИЧЕСКОЙ УПРУГОСТИ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА  
ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА**

**Монография**

Красноярск  
СФУ  
2011

УДК 321.9.025  
ББК 34.599  
К20

Р е ц е н з е н т ы: Г. Н. Чурилов, д-р техн. наук, проф.;  
В. А. Полубояров, д-р. хим. наук, проф.

**Капитонов, А. М.**  
К20      Применение метода динамической упругости для контроля качества твердосплавного инструмента : монография / А. М. Капитонов, С. Г. Теремов, В. Е. Редькин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 192 с.  
ISBN 978-5-7638-2086-7

Применен системный анализ физико-механических свойств твердых сплавов на основе системы карбид вольфрама – кобальт. Представлены расчеты влияния состава и структуры на динамические упругие постоянные твердых сплавов. Выполнено сравнение теории с экспериментом. Обоснован экспериментальный метод контроля качества твердых сплавов.

Предназначена для научных сотрудников и аспирантов, специализирующихся в физике твердого тела, материаловедении, а также технологов и инженеров производства твердосплавного инструмента.

**УДК 321.9.025**  
**ББК 34.599**

ISBN 978-5-7638-2086-7

© Сибирский федеральный  
университет, 2011

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ.....	10
1.1. Сведения о сплавах системы карбид вольфрама – кобальт.....	10
1.2. Показатели физико-механических свойств твердых сплавов.....	13
1.2.1. Общие положения.....	13
1.2.2. Механические состояния.....	17
1.2.3. Представление результатов исследований физических свойств.....	19
1.2.4. Упругие свойства твердых сплавов.....	22
1.2.5. Предел упругости, предел пластичности.....	36
1.2.6. Прочность.....	38
1.2.7. Предел прочности на растяжение.....	40
1.2.8. Твердость.....	41
1.2.9. Предел прочности на сжатие.....	43
1.2.10. Предел прочности на изгиб.....	44
1.3. Методологические принципы установления корреляционных связей между физико-механическими характеристиками материалов.....	45
1.3.1 Общие положения.....	45
1.3.2. Корреляционные связи: твердость, прочностные параметры и упругие модули.....	46
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ УПРУГОСТИ.....	54
2.1. Предельные значения упругих характеристик композиционных материалов.....	54
2.1.1. Предельные значения упругих характеристик однофазных поликристаллов.....	56
2.1.2. Предельные значения упругих характеристик композиционных материалов.....	60
2.2. Теория расчета упругих характеристик двухфазных композиционных материалов.....	60

2.2.1. Метод Фойгта и Реусса.....	61
2.2.2. Метод Хашина – Штрикмана.....	62
2.2.3. Метод самосогласования (ССМ).....	64
2.2.4. Методы статистической микромеханики.....	65
2.2.5. Упругие модули сплавов системы $WC - Co$ (расчет).....	80
2.2.6. Влияние структурных дефектов (пор и микротрещин) на упругие модули композиционных материалов.....	86
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ $WC - Co$ .....	
3.1. Плотность и упругие модули ВК-сплавов.....	91
3.2. Экспериментальные исследования упругих свойств сплавов системы $WC - Co$ , полученных горячим прессованием с использованием плазмoeлектролитного нагрева.....	95
Глава 4. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ УПРУГОСТИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ....	
4.1. Обоснование физических моделей.....	110
4.1.1. Понятие стехиометрии композиционных материалов.....	111
4.1.2. Связь между компонентами твердого сплава....	114
4.1.3. Влияние кобальта на упругие свойства ВК-сплавов.....	115
4.1.4. Изменение фазового состава от содержания углерода.....	116
4.1.5. Морфологические особенности структуры.....	117
4.1.6. Легирование металлической связки – $\gamma$ -фаза.....	119
4.1.7. Дефекты твердых сплавов.....	120
4.2. Описание физических моделей и результаты расчетов влияния фазового состава и структуры на упругие характеристики ВК-сплавов.....	120
4.2.1. Влияния содержания кобальтовой связки.....	120
4.2.2. Влияние $\gamma$ -фазы на упругие свойства твердых сплавов.....	123
4.2.3. Влияние включений графита на упругие модули твердых сплавов.....	126

4.2.4. Влияние $\eta_1$ -фазы на упругие модули твердых сплавов.....	137
4.2.5. Влияние пористости и микротрещиноватости на упругие модули твердых сплавов.....	138
4.3 Выбор предельных значений упругих модулей твердых сплавов.....	140
4.4. Информативность метода динамической упругости....	142
 Глава 5. ВЫБОР МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ УПРУГОСТИ.....	
5.1. Общая характеристика методов определения упругих характеристик твердых тел.....	148
5.2. Методы бегущих волн (импульсные методы).....	150
5.2.1. Импульсный метод с ударным возбуждением акустического сигнала.....	152
5.2.2. Импульсный метод с квазигармоническим возбуждением акустического сигнала.....	153
5.2.3. Импульсно-фазовый метод.....	155
5.3. Экспериментальные исследования по обоснованию точности измерения скоростей распространения упругих волн в твердых телах.....	158
5.3.1. Изменение формы акустического сигнала при ударном возбуждении.....	159
5.3.2. Квазигармоническое возбуждение.....	165
5.3.3. Импульсно-фазовый метод. Учет фазового сдвига.....	166
5.4. Сравнение результатов измерений разными методами для модельного образца пьезокерамики ЦТС-19.....	171
5.5. Система автоматизированного контроля качества твердых сплавов.....	173
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	 177
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	 179

---

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения качества твёрдых сплавов и степени стабильности их свойств в значительной мере зависит от развития технологии получения сплавов, методов изучения структуры, свойств сплавов и организации системы контроля готовой продукции. Многообразные методы исследования и контроля качества твёрдых сплавов по статическим физико-механическим параметрам изложены в монографиях Третьякова (1962) и Чапоровой, Чернявского (1975) и нашли отражение в практике применения твердых сплавов и нормативных документах. ГОСТом 3882-74 нормированы следующие физико-механические свойства сплавов вольфрамовой группы: предел прочности при поперечном изгибе, плотность и твердость.

Метод динамической упругости – неразрушающий метод контроля качества материалов для твёрдых сплавов – не получил широкого применения, и это незаслуженно. Имеются только отдельные исследования, которые направлены на установление связи: упругие свойства – состав – структура твёрдых сплавов.

При создании Милениным (1993) новой технологии получения инструмента из твердых сплавов методом горячего прессованием с использованием плазмoeлектролитного нагрева возникла задача разработки метода неразрушающего контроля качества получаемых твердых сплавов. Эта задача решалась с использованием специально созданной экспериментальной техники для определения в исследуемых объектах скоростей распространения упругих волн разной поляризации, которые являются основой для определения динамических упругих постоянных. Результаты этих исследований положены в основу данной монографии.

Изучение физических свойств твердых тел, в частности физико-механических, представляет собой многоуровневый характер и основывается на системном подходе, требующем выделения структурных уровней системы. Твердые сплавы относятся ко второму ранговому уровню – к многофазным поликристаллам со сложной внутренней структурой. Поликристалл – неупорядоченная среда со статистически однородным распределением по объему структурных элементов – зерен, имеющих морфологическую структуру, обусловленную размером, формой и взаимными геометрическими отношениями зерен.

Твердые сплавы – гетерогенные среды, у которых их неоднородность изменяют два фактора: ориентационную недетерминированность и

вещественную недетерминированность. Первый фактор контролирует анизотропия упругих свойств зерен монокристаллов. Чем выше упругая анизотропия кристалла, тем сильнее неоднородность напряжений и деформаций структурных элементов поликристалла при его нагружении, а соответственно, выше его гетерогенность. Вторым фактором – различие численных значений упругих характеристик отдельных фаз многокомпонентного материала: чем выше отношение этих величин, тем значительнее неоднородность среды.

При изучении физико-механических свойств материалов авторы следовали методологическим принципам, которые отражают системный подход к изучению физических свойств материалов. К этим принципам необходимо отнести: принцип механического воздействия; принцип установления факторов влияния на физико-механические свойства; принцип количественной последовательности и предельных значений механических показателей; принцип структурной чувствительности механических свойств. Принцип предельных значений механических характеристик твердых сплавов требует установления связи: свойство – фазовый состав – морфологическая структура.

Теория предельных значений упругих постоянных однофазных поликристаллов предложена авторами. Экспериментальные значения упругих постоянных поликристаллов совпадают с предельными значениями. Для композиционных материалов, которыми, по сути, являются твердые сплавы, теория предельных значений упругих характеристик находится на стадии разработки.

Первая глава по содержанию отражает методологический подход авторов к изучению физико-механических свойств твердых сплавов. В ней кратко рассмотрены упругие свойства твердых тел как на первом структурном уровне – монокристаллы, так и на втором – поликристаллы. Обсуждаются два независимых описания упругих свойств твердых тел: посредством упругих постоянных и упругих податливостей. Связь между упругими податливостями и упругими постоянными существует и для поликристаллов, и для монокристаллов, при условии, что среда обладает идеальной упругостью. Для сред со сложной внутренней структурой связь между упругими податливостями и упругими постоянными отсутствует, и расчет упругих постоянных из значений упругих податливостей не правомерен.

Поскольку анизотропия упругих свойств кристаллов является одним из важных параметров гетерогенности поликристаллов, то это потребовало обсуждения вопроса о количественной мере упругой анизотропии. Для карбидов существует корреляционная связь между скоростями продольных и поперечных волн, с одной стороны, и средней молекулярной массой – с другой. Определена степень изменения упругих характеристик карбидов при отклонении состава от стехиометрического.

Рассмотрены прочностные и деформационные показатели физико-механических свойств твердых сплавов. Каждый показатель механических свойств твердых сплавов относится к определенному уровню иерархии структурной чувствительности. Между физико-механическими характеристиками материалов существуют определенные корреляционные связи. При установлении этих связей авторы следовали принципу механического состояния и структурной чувствительности физико-механических характеристик. Этот принцип требует установления структурных элементов деформации, которые отражают соответствующий механизм деформирования. Так, за пластическую деформацию твердых тел в большинстве случаев ответственна дислокационная подсистема. Область упругой деформации характеризуется решеточными упругими постоянными, которые, в основном, определяются силами связи между атомами и симметрией кристаллической решетки. По этой причине параметры деформационной кривой в пластической области и упругие характеристики отражают отклик на внешнее воздействие разных подсистем материала и, как результат, относятся к разным уровням иерархии структурной чувствительности свойств.

Во второй главе показано, что основополагающим методологическим принципом применения метода динамической упругости для контроля качества твердых сплавов явилось нахождение предельных упругих характеристик. Наиболее приемлемым для разрешения этой проблемы стал метод теоретического расчёта упругих модулей твёрдого сплава из упругих модулей его составных элементов. Спеченные твёрдые сплавы относятся к композиционным материалам, и поэтому авторы использовали для расчёта упругих модулей их теории упругости микронеоднородных сред, разработанных для композиционных материалов. Выполнен анализ существующих теорий расчета упругих характеристик композиционных материалов и расчетным путем установлены их возможности на ряде систем композиционных материалов, у которых изменялись параметры вещественной анизотропии.

В третьей главе приведены экспериментальные исследования упругих свойств сплавов системы карбид вольфрама – кобальт, полученных методом горячего прессования по промышленной технологии и методом горячего прессования с использованием плазмoeлектролитного нагрева. На образцах, изготовленных при режимах спекания, которые отличались от оптимальных, изучено влияние пористости и микротрещин на динамические упругие характеристики твердых сплавов. Значимым стал результат, что упругая постоянная  $\rho \cdot V_p^2 = \bar{C}_{11}$  для большинства образцов с низкой пористостью значительно меньше теоретического значения. Ничем другим, как влиянием каркасной структуры твердых сплавов, эффект низких продольных упругих волн объяснить не представляется возможным. Сдви-

говая упругая постоянная  $\rho \cdot V_s^2 = \bar{C}_{44}$  твердых сплавов, напротив, совпадает с теоретическим значением.

В четвертой главе изложена теория метода динамической упругости для контроля качества твердых сплавов. Установлено влияние морфологической структуры и фазового состава: карбида вольфрама, кобальта,  $\eta_1$ -фазы,  $\gamma$ -фазы, и содержание свободного графита на динамические упругие постоянные твердых сплавов. Определена чувствительность метода динамической упругости к изменению фазового состава и структуры ВК-сплавов. Механические модели, используемые для расчетов, соответствуют реальным значениям фазового состава и структуре промышленных твердых сплавов.

В пятой главе описаны экспериментальные установки и рассмотрена теория методов измерения упругих характеристик материалов. Приведены результаты методических исследований, которые направлены на определение точности измерения разных методов. Эти исследования выполнены для того, чтобы установить возможности и обосновать метод, который выбран для автоматизированной системы контроля качества твёрдосплавного инструмента.

В заключении подведены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований твердых сплавов.

Глава 1 написана В. Е. Редькиным и А. М. Капитоновым; глава 2 – С. Г. Теремовым, В. Е. Редькиным и А. М. Капитоновым; главы 3 и 4 – А. М. Капитоновым; гл. 5 – С. Г. Теремовым и А. М. Капитоновым.

Авторы выражают искреннюю признательность д-ру физ.-мат. наук Г. И. Фролову, который взял на себя труд прочесть первый вариант рукописи и дать ценные советы по содержанию рукописи, а также выражают благодарность рецензентам монографии д-ру техн. наук, профессору Г. Н. Чурилову и д-ру хим. наук, профессору В. А. Полубоярову.