

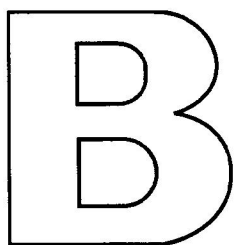
В

ДЛЯ ВУЗОВ

*О.Е. Осинцев*

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ  
ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ  
И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ



**ДЛЯ ВУЗОВ**

---

*О.Е. Осинцев*

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ИХ ОСНОВЕ

*Рекомендовано Учебным объединением высших учебных заведений РФ по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 150100 Материаловедение и технологии материалов*



---

**МОСКВА**  
**«МАШИНОСТРОЕНИЕ»**  
**2013**

УДК 669.0173:541.123

ББК 34.2

О-73

**Осинцев О.Е.**

**О-73** **Металловедение тугоплавких металлов и сплавов на их основе: учеб. пособие для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 156 с., ил.**

ISBN 978-5-94275-720-5

Изложены основные положения металловедения и термической обработки тугоплавких металлов и сплавов на их основе. Систематизированы и обобщены физико-химические основы взаимодействия тугоплавких металлов с элементами различных групп Периодической системы, особое внимание уделено взаимодействию их с элементами IIIA—VIIIA групп и с элементами внедрения. Рассмотрены современные представления о природе высокой прочности межатомной связи тугоплавких металлов с позиции электронного строения. Приведены данные о их кристаллической структуре, физических, химических и механических свойствах. Рассмотрены природа хладноломкости и методы повышения пластичности сплавов на основе вольфрама, молибдена и ниобия. Рассмотрена химическая стойкость тугоплавких металлов в растворах реагентов, взаимодействие их с газами воздуха в широком интервале температур и способы защиты этих материалов от окисления. Изложены физико-химические принципы разработки жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлов и подчеркивается особая роль двойных и многокомпонентных диаграмм состояния при создании сплавов с твердорастворным, дисперсионным и дисперсным упрочнением. Рассмотрены структура, физические, химические, механические, технологические свойства и области применения современных сплавов на основе ниобия, тантала, молибдена и вольфрама.

Для студентов магистерской системы обучения, специализирующихся в области материаловедения и технологии новых материалов, а также других технологических специальностей. Может быть полезна технологам, металлургам, инженерам, имеющим дело с обработкой и применением тугоплавких металлов и сплавов на их основе.

УДК 669.0173:541.123

ББК 34.2

ISBN 978-5-94275-720-5

© О.Е. Осинцев, 2013

© ООО «Издательство «Машиностроение», 2013

# Содержание

|  |           |
|--|-----------|
| Предисловие .....  | 5         |
| Введение .....   | 7         |
| <b>Глава 1. Физико-химические закономерности взаимодействия тугоплавких металлов .....</b>       | <b>13</b> |
| 1.1. Электронная структура и природа высокой прочности межатомной связи .....                    | 13        |
| 1.2. Кристаллическая структура .....   | 24        |
| 1.3. Общие закономерности взаимодействия тугоплавких металлов с элементами различных групп ..... | 29        |
| 1.3.1. Взаимодействие тугоплавких металлов с элементами IVA—VIIA групп .....                     | 30        |
| 1.3.2. Взаимодействие тугоплавких металлов с элементами внедрения. Фазы внедрения .....          | 44        |
| <b>Глава 2. Физические свойства .....</b>  | <b>58</b> |
| 2.1. Температура плавления .....   | 58        |
| 2.2. Плотность .....   | 61        |
| 2.3. Электрические свойства .....  | 62        |
| 2.4. Сверхпроводимость .....   | 63        |
| 2.5. Свойства, необходимые для ядерной энергетики .....  | 65        |
| 2.6. Свойства, определяющие прочность связи .....  | 65        |
| <b>Глава 3. Химические свойства .....</b>  | <b>67</b> |
| 3.1. Химическая стойкость в растворах реагентов .....  | 67        |
| 3.2. Стойкость тугоплавких металлов в газах .....  | 69        |
| 3.2.1. Окисление .....   | 69        |
| 3.2.2. Взаимодействие с азотом .....   | 72        |
| 3.2.3. Взаимодействие с водородом .....  | 73        |
| 3.2.4. Совместимость тугоплавких металлов с другими материалами в процессе эксплуатации .....    | 74        |
| 3.3. Способы защиты тугоплавких металлов от окисления .....                                      | 75        |

|  |     |
|--|-----|
| Глава 4. <b>Механические свойства</b> .....  | 81  |
| 4.1. Хладноломкость тугоплавких металлов .....   | 81  |
| 4.1.1. Методы оценки хладноломкости .....  | 81  |
| 4.2. Факторы, влияющие на низкотемпературную хрупкость .....   | 82  |
| 4.2.1. Влияние внешних факторов .....  | 82  |
| 4.2.2. Физические аспекты хладноломкости .....   | 84  |
| 4.2.3. Влияние примесей внедрения .....  | 87  |
| 4.2.4. Влияние структуры .....   | 93  |
| 4.3. Способы снижения склонности тугоплавких металлов<br>к хладноломкости .....  | 98  |
| Глава 5. <b>Принципы легирования тугоплавких металлов с целью<br/>создания жаропрочных сплавов</b> .....                                     | 105 |
| 5.1. Жаропрочность нелегированных металлов .....   | 105 |
| 5.2. Твердорастворное упрочнение .....   | 108 |
| 5.3. Упрочнение за счет образования избыточных фаз .....   | 111 |
| 5.3.1. Упрочнение элементами, которые образуют<br>фазы внедрения .....   | 112 |
| 5.4. Тройные диаграммы состояния как основа создания<br>сплавов с использованием тугоплавких металлов,<br>упрочненных фазами внедрения ..... | 117 |
| Глава 6. <b>Сплавы тугоплавких металлов</b> .....  | 123 |
| 6.1. Ниобий и его сплавы .....   | 123 |
| 6.1.1. Ниобий как основа сплавов .....   | 123 |
| 6.1.2. Сплавы ниобия .....   | 125 |
| 6.2. Тантал и его сплавы .....   | 132 |
| 6.2.1. Тантал как основа сплавов .....   | 132 |
| 6.2.2. Сплавы тантала .....  | 133 |
| 6.3. Молибден и его сплавы .....   | 138 |
| 6.3.1. Молибден как основа сплавов .....   | 138 |
| 6.3.2. Сплавы молибдена .....  | 139 |
| 6.4. Вольфрам и его сплавы .....   | 146 |
| 6.4.1. Вольфрам как основа сплавов .....   | 146 |
| 6.4.2. Сплавы вольфрама .....  | 146 |
| Список литературы .....  | 154 |