



**«МАТИ» – Российский государственный технологический  
университет имени К.Э. Циолковского**

**Кафедра «Материаловедение и технология обработки материалов»**

**Дисциплина из профессионального цикла**

**«Материаловедение и технология современных и перспективных материалов.**

**Тугоплавкие металлы»**

**Лектор – проф. О.Е. Осинцев**

**Курс 5, семестр 10, учебный год – 2011/12**

**Квалификация выпуска: магистр**

<b>№№ п/п</b>	<b>Вид учебной работы</b>	<b>Трудоемкость, часы</b>
1	Лекции (ЛК)	6
2	Практические занятия (ПЗ)	8x3
3	Лабораторные занятия (ЛР)	12x3
4	Контроль самостоятельной работы (тестирование, коллоквиумы и др.) (КСР)	3
5	Вид окончательной аттестации (З)	
6	Общая трудоемкость дисциплины	72
7	Общий объем самостоятельной работы	43

# Введение

## Положение тугоплавких металлов в Периодической системе элементов

**Тугоплавкими называются металлы,  $T_{пл}$  которых равна или выше температуры плавления хрома ( $T_{пл}^{Cr}=1863^{\circ}C$ ).**

Они относятся к **переходным металлам** трех больших периодов Периодической системы и находятся в IVA–VIII A группах.

	1																		2
	H																		He
	3	4											5	6	7	8	9	10	
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
	11	12																	
	Na	Mg																	
			IIIA	IVA	Переходные металлы						VIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA		IB	IIB		
большой период	I	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
		K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
	II	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
		Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe
III	55	56	La-Lu 57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
	87	88	Ac-Lr 89-103																
	Fr	Ra																	

← Атомный номер

→ Химический символ

лантанид

актинид

ы

## Введение (продолжение)

Тугоплавких металлов – 13. В таблице приведены температуры плавления всех металлов. Видно, что в пределах одного периода температуры плавления повышаются от I большого периода к III, так что самые тугоплавкие металлы (W, Re, Os и Ta) – трехтысячники находятся в III большом периоде.

Хотя большинство тугоплавких металлов (ТМ) известно науке давно (только три из них – Hf, Tc, и Re открыты в XX веке), широкое использование в качестве конструкционных материалов они нашли недавно – после окончания Великой Отечественной войны, особенно в 50-60-е годы. Поэтому металловедение ТМ – это относительно новый раздел науки о металлах.

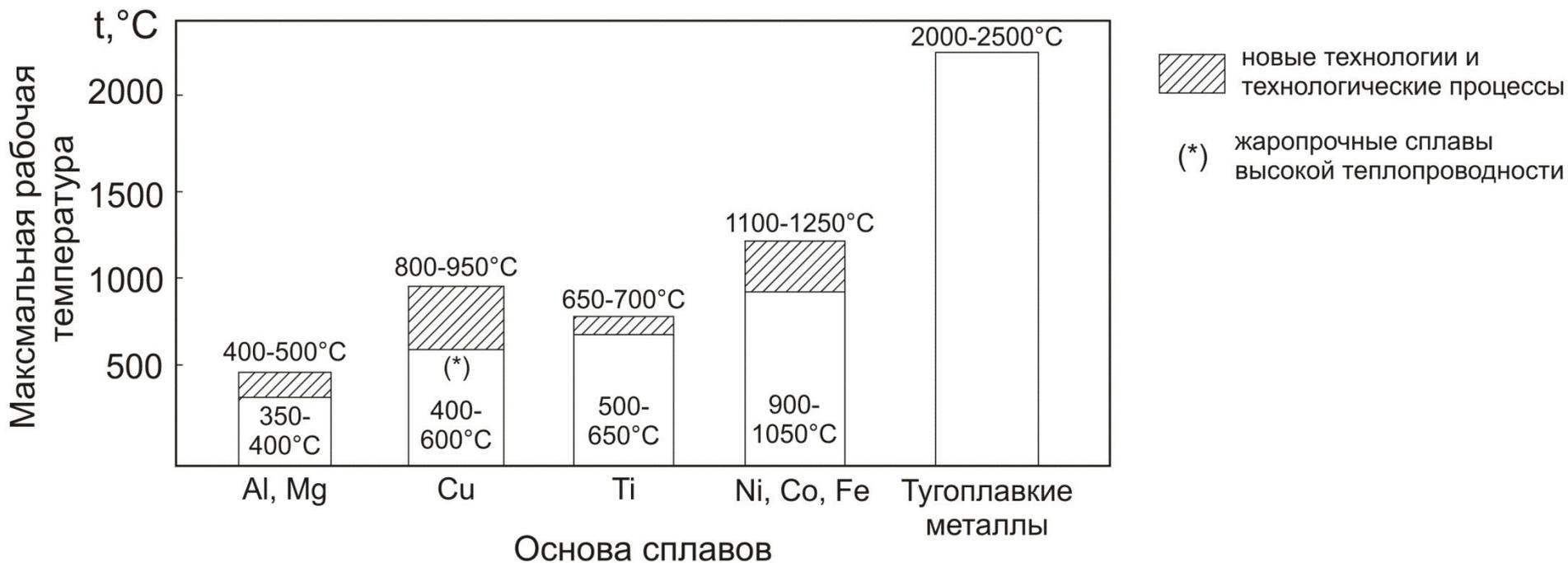
*Расположение ТМ в периодической системе элементов и их температуры плавления*

Номер большого периода	Обозначение	Номер группы							
		IVA	VA	VIA	VIIA	VIII A			
I	K <sup>19</sup> ↓ Ni <sup>28</sup>	Металл→ T <sub>пл</sub> , °C→	—	V <sup>23</sup> 1910	Cr <sup>24</sup> 1863	—	—	—	—
II	Rb <sup>37</sup> ↓ Pd <sup>46</sup>	Металл→ T <sub>пл</sub> , °C→	—	Nb <sup>41</sup> 2469	Mo <sup>42</sup> 2625	Tc <sup>43</sup> 2204	Ru <sup>44</sup> Rh <sup>45</sup> —2234 1963 —		
III	Cs <sup>55</sup> ↓ Pt <sup>78</sup>	Металл→ T <sub>пл</sub> , °C→	Hf <sup>72</sup> 2231	Ta <sup>73</sup> 3020	W <sup>74</sup> 3422	Re <sup>75</sup> 3186	Os <sup>76</sup> 3033	Ir <sup>77</sup> 2447	— —

# Требования, предъявляемые к жаропрочным материалам<sup>4</sup> для новой техники

**Новая техника:** сверхзвуковая авиация, ядерная энергетика, ракетная техника, электронная промышленность требует создания новых материалов, которые обладают высокой прочностью при температуре выше  $1100^{\circ}\text{C}$  и даже выше  $2000^{\circ}\text{C}$ . Жаропрочные стали и сплавы на основе никеля и кобальта, при таких температурах работать уже не могут. Об этом свидетельствует гистограмма, на которой представлены предельные рабочие температуры для жаропрочных материалов на металлической основе.

*Максимальные рабочие температуры жаропрочных сплавов на различной основе*



# Максимальные рабочие температуры жаропрочных сплавов на различной основе

Рассмотрим основные группы жаропрочных материалов на металлической основе.

1. Жаропрочные сплавы на основе  $Al(T_{пл}^{Al}=660^{\circ}C)$  и  $Mg(T_{пл}^{Mg}=650^{\circ}C)$  имеют предельные рабочие температуры **300-350°C**.

Только применение новых технологических процессов и новых технологий позволило создать материалы на Al и Mg основе, которые могут работать при 400-500°C. Это прежде всего:

- **КМ**, упрочненные тугоплавкими и жаропрочными волокнами;
- **дисперсно-упрочненные материалы**, типа САПов;
- **быстрозакристаллизованные сплавы**, создаваемые методом **гранульной металлургии**, в состав которых в больших количествах вводят переходные металлы (ПМ);
- применительно к магниевым сплавам, это быстрозакристаллизованные материалы, в которых гранулы получают путем кристаллизации в жидком азоте или газообразном гелии.

2. Особняком в группе жаропрочных материалов стоят медные сплавы ( $T_{пл}^{Cu}=1084^{\circ}C$ ). Стандартные медные сплавы латуни, бронзы с низкой теплопроводностью не могут конкурировать с более дешевыми жаропрочными сталями.

Однако развитие новых отраслей техники, прежде всего ракетостроения, потребовало создания жаропрочных медных сплавов с высокой теплопроводностью.

Благодаря высокой теплопроводности в условиях хорошего отвода тепла такие медные сплавы (хромовые и хромоциркониевые бронзы) могут работать при температурах до 700-800°C. Очень перспективными являются также **внутреннеокисленные медные сплавы**, упрочнённые дисперсными частицами оксидов нанометрических размеров. Такие материалы имеют термическую стабильность до 950 - 1000°C.

3. Жаропрочные титановые сплавы ( $T_{\text{пл}}^{\text{Ti}}=1663^{\circ}\text{C}$ ) с учетом последних достижений науки и техники могут работать до температур 500-650 $^{\circ}\text{C}$ .

Перспективным является также метод гранульной металлургии и получение сплавов на основе интерметаллидов (типа  $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ ).

4. Жаропрочные сплавы на основе Fe( $T_{\text{пл}}^{\text{Fe}}=1535^{\circ}\text{C}$ ), Co( $T_{\text{пл}}^{\text{Co}}=1498^{\circ}\text{C}$ ) и Ni( $T_{\text{пл}}^{\text{Ni}}=1455^{\circ}\text{C}$ ), в том числе «суперсплавы» на никелевой основе, могут длительно работать до 950-1050 $^{\circ}\text{C}$ .

### ***Современная технология создания «суперсплавов»:***

- получение быстрозакристаллизованных сплавов методом гранульной металлургии;
- монокристалльное литье лопаток турбин авиационных двигателей;
- получение направленной кристаллизацией эвтектических композиций со стержневидными жаропрочными фазами – упрочнителями;
- создание КМ, упрочненных тугоплавкими и жаропрочными волокнами;
- дисперсноупрочненные КМ и т.д. позволяет поднять потолок рабочих температур на 150-200 $^{\circ}\text{C}$  до 1100-1200 $^{\circ}\text{C}$ .

Анализ этих данных показывает, что у тугоплавких металлов (ТМ) как основы жаропрочных сплавов, которые могут длительно работать при температурах выше 1200 $^{\circ}\text{C}$ , среди других металлических материалов конкурентов нет.

# Характеристика отдельных групп тугоплавких металлов

1. Наибольший интерес для техники представляют **TM VA (V, Nb, Ta) и VIA (Cr, Mo, W)** групп Периодической системы, а среди них благодаря уникальному сочетанию свойств и доступности **металлы «большой четверки» - Nb, Mo, Ta, W.**

2. **Металлы платиновой группы – осний (Os), иридий (Ir), рутений (Ru), родий (Rh)** обладают рядом уникальных свойств: их отличает высокая коррозионная стойкость, Os и Ir имеют самые высокие модули упругости (E), Os входит в четверку самых тугоплавких металлов ( $T_{пл} > 3000^{\circ}\text{C}$ ), он же является самым тяжелым элементом ( $\gamma = 22.5 \text{ г/см}^3$ ). Эти металлы имеют малую распространённость в природе (годовое производство не превышает нескольких десятков тонн).

3. **Металл IVA группы – гафний (Hf)** также относится к редким металлам. Он используется как легирующий элемент при создании сплавов на основе W и Ta.

4. **Элемент VIIA группы за №43 – технеций (Tc)** в земной коре практически не содержится. Ячейка, принадлежащая этому металлу в таблице элементов, долгое время оставалась пустой.

5. **Одним из редких элементов** в земной коре **является металл VII группы – рений (Re)**. Этот дорогостоящий тугоплавкий металл (по  $T_{пл}$  уступает только W) имеет ряд необычных свойств, которые позволяют использовать его в качестве легирующего элемента при создании высокотехнологичных сплавов на основе Mo и W. Кроме того, рений используется в малогабаритных изделиях (термопары, нагревательные элементы, эмиссионные элементы и т.д.).

**Достоинства и недостатки тугоплавких металлов «большой четверки» – ниобия, тантала, молибдена и вольфрама.** Благодаря уникальному сочетанию свойств в технике особое внимание отводится ниобию, танталу, молибдену и вольфраму. Их объединяет:

- высокая температура плавления;
- высокая прочность и жаростойкость;
- высокая коррозионная стойкость при низких температурах;
- доступность – рудные запасы этих металлов достаточно велики.

По уровню абсолютной и удельной жаропрочности они превосходят лучшие суперсплавы на никелевой и кобальтовой основах. Они могут применяться при температурах 1300-2500°C и выше, при которых другие сплавы работать уже не могут.

Однако эти **металлы имеют ряд существенных недостатков**, которые сдерживают более широкое применение их в технике.

К таким недостаткам следует отнести:

1. Их высокую **склонность к хладноломкости**. Особенно ярко она выражена у металлов VIA группы – Cr, Mo, W. У этих металлов технической чистоты температура перехода из хрупкого состояния в пластичное ( $t_{xp}$ ) находится выше комнатной (Cr, W) или близка к комнатной (Mo). Это создает трудности при их производстве и применении.

2. Другой существенный недостаток ТМ заключающейся в их высокой склонности к окислению и к взаимодействию с другими газами воздуха при нагреве, т.е. **низкая жаростойкость**. Это делает их нетехнологичными, требует применения защитных сред в виде инертных газов (Ar, He) или вакуума при производстве полуфабрикатов и изделий.

Большим недостатком ТМ является **низкая плотность** (кроме V и Cr)

# Часть 1. §1. Электронная структура и природа высокой прочности межатомной связи тугоплавких металлов

Характерные *физические, химические и механические свойства*, которые отличают тугоплавкие металлы (ТМ) от других элементов Периодической системы, определяются:

- *электронной структурой их атомов;*
- *природой межатомной связи;*
- *типом кристаллической решетки.*

*Каждому элементу* периодической таблицы приписывают определенный *атомный номер*, соответствующий положительному *заряду ядра  $Z$*  ( $\text{Cr}^{24}$ ,  $\text{Mo}^{42}$ ,  $\text{W}^{74}$ ). Этот *заряд несут  $Z$  протонов (+)*, ядра содержат также нейтральные частицы – *нейтроны*.

*Атом можно представить в виде положительно заряженного ядра, окруженного облаком отрицательно заряженных  $Z$  электронов (-).*

*Закон квантовой механики* ограничивает число электронов в данном состоянии изолированного атома. Он не позволяет всем электронам занять энергетические состояния с минимальной энергией около ядра атома.

Распределение электронов по орбиталям подчиняется *принципу Паули*.

Согласно принципу Паули **в атоме не могут быть более двух электронов в одинаковых энергетических состояниях с четырьмя одинаковыми квантовыми числами**. На каждой орбите может находиться не более **двух электронов**, различающихся **спинами (спаренные электроны)**.

Поэтому в изолированном атоме  **$Z$  электронов распределяются по разрешенным орбитам** таким образом, чтобы **общая энергия атома была минимальной**.

Максимальное количество электронов в подболочках s, p, d, f равно соответственно 2, 6, 10 и 14.

Так, что емкость каждого энергетического уровня составляет:



ПМ I большого периода

ПМ II большого периода

ПМ III большого периода

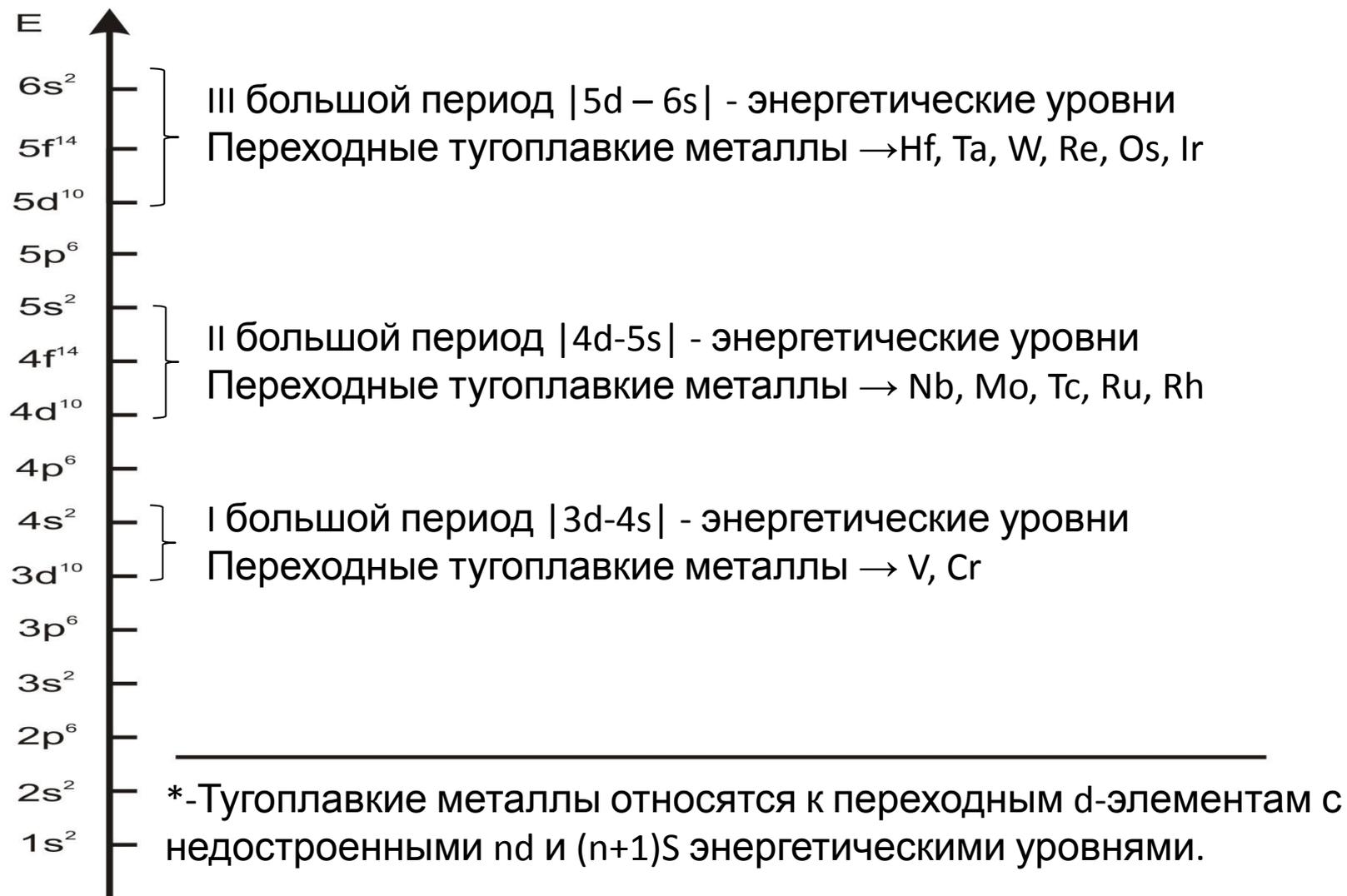
**Тугоплавкие металлы относятся к переходным d-элементам с недостроенными  $nd$  и  $(n+1)s$  энергетическими уровнями**, где  $n$ - натуральное целое число. У них начинает заполняться электронами более «высокий»  $(n+1)s$ -уровень, когда еще полностью не заполнен электронами более «низкий»  $nd$  – энергетический уровень:

**V, Cr** находятся в I большом периоде с недостроенными  $3d-4s$  уровнями;

**Zr, Nb, Mo** находятся во II большом периоде с недостроенными  $4d-5s$  уровнями;

**Ta, W, Re** находятся в III большом периоде с недостроенными  $5d-6s$  уровнями.

## Схематичное изображение энергетического спектра изолированного атома\*



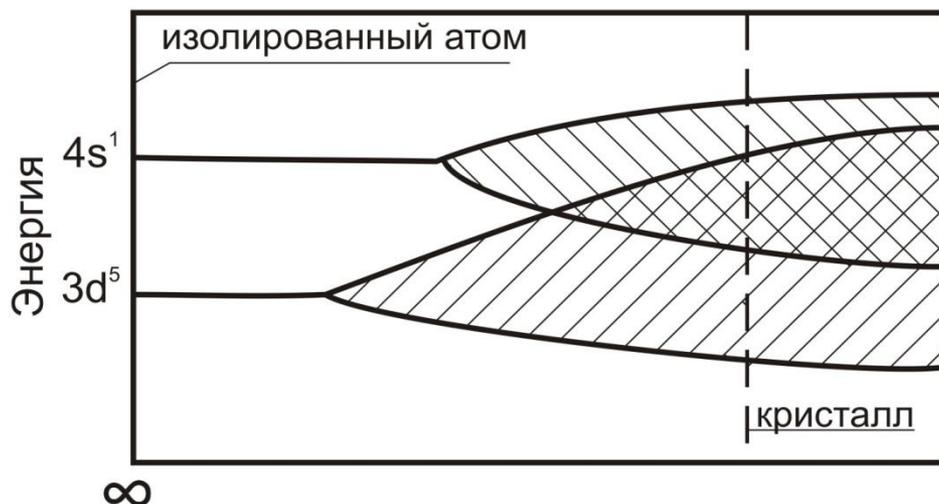
(продолжение 3)

**В изолированных свободных атомах ТМ электронные орбитали имеют дискретные значения энергии  $E$ .** При сближении атомов энергии орбиталей не остаются дискретными, а размываются в энергетические области, которые **называются энергетическими зонами.**

В кристаллах энергетические  $nd$  и  $(n+1)s$  – уровни перекрываются – происходит гибридизация орбит, как показано на **рис.1** для хрома – переходного металла I большого периода. Энергия электронов  $4s^1$  уровня у этого металла выше, чем  $3d^5$ -уровня. Поэтому сначала заполняется  $4s^1$  уровень, но только одним, а не двумя электронами.

При образовании связей в кристаллах происходит размытие в полосу уровней не только валентных электронов, но и внутренних, незаполненных полностью

ЭН



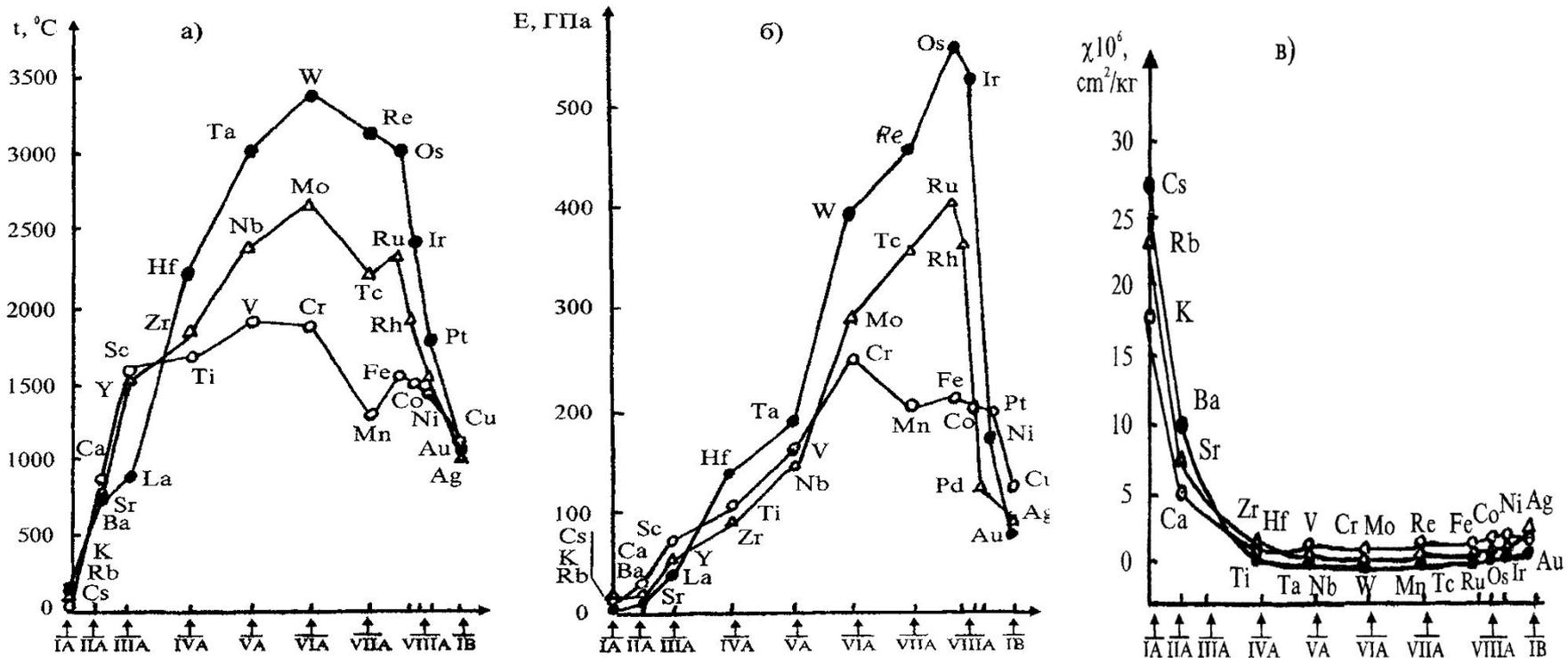
*Рис.1* Схема размытия электронных  $3d$  и  $4s$  энергетических уровней при образовании кристаллов хрома

Поэтому в образовании связей в кристаллах ПМ участвуют электроны  $(d+s)$  - энергетических уровней.

**Наличие на внешних  $nd$  и  $(n+1)s$  оболочках большого количества электронов с близкими энергиями и их участие в связи определяет высокую прочность межатомной связи в кристаллах тугоплавких**

**Высокие силы связи между** атомами в кристаллах ТМ легко **обнаруживаются по экстремальным значениям физических свойств**, которые определяют прочность межатомной связи.

Из элементов трех больших периодов именно ТМ имеют наиболее высокие  $T_{пл}$ ,  $E$ ,  $Q_{суб}$ ,  $S_{пл}$  и минимальные значения коэффициентов сжимаемости ( $\alpha$ ) и ТКЛР. Это следует из рассмотрения **рис.2**. Причем максимальные значения  $T_{пл}$  и минимальный коэффициент сжимаемости имеют металлы VIA группы – Cr, Mo, W.



**Рис.2** Изменение температуры плавления (а), модуля упругости (б) и коэффициента сжимаемости (в) металлов трех больших периодов в зависимости от номера группы

Переходные ТМ имеют неспаренные d-электроны с параллельными спинами (спин – это 4-е магнитное квантовое число, имеет только два значения  $+1/2$  и  $-1/2$ , определяет магнитный момент вращение электрона вокруг своей оси).

Обозначения: - скомпенсированный спин



или - некомпенсированный спин



Наличие у ТМ d-электронов с некомпенсированными спинами приводит к определенной направленности межатомной связи, которую рассматривают как ковалентную составляющую.

Поэтому у **ТМ наряду с сильно выраженной металлической связью проявляется также ковалентная связь**, которая обеспечивает сильное взаимодействие между атомами в кристалле. Отсюда высокая прочность и модуль упругости, но ковалентная составляющая приводит к понижению пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ), вязкости (КС), способствующей хрупкому разрушению.

Порядок заполнения внешних энергетических уровней такой (правило Хунда), что ковалентная составляющая межатомной связи является максимальной у ПМ VIA группы у металлов трех больших периодов, где число d-электронов с неспаренными спинами максимально: 5 – у Cr и 4 – у Mo и W.

**Существование определенной доли ковалентной связи** у тугоплавких металлов и усиление ее при переходе от элементов VA к элементам VIA группы **объясняет многие закономерности изменения физических, химических и механических свойств ТМ**, которые рассматриваются в этом курсе.

## § 2. Кристаллическая структура

Тугоплавкие металлы VA и VIA групп имеют близкое строение внешних  $nd+(n+1)s$  электронных орбиталей, и поэтому ***они имеют не только одинаковые кристаллические решетки, но и близкие параметры.***

***Все они изоморфны и имеют ОЦК решетки.***

***Структура ОЦК (A2) является менее плотноупакованной, чем кубическая ГЦК (A1).*** В ОЦК решетке нет плотноупакованных плоскостей, аналогичных плоскостям октаэдра  $\{111\}$  в решетке ГЦК. Наиболее плотноупакованными являются 12 плоскостей ромбического додекаэдра  $\{110\}$ . В таких плоскостях имеются два плотноупакованных направления  $\{111\}$ , вдоль которых жесткие шары (атомы) будут соприкасаться.

***Дефекты кристаллической решетки ОЦК металлов (точечные, линейные) имеют свои специфические особенности,*** которые в большой степени определяют поведение ТМ в процессе пластической деформации и ***сказываются на их свойствах.***

(продолжение 1)

В структуре ОЦК решетки имеется два типа междоузлий: октаэдрические и тетраэдрические поры (пустоты):

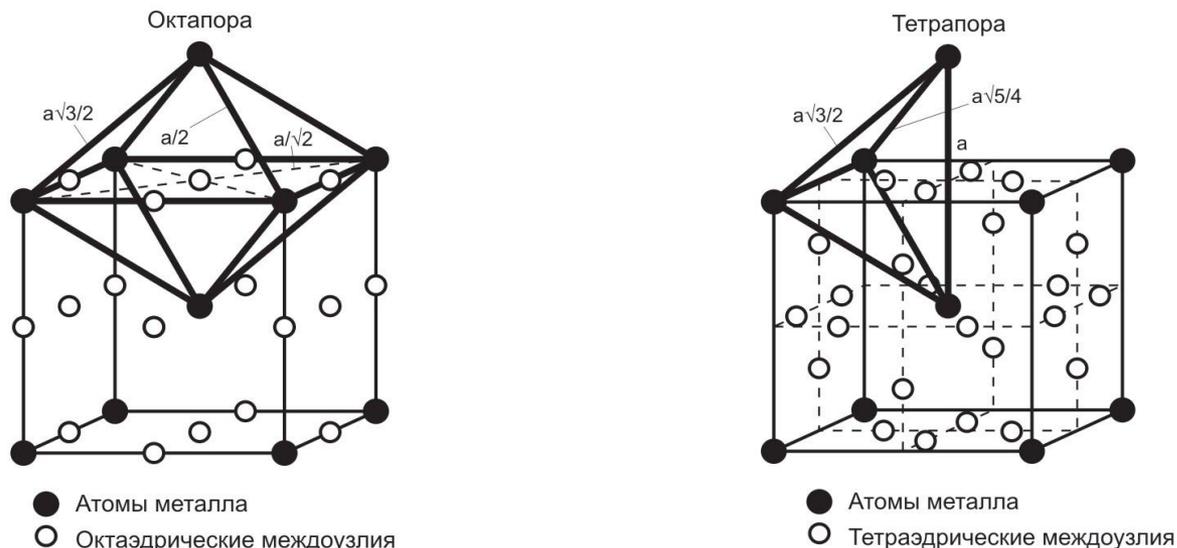


Рис. 3 Кубическая ОЦК решетка

*a* – октаэдрические пустоты; *b* – тетраэдрические пустоты..

**а) Более мелкие октаэдрические пустоты** образуют шесть атомов ( $4+2$ ): 4 – в вершинах куба; 2 – в центре соседних ячеек.

В ОЦК решетке на 1 атом приходится 3 октапоры:  $R_{\text{окт}} = 0,154R_{\text{ат}}$ ; 3 поры/ат.

**б) Более крупные тетраэдрические пустоты** расположены на гранях ячейки (по 4 поры на каждой грани). Они окружены 4-мя атомами: 2- в вершинах куба и 2- в центре объема соседних ячеек  $R_{\text{тетр}} = 0,291R_{\text{ат}}$ ; 6 поры/ат.

(продолжение 2)

Необходимо отметить следующие особенности металлов с ОЦК решеткой.

1. **Тетраэдрические и октаэдрические поры в ОЦК решетке**

**неравноосны, они не имеют шаровой симметрии.**

2. Несмотря на меньшую компактность ОЦК решетки, т.е. больший суммарный объем пустот по сравнению с плотноупакованной ГЦК решеткой, размер отдельных пор в ней меньше:

**октаэдрическая пора в ГЦК решетке ( $R_{окт} = 0,412 a_{ат}$ ) значительно больше по размерам наиболее крупной тетраэдрической поры ( $R_{тетра} = 0,291 a_{ат}$ ) в ОЦК решетке.**

**Это является главной причиной малой предельной растворимости примесей внедрения в металлах с ОЦК решеткой.**

3. Другой принципиальный вопрос – в каких порах располагаются элементы внедрения (H, N, O, C, B) в структуре ТМ, в более крупных тетрапорах ( $0,291R_{ат}$ ) или в более мелких октапорах ( $0,154R_{ат}$ )? Несмотря на кажущуюся очевидность однозначного ответа на этот вопрос нет.

Дело в том, что **внедренные атомы с радиусом, превышающим размеры этих пор, вызывают неодинаковые искажения кристаллической решетки:**  
 - **в более крупных тетрапорах атомы примеси вызывают смещение всех четырех атомов в направлении плотнейшей упаковки  $\langle 111 \rangle$ , что, естественно, вызывает сильные внутренние напряжения;**

- **в более мелких октапорах атомы примеси приводят к сдвигу в направлении ребра куба  $\langle 010 \rangle$ , где атомы уложены не так плотно и внутренние напряжения могут легко релаксироваться путем расширения решетки только в этом**

(продолжение 3)

4. **Атомы внедрения**, расположенные в окта- и тетрапорах в ОЦК решетке ТМ, **вызывают несимметричные искажения кристаллической решетки**, т.е. возникающие вокруг этих атомов **поля упругих напряжений не имеют шаровой симметрии**.

Несимметричные искажения кристаллической решетки приводит к тому, что **атомы примесей внедрения активно взаимодействуют с дислокациями всех видов в тугоплавких ОЦК металлах (включая и винтовые), образуя атмосферы на дислокациях (типа атмосфер Коттрелла)**. В плотноупакованных решетках ГЦК и ГП примеси внедрения почти не взаимодействуют с винтовыми дислокациями и не блокируют их.

**В результате в ОЦК металлах возможна эффективная блокировка всех дислокаций примесями внедрения.**

Отсюда резкое влияние примесей внедрения на механические свойства, которое проявляется:

- в резком упрочнении металла (повышаются:  $HВ$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ );
- сильной температурной зависимости предела текучести от температуры ( $\sigma_{0,2}(t)$ ), вплоть до  $t \leq 0.2T_{пл}$ , К.
- в снижении характеристик пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и вязкости (КС);
- в повышении склонности к хрупкому разрушению, в повышению температуры  $T_{хр}$ .

## Системы скольжения в ОЦК металлах

**В ОЦК металлах систем скольжения** значительно больше, чем в плотноупакованных решетках: их 48; у металлов с ГЦК решеткой – 12 систем скольжения. Дислокации скользят по плоскостям:  $\{101\}$ ,  $\{112\}$  и возможно  $\{123\}$ :

$\{101\}\langle 11\bar{1}\rangle$  - 12 систем скольжения (6 пл x 2 напр)

$\{112\}\langle 11\bar{1}\rangle$  - 12 систем скольжения (12 пл x 1 напр)

$\{123\}\langle 11\bar{1}\rangle$  - 24 системы скольжения (24 пл x 1 напр)

Полные дислокации в решетке ОЦК имеют вектора Бюргенса –  $\bar{v}_1 = a/2 \langle 111 \rangle$ ,  $\bar{v}_2 = a \langle 101 \rangle$ ,  $\bar{v}_3 = a \langle 110 \rangle$  (рис. 2). Минимальную энергию имеют дислокации с вектором Бюргенса  $v_1 = a/2 \langle 111 \rangle$ . Они наиболее устойчивы, и поэтому встречаются в плоскостях скольжения чаще других.

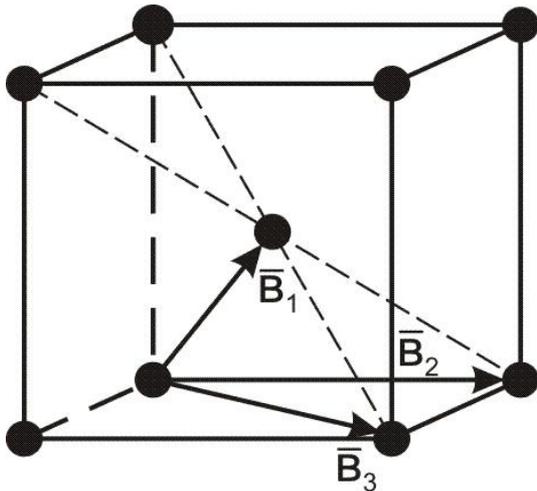


Рис. 4 Вектора Бюргенса единичных дислокаций в ОЦК решетке

Энергия дефекта упаковки  $\gamma_{уп}$  у ТМ с ОЦК решеткой очень велика. **У металлов VIA группы** она превышает 300 МДЖ/м<sup>2</sup> (против 70 МДЖ/м<sup>2</sup> у меди). В ТМ с ОЦК решеткой **легко осуществляется поперечное скольжение винтовых дислокаций**. Этому способствует большое число систем скольжения, а также малая склонность к расщеплению дислокации из-за высокой энергии дефекта упаковки.

Поэтому при пластической деформации **у ТМ легко формируется дислокационная ячеистая или подгонизованная**

В тугоплавких металлах с ОЦК решеткой скользящие **дислокации при встрече могут вступать в различные реакции, результатом которых является торможение дислокаций и, как следствие, деформационное упрочнение.**

Наиболее важной дислокационной реакцией является взаимодействие двух полных дислокаций с векторами  $a/2\langle 111 \rangle$ , скользящих в двух пересекающихся плоскостях (110). В результате такого взаимодействия возникает неподвижная дислокация  $a[100]$  (рис 5):

$$a/2[111]_{(110)} + a/2[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]_{(\bar{1}\bar{1}0)} = a[100]_{(010)}$$

Поэтому **неподвижная дислокация  $a[\bar{1}00]$  является эффективным препятствием для движения других дислокаций.** С практической точки зрения важно, что такое **взаимодействие дислокаций может привести к образованию трещины.**

По модели, предложенной Коттреллом (рис. 6), многократное повторение данного взаимодействия между дислокациями приводит к слиянию дислокаций  $a[\bar{1}00]$  в плоскости (010). **В результате дислокации  $a[\bar{1}00]$  оказываются настолько сильно прижатыми друг к другу, что их экстраплоскости сливаются, и под ними образуется трещина.** Рассмотренный механизм не требует наличия барьеров в виде частиц избыточных фаз, границ зерен и субзерен и т.п.

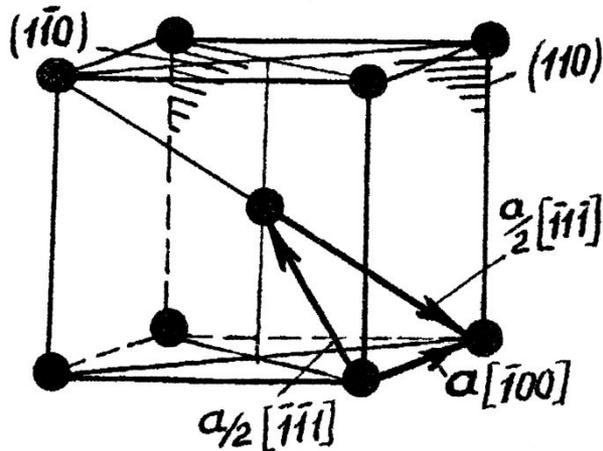


Рис. 5 Вектора Бюргера дислокационной реакции

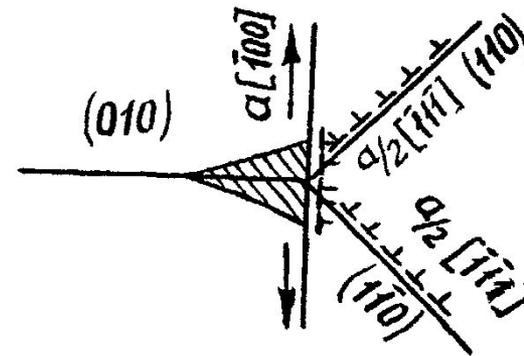


Рис. 6 Схема зарождения трещины при взаимодействии дислокаций  $a/2\langle 111 \rangle$  (Коттрелл)