

Г.А. Ягодин

Технология редких металлов в атомной технике

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
Г11

Г11 **Г.А. Ягодин**
Технология редких металлов в атомной технике / Г.А. Ягодин – М.: Книга по Требованию, 2023. – 344 с.

ISBN 978-5-458-28315-1

Для инженерно-технических и научных работников заводов и научно-исследовательских институтов, преподавателей ВУЗов, аспирантов и студентов старших курсов.

ISBN 978-5-458-28315-1

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время без редких металлов немыслима ни одна отрасль современной техники. Применение редких металлов в производстве специальных сталей, жаропрочных и антикоррозионных сплавов, в радиоэлектронике и квантовой электронике, в атомной технике, авиа- и ракетостроении в значительной степени обеспечило успех этих важнейших отраслей современной промышленности и техники.

Понятие «редкие металлы» сложилось исторически для обозначения тех металлов, которые позже других человек стал использовать для практических целей*.

Выделение группы редких металлов (как и редких элементов) не является результатом какой-либо разработанной научной классификации, а сложилось исторически. Невозможно сгруппировать редкие элементы по общности физико-химических свойств — в периодической системе химических элементов они располагаются во всех группах (в приведенной таблице редкие элементы выделены штриховкой, см. стр. 6 и 7).

Редкие металлы отнюдь не являются менее распространенными в литосфере, как видно из данных о среднем химическом составе земной коры (табл. 1). Например, V, Li, Zr, Ce в земной коре содержится больше, чем Sn, Co, Pb, Hg и многих других широко применяемых металлов.

Редкие металлы не встречаются в природе в виде самородных образований, а наоборот, находятся в виде минералов, как правило, весьма трудно поддающихся разложению.

Характерным для части редких элементов является отсутствие собственных рудных минералов. Они входят в виде изоморфных примесей в кристаллы, образуемые соединениями других металлов, и являются рассеянными элементами. Однако это свойство не является общим для всех редких металлов.

В технической классификации принято деление редких элементов на пять групп (табл. 2). В основе классификации лежит принцип общности физико-химических свойств, совместного нахождения в природе и однотипности технологии.

* Это понятие на некоторых языках начало вытесняться другим, перевести которое на русский можно как «менее обычные металлы».

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Периоды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т					
1	(H)	II	III	IV	V	
2	Li 3 6,94 Литий	Be 4 9,01218 Бериллий	B 5 10,81 Бор	C 6 12,011 Углерод	N 7 14,0087 Азот	
3	Na 11 22,98977 Натрий	Mg 12 24,306 Магний	Al 13 26,98154 Алюминий	Si 14 28,086 Кремний	P 15 30,97376 Фосфор	
4	K 19 39,098 Калий	Ca 20 40,08 Кальций	Sc 21 44,9559 Скандий	Ti 22 47,90 Титан	V 23 50,9414 Ванадий	
	Cu 29 63,546 Медь	Zn 30 65,38 Цинк	Ga 31 69,72 Галлий	Ge 32 72,59 Германий	As 33 74,9216 Мышьяк	
5	Rb 37 85,4678 Рубидий	Sr 38 87,62 Стронций	Y 39 88,9059 Иттрий	Zr 40 91,22 Цирконий	Nb 41 92,9064 Ниобий	
	Ag 47 107,868 Серебро	Cd 48 112,40 Кадмий	In 49 114,82 Индий	Sn 50 118,69 Олово	Sb 51 121,76 Сурьма	
6	Cs 55 132,9054 Цезий	Ba 56 137,34 Барий	La * 57 138,9056 Лантан	Hf 72 178,49 Гафний	Ta 73 180,9479 Тантал	
	Au 79 196,9666 Золото	Hg 80 200,59 Ртуть	Tl 81 204,37 Таллий	Pb 82 207,2 Свинец	Bi 83 208,9804 Висмут	
7	Fr 87 [223] Франций	Ra 88 226,0254 Радий	Ac ** 89 [227] Актиний	Ku 104 [261] Курчатовий	106	
* Л А Н Т А						
Ce 58 140,12 Церий	Pr 59 140,9077 Празеодим	Nd 60 144,24 Неодим	Pm 61 [145] Прометий	Sm 62 150,4 Самарий	Eu 63 151,96 Европий	Gd 64 157,25 Гадолиний
** А К Т И						
Th 90 232,0381 Торий	Pa 91 231,0369 Протактиний	U 92 238,029 Уран	Np 93 237,0482 Нептуний	Pu 94 [244] Плутоний	Am 95 [243] Америций	Cm 96 [247] Кюрий

ПРИМЕЧАНИЕ: Атомная масса приведена по Международной таблице 1971 года.
В неадратных скобках приведены

ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Т О В		VII		VIII	
VI		1 1,0079 Водород	H	2 4,00260 Гелий	He
8 16,9994 Кислород	O	9 18,99840 Фтор	F	10 20,179 Неон	Ne
16 32,06 Сера	S	17 35,453 Хлор	Cl	18 39,948 Аргон	Ar
Cr 24 51,996 Хром		Mn 25 54,9360 Марганец		Fe 26 55,847 Железо	
				Co 27 58,9332 Кобальт	Ni 28 58,71 Никель
34 78,96 Селен	Se	35 79,904 Бром	Br	36 83,80 Криптон	Kr
Mo 42 95,94 Молибден		Tc 43 98,9062 Технеций		Ru 44 101,07 Рутений	
				Rh 45 102,9055 Родий	Pd 46 106,4 Палладий
52 127,60 Теллур	Te	53 126,9045 Иод	I	54 131,30 Ксенон	Xe
W 74 183,85 Вольфрам		Re 75 186,2 Рений		Os 76 190,2 Осмий	
				Ir 77 192,22 Иридий	Pt 78 195,08 Платина
84 [209] Полоний	Po	85 [210] Астат	At	86 [222] Радон	Rn
Обозначение элемента					
Li Литий 3 — Атомный номер 6,941 — Атомная масса					

Н О И Д Ы

Tb	65 158,9254 Тербий	Dy	66 162,50 Диспрозий	Ho	67 164,9304 Гольмий	Er	68 167,26 Эрбий	Tm	69 168,9342 Тулий	Yb	70 173,04 Иттербий	Lu	71 174,97 Лютеций
----	--------------------------	----	---------------------------	----	---------------------------	----	-----------------------	----	-------------------------	----	--------------------------	----	-------------------------

Н О И Д Ы

Bk	97 [247] Берклий	Cf	98 [251] Калифорний	Es	99 [254] Эйнштейний	Fm	100 [257] Фермий	Md	101 [258] Менделевий	(No)	102 [259] (Нобелий)	(Lr)	103 [260] (Лоуренсий)
----	------------------------	----	---------------------------	----	---------------------------	----	------------------------	----	----------------------------	------	---------------------------	------	-----------------------------

Точность последней цифры ± 1 или ± 3 (если выделена мелким шрифтом).
массовые числа наиболее устойчивых изотопов.

Таким образом, практически единственной характеристикой, объединяющей редкие металлы, является то, что они позже других вошли в современную технику. Причины этого индивидуальны для каждого элемента, однако во всех случаях выделение редкого металла из его природных соединений в виде, удобном для использования, оказалось чрезвычайно сложной задачей.

Т а б л и ц а 1

Распространенность некоторых элементов в земной коре
(по А. П. Виноградову, 1962 г.)

Порядковый номер	Элемент	Содержание в земной коре, вес. %	Порядковый номер	Элемент	Содержание в земной коре, вес. %
3	Литий	$3,2 \cdot 10^{-3}$	57	Лантан	$1,8 \cdot 10^{-3}$
4	Бериллий	$3,8 \cdot 10^{-4}$	58	Церий	$7 \cdot 10^{-3}$
22	Титан	$6 \cdot 10^{-1}$	59	Празеодим	$9 \cdot 10^{-4}$
23	Ванадий	$1,5 \cdot 10^{-2}$	60	Неодим	$3,7 \cdot 10^{-3}$
29	Медь	$4,7 \cdot 10^{-3}$	63	Европий	$1,3 \cdot 10^{-4}$
31	Галлий	$1,9 \cdot 10^{-3}$	72	Гафний	$1 \cdot 10^{-4}$
32	Германий	$1,4 \cdot 10^{-4}$	73	Тантал	$2,5 \cdot 10^{-4}$
39	Иттрий	$2,8 \cdot 10^{-3}$	75	Рений	$1 \cdot 10^{-7}$
40	Цирконий	$1,7 \cdot 10^{-2}$	80	Ртуть	$7 \cdot 10^{-6}$
41	Ниобий	$2 \cdot 10^{-3}$	82	Свинец	$1,6 \cdot 10^{-3}$
47	Серебро	$7 \cdot 10^{-6}$	90	Торий	$1,3 \cdot 10^{-3}$
49	Индий	$2,5 \cdot 10^{-5}$	92	Уран	$2,5 \cdot 10^{-4}$
50	Олово	$2,5 \cdot 10^{-4}$			

Т а б л и ц а 2

Техническая классификация редких металлов

Группа технической классификации	Элементы	Группа периодической системы	Группа технической классификации	Элементы	Группа периодической системы
Легкие	Li, Rb, Cs	I	Тугоплавкие	Ti, Zr, Hf	IV
	Be	II		V, Nb, Ta	V
Рассеянные	Ga, In	III		W, Mo	VI
	Ta	V		Re	VII
	(Hf)	IV	Радиоактивные	Ac и актиноиды	III
	(Re)	VII		Po	VI
Редкоземельные	Sc, Y, La и лантаноиды	III		Ra	II

Химическая активность редких металлов является причиной трудности их получения в чистом состоянии, а именно чистота является необходимым условием успешного применения многих из них.

Технология редких металлов имеет особенности, связанные с характером исходного сырья и требованием к качеству готовой продукции, и носит многостадийный характер.

Большое значение в технологии редких металлов имеет обогащение. Как правило, для получения кондиционных концентратов используют методы, основанные на разнице в плотности редких минералов и пустой породы, в сочетании с флотацией, электромагнитным, электростатическим и прочими методами обогащения.

Многие редкие металлы встречаются в природе в виде сложных сочетаний друг с другом. Комплексность сырья и, как следствие, переработка его на все полезные компоненты составляют одну из типичных черт технологии редких металлов. Для разложения рудных концентратов используют как пиро-, так и гидрометаллургические процессы. Широкое применение для вскрытия руд находит метод хлорирования.

Обязательной стадией технологии является получение чистых химических соединений, отделение редкого металла от сопутствующих ему примесей. Для решения этой задачи широко используют экстракцию, ионный обмен, ректификацию и другие методы.

Из чистых химических соединений металл получают электролизом или металлотермией.

Для технологии редких металлов характерна необходимость рафинирования получаемого металла. Для этого широко используют вакуумную дистилляцию, иодидное рафинирование, кристаллофизические методы очистки и т. д.

Одним из основных переделов является получение компактных слитков или сплавов в форме, удобной для последующей механической обработки, получения полуфабрикатов или готовых изделий.

В настоящее время технология редких металлов — быстро развивающаяся отрасль: создаются новые технологические схемы, совершенствуется аппаратное оформление процессов.

Глава 1

ПРИМЕНЕНИЕ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Редкие металлы обладают целым рядом уникальных физических и химических свойств, и с каждым годом их все шире используют в новейших областях науки и техники.

Редкие металлы приобрели исключительное значение для производства специальных сталей, твердых, жаропрочных, сверхпроводящих, антикоррозионных и других сплавов.

Металлические сплавы — это макроскопически однородные системы из двух или более металлов и неметаллов, обладающие характерными свойствами металлов. Сплавы можно классифицировать: 1) по числу компонентов (двойные, тройные и т. д.), 2) по структуре (гомогенные и гетерогенные), 3) по характеру основного металла (например, сплавы редких металлов), 4) по характерным свойствам (тугоплавкие, коррозионно устойчивые и т. д.), 5) по технологическим признакам (литейные и деформируемые).

Сплавы в общем случае не представляют собой простых смесей составляющих компонентов. В зависимости от химической природы компонентов сплав может быть твердым раствором, химическим соединением или смесью фаз.

Взаимная растворимость элементов определяется кристаллохимическими факторами (подобие или различие кристаллических решеток), разницей в атомных радиусах компонентов, а также величиной электроотрицательности элементов.

Чем больше разница в электроотрицательности двух элементов, тем больше вероятность образования устойчивого ионного соединения. При сплавлении металлов, обладающих одинаковой кристаллической структурой компонентов, малой (меньше 15%) разницей в атомных радиусах и близкими химическими свойствами, возникают твердые растворы с неограниченной растворимостью компонентов. Для образования твердых растворов разница в электроотрицательности не должна превышать $\pm 0,4$.

Ограниченная растворимость наблюдается, если различна кристаллическая структура компонентов, радиусы атомов компонентов различаются более чем на 15% и т. д. При этом возникают промежуточные фазы. Если отношение атомных радиусов компонентов меньше 0,59, образуются так называемые фазы внедрения.

Металлические химические соединения образуются преимущественно из тех компонентов, которые наиболее сильно различаются по электронному строению, химическим и физическим свойствам, т. е. далеко расположены друг от друга в периодической системе элементов, имеют значительно различающийся атомный объем и различное кристаллическое строение.

Металлические соединения могут быть как постоянного, так и переменного состава. Металлические соединения отличаются от обычных неорганических химических соединений тем, что компонентами их служат металлы, причем металлические соединения являются новыми веществами, по своим свойствам мало похожими на металлы, из которых они образовались. Это происходит благодаря наличию смешанной межатомной связи (металлической, ко-

валентной и ионной) и разнообразию кристаллических структур. В металлических соединениях все же преобладает металлическая связь и вследствие этого проявляются металлические свойства. Наличие смешанной и преобладание металлической связи характерно также для соединений металлов с неметаллом (бориды, нитриды, карбиды и т. д.), которые тоже относятся к классу металлических соединений, так как в их строении преобладает металлическая связь и они проявляют типичные металлические свойства (электронную проводимость, высокую теплопроводность, металлический блеск и т. п.).

Различные типы межатомной связи и кристаллических структур создают у этих соединений большое разнообразие физико-химических, механических, электрических, оптических и других свойств.

Физико-химические свойства сплавов в большой степени определяются их структурой. Н. С. Курнаков установил закономерности изменения многих физических свойств в двойных равновесных системах. Он нашел, что образование твердых растворов металлов, как правило, приводит к увеличению твердости, прочности и электросопротивления по сравнению с их значениями для исходных компонентов. При образовании металлического соединения твердость и электросопротивление также возрастают. Металлические соединения имеют гораздо более высокие значения твердости и электросопротивления, чем образовавшие их металлы. В сплавах-смесях физико-химические свойства изменяются аддитивно.

Редкие металлы можно использовать как в качестве основы сплава, так и в качестве легирующих добавок.

В соответствии с классификацией Е. М. Савицкого различают несколько механизмов влияния добавок редких металлов на другие металлы и сплавы:

1) модификация структуры основного металла — измельчение зерен. Механизм модификации сложен, частично его можно объяснить изменением поверхностного натяжения основного металла. Иногда эффект модификации достигается при введении окислов, частицы которых, вероятно, служат центрами кристаллизации. К явлениям модификации можно отнести также измельчение включений графита. Включения углерода в чугуне обычно имеют форму пластин хрупкого графита, которые ослабляют металл. Введение модификатора придает графиту форму мелких шариков, прочность металла при этом возрастает;

2) рафинирование от неметаллов: кислорода, азота, углерода, водорода, серы, фосфора. За счет образования более прочных соединений редкие элементы образуют соответствующие сульфиды, окислы, нитриды и т. д., которые переходят в шлак. При этом в первую очередь очищаются границы зерен основного металла, что приводит к снижению граничной хрупкости, повышению ударной вязкости, уменьшению хладноломкости;

3) образование тугоплавких соединений с вредными примесями. Легкоплавкие соединения основного металла, а также включения легкоплавких примесей (сера, $t_{пл} = 95^\circ \text{C}$; фосфор, $t_{пл} = 44^\circ \text{C}$) часто нарушают целостность границ зерен при горячей обработке;

4) улучшение структуры поверхностной окисной пленки, что обычно приводит к резкому возрастанию жаропрочности и коррозионной устойчивости;

5) изменение механизма пластической деформации основного металла — увеличение или уменьшение пластичности;

6) повышение температуры рекристаллизации в результате увеличения прочности межатомных связей;

7) образование тугоплавких металлических соединений, что приводит к механическому упрочнению сплавов при обычных и высоких температурах. Образующиеся соединения часто концентрируются на границах зерен;

8) стабилизирующее действие на отдельные модификации полиморфных материалов;

9) придание сплавам особых физических свойств (повышенной способности поглощать нейтроны, магнитных свойств, сверхпроводимости и т. д.).

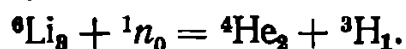
Модификация структуры и раскисление обычно благоприятно сказываются на процессах сварки и качестве сварного шва. Измельчение структуры

и очистка границ зерен от неметаллических включений повышают стойкость против истирания.

Использование редких металлов в черной и цветной металлургии приводит в некоторых случаях к значительному улучшению свойств основного металла. Следует отметить, что в настоящее время эта область технологии бурно развивается и возможности ее все более расширяются по мере совершенствования способов выделения и очистки редких элементов.

Литий

Литий является источником тяжелого изотопа водорода — трития, который используется в реакциях ядерного синтеза. Тритий можно получить при бомбардировке нейтронами лития-6:



Содержание ${}^6\text{Li}$ составляет примерно 7% в природной смеси изотопов лития. Современная водородная бомба оснащена зарядом дейтерида лития-6. Создаваемый при взрыве атомного «запала» поток нейтронов вызывает ядерную реакцию (n, α), приводящую к образованию трития. При температуре ядерного взрыва ($\sim 10^8$ K) тритий реагирует с дейтерием с выделением громадного количества энергии.

Важной областью ядерного применения лития является использование гидрида ${}^6\text{LiH}$ для создания легких защитных экранов от нейтронного излучения.

Жидкий литий-7 можно использовать в качестве теплоносителя в ядерном реакторе ввиду его большого температурного интервала жидкого состояния (179—1317° C), малой плотности ($\rho=0,534 \text{ г/см}^3$); большой теплоемкости, относительно малой вязкости, высокой теплоты парообразования, малого сечения захвата тепловых нейтронов (в 16 раз меньше, чем у натрия). Препятствием к применению жидкого лития является его сильное коррозионное действие.

Дейтерид лития-7 может служить более эффективным замедлителем нейтронов, чем тяжелая вода.

Значительно применение лития в металлургии.

Литий вводят в виде индивидуального металла или различных лигатур (например, 30% Li+70% Ca) для раскисления, легирования, модификации многих марок черных сплавов, чугуна. Его применяют для повышения предела текучести и твердости углеродистой и нержавеющей стали, для модификации инструментальной быстрорежущей и аустенитной стали. В цветной металлургии введение 1% лития в магниевый сплав повышает его коррозионную стойкость и сопротивляемость разрыву. Большой интерес представляет возможность создания «плавающих» сплавов Mg—Li, содержащих более 50% Li. В авиации нашел применение сплав «склерон» на основе алюминия, в со-

став которого входит литий. Предел прочности, упругость и твердость этого сплава выше, чем у сплавов типа дюралюминия. Прекрасными механическими свойствами обладают сплавы лития с медью и свинцом. Находят применение сплавы с титаном, бериллием, цинком и серебром.

Значительное количество соединений лития используют для получения стекол, обладающих такими свойствами, как повышенная химическая устойчивость, прозрачность для ультрафиолетового или инфракрасного излучения, светочувствительность. Введение литиевых соединений способствует получению высококачественной керамики. В частности, литий входит в состав высоковольтного фарфора, а также в состав специальных керамических покрытий с исключительной термостойкостью (ступалит), которые применяют для увеличения срока службы камер сгорания и сопел реактивных двигателей.

В эмалях соединения лития снижают вязкость расплава, способствуют образованию тонкого и гладкого покрытия. Литий является составной частью высококачественной глазури.

По мнению иностранных специалистов, возможной областью применения соединений лития является ракетная техника, где в качестве ракетного топлива можно использовать гидрид, борид лития и металлический литий. Сжигание 1 кг лития или некоторых его соединений дает до 4000 ккал (обычное ракетное топливо — керосин — 2300 ккал/кг). Перхлорат и нитрат лития характеризуются высоким содержанием кислорода (60,1 и 69,5% соответственно), а используемый в твердом ракетном топливе окислитель — перхлорат аммония — содержит лишь 54,4% кислорода.

Литиевые соли высших жирных кислот служат основой высококачественных консистентных смазок с необыкновенно широким диапазоном рабочих температур (от -60 до $+160^{\circ}\text{C}$). Металлорганические соединения лития широко используют в органическом синтезе.

Заслуживает упоминания применение LiOH в качестве добавки к щелочным аккумуляторам. Добавка LiOH к KOH + NaOH повышает емкость аккумулятора на 12%, удельное сопротивление на 21%, срок службы железо-никелевого аккумулятора удлинится в 2—3 раза (приведенные данные относятся к случаю добавки 21 г/л LiOH·H₂O в электролит KOH с $\rho = 1,19\text{—}1,21\text{ г/см}^3$).

Хлорид и бромид лития, обладающие высокой гигроскопичностью, а также LiOH, способный поглощать CO₂, используют для поддержания постоянной влажности и очистки воздуха (кондиционирование).

Насыщенный раствор LiCl применяют в качестве антиобледенителя (температура замерзания -55°C).

При реакции $\text{LiH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{H}_2$ 1 кг гидрида лития может выделить 2,8 м³ водорода. Поэтому гидрид используют

как твердый источник водорода для заполнения спасательных средств, шаров-зондов и т. п.

В пиротехнике важна способность соединений лития окрашивать пламя в яркие красные цвета.

Некоторые соединения лития находят применение в качестве катализаторов, в медицине для создания лекарств. Литиевыми мылами пропитывают водоотталкивающие ткани.

Один из главных потребителей лития — алюминиевая промышленность, положение в которой определяет в основном темпы роста производства лития. Если в начале шестидесятых годов потребление лития увеличивалось на 12—15% ежегодно, то за последние годы наблюдается застой и даже некоторый спад производства, связанный с сокращением спроса на алюминий (табл. 3).

Таблица 3

Потребление лития в капиталистическом мире (в пересчете на карбонат, т)

Страна	Потребление по годам		
	1969	1970	1971
США	8 255	9 070	8 845
Европа	2 858	3 583	3 175
Япония	816	907	907
Прочие страны	635	726	544
Всего	12 564	14 286	13 471

Второе место в структуре потребления лития занимает производство синтетического каучука. Перспективы увеличения потребления связаны с разработкой и усовершенствованием конструкции щелочных аккумуляторов.

Бериллий

Применимость того или иного материала в качестве конструкционного в ядерном реакторе определяется величиной сечения захвата тепловых нейтронов (табл. 4).

Бериллий удовлетворяет основным требованиям к конструкционным материалам ядерных реакторов, поэтому его используют в качестве замедлителя и отражателя нейтронов, как материал оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) с рабочей температурой до 500—600° С.

Широкое применение находят медно-бериллиевые бронзы, содержащие до 2,5% Be, и тройные сплавы Cu—Be—Ni. Медно-бериллиевые бронзы по праву называют металлом, не знающим усталости. Пружины из этого материала сохраняют упругость после многих миллионов сжатий, в то время как стальные выдерживают всего около миллиона сжатий. Из бериллиевого сплава изготавливают боевые пружины автоматического оружия,