

6. МЕТАЛИ

На основу особина материјала у чврстом стању и њихове атомске структуре, материјали могу да се сврстају у неколико основних група. То су: метали, керамике, полимери, композити и полупроводници. Они се често означавају и као основне класе материјала. Друге групе са специфичним особинама чине нанофазни материјали, танки слојеви и превлаке, биоматеријали, материјали за претходно дефинисану примену итд.

Метали и њихове легуре се одликују присуством нелокализованих електрона, односно тзв. металном везом. Управо због присуства слободних електрона, метали показују добру електричну и топлотну проводност. Нису транспарентни за видљиву светлост, а полиране површине метала показују изузетну сјајност. Метали имају велику чврстоћу али се могу и деформисати и припадају групи конструкционих и структурних материјала.

Керамички материјали су вишекомпонентни материјали са јонском и ковалентном везом. То су обично оксиди, нитриди и карбиди многих елемената. Многи керамички материјали су састављени од глине, стакла или цемента. Ови материјали су углавном изолатори, слабо проводе топлоту и имају изузетну температурну стабилност, а у погледу механичких својстава, тврди су и веома крти.

Полимерни материјали су углавном органска једињења базирана на угљенику, водонику и другим неметалним елементима. Ради се углавном о ланчастим структурама које имају велику молекулску тежину. Везе између атома у молекулу су ковалентне, док су везе између ланаца слабе Ван дер Валсове. Ови материјали имају малу густину и већина њих се лако обрађује. Полимери спадају у изолаторе мада има и полупроводничких полимера који се добијају специјалним поступком.

Композитни материјали се најчешће састоје од матрице, полимерне, керамичке или металне у коју је уграђен други тип материјала, нпр. стаклена или угљенична влакна. Особине ових материјала могу да се подешавају тако да финални производ преузима најбоље особине од сваког конституента.

Полупроводнички материјали се по својим електричним карактеристикама налазе између проводника и изолатора. Електрична својства зависе од присуства примеса чија се концентрација може контролисано мењати. Нагли развој електронике и информационе технологије остварен је управо захваљујући развоју полупроводничких материјала (елементарни полупроводници и полупроводничка једињења).

Наноматеријали су посебно дизајнирани материјали добијени нанотехнологијом како би се добила одговарајућа електрична, магнетна или друга својства која се класичним, традиционалним техникама не могу добити. Префикс "нано" означава да се ради о структурним јединицама које су реда величине нанометра, по правилу мање од 100 nm .

Танки слојеви и превлаке представљају слојеве депоноване на површини, тако да се њихове особине разликују у односу на комадни материјал. Да би се захтевана особина, као и функционална примена танких слојева и превлака постигла неопходно је да депоновани материјал има одређену дебљину, структуру и дефинисан хемијски састав компатибилан са подлогом.

Биоматеријали се користе као имплантанти који се уграђују као замена за поједине делове људског тела и као такви морају бити нетоксични и компатибилни са људским ткивом. Поједини од претходно наведених материјала, добијени посебним процесирањем, се могу користити као биоматеријали. Композитни материјали, на пример, на бази Са-хидроксиапатита су веома слични природној кости.

Модерни (advanced) материјали се користе у тзв. high-tech технологијама. Под високим технологијама обично се подразумевају софистицирани уређаји, као што су рачунари, оптички системи са оптичким влакнима, уређаји у космичкој и војној технологији итд. Модерни материјали могу бити класични материјали чија су својства специјално дизајнирана и промењена или ново пројектовани материјали добијени специјалним техникама. У савремене материјале убрајамо материјале за интегрисана кола, ласере, оптичка влакна, материјале за чување и записивање информација, течне кристале и др.

Интелигентни материјали се још називају и *state of art* материјалима. То су материјали који примају информацију, обрађују је и извршавају задату функцију. Компоненте паметних материјала или система састоје се од одређеног типа сензора који прима и шаље сигнал и актуатора који одговара на задати сигнал. Као актуатори се обично користе пиезоелектрични или магнетострикциони материјали, који могу да промене облик, позицију или фреквенцију као одговор на промену температуре, електричног или магнетног поља..

И поред огромног напретка последњих година у науци и технологији материјала, још увек постоји велики изазов у развоју нових материјала са софистицираним и специјалним својствима. Изазов, такође, постоји и у производњи материјала и њиховог утицаја на околину. У многим технологијама долази до стварања токсичног отпада који се мора строго контролисати. Посебан проблем представља складиштења нуклеарног отпада. Многи материјали, нпр. полимери, добијају се из извора, као што је нафта, који се не може регенерисати.

Конверзија сунчеве енергије у електричну захтева соларне ћелије које се праве од релативно скупог материјала са недовољном ефикасношћу, па је неопходно радити на добијању таквог материјала који ће обезбедити већу ефикасност по нижој цени. Потребно је наћи или нове изворе или нове материјале са упоредивим карактеристикама традиционалних материјала.

6.1. КЛАСИФИКАЦИЈА МЕТАЛА

Највећи број елемената у природи су метали. Од седам најзаступљенијих елемената на Земљи, где је заступљеност изражена преко масеног удела у процентима¹ (O-49.89wt%, Si-26.03wt%, Al-7.28wt%, Fe-4.12wt%, Ca-3.18wt%, Na-2.33wt%, K-2.33wt%), пет су метали, а од свих познатих хемијских елемената око 80% су метали. У природи се углавном појављују у спојевима, односно минералима, а врло ретко у елементарном стању (злато, сребро, платина, бакар, бизмут, паладијум и метеоритно гвожђе), што зависи од њихове реактивности.

По месту на коме се налазе у периодном систему деле се на:

- алкалне метале: литијум, натријум, калијум,...
- земно алкалне метале: берилијум, магнезијум, калцијум,...
- слабе метале: алуминијум, калај, антимон,...
- прелазне метале: никал, платина, бакар, злато,...
- лантаноиде и актиноиде: торијум, уранијум, плутонијум,...

Легуре настају мешањем чистог метала са неким другим металом, или неметалом (нпр. угљеником), при чему се добија материјал бољих својстава у односу на особине полазних компоненти. Легирање повећава чврстоћу, тврдоћу и отпорност према корозији. Бакар и калај су сваки за себе слаби и сувише савитљиви, али када се помешају чине чврсту легуру-

¹Масени удео у процентима X (wt %) одређеног елемента m_{el} у односу на укупну масу m_u свих елемената, дат је изразом: $[m_{el} / m_u] \times 100$.

бронзу, док су алуминијумске легуре лагане и чврсте и користе се у авиоиндустрији. Легуре тачно одређеног стехиометријског састава називају се интерметална једињења. Називи најчешће коришћених легура, њихови састави и особине, као и могуће примене су дати у табели 6.1.

Табела 6.1. Најчешће коришћене легуре, њихов састав и особине.

име	састав	особине	примена
Алнико	алуминијум, никал, кобалт, гвожђе	високи магнетизам	трајни магнети
Бронза	бакар, калај	отпорност на корозију и хабање	кипови, клизни лежајеви
Дуралуминијум	алуминијум, бакар	чврст, лаган	бицикли, авиони
Константан	бакар, никал	сталан електрични отпор	отпорници
Лем	калај, олово	ниска тачка топљења	лемљење
Монел	никал, бакар	отпорност на корозију	хемијски прибор
Нерђајући челик	гвожђе, хром, никал	отпорност на корозију	кухињски и хируршки прибор
Нихром	никал, хром	ватроотпорност	отпорници
Пермалој	никал, гвожђе	високи магнетизам	електричне машине
Топовска бронза	бакар, калај, цинк	жилавост, отпорност на корозију	клизни лежајеви, зупчаници

Легуре се најчешће деле на:

- феро легуре у којима је основна компонента Fe (челик и ливено гвожђе),
- неферо легуре у којима основна компонента може бити Cu, Al, Mg, Ti или ватростални метали (W, Ta и Mo) и
- суперлегура у којима је основна компонента Co, Ni, Fe и Ti уз додатак хрома и ватросталних метала.

Метални материјали (метални елементи и легуре) се често на основу боје деле на: црне (гвожђе, челици и феролегура) и обојене (сви остали метали и легуре). На основу тога и веома важна грана индустрије, металургија, се дели на црну и обојену металургију.

6.2. СТРУКТУРА МЕТАЛА

Када се говори о структури метала треба разликовати структуру чистих металних елемената од структуре легура.

6.2.1. Структура металних елемената

Сви метали, осим живе, су чврста кристална тела на собној температури. Кристална решетка је формирана од атома једне врсте, тако да се у чворовима решетке налазе позитивни јони између којих се лако крећу валентни електрони. Слободни електрони заклањају јоне умањујући на тај начин њихово међусобно одбијање, а истовремено јони формирају области са малом потенцијалном енергијом за електроне и на тај начин повећавају јачину везе.

Међу кристалним структурама најзаступљеније су: запремински центрирана кубна, површински центрирана кубна и хексагонална компактно пакована кристална решетка, које су детаљно објашњене у 1. Поглављу. Највећи број метала и њихових легура, чак 90% кристалише у ова три кристалографска облика, тако да:

- запремински центрирану кубну решетку-ВСС имају: гвожђе α – Fe, натријум, хром, манган, титан, ванадијум, калијум, волфрам итд. са густином паковања 0.68.
- површински центрирану кубну решетку-FCC имају: гвожђе γ – Fe, бакар, никал, сребро, злато, алуминијум, калцијум итд. са густином паковања 0.74.
- хексагоналну компактно паковану решетку-НСС имају: магнезијум, цинк, хром, титан, кадмијум итд. са густином паковања 0.74 као код површински центриране кубне решетке.

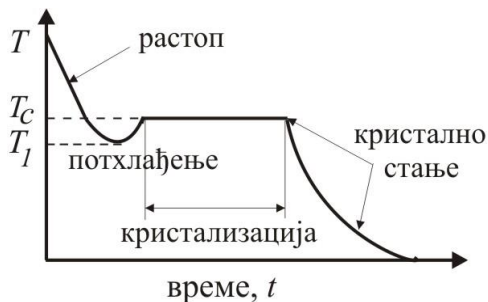
Чисти метали се доста разликују по густини, која може да има вредности у интервалу $(2 - 20) \text{ g/cm}^3$, тако да се на тој основи деле на:

- лаке метале чија густина износи до 4.5 g/cm^3 (Na, Mg, Al итд.) и
- тешке метале са густином преко 4.5 g/cm^3 (Fe, Sn, Pb итд.).

Метали се ретко користе у облику монокристала. Углавном се добијају као **поликристални**, састављени од кристалних зрна. Приликом кристализације долази до очвршћавања метала, при чему он прелази из течне у чврсту фазу. Процес се одвија одвођењем топлоте растопљеног метала или легуре у неком временском интервалу до температуре кристализације T_C . Овај процес се може приказати **кривом хлађења** у

координатном систему температура-време (слика 6.1.). Супротан процес од кристализације је топљење, које се врши на температури топљења T_l . На температури кристализације, односно температури топљења, које су у идеалном случају једнаке, течна и чврста фаза су окарактерисане истом слободном енергијом.

У реалним условима, међутим, ове две температуре нису исте ($T_C \neq T_l$). У стварности, процес кристализације се одвија само онда када постоји разлика у слободној енергији чврсте и течне фазе, тачније када је слободна енергија чврсте фазе нижа од слободне енергије течне фазе. То се постиже хлађењем течности испод температуре кристализације T_C . Температурска разлика између идеалне температуре кристализације T_C и температуре T_l на којој се образују прве клице чврсте фазе које даље могу да расту, назива се **степен потхлађења** $\Delta T = T_C - T_l$. Застој у хлађењу за време процеса кристализације условљен је ослобађањем латентне топлоте топљења. Са повећањем брзине хлађења повећава се степен потхлађења.



Слика 6.1. Крива хлађења чистог метала.

Први центри кристализације-нуклеуси расту даљим хлађењем (за њега се "лепе" нови атоми течног метала). Кристалити расту уз правилан геометријски облик док се не додирну са другим, нараслим кристалитима.

Величина и облик зрна зависе од броја нуклеуса и брзине раста кристала, а то утиче и на механичке особине материјала. Ако је брзина хлађења већа, појављује се више нуклеуса а добијена структура је ситнозрнастија, већа је површина границе зрна па је већа чврстоћа и тврдоћа таквих материјала. Материјали са крупнијим зрнима су мекши и пластичнији. Додавањем модификатора и подешавањем брзине хлађења утиче се на врсту структуре (ситнија или крупнија).

Неки материјали могу имати различиту структуру, односно кристализовати у више различитих кристалних решетки, у зависности од

температуре на којој се налазе. Променом кристалне решетке мењају се и својства материјала. Гвожђе, на пример има 4 alotропске модификације:

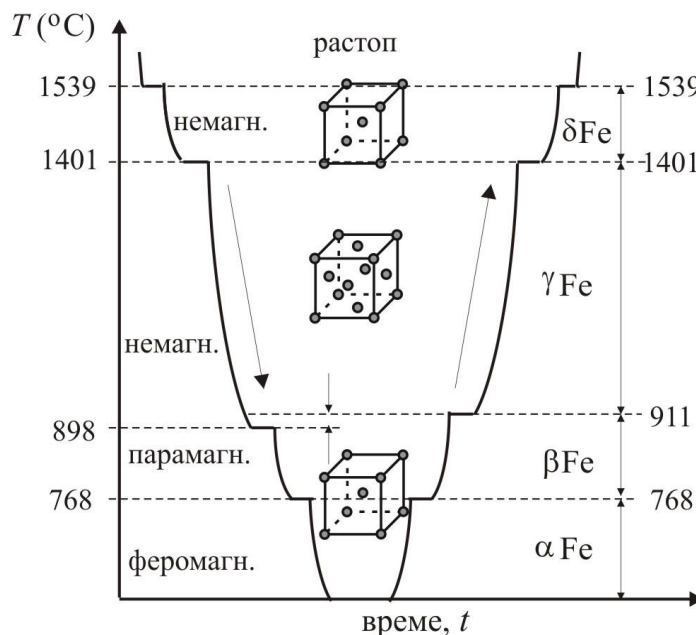
α -Fe, запремински центрирана кубна решетка до температуре 768 °C, која се одликује феромагнетским особинама,

β -Fe, запремински центрирана кубна решетка од 768 °C до 911 °C (при хлађењу 898 °C), са парамагнетним својствима,

γ -Fe, површински центрирана кубна решетка од 911 °C (при хлађењу 898 °C) до 1401 °C,

δ -Fe, запремински центрирана кубна решетка од 1401 °C до 1539 °C. Разлика између α -Fe и δ -Fe је у параметру кристалне решетке.

На слици 6.2. приказан је дијаграм стања гвожђа. Изнад температуре од 1539 °C гвожђе је у течном стању, у стању растоп. При хлађењу, његово очвршћавање ће започети и завршити се на 1539 °C. На овој температури долази до застоја због формирања првих честица кристала, које је праћено ослобађањем топлоте.



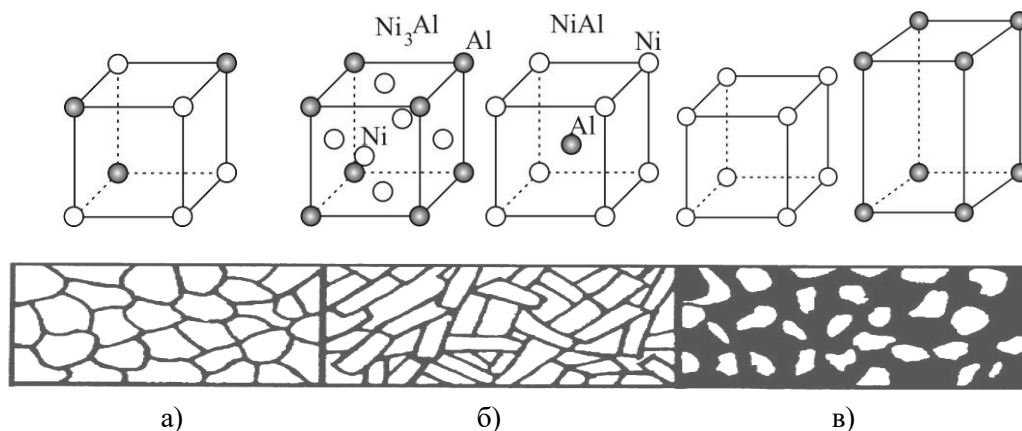
Слика 6.2. Крива хлађења чврстог гвожђа.

Застоји у хлађењу на 1401 °C, 898 °C и 768 °C се дешавају због трансформације кристалне решетке.

6.2.2. Структура легура

У току кристализације легура распоред атома се мења и из приближно уређеног стања прелази се у потпуно уређено стање које се карактерише кристалном структуром. У чврстом стању атоми различитих хемијских елемената могу међусобно да реагују образујући: чврст раствор, хемијско једињење или механичку смешу.

Чврст раствор има исту кристалну решетку као основни метал, а атоми легирајућих елемената се растварају у њој кристалишући у заједничким решеткама кристала (слика 6.3.a). Атоми растворених компоненти могу да замењују атоме основне компоненте, уколико су приближно истих димензија, или могу да се смештају између атома основне компоненте ако су знатно мањи од њих. Чврсти раствори се могу формирати са различитим односом компоненти, при чему однос компоненти може бити произвољан (потпуна растворљивост) или се може кретати у неком распону (делимична растворљивост). Пошто чврсти раствор има исти тип кристалне решетке као и основна компонента њихова својства се не могу превише разликовати. Крива хлађења чврстог раствора се разликује од криве хлађења чистог метала.



Слика 6.3. Структура легура: а) чврст раствор, б) хемијско једињење, в) механичка смеша.

Хемијска једињења (интерметална једињења) настају тако што елементи у растопљеном стању граде једињење. То су фазе које настају хемијском реакцијом компоненти, при чему се формира кристална решетка једињења, која се обично разликује од решетки компоненти које улазе у састав једињења. Компоненте граде једињење са тачно одређеним, стехиометријским односом броја атома. На слици 6.3.б) приказане су кристалне решетке интерметалних једињења Ni_3Al и NiAl . Пошто једињење, по правилу, има различиту решетку у односу на компоненте и

његова својства се знатно разликују од својстава одговарајућих компонената.

При очвршћавању настају заједнички кристали оба елемента, што утиче на велику тврдоћу и крутост таквих метала и легура. Структура легуре је апсолутно хомогена.

Механичка смеша настаје тако што се у растопљеном стању помешани метали међусобно растварају. Када почне кристализација, атоми сваког елемента кристалишу појединачно стварајући сопствену кристалну решетку, задржавајући сопствене особине или остану растворени и граде заједничке кристале (слика 6.3.в). Величина и облик зрна утичу на механичке особине металних материјала. Чврстоћа, пластичност и жилавост материјала се повећавају смањењем величине зрна.

У конвенционалним легурама атоми су кристалографски исто оријентисани у сваком кристалиту. За разлику од њих у тзв. суперлегурама атоми су распоређени у две или више фаза.

Суперлегура се најчешће производе на бази никла, кобалта и титана. У суперлегури на бази никла формирају се две фазе: γ и γ' , са различитим распоредом атома. Кристалне равни атома у обе фазе су упаковане на исти начин, али су места легирајућих атома тачно одређена и различита. На пример, у суперлегури Ni-Al у γ фази сваки атом може да заузме било које место у кристалу, док у γ' фази (Ni_3Al), у одређеним местима у кристалу, на свака три атома никла долази по један атом алуминијума. Кубни кристали γ' фазе уграђују се у матрицу γ фазе. Под дејством силе долази до померања дела равни у материјалу, што доводи до тога да места која су била заузета атомима алуминијума, сада бивају заузета атомима никла и обрнуто. Нови распоред атома има већу енергију него недеформисана γ' фаза и спречава простирање дислокација, односно повећава чврстоћу материјала. Суперлегура на бази никла имају највећу чврстоћу на температури око $850\text{ }^\circ\text{C}$, док на вишим температурама боље особине имају легуре на бази кобалта.

Суперлегура се одликују изузетно добром комбинацијом чврстоће, температурске и корозионе стабилности. Особине суперлегура зависе од хемијског састава и кристалне структуре, а до промена особина долази при температурској обради материјала. Посебно је важна њихова примена у екстремним условима, тако да се користе за израду компоненти нуклеарних реактора, турбина авионских мотора, код петрохемијских постројења итд.

6.3. ОСОБИНЕ МЕТАЛА

Скоро сви метали имају врло слична физичка својства. Имају велику моћ апсорпције електромагнетног зрачења, тако да су потпуно непровидни. Испољавају велику рефлексију у инфрацрвеној (IR) и видљивој (VIS) области спектра што доводи до карактеристичног металног сјаја (слика 6.4.), а транспаренцију у ултраљубичастом (UV) делу спектра.



Слика 6.4. Метални елементи.

Особине метала су условљене њиховом структуром и металном везом. Валентни електрони код метала су слабо везани за металне атоме. При образовању чврстог метала, услед узајамног дејства атома, валентни електрони лако напуштају металне атоме и хаотично се крећу између позитивних јона метала.

Постојање металног чврстог стања резултат је привлачног дејства између позитивно наелектрисаних јона, са једне стране, и електронског гаса са друге стране, као и одбојног дејства између позитивних јона. На тај начин се јони распоређују на међусобна равнотежна растојања која одговарају минимуму потенцијалне енергије. По успостављању равнотежног стања формира се стабилна кристална решетка у којој постоји релативно хомогена расподела негативног наелектрисиња.

Метална веза има сличности са ковалентном везом по питању колективизације електрона, али се истовремено од ње разликује по томе што у овој колективизацији не учествују само два атома већ сви атоми у кристалу. Метална веза може постојати само код већег скупа атома, а слободни електрони у металу одређују и саму кристалну структуру. Они условљавају неусмерени и незасићени карактер везе, тако да већина метала кристалише у структурама које се одликују густим паковањем јона и максималним координационим бројевима.

Код алкалних метала интеракција јонских остатака са проводним електронима даје велики допринос енергији везе. У алкалним металима су

међуатомска растојања релативно велика јер је кинетичка енергија проводних електрона нижа при великим међуатомским растојањима, па настаје слаба веза. Код прелазних метала, међутим, постоје и додатни утицаји на везу, услед интеракција између унутрашњих електронских љуски. Група прелазних елемената (нпр. гвожђе и волфрам) има непопуњене d љуске електрона, тако да их карактерише висока енергија везе.

Особине метала не зависе само од типа кристалне решетке, већ могу зависити и од степена одступања кристала од идеалног. У том смислу, могу се разликовати структурно зависне и структурно независне особине.

Структурно независне особине су незнатно модификоване грешкама кристалне решетке и ту спадају: густина и модул еластичности од механичких особина, топлотно ширење, тачка топљења, топлотна проводност и специфични топлотни капацитет у оквиру топлотних особина, отпор, електрохемијски потенцијал и термоелектричне особине, парамагнетизам и дијамагнетизам, као и рефлексивност.

Структурно зависне особине метала зависе од степена одступања кристала од идеалног и то су: чврстоћа и пластичност у оквиру механичких особина и феромагнетне особине укључујући и магнетострикцију.

6.3.1. Механичке особине метала

Механичка својства описују на који начин материјал одговара на примењено оптерећење тј. силу. Основна механичка својства материјала су: еластичност, пластичност, чврстоћа, тврдоћа, истегљивост и жилавост.

- **Еластичност** представља способност материјала да се након деформисања услед деловања силе, врати у првобитни облик.
- **Пластичност** представља способност материјала да након престанка дејства силе задржи деформисани облик.
- **Чврстоћа** је особина материјала која показује колика оптерећења, односно силе или моменте сила може издржати неки део. У зависности од тога на који начин се оптерећује материјал могу се разликовати: затезна чврстоћа, притисна чврстоћа, чврстоћа на савијање и чврстоћа на увијање.
- **Тврдоћа** представља особину материјала која показује колики је отпор материјала при продирању другог, тврђег тела у његову површину.
- **Жилавост** је особина која показује колика је отпорност материјала на ударно (краткотрајно динамичко) оптерећење.
- **Истегљивост** представља способност материјала да се деформише, а да не дође до прелома.

Метале карактерише релативно велика чврстоћа и крутост, добре пластичне особине и жилавост², као и отпорност на ударе и кидање. Механичке особине: густина ρ , модуо еластичности E , модуо смицања G , тврдоћа по Бринелу HB и Мосова тврдоћа³ HM , најчешће коришћених метала су дате у табели 6.2. где су метали поређани по растућој тврдоћи на Мосовој скали за FCC, HCC и BCC решетке, редом.

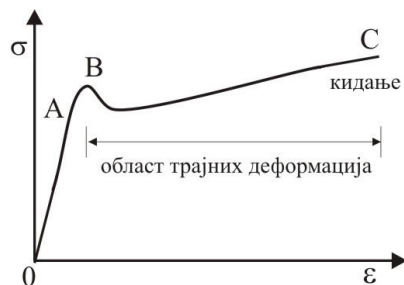
Табела 6.2. Механичке особине метала.

метал	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	G (GPa)	HB (MPa)	HM
⁸² Pb-FCC	11.34	16	5.6	38-50	1.5
⁷⁹ Au-FCC	19.30	79	27	188-245	2.5
⁴⁷ Ag-FCC	10.49	83	30	206-250	2.5
¹³ Al-FCC	2.70	70	26	160-550	2.75
²⁹ Cu-FCC	8.96	110-128	48	235-878	3.0
⁷⁸ Pt-FCC	21.45	168	61	300-500	3.5
²⁸ Ni -FCC	8.91	200	76	667-1600	4.0
⁷⁷ Ir-FCC	22.56	528	210	1670	6.5
¹² Mg-HCC	1.74	45	17	44-260	1-2.5
²⁷ Co-HCC	8.90	209	75	470-3000	5.0
4Be-HCC	1.85	287	132	590-1320	5.5
⁷⁶ Os-HCC	22.59	-	222	3490-4000	7.0
¹¹ Na-BCC	0.968	10	3.3	0.69	0.5
²⁶ Fe-BCC	7.87	211	82	200-1180	4
⁴² Mo-BCC	10.28	329	126	1370-2500	5.5
⁷⁴ W-BCC	19.25	411	161	2000-4000	7.5
²⁴ Cr-BCC	7.19	279	115	687-6500	-

²Пластична својства и жилавост неког материјала се често једним именом називају *дуктилност*. Метали се одликују високом дуктилношћу.

³Мосова скала тврдоће се користи за одређивање релативне тврдоће минерала. Предложио ју је Фридрих Мос (Frederich Mohs), немачки минералог, 1812. године. Мосова скала представља низ од 10 минерала, који су поређани по тврдоћи, од најmekшег (талк са тврдоћом 1) до најтврђега (дијамант са тврдоћом 10). Скала није пропорционална, наиме, дијамант није десет пута тврђи од талка, већ много више. Класификација се заснива на способности испитиваног минерала да огребе површину узорка. Уколико испитивани материјал може да огребе површину одређеног минерала из Мосове скале, онда је он тврђи од тог минерала и налази се на скали изнад њега.

Сви метали и легуре при малом напону показују еластично понашање, што значи да су деформације повратне и зависност између напона и деформације је линеарна. Повећањем напона изнад границе еластичности долази до пластичног деформисања материјала. На слици 6.5. је приказана типична крива деформације метала при дејству напона на којој се може запазити неколико области. У еластичној, линеарној области ОА, промене облика материјала су реверзибилне и материјал се након престанка деловања силе враћа у првобитно стање. У пластичној области ВС, промене облика испитиваног материјала су иреверзибилне, тј. материјал задржава деформисани облик и након престанка деловања силе. Пластичне деформације расту све док не дође до киданја испитиваног узорка (тачка С).



Слика 6.5. Крива деформације метала при оптерећењу.

Промена запремине услед еластичне деформације је код већине материјала релативно мала, нпр. при свестраном сабијању притиском од 100 MN/m^2 запремина гвожђа се смањује за око 0.6%, а бабра за 1.3%, док се запремина церијума смањује за 30%.

Еластична деформација узорка-епрувете може се мерити помоћу дифракције рендгенских зрака на основу промене међуатомског растојања до које долази под дејством спољашњих сила. При еластичној деформацији постоји линеарна зависност између напона и деформације која је дефинисана Хуковим законом. У случају када напон делује нормално на површину попречног пресека епрувете константа пропорционалности је моду еластичности E , док је у случају деловања тзв. смицајног напона паралелно површини константа пропорционалности моду смицања G .

Приликом издужења епрувете долази до попречних контракција, па се однос попречне деформације и издужења дефинише Поасоновим коефицијентом ν . Како ове три константе нису међусобно независне, број независних константи еластичности се своди на две: E и ν .

Ови односи између напона и деформације важе за еластично изотропне материјале. Међутим, еластичне особине кристалних материјала најчешће нису потпуно изотропне, тако да се за дефинисање односа између напона и деформације мора узети у обзир да еластичне константе могу бити различите у различитим правцима.

Линеарна зависност између напона и деформације, односно Хуков закон, се може дати на два начина: тако да се свака компонента напона изрази као линеарна функција свих компоненти деформације или да се свака компонента деформације изрази као линеарна функција свих компоненти напона. Може се показати да постоји шест независних компоненти напона и шест независних компоненти деформације, што значи да је потребно дефинисати 6 једначина са 36 константи еластичности које представљају општи Хуков закон.

Потребан број независних константи може се смањити захваљујући одређеном степену симетрије кристалних решетки. Триклинични кристали имају најмањи степен симетрије и захтевају 21 константу, док орторомбични кристали захтевају 9 константи, хексагонални пет, а кубни кристали само три константе, што знатно олакшава њихово одређивање.

За разлику од еластичних деформација, пластичне деформације су неповратне и структурно зависне особине металних материјала. Једини тип деформационог процеса код кога се не мењају густина и структура је смицање једног дела кристала у односу на други тако да сваки атом на крају заузима положај атома који је пре деформације био у том положају. Распоред атома је, у том случају, у највећем делу запремине деформисаног метала идентичан оном који поседује недеформисани метал и не зависи од механизма пластичне деформације. Ако се промене при пластичној деформацији посматрају у атомским размерама онда се може дефинисати пет основних механизма пластичне деформације: клизање, двојниковање, пењање/спуштање дислокација, клизање по границама зрна и дифузионо пластично попуштање.

Клизање је најважнији механизам пластичне деформације. Механизам двојниковања је значајан на ниским температурама, при великим брзинама деформације или када се у металу јавља мали број система клизања, док су клизање по границама зрна и дифузионо пластично попуштање доминантни на повишеним температурама.

Механичка својства метала се одређују у лабораторијама, под строго дефинисаним условима испитивања, применом стандардних процедура и на специјално припремљеним узорцима (епруветама). Она представљају најважнији показатељ при избору материјала за израду машинских

елемената, делова или конструкција. Метали се могу ковати и извучити у жице, што омогућава њихову разноврсну примену.

Еластичне особине су веома важне код избора материјала за одређене врсте примене, на пример, одређени делови различитих конструкција захтевају материјале са великим вредностима модула еластичности. Битна особина константи еластичности је да се не мењају значајно са променом хемијског састава легура, термичком обрадом или под утицајем других фактора.

У случају када је битније преузимање напона еластичне деформације него чврстоћа, предност имају материјали са малом вредношћу модула еластичности. При ударним оптерећењима материјал са нижим модулом еластичности има већу способност поништавања енергије удара, тако да у том случају легуре магнезијума ($E \approx 45 \text{ GPa}$) и алуминијума ($E \approx 75 \text{ GPa}$) имају знатну предност у односу на челик који има високу вредност модула еластичности ($E \approx 200 \text{ GPa}$). Због тога се, на пример, каросерије аутомобила праве од легура алуминијума.

Метали, а посебно легуре код којих је могуће тачном комбинацијом хемијских елемената и одабраним поступцима прераде побољшати одређена својства, имају широку примену за израду конструкција и високо оптерећених елемената у грађевинарству. Због својих одличних механичких особина користе се и за израду машина и алата.

6.3.2. Топлотне особине метала

Основне топлотне карактеристике метала су: тачка топљења T_m , латентна топлота топљења Q_m , коефицијент топлотног ширења α , моларни топлотни капацитет c , коефицијент топлотне проводности K итд. (табела 6.3.).

Метали се могу поделити на лако топиве (цинк, олово, кадмијум итд.) и тешко топиве метале (гвожђе, бакар, платина, осмијум, молибден итд.). Најнижу тачку топљења има жива која се на собној температури налази у течној фази ($-38.83 \text{ }^\circ\text{C}$), а највишу волфрам ($3422 \text{ }^\circ\text{C}$).

За разлику од чистих метала, код којих се прелази из једног у друго агрегатно стање (течно→чврсто при кристализацији, односно чврсто→течно при топљењу) одвијају при константној температури, код легура се ови прелази одвијају у одређеном температурском интервалу. У идеалном случају (чисти метали, веома мала брзина промене температуре) температура топљења је једнака температури кристализације. Температура топљења материјала зависи од енергије потребне да се раздвоје атоми. Од

велике је важности познавање ове величине приликом избора материјала за израду компоненти које су у експлоатацији изложене високим температурама, као што су делови млазних мотора, индустријских пећи и делови где се развија топлота услед трења.

Табела 6.3. Топлотне особине метала.

метал	T_m (°C)	Q_m (kJ/mol)	α $10^{-6} / \text{K}$	c (J/mol K)	K (W/mK)	$\alpha \times T_m$ 10^3
$_{82}\text{Pb-FCC}$	327.46	4.77	28.9	26.650	35.3	9.46
$_{13}\text{Al-FCC}$	660.32	10.71	23.1	24.20	237	15.25
$_{47}\text{Ag-FCC}$	961.78	11.28	18.9	25.350	429	18.18
$_{79}\text{Au-FCC}$	1064.18	12.55	14.2	25.418	318	15.11
$_{29}\text{Cu-FCC}$	1084.62	13.26	16.5	24.440	401	17.896
$_{28}\text{Ni-FCC}$	1455	17.48	13.4	26.07	90.9	19.497
$_{78}\text{Pt-FCC}$	1768.3	22.17	8.8	25.68	71.6	15.56
$_{77}\text{Ir-FCC}$	2446	41.12	6.4	25.10	147	15.65
$_{12}\text{Mg-HCC}$	650	8.48	24.8	24.869	156	16.12
$_{4}\text{Be-HCC}$	1287	11.3	13.0	16.443	200	16.731
$_{27}\text{Co-HCC}$	1495	16.06	12.3	24.81	100	18.39
$_{76}\text{Os-HCC}$	3033	57.85	5.1	24.70	87.6	15.47
$_{11}\text{Na-BCC}$	97.8	2.60	71	28.230	142	6.94
$_{26}\text{Fe-BCC}$	1538	13.81	11.8	25.10	80.04	18.15
$_{24}\text{Cr-BCC}$	1907	21.0	4.9	23.35	93.9	9.34
$_{42}\text{Mo-BCC}$	2623	37.48	4,8	24.06	138	12.59
$_{74}\text{W-BCC}$	3422	35.3	4.5	24.27	173	15.4

Када је реч о металима са кубном структуром, **топлотно ширење** је изотропно и довољан је само један параметар, а то је линеарни коефицијент топлотног ширења α , за описивање датог материјала на одређеној температури. Са друге стране, код метала који имају кристалну структуру различиту од кубне, топлотно ширење је најчешће анизотропно и описује се са три параметра.

Коефицијент топлотног ширења повезан ја са латентном топлотом топљења Q_m и тачком топљења. Наиме, претпоставља се да се коефицијент топлотног ширења мења обрнуто пропорционално тачки топљења за кристалне структуре као што је површински центрирана-FCC и

приближно на такав начин за све метале. Показало се да постоји добра сагласност са овом претпоставком код метала са FCC решетком, док је код метала са HCC решетком слагање мање вероватно због анизотропије. Код метала са ВСС решетком разликују се алкални метали са високим вредностима α (која за натријум износи 71) и прелазни метали чије су вредности упоредиве са вредностима за FCC решетке.

У табели 6.3. дате су вредности производа α (на температури 25 °C) и T_m , где се могу уочити приближно константне вредности овог производа. Елементи су поређани по растућој тачки топљења за FCC, HCC и ВСС решетке, редом. Постоје и примери где топлотно ширење не показује овако једноставну зависност од тачке топљења, као што је уран који на собној температури има орторомбичну кристалну решетку. Он се одликује изразитом анизотропношћу, где један од три коефицијента топлотног ширења има негативну вредност.

Метали су добри проводници топлоте што се објашњава присуством великог броја слободних електрона у материјалу. Коефицијент топлотне проводности зависи од температуре на којој се материјал налази. На собној температури чисти метали обично имају вредност коефицијента топлотне проводности за један или два реда величине већу у односу на чврсте диелектрике. Топлотна проводност се креће од средње (кобалт, никал, олово итд.) до високе (бакар, сребро, злато итд.), што се може видети у табели 6.3. При овим условима доминантан допринос топлотној проводности дају слободни електрони.

Утврђено је да је код чистих метала, електронски допринос доминантан на свим температурама. Међутим, код примесних метала и неуређених легура фононски допринос може бити упоредив са електронским.

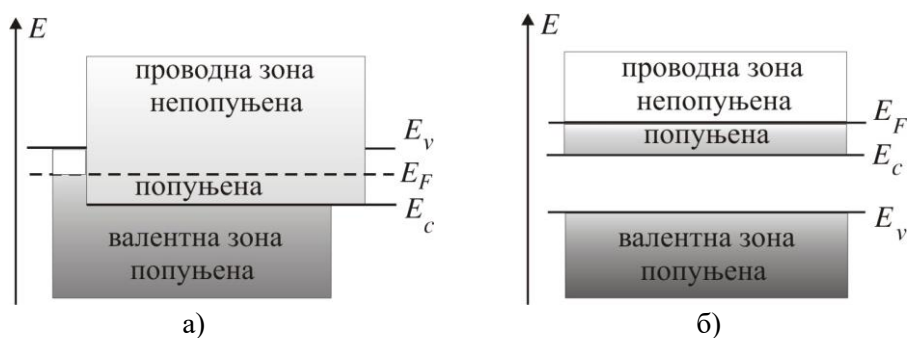
6.3.3. Електричне особине метала

За метална чврста тела са металном везом карактеристично је да су добри проводници електрицитета, због постојања слободних електрона. Електричне особине метала објашњавају се на основу зонске теорије.

Електрони у изолованом атому могу имати само одређене дискретне вредности енергија. Приликом образовања чврстих тела енергетска стања електрона у атому се мењају услед деловања периодичног електричног поља кристалне решетке, које деформише енергетске нивое електрона. Долази до цепања енергетских нивоа и формирања енергетских зона са веома блиским вредностима енергија, које зависе од међуатомских веза у

одређеној кристалној решетки. Енергетске зоне могу бити различито попуњене електронима. Последња зона у којој се електрони налазе још увек у везаном стању се назива **валентном зоном** (енг. valence band), док се зона у којој се електрони могу кретати слободно назива **проводном зоном** (енг. conduction band).

На основу зонске теорије метала, код проводника најчешће долази до преклапања валентне и проводне зоне, што је приказано на слици 6.6.а) или уколико нема преклапања проводна зона је делимично попуњена електронима до Фермијевог нивоа E_F на $T = 0$ К, као на слици 6.6.б), где је E_C енергија дна проводне зоне, а E_V енергија врха валентне зоне. То условљава добру електричну проводност јер је потребна релативно мала енергија како би електрони из валентне прешли у проводну зону.



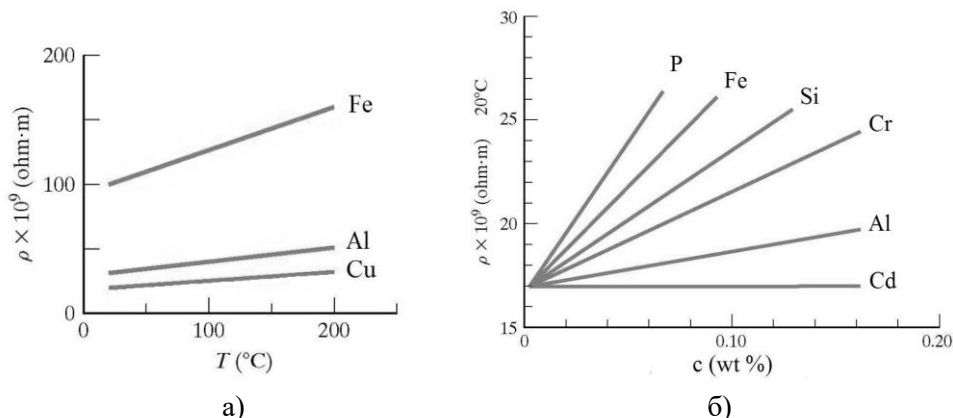
Слика 6.6. Енергетске зоне код метала.

Електрична проводност σ метала опада са порастом температуре. Зависност проводности од температуре није линеарна, међутим, ако се посматра електрична отпорност ρ , као величина обрнуто пропорционална проводности, онда се добија линеарна зависност електричне отпорности од температуре:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (6.1)$$

где је ρ_0 - електрична отпорност на собној температури, T_0 - собна температура и α - температурски коефицијент отпорности датог материјала. За метале је карактеристично да је вредност температурског коефицијента отпорности позитивна. На слици 6.7.а) приказана је промена електричне отпорности са повећањем температуре за бакар, алуминијум и гвожђе.

Сви метали, а посебно бакар, као добри електрични проводници се користе за израду компоненти са великом електричном проводношћу. Алуминијум има скоро двоструко мању електричну проводност од бакра, али мању специфичну тежину, тако да замењује бакар како би се смањило оптерећење тежином на одређеним местима где се то захтева.



Слика 6.7. Електрична отпорност: а) метала у зависности од температуре, б) бакарних легура од концентрације легирајућих компоненти (Cd, Al, Cr, Si, Fe, P).

Електричне особине: проводност σ , отпорност ρ и температурски коефицијент отпорности α за поједине чисте метале и легуре дате су у табели 6.4.

Табела 6.4. Електричне особине појединих чистих метала и легура.

метал	σ (10^6 S/m)	ρ (10^{-8} Ω m)	α (K^{-1})
сребро Ag	62.1	1.6	0.0038
бакар Cu	58.5	1.7	0.003862
злато Au	44.2	2.3	0.0034
алуминијум Al	36.9	2.7	0.0039
никал Ni	14.3	7.0	0.006
гвожђе Fe	10.1	9.9	0.005
бронза 67Cu-33Sn	7.4	13.5	-
нерђајући челик 304	1.37	73.0	-
легура Fe-Cr	0.74	134	-

У односу на чисте метале, одговарајуће легуре имају мању електричну проводност, односно већу отпорност. Наиме, легирајуће компоненте повећавају број места на којима се електрони расејавају, а тиме и електричну отпорност. За мале концентрације додатих компонената, електрична отпорност материјала линеарно расте са порастом концентрације легуре:

$$\rho_{legure} = \rho_{matrice} (1 + \beta c) \quad (6.2)$$

где је ρ_{legure} -електрична отпорност легуре, $\rho_{matrice}$ -електрична отпорност чистог метала, β -константа за дати материјал и c -концентрација легирајуће компоненте. На слици 6.7.б) приказана је линеарна зависност електричне отпорности појединих бакарних легура од концентрације одговарајућих легирајућих компоненти (Cd, Al, Cr, Si, Fe и P) на температури $t = 20$ °C. Ефекат легирања проводника је искоришћен за израду отпорника и грејача, који поред велике електричне отпорности имају и велику отпорност на корозију на високим температурама.

За разлику од велике сличности у погледу физичких особина, у односу на хемијску реактивност метали се јако разликују.

- У реакцији са водом реактивнији дају хидроксиде и ослобађају водоник, најреактивнији метали реагују са хладном водом, док мање реактивни реагују са топлим водом, а неки са воденом паром. Неки метали уопште не реагују са водом.

- У реакцији са кисеоником дају оксиде метала, тако да већина метала има веома малу отпорност на корозију, осим живе, злата и платине који не реагују са кисеоником.

- У реакцији са киселинама реактивнији истискују водоник из киселина које нису оксидационо средство, слабије реактивни реагују само са киселинама које су оксидациона средства, а племенити метали не реагују са киселинама.

- У реакцији деловања метала на соли другог метала долази до потискивања метала који је ниже у низу реактивности из његове соли.

6.3.4. Промена особина метала

Начин на који су атоми распоређени у кристалној решетки одређује многе механичке особине метала. У стварности кристали никад немају савршену структуру. Под дејством спољашњих сила долази до промене распореда атома и равнотежне концентрације дефеката, међуатомске везе се кидају и успостављају на другом месту, а материјал се деформише еластично или пластично.

Дефекти у кристалној решетки и примесе у материјалу знатно утичу на промене особина материјала, посебно на еластичност и понашање на високим температурама. Концентрација дефеката у материјалу може да се мења и зависи од начина обраде материјала. Равнотежна концентрација ваканција N_v за укупан број атомских места N , зависи од температуре T на следећи начин:

$$N_v = N \exp(-E_v / kT) \quad (6.3)$$

где је E_v -енергија потребна за формирање ваканција, а k је Болцманова константа. За већину метала на температурама у близини тачке топљења, равнотежна концентрација ваканција је реда 10^{-4} .

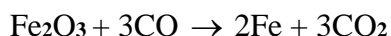
Нечистоће у виду тачкастих дефеката, супституционе или интерстицијске, формирају чврст раствор остављајући кристалну структуру материјала непромењеном. Додавањем атома другог метала, мења се распоред атома и начин формирања блиско сложених равни, што утиче на повећање чврстоће материјала.

Особине метала могу се мењати у жељеном правцу до одређене границе, а најчешћи поступак измене особина метала је легирање-замена атома једне врсте у кристалу, атомима друге врсте.

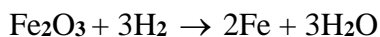
6.4. ДОБИЈАЊЕ МЕТАЛА

Са развојем човечанства развила се и посебна грана делатности: металургија, односно умеће добијања метала из руде. Метали се из богатијих или обогаћених руда добијају углавном поступцима редукције, отапања и електролизе. У свим тим поступцима долази до процеса редукције.

Редукција се заснива на редукцији металних оксида, најчешће помоћу кокса, дрвеног угља или угљенмоксида, при чему је важно да је реакција егзотермна. Тако се нпр. добија гвожђе у високим пећима:



Редукција се може извршити и са водоником:



а такође и са алуминијумом у праху.

Отапање је поступак који се темељи на хемијској реакцији отапања и одвајању минералне компоненте од јаловине. Тако се нпр. може добити злато отапањем у растопу натријумовог цијанида из златоносних руда.

Електролиза је поступак којим се могу добити метали из растопа соли. Принцип добијања метала електролизом је процес редукције на катоди. Метода се употребљава и за пречишћавање или рафинисање метала. Електролизом се нпр. добијају и рафинишу алуминијум и бакар.

6.5. ДИЈАГРАМИ СТАЊА МЕТАЛА И ЛЕГУРА

Дијаграм стања је графички приказ стања система легура у зависности од температуре и концентрације компоненти. Стање легуре се карактерише бројем и врстом присутних структурних фаза у легури а одређено је температуром, притиском и концентрацијом компоненти. Број фаза у једној легури је одређен бројем компоненти које чине легуру.

Структурна фаза је хомогени део легуре који има исти тип кристалне решетке и иста својства у свим својим тачкама. У легурама се могу јавити следеће врсте фаза: компоненте, чврсти раствори, хемијска једињења и прелазне фазе. Компоненте су фазе састављене само од једне врсте атома. Компонента је углавном хемијски елемент који улази у састав легуре, а изузетак представљају само стабилна једињења која се понашају као компоненте у легури.

У сваком дијаграму стања могу се разликовати ликвидус и солидус линија. Ликвидус температура означава температуру почетка кристализације, а солидус температура завршетак кристализације. Крива хлађења показује промену температуре спонтано хлађене легуре у току времена, од растопа до собне температуре. На основу карактеристичних тачака кривих хлађења (застоји и промене правца) конструише се дијаграм стања.

Дијаграми стања се могу разврстати у неколико група у зависности од облика и структурних промена при хлађењу, тако да разликујемо:

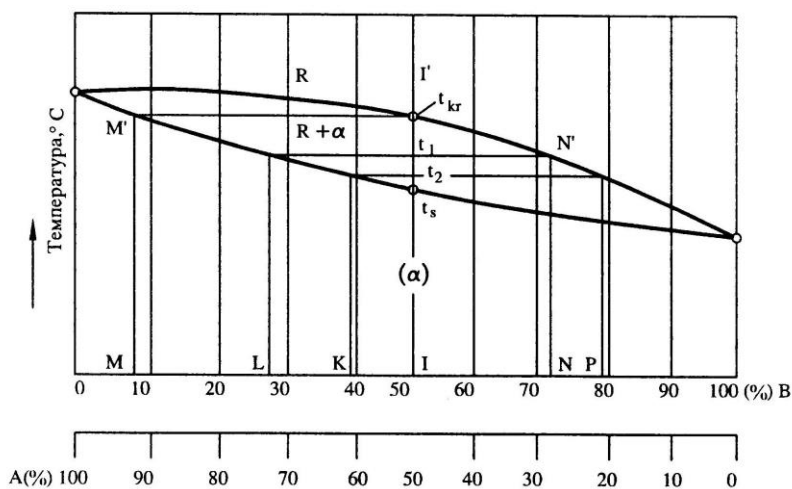
- дијаграм стања легура чије се компоненте не растварају ни у течном ни у чврстом стању,
- дијаграм стања легура чије се компоненте делимично растварају у течном стању а не растварају се у чврстом стању,
- дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном стању а не растварају се у чврстом стању,
- дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном стању а делимично у чврстом стању и
- дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном и чврстом стању.

Потпуно растварање подразумева формирање хомогеног раствора при било ком односу компоненти, док делимично растварање значи да је могуће растварање једне или више компоненти до одређене ограничене количине. Уколико компоненте у легури кристалишу посебно, градећи решетку само са сопственим атомима онда се компоненте не растварају у чврстом стању. Од већег техничког значаја су последња три наведена типа дијаграма.

6.5.1. Дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном и чврстом стању

Овакав дијаграм стања могу да граде само компоненте које имају исти тип кристалне решетке, малу разлику параметара решетке (разлика у величини атома је мања од 8%) и мали хемијски афинитет, на пример двојне легуре: Cu-Ni, Au-Ag, Fe-Cr, Fe-V итд. Ови дијаграми стања су најједноставнији јер се у легурама у чврстом стању јавља само једна фаза због тога што се компоненте могу растварати у било ком односу формирајући супституцијски чврст раствор.

Типичан дијаграм стања бинарног система приказан је на слици 6.8., где се на апсису наносе процентуални састави компоненти легуре, а на ординату температура. На дијаграму стања горња линија је **ликвидус линија** и изнад ње су све легуре у течном стању (подручје растопа R). Испод **солидус линије** (доња линија) све легуре су у чврстом стању, а ово подручје је једнофазно са низом α -чврстих раствора. Како се компоненте А и В потпуно растварају једна у другој и у течном и у чврстом стању, између ликвидус и солидус линије постоје само две фазе ($R + \alpha$): растоп-R и кристали α -чврстог раствора.



Слика 6.8. Дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном и чврстом стању.

Процес кристализације растопа може се објаснити на примеру спорог хлађења легуре која се састоји од 50% компоненте А и 50% компоненте В. На слици је ова легура означена I-I'. На температури t_{kr} започиње процес кристализације, када се образују први кристали чврсте фазе. Састав чврсте фазе се одређује тако што се на датој температури уочи тачка M' на

солидус линији, а пројекција ове тачке на апсцису (тачка М) показује састав кристалита који се први образују. Даљим хлађењем, када легура достигне температуру t_1 , на исти начин се добија да се у равнотежи са растопом налазе само кристали чији састав одговара тачки L на апсциси.

Хлађењем од t_{kr} до t_1 кристалити састава који одговара тачки М трансформишу се у кристалите састава који одговара тачки L. Наиме, у кристалитима састава М има мање компоненте В него у кристалитима састава L. То се објашњава процесом дифузије, на датој температури, атома компоненте А из кристалита са већом концентрацијом (састав М) у кристалите са мањом концентрацијом (састав L). При веома спором хлађењу на температури t_1 успоставља се равнотежа између кристала састава који одговара тачки L и растопа. Међутим, како у кристалима састава L компоненте В има мање него у легури полазног састава, то значи да је преостала течна фаза обogaћена компонентом В. На посматраној температури састав течне фазе се одређује пројекцијом тачке N' са ликвидус линије на апсцису (тачка N).

При даљем хлађењу до температуре t_2 , поново се успоставља равнотежа и легура се састоји из кристала чврстог раствора састава који одговара тачки K и дела течне фазе чији састав одговара тачки P. Са снижењем температуре, дакле, долази до пораста удела кристала α -чврстог раствора чији се састав све више приближава полазном. На температури t_s долази до потпуне кристализације легуре која се састоји од хомогених кристала α -чврстог раствора полазног састава. Након завршене кристализације структура легуре је једнофазна, не мења се при даљем хлађењу до собне температуре, једино се може одвијати дифузија у циљу уједначавања хемијског састава.

Неопходно је да се процес одвија у условима веома спорог хлађења, јер једино тада сва формирана кристална зрна имају потпуно исти хемијски састав. Уколико се хлађење одвија већом брзином, што су најчешће реални услови хлађења, састав кристала није хомоген и различита кристална зрна имају различит хемијски састав јер је у том случају брзина кристализације већа од брзине дифузије атома.

Нехомогеност хемијског састава унутар полигоналних кристалних зрна назива се **кристална сегрегација**, а нехомогеност повезана са кристалним зрнима облика дендрита-дендритна **сегрегација**. Дендритна сегрегација може да се одстрани дуготрајним загревањем легуре на високим температурама, које је познато као дифузионо жарење. Током дифузионог жарења се интензивира дифузија атома из области са већом концентрацијом у области са мањом концентрацијом, односно долази до

изједначавања хемијског састава. Нехомогеност по запремини целог комада-зонална ликвација практично се не може одстранити.

Удео и састав кристала и растопа за сваку фазу бинарног фазног дијаграма на било којој температури могу се одредити **Правилном полуге**. На пример, на температури t_1 процентуални удео компоненте А у чврстој фази x_s је одређен тачком L, а удео исте компоненте у течној фази x_l је одређен тачком N. За било који састав легуре на хоризонталној линији L'-N' за температуру t_1 може се удео компоненте А означити са x_0 . У том случају је удео компоненте А у чврстом X_{As} и течном стању X_{Al} дефинисан на следећи начин:

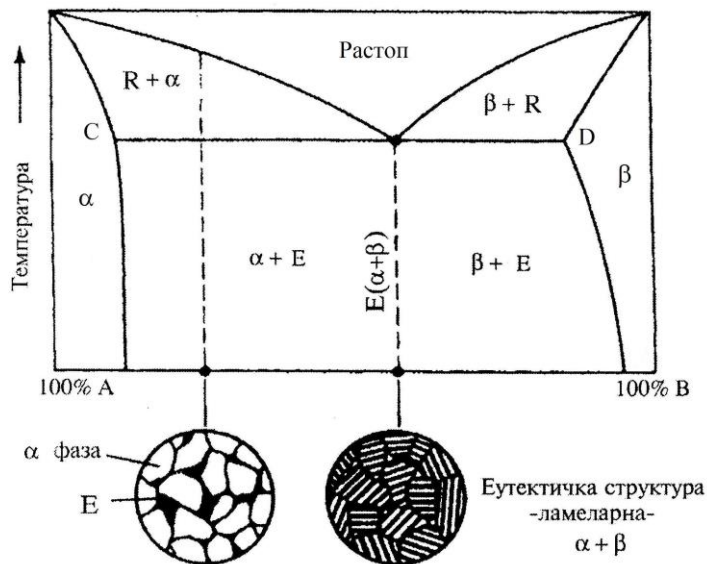
$$X_{As} = \frac{x_0 - x_l}{x_s - x_l}, \quad X_{Al} = \frac{x_s - x_0}{x_s - x_l} \quad (6.4)$$

На исти начин одређује се и удео компоненте В у чврстој и течној фази. Својства легура које припадају овом дијаграму стања се мењају нелинеарно, највеће промене настају при малим додацима друге компоненте. Утицај се смањује са повећањем концентрације и максимум или минимум вредности својстава се постиже при 50 атомских процената компоненти.

6.5.2. Дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном и делимично у чврстом стању

Дијаграм стања са делимичном растворљивошћу компонената у чврстом стању карактеристичан је за бројне системе, у које спадају Cu-Al, Cu-Zn, Al-Mg итд. Разлика у величини атома хемијских елемената који образују овакав тип дијаграма стања је (8-15)%, што значи да легирајућа компонента може да се раствори у решетки основног метала до тачно одређеног садржаја, чиме се формира чврст раствор. Када је легирајућа компонента садржана у легури преко одређене количине, она не може више да се раствара. Типичан дијаграм стања приказан је на слици 6.9.

Легуре које имају овакав тип дијаграм стања могу да имају у структури чврсте растворе, хемијска једињења или компоненте. Уколико је присутна мала количина легирајуће компоненте, она се може потпуно растворити у основној компоненти и тада се формира само један чврсти раствор α или β фаза. У легурама које имају састав између тачака С и D настаје еутектичка реакција у којој при тачно одређеном саставу растопа на тачно одређеној температури настаје смеша кристала чврстих раствора E ($\alpha + \beta$).



Слика 6.9. Дијаграм стања легура чије се компоненте потпуно растварају у течном стању и делимично у чврстом стању.

Промена својстава ових легура са променом састава се одвија нелинеарно у делу састава од 100 % A компоненте до тачке C и од 100 % B до тачке D, а између састава одређених тачкама C и D, промена је линеарна. Овакав тип дијаграма стања се најчешће јавља у пракси.