

**Д-р Јован Мицковски**

# **ФИЗИЧКА МЕТАЛУРГИЈА**

**УЧЕБНИК ЗА IV ГОДИНА**

**МЕТАЛУРШКА СТРУКА**

**СКОПЈЕ**

**2015**

**Автори:**

Д-р Јован Мицковски, редовен професор,  
Технолошко-металуршки факултет, Скопје

**Рецензенти:**

Д-р Игнат Ефремов

Чедомир Крстев, дипл. маш. инж.

Дончо Петков, Дипл. маш. инж.

**Издавач:** Министерство за образование и наука на Република Македонија

**Печати:** Графички центар дооел, Скопје

---

Со решение на Министерот за образование и наука на Република македонија бр. 22-4287/1 од 28.07.2010 година се одобрува употребата на овој учебник

---

## СОДРЖИНА

<b>1. МЕТАЛИ</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. ГРАДБА НА АТОМ</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2. ПОВРЗУВАЊЕ НА АТОМИТЕ</b> .....	<b>6</b>
1.2.1. ЈОНСКА ВРСКА .....	8
1.2.2. КОВАЛЕНТНА ВРСКА.....	8
1.2.3. МЕТАЛНА ВРСКА .....	9
<b>1.3. КРИСТАЛНИ РЕШЕТКИ НА МЕТАЛИТЕ</b> .....	<b>10</b>
1.3.1. ТИПИЧНИ МЕТАЛНИ КРИСТАЛНИ РЕШЕТКИ .....	10
1.3.2. НЕТИПИЧНИ МЕТАЛНИ СТРУКТУРИ .....	14
1.3.3. ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕМЕНТАРНА КЕЛИЈА И ГУСТИНА КАЈ МЕТАЛИТЕ.....	14
<b>1.4. ГРЕШКИ ВО СТРУКТУРАТА НА МЕТАЛИТЕ</b> .....	<b>15</b>
<b>1.5. ФАЗНА РАМНОТЕЖА ВО ЧИСТИТЕ МЕТАЛИ</b> .....	<b>16</b>
<b>1.6. КРИВИ НА ЗАГРЕВАЊЕ И ЛАДЕЊЕ</b> .....	<b>19</b>
<b>2. ЛЕГУРИ</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1. ПОДЕЛБА НА ЛЕГУРИТЕ</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2. КРИСТАЛНИ СТРУКТУРИ НА ЛЕГУРИТЕ</b> .....	<b>23</b>
2.2.1. ЕДНОФАЗНИ ЛЕГУРИ .....	23
2.2.1.1. СУПСТИТУЦИСКИ ЦВРСТИ РАСТВОРИ.....	23
2.2.1.2. ЛЕГУРИ СО ИНТЕРСТИЦИСКИ ЦВРСТИ РАСТВОРИ .....	27
2.2.3. ПОВЕЌЕФАЗНИ ЛЕГУРИ.....	30
<b>2.3. МИКРОСТРУКТУРА НА ЛЕГУРИТЕ</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4. ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ЛЕГУРИ</b> .....	<b>32</b>
2.4.3. ДОБИВАЊЕ ЛЕГУРИ СО ЛЕЕЊЕ.....	33
2.4.4. ДОБИВАЊЕ НА ЛЕГУРИ СО СИНТЕРУВАЊЕ .....	34
2.4.5. ДОБИВАЊЕ ЛЕГУРИ СО ЕЛЕКТРОХЕМИСКИ МЕТОДИ.....	35
<b>2.5. ИНДУСТРИСКИ ЛЕГУРИ</b> .....	<b>35</b>
<b>3. КРИСТАЛИЗАЦИЈА</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1. ПРОЦЕС НА КРИСТАЛИЗАЦИЈА НА РАСТОП И ФОРМИ НА КРИСТАЛИ</b> .....	<b>41</b>
3.1.1. ФОРМА НА КРИСТАЛИТЕ ВО ОДЛИВКИ.....	46
3.1.2. ЕВТЕКТИЧКА КРИСТАЛИЗАЦИЈА И ФОРМА НА КРИСТАЛИТЕ .....	49
<b>3.2. АЛОТРОПИЈА И ПОЛИМОРФИЈА</b> .....	<b>50</b>
<b>3.3. ЛИКВАЦИЈА ПРИ КРИСТАЛИЗАЦИЈА НА ЛЕГУРИ</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4. ЛУНКЕРИ (ПРАЗНИНИ) ОД КРИСТАЛИЗАЦИЈА</b> .....	<b>51</b>
<b>4. ФАЗНА РАМНОТЕЖА ВО ДВОКОМПОНЕНТНИ СИСТЕМИ</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1. ОСНОВИ ПОИМИ ОД ТЕРМОДИНАМИКА НА РАМНОТЕЖНИ СИСТЕМИ</b> .....	<b>53</b>
<b>4.2. ПРАВИЛО НА ФАЗИ ВО ПОЛИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ</b> .....	<b>54</b>
<b>4.3. ДИЈАГРАМИ НА СОСТОЈБАТА НА ДВОЈНИ ЛЕГУРИ</b> .....	<b>55</b>
4.3.1. ОЗНАЧУВАЊЕ ВО ДВОКОМПОНЕНТНИТЕ РАМНОТЕЖНИ ДИЈАГРАМИ .....	56
Специфични називи на одделните линии во двокомпонентните системи .....	57
4.3.2. ПРАВИЛО НА ЛОСТОВИ .....	57

4.3.3. КОНСТРУИРАЊЕ НА ДВОКОМПОНЕНТНИТЕ ДИЈАГРАМИ.....	58
<b>4.4. ВИДОВИ НА ФАЗНИ ДИЈАГРАМИ .....</b>	<b>59</b>
4.4.1. ДИЈАГРАМ СО ЦЕЛОСНА НЕРАСТВОРЛИВОСТ НА МЕТАЛИТЕ ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА.....	59
4.4.2. ДИЈАГРАМ СО МАЛА РАСТВОРЛИВОСТ ВО ТЕЧНА И ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА.....	60
4.4.3. ДИЈАГРАМ СО ЦЕЛОСНА РАСТВОРЛИВОСТ НА МЕТАЛИТЕ ВО ТЕЧНА И ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА.....	60
КОРИСТЕЊЕ НА ПРАВИЛОТО НА ЛОСОВИ ВО ДИЈАГРАМ СО ПОТПОЛНА РАСТВОРЛИВОСТ НА КОМПОНЕНТИТЕ .....	61
4.4.4. ДВОКОМПОНЕНТНИ ДИЈАГРАМИ СО ЕВТЕКТИКУМ .....	62
4.4.5. ДИЈАГРАМ СО ОГРАНИЧЕНА РАСТВОРЛИВОСТ НА КОМПОНЕНТИТЕ ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА.....	65
4.4.6. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ СО ПЕРИТЕКТИЧКА РЕАКЦИЈА .....	67
4.4.7. ДИЈАГРАМИ СО ИНТЕРМЕТАЛНИ СОЕДИНЕНИЈА И ФАЗИ.....	69
4.4.8. ДИЈАГРАМ СО ИНТЕРМЕТАЛНО СОЕДИНЕНИЕ СО ПОКРИЕН МАКСИМУМ .....	70
4.4.9. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ СО ЕВТЕКТОИДНА РЕАКЦИЈА .....	71
4.4.10. ДРУГИ ТИПОВИ БИНЕРНИ ДИЈАГРАМИ НА СОСТОЈБА.....	72
<b>4.5. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ FE-FE<sub>3</sub>C.....</b>	<b>73</b>
4.5.1. ЖЕЛЕЗНИ ЛИВОВИ.....	77
<b>5. ТРИКОМПОНЕНТНИ ФАЗНИ ДИЈАГРАМИ .....</b>	<b>81</b>
<b>5.1. ПРЕТСТАВУВАЊЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЈАТА НА КОМПОНЕНТИТЕ ВО ТРИКОМПОНЕНТНИ СИСТЕМИ .....</b>	<b>81</b>
5.1.1. ОТЧИТУВАЊЕ НА ХЕМИСКИОТ СОСТАВ НА ЛЕГУРА ВО КОНЦЕНТРАЦИСКИ ТРИАГОЛНИК.....	82
5.1.2. ПРАВИЛО НА ЛОСОВИ И ПРИНЦИПОТ НА ТЕЖИШТЕ ВО КОНЦЕНТРАЦИСКИ ТРИАГОЛНИК .....	83
5.1.3. ПРИМЕНА НА ПРАВИЛОТО НА ЛОСОВИ И ТЕЖИШТЕ ПРИ ПРЕСМЕТКИ.....	85
<b>5.4. ВИДОВИ НА ТРИКОМПОНЕНТНИ МЕТАЛНИ СИСТЕМИ.....</b>	<b>86</b>
5.4.1. ПРОЕКЦИСКО ПРЕТСТАВУВАЊЕ НА ТРИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ СО НЕРАСТВОРЛИВОСТ ВО ТВРДА СОСТОЈБА И ТРИКОМПОНЕНТЕН ЕВТЕКТИКУМ.....	86
5.4.2. ПРЕТСТАВУВАЊЕ СО ИЗОТЕРМНИ ПРЕСЕЦИ .....	87
5.4.3. ПРОСТОРЕН ТРИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ.....	89
<b>5.5. ПРОЦЕС НА КРИСТАЛИЗАЦИЈА.....</b>	<b>90</b>
5.5.1. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ТОЧКА НА ТОПЕЊЕ И КРИСТАЛИЗАЦИЈА ОД ПРОЕКЦИСКИ ДИЈАГРАМ .....	91
<b>5.6. НЕКОИ ВИДОВИ НА ТРИКОМПОНЕНТНИ ДИЈАГРАМИ.....</b>	<b>92</b>
<b>5. СТРУКТУРНИ ПРОМЕНИ И ПРЕТВОРБИ КАЈ ТВРДИТЕ МЕТАЛИ .....</b>	<b>97</b>
<b>6.1. ДИФУЗИЈА ВО МЕТАЛИТЕ И ЛЕГУРИТЕ .....</b>	<b>98</b>
<b>6.2 СТРУКТУРНИ ПРОМЕНИ ПОД ДЕЈСТВО НА НАДВОРЕШНА СИЛА.....</b>	<b>101</b>
6.2.1. ПРОМЕНА НА СТРУКТУРАТА НА ДЕФОРМИРАНИТЕ МЕТАЛИ И РЕКРИСТАЛИЗАЦИЈА.....	104
<b>6.3. ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ ВО МЕТАЛИТЕ.....</b>	<b>107</b>
6.3.1. ВИДОВИ ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ.....	109
6.3.2. БЕЗДИФУЗИСКИ ПРЕТВОРБИ.....	109
6.3.2.2. МАРТЕНЗИТНА ПРЕТВОРБА .....	109
6.3.3. ДИФУЗИСКИ ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ .....	111
6.3.3.1. ИЗДВОЈУВАЊЕ НА СЕКУНДАРНИ ФАЗИ.....	111
6.3.3.2. ОТПУСТАЊЕ НА МАРТЕНЗИТ .....	113
6.3.3.3. ЕВТЕКТОИДНИ ПРЕТВОРБИ.....	114
6.3.3.4. ПРЕТВОРБИ СО СРЕДУВАЊЕ НА ЦВРСТИ РАСТВОРИ ИЛИ СО РАСЛОЈУВАЊЕ НА ФАЗИТЕ .....	119
6.3.3.5. МАСИВНИ ПРЕТВОРБИ .....	120
6.3.3.6. ПОЛИМОРФНИ ПРЕТВОРБИ.....	120
<b>6.4 ДРУГИ ПОСТАПКИ ЗА ПРОМЕНА НА СТРУКТУРАТА НА МЕТАЛИТЕ И НА ЛЕГУРИТЕ .....</b>	<b>122</b>







## ВОВЕД

Физичка металургија е научна и технолошка дисциплина која ги изучува врските меѓу составот, структурата и особините на металите и легурите, како и законитостите по кои се менуваат од надворешните влијанија, како што се топлинските, хемиските, механичките, електромагнетните и радиоактивните. Како технолошка производна дисциплина, физичката металургија ги развива механичките, физичките, хемиските методи на преработката и обликување на металите и легурите во полупроизводи и завршни предмети, како што се пластичната деформација на металите, леењето и меѓусебното спојување на металите и легурите.

Физичката металургија ги изучува: градбата на металите и легурите, нивните физички, хемиски и механички особини во зависност од нивниот состав и влијанието на топлинските, хемиските, физичките и механичките дејствија врз нивните особини.

Основа на физичка металургија се физиката и хемијата применети на металите. За успешно совладување на овој предмет потребно е знаење на основите на физиката, како што се физика на гасови, електрицитет, механика, статика и движење. Исто така, во хемијата уште во првата година се изучуваат градбата на атомот и хемиските врски. Во овој предмет тие ќе бидат разгледувани од практичен и применет светоглед. Металите се основни конструкциски материјали, особено челикот. Физичко-металургиските третмани, пред сè топлотните, се основни во промената и управувањето на структурата и особините на металите и на легурите. Ако екстрактивната металургијата има предмет само добивање на метали и легури, без третирање на особините и структурата, тогаш физичката металургија е научна и технолошка дисциплина која го изучува влијанието на топлината и другите механички влијанија врз структурата и градбата на металите и на легурите. Физичко-металургиските процеси се основни во обликување на металите во употребни форми и во промената на особините на металите. Металите се разликуваат од неметалните и од органските соединенија, пред сè, по физичките и механичките особини, по нивната специфична електро и топлинска спроводливост, специфичен сјај при прелом и по пластичноста. Затоа наоѓаат широка и незаменлива улога во индустријата.

Физичката металургија ги третира нагласено однесувањето и законитостите во цврстата состојба, а ограничено - течната состојба. Металите се користат во цврста состојба, затоа таа состојба е посебно важна за физичката металургија, а течната состојба е важна при леењето на металите и на легурите.

Металите и металните легури многу се разликуваат по своите особини од неметалните и од органските материјали во пластичноста и електроспроводливоста што е диктирана од карактеристичната метална врска..

Физичката металургија ги проучува процесите на механичката преработката и обликувањето на металите во цврста состојба, промените на структурата и особините на металите.

Затоа, во рамките на овој наставен предмет учениците ќе се запознаат со: специфичната микроградба на металите, основите на структурата на металите, основните елементи на промената на структурата. Особено ќе се разгледа влијанието на топлотната енергија врз структурна градба, а која ги диктира особините на металите.

# 1. ТЕМА МЕТАЛИ

Преглед на содржини	Цел на учењето
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Градба на металите;</li> <li>• Градба на атом;</li> <li>• Поврзување на атомите;</li> <li>• јонска врска;</li> <li>• ковалентна врска;</li> <li>• метална врска;</li> <li>• типични кристални; решетки на металите;</li> <li>• Нетипични метални кристални решетки;</li> <li>• Параметрите на елементарните кристалните решетки и определување на теоретската густина на металите;</li> <li>• Грешки во реалната градба на кристалите;</li> <li>• Фазна рамнотежа во чистите метали;</li> <li>• Криви на загревање и ладење.</li> </ul>	<p>Со совладување на наставната материја за оваа тема ученикот треба:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- да ја познава градбата кај металите;</li> <li>- да го разбира поврзувањето на атомите;</li> <li>- да ги објаснува кристалните решетки кај металите;</li> <li>- да ја разбира фазната рамнотежа;</li> <li>- да прикажува криви на загревање и ладење.</li> </ul> <p><i>Материјалот презентира во уебникот во оваа тема е изготвен и избран така да тој одговори на целите на учењето. Во изнесениот материјал, иако недоволно продлабочено за да може да се сфати суштината зошто се јавуваат одредени феномени и законитости во градбата на материјата во природата, посебен акцент е даден на градбата на металните елементи. Градбата на материјата дадена во оваа тема е опис на современите сфаќања за атомот, врските меѓу атомите и градбата на кристалите.</i></p> <p><i>Настојувано е, во описна форма, да се дадат општите констатации и фактите што ја карактеризираат градбата на металите, што по оценка на авторот, има суштинско значење за натамошна обработка на другите теми и материјата што ја изучува физичката металургија. При тоа, не е настојувано да се дадат одговори за причините на одредени феномени од градбата. Тие факти се неопходни за успешно размислување на техничарот, кога се најде во праксата, но да претставува и основа за натамошно образование и самообразува на металуршкиот техничар. За продлабочено изучување на материјалот третиран во оваа тема, има задоволителни детали во посочената литература.</i></p> <p><i>Материјалот е концепиран да биде совладив за ученикот, но и за наставникот, во неговата подготовка.</i></p> <p><i>Во овој материјал се третираат некои особини на чистите метали, како што се кристалната градба, густината, фазните рамнотежни состојби во зависност од температурата и притисокот и определување на кривите на загревање и ладење, што се неопходни за натамошно изучување на повеќеконпонентните рамнотежи.</i></p> <p><i>Користени се илустрации за да стане појасно она што се објаснува во текстот. Настојувано е илустрациите да го заменат текстот, како алтернативен метод за учење.</i></p>

# 1. МЕТАЛИ

Разработката на темата за металите бара едноставно и разбирливо објаснување за ученикот од металургиската струка, што е тоа метал, какви особини има и што е причината за тие специфични особини.

Наједноставна практична дефиниција, од физичко-металуршки светоглед би била: *металите се непроѕирни, сјајни елементи од периодниот систем, што се добри спроводници на топлина и на електрицитет*. Најголем број метали се деформабилни, се јавуваат на собна температура во цврста агрегатна состојба (со исклучок на жива) и се погусты од неметалните елементи.

Металите се со различна цврстина, густина, еластичност, пластичност, можност за ковање или валање. Металите имаат точка на топење и вриење. Тие меѓусебно стапуваат во различни односи и градат легури. Типично за легурите е што се раствораат и кога се цврсти, а не само течни. Металите реагираат меѓусебно и градат соединенија. Металите во цврста состојба раствораат во својата структура неметални елементи, како јаглерод, азот и водород, а и градат соединенија со неметалните елементи.

Металите се употребуваат како чисти метали и легури, каде што преовладуваат типичните метални особини, но огромен е бројот на соединенија на металните елементи како катјони со анјонските групи во вид сулфиди, оксиди, карбонати, силикати и други соединенија.

Науката и технологијата за екстракција на металите во метална состојба од карпите, минералите и рудите се нарекува екстрактивна металургија, додека градбата на металите, промените во агрегатната состојба, кристалографската градба, влијанието на хемискиот состав и надворешните делувања врз кристалната градба, се предмет на преработувачката металургија, со основи од физичката металургија.

Металите, кога се чисти, најчесто имаат незадоволителни својства за практична примена. Затоа, денес тие најчесто се користат како легури, а многу ретко и во специјални случаи како чисти метали. На пример, чистото железо е многу меко за да се користи како конструкциски материјал, па затоа тоа се легира со други елементи во вид на челик. Исто така, чистото железо се користи како феромагнетен материјал. Среброто, златото и алуминиумот, исто така, имаат мала цврстина и јачина, но имаат инертност кон кислородот, повеќе се користат како легури со други метали. Како легури и тие метали добиваат задоволителна цврстина, а имаат други ценети особини, како хемиска постојаност и висока електроспроводливост.

Металите, во својата електронска градба, може лесно да испуштаат електрони од последните орбитали и образуваат позитивно наелектризирани честици – катјони. Металните катјони се поврзуваат со неметалните елементи, кои лесно примаат електрони, во соединенија – јонски соединенија. Јонските соединенија се најчесто растворливи во вода. Металните катјони, во одредена концентрација, се неопходни за животот на Земјата, па и на човекот. Човечкото тело е незамисливо без мали концентрации на железо, алуминиум, калциум, манган и натриум.

Металните елементи го чинат мнозинството на елементите од периодниот систем, а нивниот број е 85 од 109 елементи. Во модерната верзија Менделеевиот периоден систем на елементите и претставен на сликата 1.1. Металоидните елементи се наоѓаат лево од дијагоналата на периодниот систем бор (В)-полониум

(Po). Меѓу нив се наоѓаат елементите Si, Ge, As, Se и Te, кои имаат метални-неметални особини, или нетипични метали, што се наредуваат металоиди.

Табела на периодниот систем на елементите

I	II	Преодни метали										III	IV	V	VI	VII	0
H <sup>1</sup>																	He <sup>2</sup>
Li <sup>3</sup>	Be <sup>4</sup>											B <sup>5</sup>	C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>	Ne <sup>10</sup>
Na <sup>11</sup>	Mg <sup>12</sup>	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	IXb	Xb	XIb	XIIb	Al <sup>13</sup>	Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup>	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>	Ar <sup>18</sup>
K <sup>19</sup>	Ca <sup>20</sup>	Sc <sup>21</sup>	Ti <sup>22</sup>	V <sup>23</sup>	Cr <sup>24</sup>	Mn <sup>25</sup>	Fe <sup>26</sup>	Co <sup>27</sup>	Ni <sup>28</sup>	Cu <sup>29</sup>	Zn <sup>30</sup>	Ga <sup>31</sup>	Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>	Kr <sup>36</sup>
Rb <sup>37</sup>	Sr <sup>38</sup>	Y <sup>39</sup>	Zr <sup>40</sup>	Nb <sup>41</sup>	Mo <sup>42</sup>	Tc <sup>43</sup>	Ru <sup>44</sup>	Rh <sup>45</sup>	Pd <sup>46</sup>	Ag <sup>47</sup>	Cd <sup>48</sup>	In <sup>49</sup>	Sn <sup>50</sup>	Sb <sup>51</sup>	Te <sup>52</sup>	I <sup>53</sup>	Xe <sup>54</sup>
Cs <sup>55</sup>	Ba <sup>56</sup>	La <sup>57-71</sup>	Hf <sup>72</sup>	Ta <sup>73</sup>	W <sup>74</sup>	Re <sup>75</sup>	Os <sup>76</sup>	Ir <sup>77</sup>	Pt <sup>78</sup>	Au <sup>79</sup>	Hg <sup>80</sup>	Tl <sup>81</sup>	Pb <sup>82</sup>	Bi <sup>83</sup>	Po <sup>84</sup>	At <sup>85</sup>	Rn <sup>86</sup>
Fr <sup>87</sup>	Ra <sup>88</sup>	Rf <sup>89-103</sup>	Ha <sup>104</sup>														
Лантаниди		La <sup>57</sup> Ce <sup>58</sup> Pr <sup>59</sup> Nd <sup>60</sup> Pm <sup>61</sup> Sm <sup>62</sup> Eu <sup>63</sup> Gd <sup>64</sup> Tb <sup>65</sup> Dy <sup>66</sup> Ho <sup>67</sup> Er <sup>68</sup> Tm <sup>69</sup> Yb <sup>70</sup> Lu <sup>71</sup>															
Актиниди		Ac <sup>89</sup> Th <sup>90</sup> Pa <sup>91</sup> U <sup>92</sup> Np <sup>93</sup> Pu <sup>94</sup> Am <sup>95</sup> Cm <sup>96</sup> Bk <sup>97</sup> Cf <sup>98</sup> Es <sup>99</sup> Fm <sup>100</sup> Md <sup>101</sup> No <sup>102</sup> Lr <sup>103</sup>															

Метали
  Металоиди
  Неметали

Слика 1.1. Периоден систем на елементите

Металите во нормалните услови кои владеат во природата (атмосферски притисок и температура) и во производните услови во металургијското производство, по правило се јавуваат во кристална форма. Кристалната состојба на металите се карактеризира со правилно и закономерно поставување на атомите во просторот на кристалот. Поставувајќи се на точно определени места во просторот, атомите образуваат елементарни кристални просторни решетки.

Во цврста состојба, што може да се прошири и на течните метали во близина на точката на топење, металите поседуваат бројни типични особини:

- (1) висока термичка и електрична проводност;
- (2) позитивен температурен коефициент на електричен отпор (електричниот отпор на чистите метали расте со повишување на температурата; околу 30 метали покажуваат суперспроводливост. Нивниот електричен отпор нестанува практично при температура блиска до апсолутна нула);
- (3) термојонска емисија, т.е. емитираат електрони кога се загреваат;
- (4) добра рефлексија на светлина (металите се непроѕирни и имаат специфичен метален одсјај);
- (5) тие се подложни лесно на деформација;

Наведени се особини што ја карактеризираат, т.н. метална состојба на материјата.

Сите цврсти метали и легури се *кристални тела*, со закономерна поставеност на атомите во простор, што се повторува периодично во сите три насоки во просторот.

Металите добиени со обичните металургијски методи се поликристални тела, составени од голем број на ситни кристалчиња (0,1sm до 0,00001 sm по големина) безредно различно меѓусебно ориентирани во телото.

Зависно од начинот на кристализацијата, металните кристалчиња, може да имаат различни нерамномерни форми, што се нарекуваат **кристалити** или **зрна**.



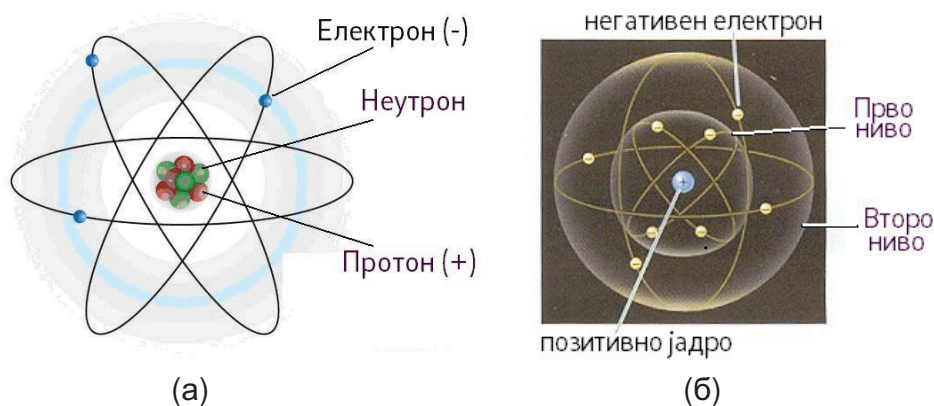
## 1.1. ГРАДБА НА АТОМ

Специфичната градба на металите ги издвојува по особините од другите елементи во периодниот систем. За да може да се укаже на специфичноста на градбата на металите неопходно е овде да се повторат некои сознанија, изучувани во хемија и физика.

Атомот е елементарен дел од материјалниот свет што може да ја дефинира и по кого се разликуваат супстанциите. Атомите се поврзуваат меѓусебно, или со други елементи, со хемиски или кристални врски во цврсти тела, во облик во кој се наоѓаат во природата, или се употребуваат во секојдневниот живот и индустријата.

Иако се елементарни составни честички, атомите се сложени честички во градбата. Со досега развиените инструменти за наблудување, атомите од надворешен изглед имаат топчеста форма, што ја формираат електроните во надворешните орбитали. Атомите се составени од атомско јадро во средината, со позитивен електричен полнеж, околу кое се движат на различни растојанија негативни честички, наречени електрони.

**Јадрото** е доминантен носител на масата на атомот. Јадрото не е компактно, туку е составено до повеќе вида елементарни честички, а основни се протони (позитрони) со позитивен електрицитет и неутрони (без електрицитет), што се држат меѓусебно со силни врски. Тие се основни носители на масата на јадрото, но и на атомот. Протони и неутроните имаат еднаква маса -  $1.673 \cdot 10^{-27}$  kg. Протоните имаат за 1836 пати поголема маса од електронот. Јадрото сочинува околу 99% од масата на атом. Протоните и неутроните осцилираат околу некои положби.



Слика 1.2. Боров модел на атом со електрони во едно ниво (а) и модел со две нивоа.

**Електроните** се движат околу јадрото по т.н. орбитали<sup>1</sup>, што се математички изрази за можноста за престојување на некој електрон во некоја положба околу јадрото. Меѓу орбиталите има појас на забрането престојување на електрони. На сликата 1.2(а) е дадена шема на атом со електрони во едно ниво и на сликата 1.2(б) во повеќе нивоа. По претставата за атомот, што ја дал Нилс Бор, и во основа нема големи промени, постојат повеќе нивоа за престој на електроните околу јадрото. Меѓу нив има простори без електрони. Електронските ленти (слично како топката за играње кога се пресече) имаат определена дебелина, во која електроните престојуваат со осцилаторно движење. Формата на орбиталите е различна. Таа може да биде во облик на топка, волуменска осумка и други покомплицирани форми.

<sup>1</sup> За енергетските појаси во кои се движат електроните околу јадрото, во литература се среќаваат повеќе изрази што значат едно исто, како на пример - електронски облаци, електронски лушпи, електронски појаси, што се споменуваат и во текстот на овој учебник.

Покрај што се движат како бранови по определените орбитали, електроните се вртат околу својата оска во двата правци. Нивното вртење (спин) дава магнетни особини на металите. Во една орбитална ќелија не може да има повеќе од два електрони со различен спин.

Електроните се честички со мала маса и се движат со голема брзина со осцилаторно брановидно движење со определена број на осцилации и должина на бранот. Тие имаат маса од  $9,109 \times 10^{-31}$  kg и негативен електричен полнеж од  $1.0602 \times 10^{-19}$  Cb (колумби), а се разликуваат со брзината, енергијата, брановата должина и фреквенцијата на осцилацијата што ја поседуваат при брановидното движење. Електроните имаат особина на тело и бран.

Електроните учествуваат во создавање врската во цврстите тела и молекулите меѓу еднакви и различни хемиски елементи. Ако електроните добијат енергија од надвор, се возбудуваат и преминуваат во друга орбитала, а кога се враќаат во пониска енергија испуштаат енергија во вид на зрачење со одредени кванти<sup>2</sup>.

Бројот на електрони и протони во еден атом се еднакви и атомот е секогаш електронеутрален. Неутроните може да бидат во различен број спрема протоните. Затоа еден ист хемиски елемент може да има различна маса. Елементи што имаат различен број на неутрони од електрони се нарекуваат изотопи на елементот. Изотопите на елементите имаат различна маса при еднаква валентност.

Атомските орбитали, во хемијата имаат ознаки: s, p, d и f, што се пополнуваат со одреден број електрони (s со 2, p со 6, d со 10 и f со 14 електрони). Меѓутоа, не сите елементи не ги исполнуваат потполно сите електронски орбитали и градат *регуларни елементи* со редоследно пополнети орбитали. Одреден број елементи се нарекуваат *преодни*, затоа што прекинуваат со потполно пополнување на претходните орбитали, а започнуваат со пополнување на наредни s и p орбитали. Регуларните или преодните елементи настојуваат секогаш да ги пополнуваат s и p орбиталата, т.е елементите настојуваат да образуваат осум (8) електрони во последната орбитала, во секој ред од периодниот систем. Елементите со осум електрони во било која s и p орбитала се хемиски инертни.

Надворешните електрони на атомот ги даваат хемиските особини на елементите.

## 1.2. ПОВРЗУВАЊЕ НА АТОМИТЕ

Металните елементи се јавуваат во природата како цврсти тела - кристали, од меѓусебни соединенија или елементарни, а само во исклучителни околности, при високи температури, во едноатомни гасови. Во кристалите и молекулите атомите на елементите меѓусебно се поврзани со кристални или со молекуларни врски.

Без навлегување во суштината на електронската состојба на електроните во кристалите, ќе биде разгледано образувањето на молекулите и кристали.

Од градбата на атомите произлегува дека тие можат да примаат или да оддаваат електрони од последната орбитала (подлушпа), за да формираат стабилна надворешна подлушпа со 2 и 8 електрони. Ако орбиталата има осум електрони се нарекува - пополнета орбитала, а ако нема се нарекува проводна орбитала. Меѓу подолна пополнета орбитала и проводната орбитала (непополнета) има мала

---

<sup>2</sup>Квант најмала единица на енергија која може да се пренесува од една честица или тело на друга. Енергијата не се пренесува непрекинато туку во одредени порции, т.е. може да има само извесни одредени (дискретни) бројчани вредности, наспроти било која вредност во рамките на еден опсег на енергија.



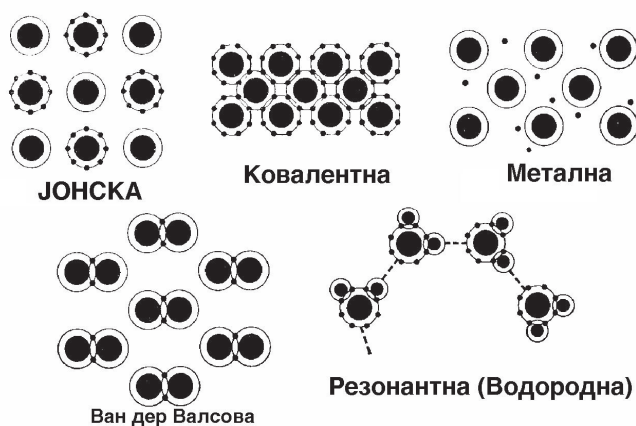
забранета енергија за електроните, а кај металите двете последни подорбитали се заеднички и се преклопуваат, што им дава посебните електропроводни особини на металите и нивните легури.

Елементите од осмата група на периодниот систем, од хелиум (He) до радон (Rd), со осум електрони во последната орбитала, се хемиски инертни. Ако се приближат два атома со пополнети валентни (пополнети) електронски лушпи, не примаат и оддаваат електрони, т.е. не градат ниту стабилни молекули.

Ако се приближат два атома што имаат непополнети до осум електрони во последната орбитала, тогаш тие може да оддаваат или да примаат електрони. Елементите што оддаваат електрони стануваат електропозитивни (вишок протони и позитивен полнеж) и се нарекуваат **катјони**. Елементите што ги прифаќаат електроните во надворешната орбитала и образуваат октет во надворешниот слој, имаат вишок негативен полнеж и стануваат **анјони**. Поради разликата во полнежите во надворешниот слој и нееднаквата зафатеност на електронската состојба во катјоните и анјоните, тие се однесуваат како честици со различен електрицитет, меѓусебно се привлекуваат и образуваат хемиска или кристална врска. Силата што ги држи заедно атомите во молекулите и цврстите тела се нарекува кристална или меѓуатомска врска.

Зависно од местоположбата на електроните и меѓусебната положба на атомите, цврстите тела и молекулите може да ги имаат следните видови меѓуатомски врски:

- јонска (хетерополярна) врска
- ковалентна (хомеополярна) врска
- метална врска
- Вандервалсова врска
- водородна (резонантна) врска



Слика 1.3. Сликосит преглед на видовите врски во кристалите

Едноставна графичка претстава на местоположбата на електроните и атомите во наведените врски е дадена на сликата 1.3. За физичката металургија поважни се првите три врски, додека преостанатите немаат практично значење.

Меѓуатомските сили, што ги држат заедно на мало растојание атомите во молекулите и кристалите, се електростатички сили на привлекување на разноимени електрични полнежи и одбивање на едноимените полнежи. Доколку се создава разлика во полнежите во атомот, тогаш таквите атоми со спротивен електричен полнеж, се привлекуваат.

### 1.2.1. ЈОНСКА ВРСКА

Како се гледа од сликата 1.3, јонската врска се создава меѓу атоми кои при доблужување оддаваат и примаат електрони, така што создаваат по осум електрони во последната орбитала. На тој начин тие добиваат вишок електричен полнеж - тие што примаат стануваат електронегативни (наречени анјони), а тие што оддаваат - електропозитивни (наречени катјони).

Ако наелектризирани атоми во јонската врска многу се доближуваат електроните од последните орбитали, кои се целосно пополнети, ги одбиваат соседните јони. Тогаш меѓу нив се јавува сила на одбивање. Ако се одбијат повеќе од дејството на силата на привлекување, тие пак ќе се привлечат. На тој начин постои осцилација (вибрација) на силата на привлекување и на одбивање околу некоја вредност на силата и растојанието меѓу јоните.

Јонските врски се многу силни, па затоа и кристалите со вакви врски имаат високи точки на топење, голема јачина, висока цврстина и мал коефициент на термичко ширење. Ако сите електрони учествуваат во врска и градат октети, тогаш таквите цврсти тела се изолатори. Ако се растопат, јонските кристали покажуваат јонска електропроводливост.

### 1.2.2. КОВАЛЕНТНА ВРСКА

Ковалентната врска меѓу два елемента се образува во елементи што можат да ги пополнат последните орбитали истовремено до осум електрони. Стабилен електронски октет (осум електрони) во надворешната валентна орбитала ( $ns^2+np^6$ ), кој е карактеристичен за инертните елементи. Ковалентната врска може да се постигне и со истовремено примање и давање на одреден број електрони од повеќе атоми. Одделните атоми со ковалентна врска имаат заеднички орбитали, за да секој добие 8 електрони во последната орбитала. Таков пример е претставен на сликата 1.3 - ковалентна.

Ковалентна врска градат елементите од неметалните и металоидните елементи IV до VII група. На пример, на хлорот му недостига само еден електрон во последната орбитала за да постигне конфигурација 8 ( $3s^2+3p^5$ ). Ако се приближат атомите на хлор така што можат да постигнат растојание при кое ќе се тангираат 3p орбиталите на двата елемента, тогаш двата атома ќе постигнат конфигурација на аргон. Двата електрони еднаш му припаѓаат на едниот атом и тој станува негативен, па се јавува привлекување на позитивниот со негативниот јон. Тие не можат да се приближат многу зашто тогаш се одбиваат од негативниот електрополнеж на внатрешните електрони. Ковалентната врска има осцилаторски карактер на привлекување и одбивање на наелектризираните соседни атоми. На таков начин, со ковалентна врска, се градат молекулите на двоатомните и на повеќе атомните гасови (на пример  $Cl_2$ ,  $F_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CF_4$ ).

Ковалентните кристали градат силициум, германиум и јаглерод (форма на дијамант). Тие градат молекули што го имаат обликот и формата на кристалот.

Ковалентната врска е најсилна врска, просторно насочена во одделни правци, зависно од тоа колку електрони учествуваат во врска. Така, на пример, јаглеродот во дијамантот има насочена врска кон четири правци.

Ковалентните кристали се изолатори, зашто имаат цврсто поврзани во октети валентни електрони. Ковалентните кристали имаат најголема цврстина и висока точка на топење.

### 1.2.3. МЕТАЛНА ВРСКА

Од електронската теорија на металната состојба произлегува дека металите образуваат посебна и многу карактеристична врска, со што се објаснуваат многуте нивни специфични физички, хемиски и механички особини.

Надворешните валентни електрони во атомите на металите се сврзани со јадрото релативно слабо. При образување на течна или кристална состојба атомите се поставуваат многу блиску еден до друг, така што постои можност последните електрони да ја раскинат врската со матичниот атом, а тој да добие надворешна орбитала со 8 електрони. Ослободените електрони да го зафатат меѓупросторот на приближените атоми.

Шематски приказ на металната врска е даден на сликата 1.4 -метална, каде се претставени со точки електроните во меѓупросторот на катјоните.

Ослободените електрони во металниот кристал се движат во просторот меѓу атомите во облик на „електронски гас“ од слободни или делумно слободни електрони<sup>3</sup>. Тие зафаќаат определени енергетски нивоа, а не под дефинирани патеки. На нивната енергетска состојба влијае позитивниот полнеж на јоните. Тие нивоа се нарекуваат *зони на престој на електронот*. Позитивните јони, меѓу гасот на слободните електрони, не може да го напуштат кристалот поради присуството електронскиот гас, а електроните не можат да го напуштат кристалот поради привлекување од полнежот на катјоните. Некои електрони се оддалечуваат од кристалот на одредени растојанија, но брзо се привлекуваат од позитивниот полнеж на целиот кристал и остануваат во металот. Ако се доближи јако енергетско поле на металот или висока подвижност на електроните, тие можат да го напуштат кристалот и даваат *електронска емисија*.

Металната врска е електростатска сила што се јавува поради меѓусебното дејствување на електронскиот гас со негативен полнеж и позитивните јони во кристал. Колку е погуста концентрацијата на „слободните електрони“, толку е потребна поголема енергија за катјон да го напушти кристалот и да ја разруши металната врска. Затоа, повеќевалентните метали, што учествуваат со повеќе електрони во металната врска, имаат повисоки точки на топење.

Електроните на металната врска не му припаѓаат на ниеден конкретен атом, туку може да се сметаат за заеднички на сите атоми во кристалот. Затоа металните атоми може лесно да го менуваат местото внатре во кристалот без да предизвикаат промени во електронеутралноста, во распоредот на електицитетот во кристалот и во силината на врската. Сите катјони се еднакви, па не е важно кое место во кристалот го заземаат.

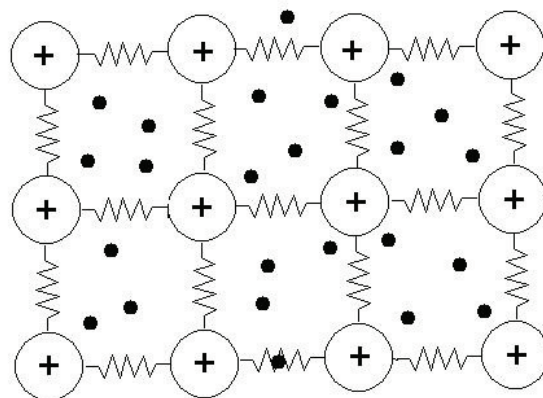
Вкупната енергија на врските во металот е збир на повеќе елементарни енергии што се јавуваат во металниот кристал. Таа зависи од бројот на валентните електрони што се во електронскиот гас, потоа од местото на металот во периодниот систем и од видот на елементарната кристална решетка. Повеќевалентните метали имаат повисоки точки на топење, поцврсти се и појаки, а се послаби електроспроводници.

---

<sup>3</sup> Во електронската теорија на метали постојат посебни теории што ги третираат електроните како слободни во затворена електрична кутија и теорија на делумно слободни електрони во затворена електрична кутија, каде што имаат влијание и позитивните полнежи на катјоните. Овие теории се поставени за да се објаснат одделни специфични однесувања на металите. Двете теории во основа ја имаат квантната механика.

Од посебната кристална врска на металите произлегуваат посебните пластични и деформабилни својства на металите, еластичноста и електроспроводноста, непроѕирноста и металниот одсјај и металната боја на кристалите. Непроѕирноста и одсјајот се предизвикани од одбивањето на електромагнетните светлосни бранови од електронскиот гас и неможност да поминат низ меѓупросторот на јоните. Металните врски се анизотропни - ненасочени кон соседниот јон, затоа е можно менување на местата на јоните без промена на електронската густина.

Атомите може да се поместуваат од рамнотежната состојба при нанесување надворешно напрегање. Врската се однесува како да е врска на еластични федери меѓу секој соседен катјон, како што е шематски претставена на сликата 1.4. Затоа, кога се истегнуваат, пресуваат или совиваат металите и легурите, во почетокот покажуваат еластични особини, па затоа се користат како материјал за федери. Тоа се забележува при испитување на механичките особини на секој метал и легура во почетниот период. За тоа влијание објаснување е дадено во темата 6.3, а исто така е обфатено во наставната програма во предметот Термичка обработка и испитување.



Слика 1.4. Шематска претстава на осцилаторната сила на врските меѓу соседните метални атоми, во вид на федери и неучество на електроните (црни точки) во насоченост на врските.

### 1.3. КРИСТАЛНИ РЕШЕТКИ НА МЕТАЛИТЕ

Кристали се цврсти тела од правилно распоредени атоми во определен волумен, поврзани со стабилни врски.

Металите се јавуваат во два вида кристали:

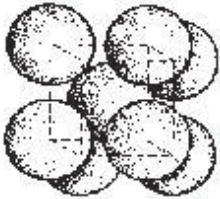
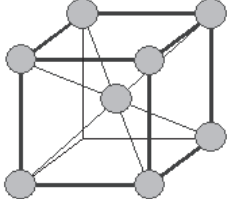
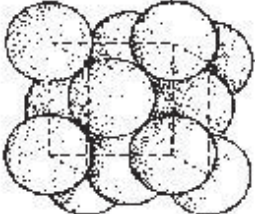
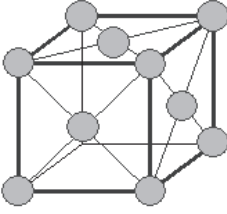
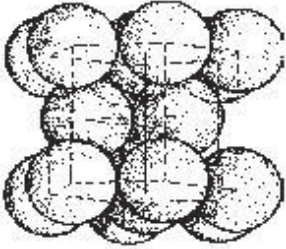
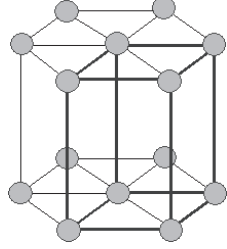
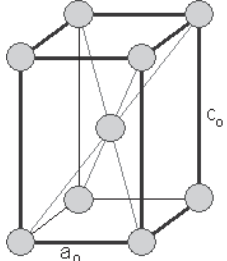
- типични метални кристали и
- нетипични метални кристали.

Основна разлика во особините на двата вида на кристали е што типичните кристали се секогаш густо пакувани и со исклучиво метална врска, додека нетипичните метални кристали, имаат порастресито пакување на ковалентно поврзани атоми во големи молекули, што во кристална форма се поврзани со метална врска. Поради металните особини на овој вид кристали, које е типичен за металоидните елементи, тие се третираат во праксата како метали.

Во предметот минерологија се изучува градбата на минералите, елементарните кристални ќелии или решетки, во коишто кристализираат сите елементи и соединенија, надворешниот изглед, форма и симетричноста на кристалите. Постојат седум елементарни кристални решетки во кои кристализираат елементите: кубна, тетрагонална, ромбоедрична, хексагонална, ромбична, моноклинична и триклинична.

#### 1.3.1. ТИПИЧНИ МЕТАЛНИ КРИСТАЛНИ РЕШЕТКИ

Металите со типични метални кристали, имаат густо пакувани атоми во кристалната елементарна решетка, слично на поставување еластични гумени топки во определено геометриско тело. При тоа се формираат типични елементарни кристални решетки и распоред на атоми во решетката. Металите кристализираат во кубна и хексагонална структура, а само во определени услови, како што е калење на железни легури (образување на мартензитот) со тетрагонална елементарна решетка. Нагледна претстава на густо пакуваните метални елементарни структури и поставеноста на атомите во нив, е дадена на сликата 1.5.

Кристална решетка	Густо пакување на атомите	Геометриска форма на елементарната решетка
Волуменски центрирана кубна (ВЦК) решетка		
Површински центрирана кубна (ПЦК) решетка		
Хексагонална густо пакувана (ХГП) решетка		
Тетрагонална волуменски густо пакувана решетка (ТГП)		

Слика 1.5. Најчести густо пакувани кристални структури кај типичните метални елементи.

Координационите броеви<sup>4</sup> за наведените типични метални решетки се:

- а) за волуменски центрирана кубна решетка - 8
- б) за површински центрирана кубна решетка - 12
- в) за хексагонална густо пакувана решетка - 12

<sup>4</sup> Координационен број е број на непосредни соседи во кристалот што го обиколуваат еден атом. Координациониот број може да биде различен за различни атоми во една иста кристална решетка

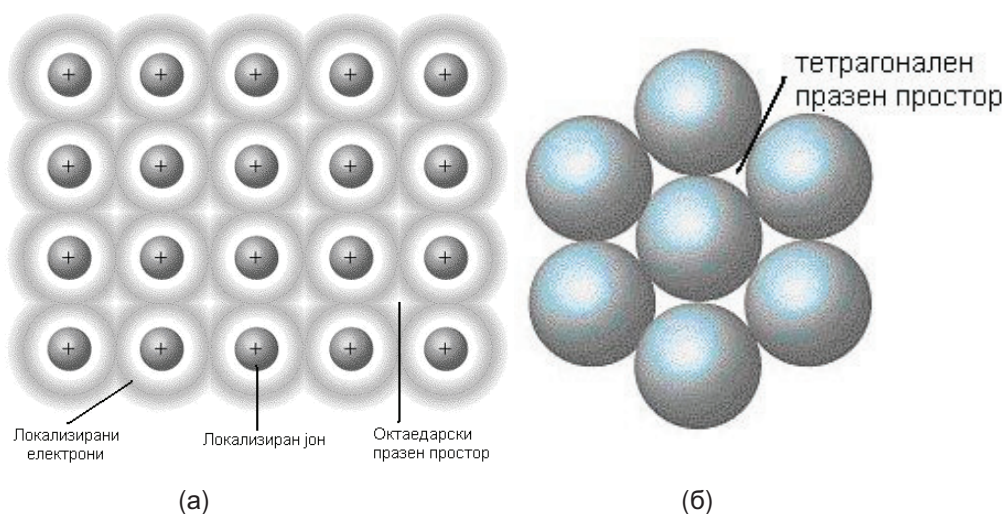


Прикажаните елементарни решетки на сликата 1.5 ги имаат чистите метали и легурите, а разликата се јавува само во тоа што во легурите од интерметалните соединенија елементарните решетки имаат поголем број на атоми и повисоки координациони броеви.

Волуменот на хексагоналната густопакувана ќелија го сочинуваат три ромбоиди со базисен агол  $120^\circ$  и  $90^\circ$  за  $c_0$ , а тетрагоналната решетка има три страни поставени под  $90^\circ$ .

Од елементарните кристални ќелии, може да се види дека во одредени кристални рамнини се поставуваат атоми со различна густина, т.е. со различна оддалеченост еден од друг соседен атом. Атомите поставени во рамнина, создаваат кристалографски рамнини, што се означуваат со т.н. Милерови индекси.

Иако имаат еднаков координациски број (блиски соседи) ПЦК и ХГП имаат различни елементарни решетки. Видот на елементарната решетка зависи од начинот на поставување на густопакуваните рамнини.



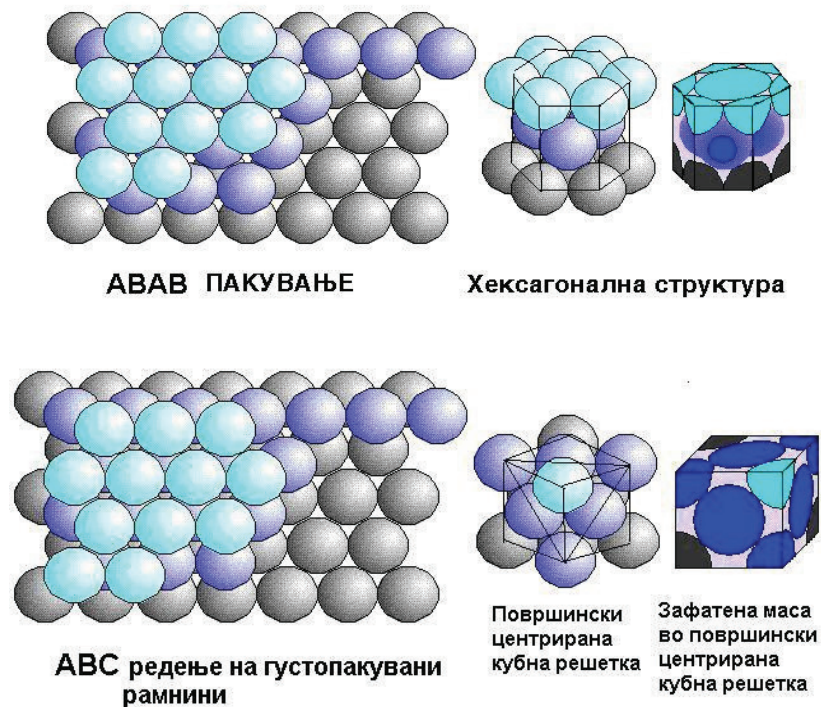
Слика 1.6. Најгусто пакувани рамнини во волуменски центрирана кубна структура (а) и хексагонална и површински центрирана структура (б)

Кога на една рамна плоча (да се замисли една рамнина во кристал каде што се поставуваат атоми) се постават една до друга еднакви топки во максимален број по единица површина, се добива густо рамнинско пакување. При тоа се добива густо пакување со четири и шест атоми околу еден централен атом (Слика 1.6 (а) и 1.6 (б)). Густо волуменско пакување се добива кога овие рамнини се спојат да добијат најголема густина. За рамнината на сликата 1.6(а) ќе се добие координација 8, значи ВЦК, а рамнината од сликата 1.6 (б) може да се наредат овие рамнини на два начина.

Хексагонална густо пакувана структура се формира ако рамнините се поставуваат така да добиваат редослед на пакување АВАВАВ.

Површински центрирана структура се формира ако рамнините се поставуваат така да добиваат редослед на пакување АВСАВС.

Пакувањето на густите рамнини за двете структури е нагледно претставено на сликата 1.7, каде се означени густопакуваните рамнини во различни слоеви, поставени едни над други, при што може да се одвои соодветна елементарна ќелија. На сликите 1.7, на десната страна, е дадена масата што припаѓа на единечна ќелија, зашто атомите на ќошовите и површините се заеднички. Од пресметаниот волумен на елементарната ќелија и масата на атоми што влегува во таа ќелија, се определува теоретската густина на металот или легурата.



Слика 1.7. Нагледно претставување на поставување на густо пакуваните рамнини кај хексагонална густо пакувана структура (горе) волуменски центрирана кубна структура (долу), издвоена елементарна ќелија и геометриска форма на елементарниот кристален волумен заполнет со атомска маса. Видливи се празните простори во елементарната ќелија

Како што се гледа од сликата 1.7, кај хексагоналната структура на металите најгусто пакувани рамнини се базисите на хексаедарот, а кај површински центрираната структура најгусто пакување е по волуменската дијагонала што поаѓа од странична дијагонала меѓу два спротивни атоми во рамнина и поминува низ едно коше (внимателно да се погледа на средните фигури од сликата 1.17).

Тетрагоналната структура се разликува од кубните структури по тоа, што на базисите има квадрати (со параметар  $a$ ), кои се растегнати по висина, па се јавува и параметарот на решетката по висина  $c$ .

При формирање на елементарните структури на метали може да бидат најмалку 9 атоми, а кај легурите до 52 атоми.

Кај металните легури се формираат елементарни структури со повисок координациски број од 12, поради можноста на густо пакување на атоми со различни атомски радиуси.

Поради можноста на густото пакување на атомите, металните кристали може да имаат различни форми на кристалите, од коцки, потоа издожени во одредени правци, во вид стапчиња, во вид плочки и до сите облици што произлегуваат од коцка кога не се целосно оформени страните на елементарната форма.

Металурзите и минералозите во својата комуникација и објаснување, ги користат елементите од кристалографија, како што се кристалографски рамнини и кристалографски правци. За таа цел се користат Милерови индекси. Милерови индекси се реципрочни вредности на пресеците со координатите на волуменскиот правоаголен систем, што ги даваат одредени рамнини од геометриско тело (кристал) каде се поставени атоми. На пример, рамнината на кристалот што поминува низ дијагоналата на кубната решетка, се означува со (111), што значи дека прави по единица пресек на сите три оски од правоаголниот координатен систем. Правецот

што поминува низ две спротивни темиња на коцката, се означува со  $\langle 111 \rangle$ . Овие елементи на кристалографија се користат во објаснување пластичната деформација на металите или изотропијата на металите.

### 1.3.2. НЕТИПИЧНИ МЕТАЛНИ СТРУКТУРИ

Металоиди се елементите Si, Ge,  $\alpha$ -Sn, Se, Te, Sb, Bi, кои имаат различно густо пакување на атомите. Тие се јавуваат и во други кристални елементарни решетки, како ромбоедарска (арсен, антимон и бизмут), тетрагонална (селен, телур од VI група и металоидите од VII група). Тие во структурата имаат комбинирана врска - неврзани (нелокализирани) електрони и електрони со јака врска (ковалентна). Со ковалентната врска се градат синцирести молекули (ковалентни молекули), густо пакувани и поврзани меѓусебно со слободни електрони (метална врска). Металоидите покажуваат електронска електрична спроводливост и топлоспроводно-ливост, типичен одсјај и непроѕирност, како кај типичните метали.

### 1.3.3. ПАРАМЕТРИ НА ЕЛЕМЕНТАРНА ЌЕЛИЈА И ГУСТИНА КАЈ МЕТАЛИТЕ

Елементарната ќелија кај металите е правилно геометриско тело, коцка, хексаедар или паралелопипед. Од геометрија произлегува дека за определување на волуменот на ќелијата потребно е да се знаат параметрите на елементарната решетка,  $a_0$  за кубна,  $a_0$  и  $c_0$  за хексагонална и за тетраедарска. Параметрите на елементарните решетки и растојанијата меѓу густопакуваните рамнини се даваат во многу прирачници за металургија и хемија. Познавајќи ги параметри на решетката може да се пресмета радиусот на атомот што ја формира елементарната ќелија, како и радиусот на празниот простор. Празниот простор е важен при легурите, зашто таму се сместуваат легирните елементи со соодветен или помал радиус. Тоа подетално ќе биде разгледано во темата 2-легури.

Начинот на пресметување на радиусот на атомите во кристалната решетка, елементарниот волумен и бројот на атоми што реално ја градат решетката, нивната пополнетост со атомска маса, се претставени во табела 1.1. Во табелата е нагледно прикажано како се доаѓа до бројот на атоми што припаѓаат на една ќелија. Од пресметаниот волумен за одредена елементарна решетка, во која кристализира некој метал, како и со познавање на атомската маса на елементот, едноставно се пресметува теоретската густина на типичните метални структури, како и степенот на пополнетост на просторот на решетката со атомска маса.

Густината на кристалите се определува од односот на масата во волуменот:

$$\rho = m/V$$

масата на атомот се пресметува со равенката:

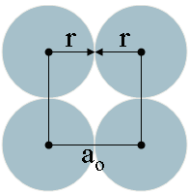
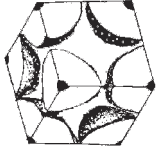
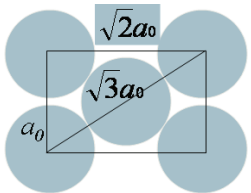
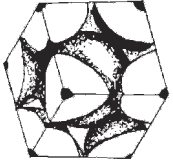
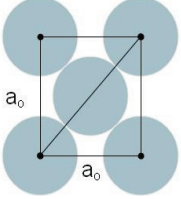
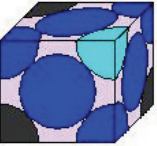
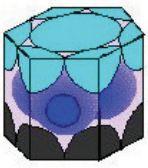
$$m = \text{број на атоми во ќелијата} \times \text{Атомска маса} \times \text{Avogadro}'\text{в број}$$

каде што е Авогардовиот број ( $N_A$ ) (има вредност  $6,022\ 141\ 79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ). Волумен на атом се пресметува по равенката  $V_a = 4 \cdot 3,14 \cdot r^3 / 3$ . Волуменот на одделните елементарни ќелии се пресметува по формулата претставена во табелата 1.1.

Табела 1.1 Зависноста на радиусот на атомите од видот на елементарната



структура, бројот на атоми и пополнетоста на просторот во елементарната ќелија со маса.

Вид елементарна структура	Радиус и волумен на елементарна ќелија и изглед на најгуста рамнина за пресметување на радиус	Број на атоми, пополнетост на елементарната ќелија со маса и скица на маса што припаѓа на елементарна ќелија
Едноставна кубна	$r = a/2$ ; 	1 атоми по ќелија; $V = a^3$ Пополнетост со маса – 52% 
Волуменска центрирана кубна	$r = \frac{a\sqrt{3}}{4}$ ; 	2 атоми по ќелија; $V = a^3$ Пополнетост со маса - 68% 
Површински центрирана кубна	$r = \frac{a\sqrt{2}}{4}$ 	4 атоми по ќелија; $V = a^3$ Пополнетост со маса - 74% 
Хексагонална густо пакувана	Има два радиуси: - на базисно поставените атоми $r = a/2$ - спрема средните атоми $r = \sqrt{\frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}}$	6 атоми по ќелија; $V = 8 \cdot (2)^{1/2} r^3$ по $r$ за базис. Пополнетост со маса - 74% 

## 1.4. ГРЕШКИ ВО СТРУКТУРАТА НА МЕТАЛИТЕ

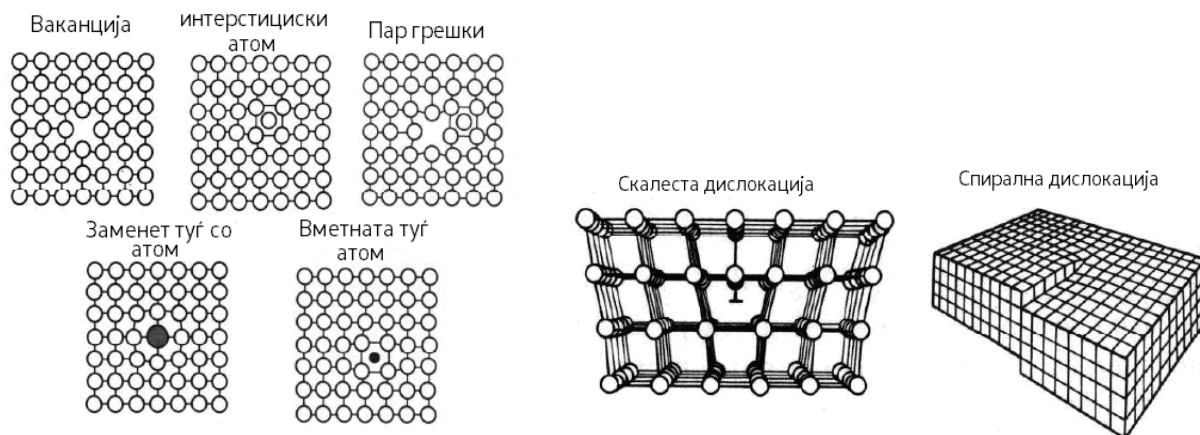
Сето досега изнесено за структурата на металите, се однесува на идеалната (теоретската) структура и градба на металите. Во металите секогаш се јавуваат грешки во кристалите. Грешките во кристалната структура на металите се од следните видови:

- грешки во зафаќањето на регуларните места (атомски или еднодимензионални грешки);

- во изграденоста на кристалните рамнини (линиски грешки или дислокации);
- во поликристаличноста на металите и легурите (појава на зрна и различни фази кај легурите)

Грешки во распоредот може да бидат од два вида: (1) да нема зафатено некое место и се образувала празнина во јазолот (во стручната литературата почесто се користи називот *ваканција*), (2) да се најде во меѓупросторот на решетката атом (грешка со вметнат атом или интерстициска грешка) и (3) атомот во јазолот да се замени со туѓ атом (види слика 1.8).

Линиските грешки се: (1) скалести или рабни, (2) спирални и (3) комбинирани.



Слика 1.8. Грешки во атомската градба на металните кристали - лево и грешки во кристал од линиски карактер (дислокации) - десно

Површински грешки се границите на зрната во еднофазните метали и или граници меѓу различните фази во повеќефазни легури.

Грешките ги менуваат сите особини на металите. За појавата на дефектите во кристалната структура на металите и влијанието на оделни дефекти врз особините на металите, ќе станува збор и натаму со текстот, во другите тематски области.

## 1.5. ФАЗНА РАМНОТЕЖА ВО ЧИСТИТЕ МЕТАЛИ

Под рамнотежа се разбира неменување на концентрацијата на реактантите и продуктите во хемиските реакции при одредени термодинамички услови - притисок, волумен, температура и хемиски состав на учесниците во реакцијата, текот на времето. Тоа се однесува и на агрегатната состојба на супстанциите во природата, што практично се поистоветат со хемиските реакции.

Во физичката металургија многу е важна рамнотежата на фазите, нивниот состав и агрегатната состојбата во која тие се наоѓаат. Затоа тука ќе биде даден акцент на рамнотежата на фазите во металните системи, што претежно се користат и експлоатираат во цврста или во течна состојба, а многу ретко во гасна.

Секоја супстанција, без оглед каква хемиска или кристална врска има, во природата се јавува во три агрегатни состојби: гасовита, течна и цврста. Секоја од овие состојби на материјата, а тоа значи и на металите, зависно од термодинамичките услови (температура, притисок и состав на супстанцијата) може да се јават истовремено и да бидат во рамнотежа или во нерамнотежа.

Основни термодинамички параметри се: температура, притисок и состав на еден систем.

За да може да се разбере рамнотежата, треба да се дефинираат определни основни поими што се користат во термодинамиката и во теоријата на фазната рамнотежа, што често ќе бидат користени во учебникот.

**Компонента** е еден дел кој учествува во рамнотежата, со специфични особини. Таа може да биде хемиски елемент или соединение, но и фазна состојба (цврста, течна или гасовита), зависно од системот што се разгледува.

**Фаза** е дел што го сочинува некој систем, во која владеат определени зависимости и има посебни особини. Фазата е оградена со граници и во тие граници важат определените законитости. Фазата е составена од компоненти, што може да се елементи, соединенија или агрегатна состојба.

**Систем** е целина од повеќе фази каде владеат определени законитости еднакви за сите фази и компоненти на системот. Системот може да биде отворен и затворен. Отворениот систем го менува хемискиот состав, т.е. може да губи дел од масата, или да добива од друг систем, а затворениот систем има константна маса.

Рамнотежа во системот се разбира кога во него со протекот на времето не се менува состојба, на пример бројот на фазите и масата на кристалите и растопот при топење, составот на фазите е константен. Ако исчезнат кристалите, се променил системот од двокомпонентен во еднокомпонентен и ја променил рамнотежата. Рамнотежа и нерамнотежа се временски или кинетички поими. Нерамнотежа во системот е кога не било овозможено доволно време да се постигне рамнотежа во системот.

Секој чист цврст метал има точка на топење и точка на испарување, а агрегатните состојби може да се во рамнотежа при одредени термодинамички услови. Рамнотежата во системот може да биде:

- меѓу цврстото тело и неговиот растоп (во точката на топење)
- меѓу растопот и гасовите на металот (точката на вриење или испарување)
- меѓу цврстиот метал и гасовите на металот - двојна или двофазна рамнотежа, зависно од температурата и од притисокот, што се основни термодинамички параметри во системот.
- меѓу цврстиот метал - растопот- гасовите (тројна рамнотежа)

Во еднокомпонентен затворен систем рамнотежата е зависна само од температурата и од притисокот што владее во системот.

Металите закономерно преоѓаат од една агрегатна состојба во друга (ја менуваат рамнотежата при промени на температурата и притисокот). Рамнотежите на фазите кај чистите метали се претставуваат преку општиот рамнотежен дијаграм на состојба претставен на сликата 1.9.

Во општиот рамнотежен дијаграм на еднокомпонентен метален систем се претставуваат промените на рамнотежата во системот, при менување на температурата, притисокот или нивно заедничко менување. Од него може да се видат агрегатните состојби што се во рамнотежа, ако се менуваат температурата и притисокот. Во него, често посебно, се означуваат точката на алотропска модификација (доколку постои) при притисок од една атмосфера (нормални услови), температурата на топење при една атмосфера и точката на вриење при една атмосфера притисок во системот.

На сликата 1.9 е претставен општиот дијаграм на рамнотежата во сите можни услови. Некои метали при топењето ја смалуваат густината (најчест случај кај металите), некои ја зголемуваат – се згуснуваат (случај кај некои метали, како кај галиум, бизмут или водата), а некои не ја менуваат (што е само теоретско прашање).

Таквите можности се претставени со испрекинатите дебели линии на дијаграмот за фазната рамнотежа цврсто-течно, т.е. точката на топење. Металите најчесто ја зголемуваат точката на топење во затворен систем, ако се зголемува притисокот во системот - на дијаграмот кривата О-О'. Доколку нема промена во густината на цврстиот метал и растопениот метал, тогаш не се менува рамнотежата цврсто-течно при зголемување на притисокот до бесконечно (тоа е само теоретски модел).

Кај металите кои при топење се згуснуваат, нивниот општ дијаграм за фазната рамнотежа ќе има изглед по испрекинатата линија О-О'.

При притисок од една атмосфера во системот, е точката на топење (Т<sub>т</sub>), што се дава во табелите во прирачниците по хемија и металургија.

По линијата В-О во рамнотежа се цврстиот метал и гасниот метал (сублимацијата). За секоја температура има определен притисок на гасните пари во затворен систем.

Точката О е тројната точка, каде што во рамнотежа се трите агрегатни фази (цврста, течна и гасна). Каква било промена на температура или притисок ја менува рамнотежата во трофазниот систем од една компонента, т.е. исчезнува некоја фаза. Линијата О-С во дијаграмите на чистите метали ја дава рамнотежата на цврстата со течната фаза, т.е. промената на точката на топење или стврдување, зависно дали се додава или одзема топлина на системот.

Линијата О-А ја претставува рамнотежата меѓу течната и гасната фаза, т.е. испарување на течните метали. При една атмосфера во системот, тоа е точката на вриење (Т<sub>в</sub>).

Во металите со модификации има криви на рамнотежата цврсто-гас, зависно од модификацијата, кои го менуваат правецот (т.е. закономерноста) на зависноста и се прекршуваат. Точките на прекршување при една атмосфера притисок се дефинираат како температури на алотропска претворба или температури на модификација.

Точката на топење на метал, при промена на притисокот на металните пари, се менува по Клаузис-Клапејроновата формула:

$$\Delta T_{\text{топ}} = \frac{T_{\text{топење}} \times (V_{\text{течно}} - V_{\text{цврсто}}) \times (P_{\text{променет}} - P_{\text{1атм}})}{H_{\text{топење}}}$$

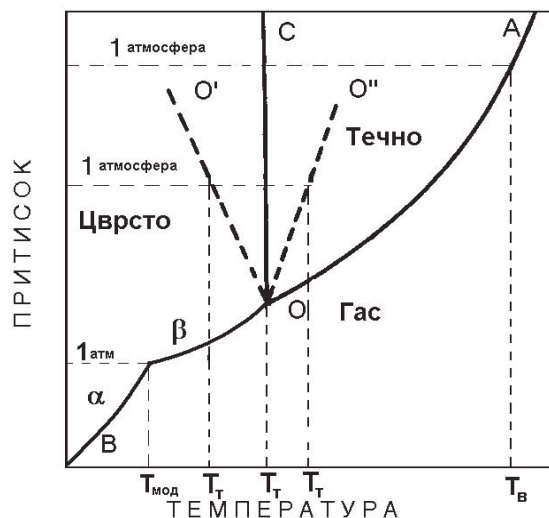
Каде што се:

$\Delta T_{\text{топ}}$  е промената на точката на топење при промена на притисокот во системот, во К или °С.

$T_{\text{топење}}$  е точка на топење при една атмосфера во системот, во К или °С.

$V_{\text{течно}}$  е волумен на течната фаза (се пресметува од густината) во единици за волумен,

$V_{\text{цврсто}}$  е волумен на металот во цврста состојба (се пресметува од густината) и има димензии за волумен,



Слика 1.9. Општ дијаграм на фазна рамнотежа на еднокомпонентен метал

$P_{\text{променет}}$  е притисокот кој дејствува во моментот во системот, во единици притисок, Pa

$P_{1\text{атм}}$  е притисокот од 1 атмосфера или соодветниот нормален притисок во Pa.

$H_{\text{топење}}$  е топлината потребна да се додаде за мол или грам маса од тврда да се растопи во течен метал, што се дава во многубројни прирачници.

Затоа металите имаат промена во точката на топење кога се во отворен и затворен систем. Во затворен систем тие се топат на пониска температура.

Исто така, може да се определи каков ќе биде притисокот на пареите над еден метал ако тој се загрева, кога е во цврста или во течна фаза.

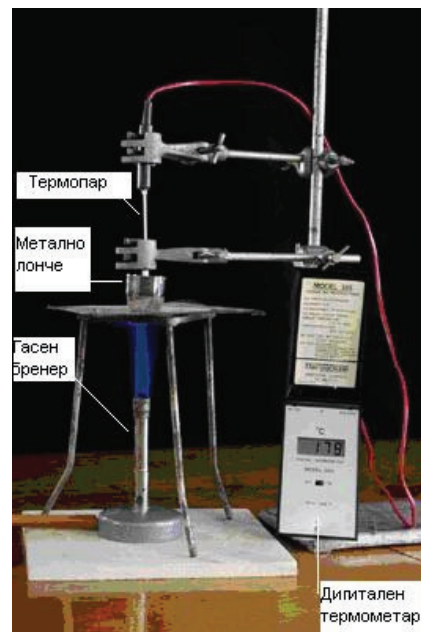
## 1.6. КРИВИ НА ЗАГРЕВАЊЕ И ЛАДЕЊЕ

Точките на топење најчесто се определуваат при постепено и бавно загревање или ладење на метал во отворен систем. Тоа се изведува така, што во огноотпорно керамичко или метално лонче ќе се стави металот, во негов контакт ќе се стави термометар или термоелемент и се загрева. Изглед на едноставна метода за определување на кривата на ладење и загревање е претставен на сликата 1.11. Се следи промената на температурата на металот со текот на времето на загревање и се исцртуваат кривите температура - време. Ако се загрева цврст метал, се добива крива на загревање, а ако се лади претходно растопен метал - крива на ладење. Наместо отчитување на температурата од дигитален термометар или живин термометар, поудобно е да се користи запишувач што отчитува напон и ја движи хартијата со определена брзина, какви што се користат многу во металургиската индустрија.

На сликата 1.11 се дадени неколку криви на ладење, од што може да се забележи дека при ладење кристализацијата започнува на пониска температура од рамнотежната. Кривите на загревање и ладење не ја даваат теоретската точка на топење или кристализација, туку пониска или повисока. При преминот на едната фаза во друга, теоретски мора да има предгревање или подладување за да започне процес на топење или на стврднување (кристализација). Затоа, при побрзото ладење температурата се запира на пониска температура од вистинската (термодинамичка) точка на топење ( $\Delta T$ ). Поради ослободување топлина при кристализацијата, растопот се загрева и се добива крива како на сликата 1.11, десна крива. На кривите на ладење, на температурата на кристализација или друг фазен премин, температурата се задржува константна додека не се трансформира целокупната количина на маса во системот што се испитува.

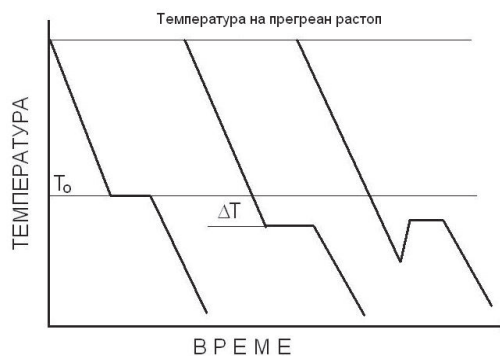
На сликата 1.12 е претставена крива на загревање на чисто железо.

Кривите на ладење покажуваат повисока температура од термодинамичката, а кривите на загревање пониска. Затоа кривите на ладење и на загревање се користат за брзо и приближно определување на точките на топење или на кристализација, што пак се важни за практична примена.

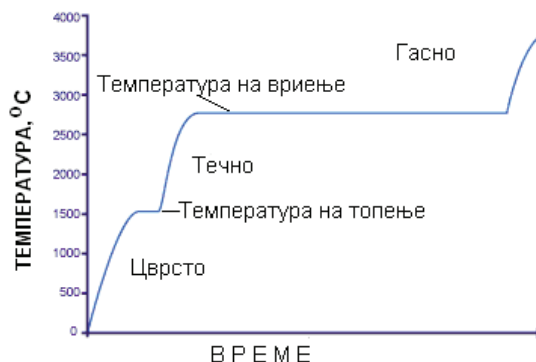


Слика 1.10. Едноставна апаратура за определување криви на ладење и загревање





Слика 1.11. Општи криви на ладење. То е термодинамичка температура на топење, а  $\Delta T$  подладување ( $T_0$ -Тпостигната).



Слика 1.12. Крива на загревање на чисто железо. Поради неосетливост на методата, не се забележливи температурите на алотропските модификации кај железото, кои ги има три.

## ПРАШАЊА ЗА САМОПРОВЕРКА

Доколку е изучен внимателно материјалот по оваа тема, ученикот треба да може да одговори со свои зборови на следните прашања:

1. Дефинирајте основа дефиниција што е метал?
2. Што е карактеристика на металните атоми?
3. како се поврзуваат атомите меѓусебно во цврсти кристали?
4. Какви типични кристални структури познавата?
5. Што е разликата меѓу структурата на врските во кристали меѓу типичните метали и металоидите?
6. Набројте колку еднофазни состојби може да има чист метал?
7. Колку двофазни рамнотежи има чист метал и меѓу кои фази?
8. Дали чистите метали ја менуваат точката на топење или имаат константа и објасни зашто мислиш така?
9. Што може да се определи од крива на ладење на чист метал?

## 2. ТЕМА ЛЕГУРИ

Преглед на содржини	Цел на учењето
•Легури, основни поими и	Целта на изучување на оваа тема е ученикот, по наставниот програм за овој предмет, да стекне знаења со што ќе:

<p>дефинирање;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Поделби на легуриите;</li> <li>• Кристална структура на легуриите;</li> <li>• Поделба по бројот на фазите - еднофазни и повеќе фазни легури;</li> <li>• Еднофазни легури со цврсти раствори - супституциски и интерстициски;</li> <li>• Микроструктура на легуриите;</li> <li>• Технологии за добивање на легури;</li> <li>• Најчести технички легури - особини, примена и состав.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ја познава поделбата на легуриите</li> <li>- ја прикажува градбата кај легуриите.</li> <li>- ги објаснува постапките на добивање на легури.</li> </ul> <p><i>Во рамките на оваа тема е дадена дефиниција што е легура, како таа се формира во металната густопакувана структура, каква кристална структура може да имаат легуриите, колку фази во цврста состојба може да образуваат и какви особини имаат одредени кристални структура на цврстите легури.</i></p> <p><i>Посебно е третирана градбата на елементарната кристална решетка на легуриите, како основа за градбата на цврстите легури, како се сместуваат атомите на легирните елементи во кристалната елементарна структура на основниот метал.</i></p> <p><i>На основа сознанијата од градбата на легуриите, претставени во оваа тема, во најзбиена форма, без термодинамички објаснувања, туку користење термодинамиката како факт, не само што ќе претставува збогатување на теоретските знаења за градбата на легуриите на идниот техничар, туку намерата е да го принуди на размислувања и натамошни изучувања, за причините на феноменот на легирањето и градбата на повеќе компонентните системи, кои се предмет на изучување и во наставниот програм по овој предмет.</i></p> <p><i>Познавањето на градбата и основите на структурата на легуриите, се неопходни за разработката на наредните теми, за што е обрнато посебно внимание.</i></p> <p><i>Разработката на темата за структурата на легуриите е само уште еден чекор во создавањето слика за особините на металите и легуриите и за нивно објаснување, а тие не се предмет за изучување во рамките на овој предмет, туку во предметот Термичка обработка и испитување, кој се слуша паралелно во четвртата година, со овој предмет.</i></p>
---	--

## 2. ЛЕГУРИ

**Легура е систем составен од повеќе елементи. Доколку елементите се метали и други елементи, во кој преовладува металниот карактер на врските, тогаш се метални легури.**

Легирањето се врши со додавање и навлегување на еден метал во друг. Додавањето на елементи во чистиот метал се врши со цел да се подобрат или да

истакнат некои позитивни особини на металот. На пример, чистите метали, како алуминиум, железо, бакар се меки и не можат да се користат како конструкциски материјали. Додавањето на оделни елементи во нив ги менуваат: механичките, хемиските, физичките и технолошките особини на основниот метал. На пример со додавање хром и никел во железо се добива легура што не рѓа и отпорна на киселини. Можат да се промената и магнетните особини на челикот со додавање на кобалт.

Алуминиумот, иако лесен метал, има слаби механички особини, а како алуминиумски легури, тој е основен конструкциски материјал за авионите. Истото се однесува и на титан. Цинкот, технички рафиниран, иако погоден за леење, има ниски механички особини. Легури на цинкот со 5%Al и 1%Cu, позната како замак5, има многу повисоки механички особини и се користи за леани делови во автомобилската индустрија и домаќинство.

Легура со најширока примена е челикот. Челик е легура на железото со јаглеродот и други елементи (за челикот ќе стане збор подетално во темата 4, фазниот дијаграм Fe-C). Железото се добива со екстракција од оксидни руди. Рафинацијата на легурата, позната како бело или сиво железо, се врши во челичарници. Со дување со кислород се отстрануваат јаглеродот и другите примесни елементи во железото. По дувањето се добива безјаглероден челик. Потоа, на такво очистено железо се додаваат јаглерод и средства за отстранување на кислородот, како и други легирни елементи, па се добива челик, како метална легура. Особините на железото, во вид на челик, се менуваат во широк дијапазон.

Од железото се добиваат многубројни легури, кои имаат многу различни особини, зависно од намената и примената. Челичните легури се подложни на натамошна промена и подобрување со накнадно термичко третирање. На пример, на железото може да му се зголеми јачината на кинење, отпорноста на корозија, тврдината, електроотпорот, отпорноста на оксидација на повисоки температури, трајната јачина при употреба на повисоки температури во парните котли и пароводите и многу други специфични намени.

## 2.1. ПОДЕЛБА НА ЛЕГУРИТЕ

Легуриите се поделени на групи според:

- основниот метал,
- намената
- структурата и механизмот на образување,
- бројот на елементите,
- бројот на фазите
- основната особина
- технолошката постапка за добивање.

Према основниот метал, легуриите се делат на железни, бакарни, алуминиумски, месингани, оловни, легури на племенити метали, никлови, титански и други.

Према намената легуриите се делат на: легури за леење, за пластична деформација, за електротехника, дентални материјали (за изработка на заби и протези), за лемење и други намени.



Према структурата и механизмот на нејзино образување, легурите се поделени на: еднофазни (супституциски или интерстициски цврсти раствори), двофазни, повеќе фазни, метални смеси.

Према бројот на елементите во легурата тие се поделени на: двокомпонентни, трикомпонентни, повеќекомпонентни легури.

Према бројот на фазите што ја сочинуваат структурата на легурите, тие се поделени на: еднофазни, двофазни, трифазни и повеќефазни легури.

Према основната особина легурите се поделени на: магнетни, електрични, тврди, корозионо отпорни, температурно отпорни, отпорни на старење, еластични, за леење, за пресување, за деформација, со пецифични физички особини и други.

Према технолошката постапка на добивање, легурите се делат на: (1) леани, (2) синтерувани и (3) електрохемиски и други превлеку.

## **2.2. КРИСТАЛНИ СТРУКТУРИ НА ЛЕГУРИТЕ**

Структурата ги диктира особините на металите. Со додавање на легирни елементи во метал, практично се врши промена на структурата и на особините. Со додавање на втор или повеќе елементи во основниот метал, во основа се одвиваат промени на структурата на основниот метал на следните начини:

1. Да се задржи едната фаза со образување на цврст раствор на основниот метал со легирните елементи.
2. легирните елементи да формираат втора, различна фаза, по кристална структура и особини. Зависно од додадена количина може да се задржи дел од основниот метал (помала количина додаден легираен елемент) или да се образува нова интерметална фаза, соодвена на фазниот дијаграм.<sup>5</sup>

### **2.2.1. ЕДНОФАЗНИ ЛЕГУРИ**

Еднофазните легури се образуваат со растворување на легирниот во основниот метал, така што во цврста состојба да се добие структура составена од двата метала.

Цврст раствор се добива кога во кристалната структура на еден метал се растворот атоми од друг метал, металоид или неметал, а притоа не се променува видот на елементарната кристална решетка.

Цврстите раствори во основниот метал може да се:

- (а) супституциски цврсти раствори (цврсти раствори со замена),
- (б) интерстициски цврсти раствори, или растворање на други елементи во празните простори во структурата на чистиот метал или соединенијата.

Исти типови на цврсти раствори се образуваат во инерметалните соединенија, што се нарекуваат интерметални фази со нестехеометриски состав.

#### **2.2.1.1. СУПСТИТУЦИСКИ ЦВРСТИ РАСТВОРИ**

---

<sup>5</sup> Фазните дијаграми за дво и три компонентни системи подетално се објаснети во тематските наставни единици 4 и 5.

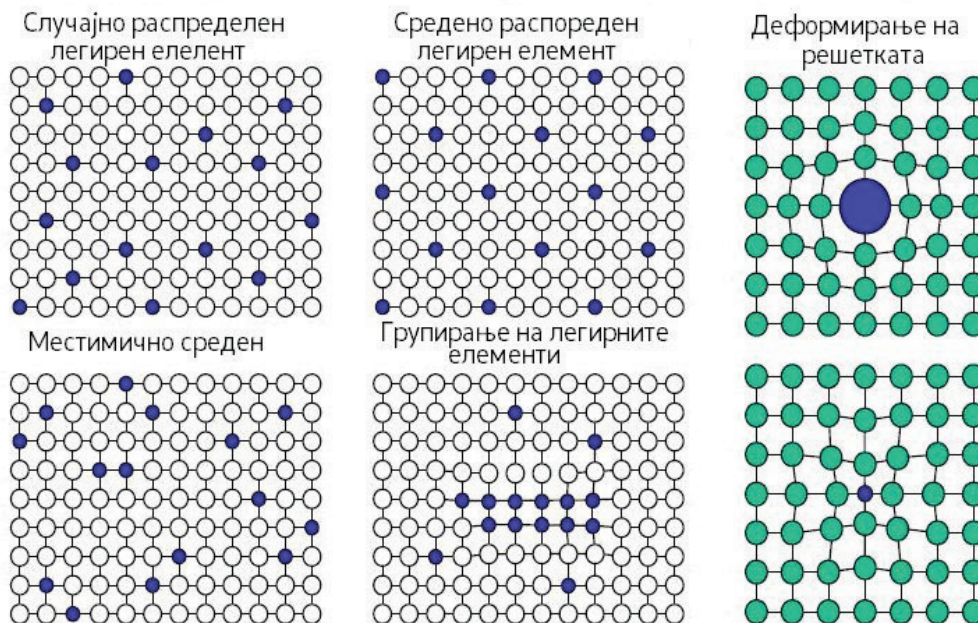
Супституциски цврсти раствори се добиваат кога атомите од регуларните (постојани) места во елементарната решетка ќе се заменат со атоми од друг метален елемент. Местата во решетката може да се заменат со помали или поголеми атоми.

Легури со супституција се добиваат само кај метали што имаат иста кристална елементарна решетка и атомки радиуси со разлика до 15%. При тоа тие треба да се со блиска електронегативност.

Зависно од големината на легирните атоми, супституциските цврсти раствори може да се со:

- неограничена растворливост и
- ограничена растворливост.

Супституциските цврсти раствори се јавуваат во еднофазните легури, кога има неограничена растворливост, или во двофазните легури, кога постои ограничена растворливост на легирниот елемент.



Слика 2.1. Деформирање на решетката при супституциско растворање на легирен елемент со поголем и помал радиус од основниот метал.

На сликата 2.1, заради нагледност во структурата на супституциските цврсти раствори, е претставена шема на легирање со заземање на различен распоред на растворените легирни елементи (несредени, делумно средени или потполно средени цврсти раствори) и со растворање на поголеми и помали легирни атоми од основниот метал. При растворување на помали или поголеми атоми се јавува деформирање на решетката на основниот метал и добиената легура има зајакнување. Секоја таква легура има повисоки механички особини, а може да има и промени во хемиските и физичките особини. Легирните елементи во супституцискиот раствор, можат да бидат заменети со случаен распоред, местимично да се средат и постават во повторливи положби со пар од легирни елементи еден покрај друг, рамномерен распоред и потполно средување (легури наречени суперструктурни), или со поставување на поголем број легирни атоми еден покрај друг и формирање на зони, што прилегаат на структурата на легирниот елемент, но со друго растојание меѓу нив (површинска деформација на решетката).

Сите неведени состојби на легирните елементи во легура, со образување супституциски цврсти раствори, доведуваат до различен степен на деформација на решетката и до зајакнување на легурата, во однос на појдовниот метал.

Туѓите атоми во решетката на основниот елемент мора да предизвикаат промена на растојанието со блиските атоми (зголемено или намалено), а тоа значи и промена на елементарниот параметар на коцката  $a_0$ . Тие истовремено предизвикуваат и напрегање во решетката, така што металот има поголема внатрешна енергија и станува појак и поцврст (погледај слика 2.1).

Под влијание на надворешни напрегања, одделни рамнини во металните кристали, што се густо пакувани, може да се лизгаат една над друга, без промена на распоредот на атомите<sup>6</sup>. Затоа кога во една рамнина се раствора поголем или помал легирен елемент, се јавува потреба за поголема сила или напрегање, за да се лизгаат меѓусебно соседните рамнини, поради нерамнините (длабнатини или испакнувања) предизвикани од легирните елементи поставени во некоја кристална рамнина. Затоа легурите со цврсти раствори се појаки и потврди од основниот метал.

Легурите кои образувале супституциски цврсти раствори, покрај на механичките особини, покажуваат влијание на промената на физичките особини, поради разликата во електронската конфигурација на одделните атоми. Тоа предизвикува промена на густината на слободните електроните во металната врска во легурата, која е основа за промената на електричните (електроспроводливоста) и магнетните особини (магнетниот пермеабилитет) на легурите, потоа на топлотниот специфичен капацитет, коефициентот на линеарното топлотно ширење и други особини.

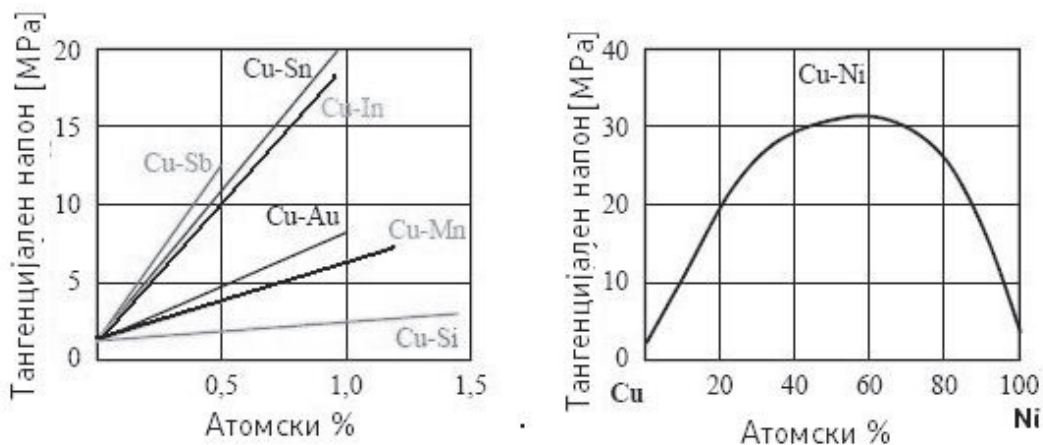
Легурите со супституциски цврсти раствори имаат поголема корозиона отпорност и хемиска постојаност (нерѓечки хромен или хром-никлов челик).

Зајакнувањето и промената на особините се зависни од количината на легирниот елемент во легурата.

Промената на цврстината на бакарните легурите во зависност од количината на додадениот легирен елемент во основниот метал, нагледно може да се илустрира со дијаграмите на сликата 2.2, за легури со ограничена растворливост на легирните елементи (слика 2.2 лево) и при неограничена растворливост во цврста состојба на двата метали, на примерот на легирање на бакар со никел и обратно (види слика 2.2 десно). Како се гледа од дијаграмот на сликата 2.2. лево, при додавање на легирни елементи бакарот зајакнува линеарно при додавање на легирни елементи антимон, калај, индиум, злато, манган и силициум. Зајакнувањето на легурите се манифестира во потребниот поголем напон за да настане деформација на легурата.

---

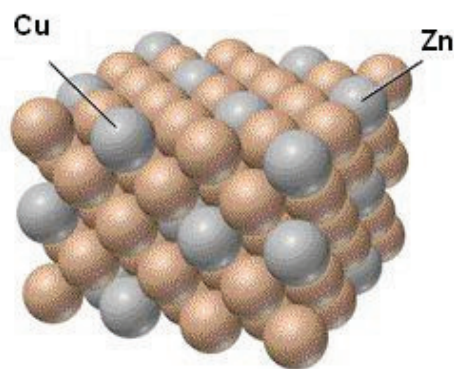
<sup>6</sup> На тоа се базира пластичната преработка и лесното обликување на металите во различна форма со надворешен притисок.



Слика 2.2. Зајакнување на легурите на бакар при зголемување концентрацијата на легирните елементи во легурите со ограничена растворливост (график лево) и зајакнувањето на бакар, кога се легира со никел или никел се легира во бакар (слика десно).

Како нагледен пример за просторен изглед на легура со структура на цврст супституциски раствор е претставено на сликата 2.3 на примерот на замена на атомите на бакар со атоми на цинк, во легурата на месинг.

Во површински центрираната елементарна ќелија на бакар, каде што во елементарната коцка се поставени осум атоми на кошовите и шест на површините на страните на коцката, ќе се заменат со атоми на цинк, се добива легура на бакар со цинк (позната како месинг), при што преовладуваат особините на бакарот (има црвенкасто златна боја). Обојувањето и другите особини се менуваат со промената на бројот на заменетите атоми. Со оглед на релативно поголемите атоми на цинк од тие на бакарот, не е можно целосно заменување на бакарните јони со цинкови. Тоа е можно меѓу бакар и никел или бакар и злато, зашто е можно да се заменуваат потполно еден со друг. При супституциските раствори, во зависност од концентрацијата, закономерно се менуваат и особините, како што се цврстината, пластичноста, електроспроводливоста и други физички и хемиски особини.



Слика 2.3 Супституциски цврст раствор на цинк во бакар.

Замената на атомите во ќелијата од еден елемент може да биде од поголем број различни метални елементи. Тогаш се добиваат повеќекомпонентни цврсти раствори или повеќекомпонентни легури.

Доколку не се исполнети словите за потполна растворливост, тогаш металите се раствораат во ограничена концентрација. Ако се надмине максималната количина на некој елемент што може да се раствори во основниот метал, а тој е додаден во поголема количина, преостаната количина на другиот метал останува нерастворена, т.е. како друга фаза и формира смеса од чист метал и цврст раствор. Во такви случаи се добиваат двофазни метални легури, за што ќе стане подетално збор во двокомпонентните легури и нивните рамнотежни системи.

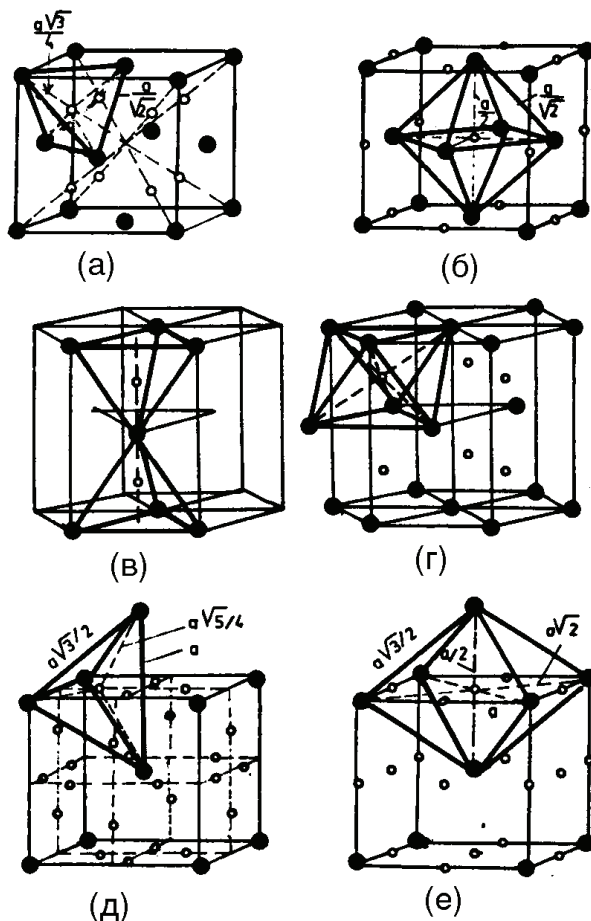
Во една легура може да се јават и супституциски и интерстициски растворени елементи и метали, кај повеќе компонентните легури.



## 2.2.1.2. ЛЕГУРИ СО ИНТЕРСТИЦИСКИ ЦВРСТИ РАСТВОРИ

Секој метален кристал, составен од густопакувани атоми, има поголеми или помали празнини меѓу атомите. Празните простори можат да бидат од тетрагонален и октаедарски облик. Интерстициски цврсти раствори се добиваат кога во тетраедарските или во октаедарските празнини ќе се сместат помали или атоми со мала разлика од големината на празнината. Под големина на празнината се разбира со каков радиус може да се смести топчеста форма во таков простор.

Сето погоре кажано станува разбирливо ако се разгледа сликата 2.4 на типичните елементарни структури на металите и се забележат можните празнини за вметнување на легирните елементи при образувањето на металните легури.



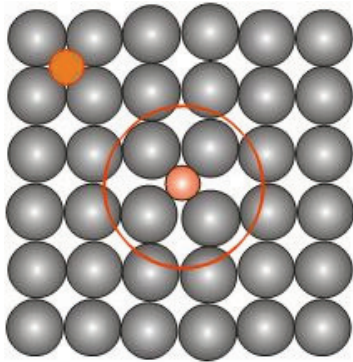
Слика 2.4. Октаедарски празнини во површински центрирана кубна (б); во хексагонална густо пакувана (г) и во волуменски центрирана кубна решетка (е) и тетраедарски празнини во: површински центрирана (а), хексагонална густо пакувана (в) и волуменски центрирана (д) решетка, во што може да се сместат помали атоми со радиуси блиски до претставените на скиците. На сликите претставени со помали кругови.

Од сликата 2.4 може да се забележи дека со поврзување на четири соседни атоми во типичните густопакувани структури на металите од п.ц. и в.ц. кубна и хексагоналната густо пакувана структура, се добива геометриска форма на тетраедар, со празнина во средината. Во тетраедарската празнина може да се вметнат атоми од легирните елементи.

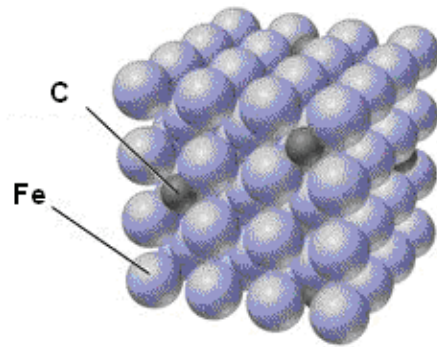
Ако се поврзат осум соседни атоми во металните кристални структури, во средината се образува празен простор - октаедарска празнина, во која, исто така,

можат да се сместуваат легирни елементи и да образуваат цврст раствор од интерстициски тип.

На сликата 2.4, на оделните структури се впишани тетраедрите и октаедрите што се можни места за интерстициско легирање на металот и должината на рабовите на тетраедрите и октаедрите, низ кој при дифузија навлегуваат атомите, во зависност од параметрите на елементарната решетка.



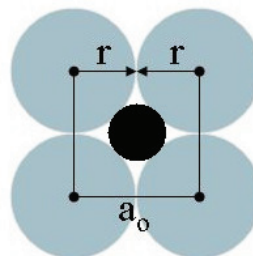
Слика 2.5. Вметнување легирните елементи меѓупросторот на атомите основниот метал.



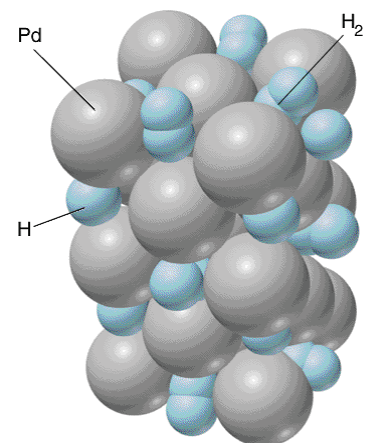
на Слика 2.6. Интерстициски цврст во раствор на јаглерод во волумен-ски од центрирана структура на железо

Големината на тетраедарските празнини зависи од големината на атомите на основниот метал. Во тетраедарските празнини можат да се вметнат и растворот атоми со помала големина од големината на празнината, но исто така и атоми со малку поголеми димензии, со истиснување на соседните атоми од нивното рамнотежно кристално растојание. Ако се растворот многу помали атоми во празнината од нејзината големина, тогаш кон растворениот интерстициски атом се приближуваат соседните атоми и пак ќе ја деформираат кристалната решетка (види слика 2.5). Без оглед на тоа, дали во интерстицискиот раствор легирните елементи се поголеми или помали од максималните димензии на празнината, кристалната решетка ќе се напрегне и ќе се зајакне основниот метал. Легурите со интерстициско растворување на легирните елементи се појаки од основниот метал, имаат поголеми механички особини, поголем отпор за да започне деформацијата, поголема јачина да се скинат и поголема тврдина и подобри многу други карактеристики.

На сликата 2.6 е нагледно претставено како во кристалната решетка на железото со волуменски центрирана кубна структура во празнините на страните се вметнуваат атомите на јаглеродот, образувајќи феритен цврст раствор, кој е составен дел на микроструктурата на челиците



Слика 2.7 Шема на сместување на максимален атом во тетраедарска празнина во кристал.



Слика 2.8 Симулација на кристална структура на паладиум (Pd), во кој се раствораат интерстициски атоми и молекули на водород (H).

(подетално за овој цврст раствор во темата 4).

На сликата 2.7 е дадено нагледно, колкав јон може да се смести во просторот на тетрагонална празнина, а пример на растворување на водород во кристалната структура на паладиум (Pd) е претставен на сликата 2.8. Во интерстициски празнини, покрај атоми, може да се сместат и молекули на водород.

За да се добие значително зајакнување на материјалот со легирање, треба да се додаваат како легирни елементи метали што ќе го зголемат модулот на смолкнување. Тоа значи да се додаваат легирни елементи со различна кристални параметри, или со атоми со поголем атомски дијаметар над 15% во однос на основниот, е потребно поголемо тангенцијално напрегање за да металот се деформира.

Интерстициските легирни метали, покрај што се раствораат во празнините на идеалната кристална решетка, тие се вметнуваат и во другите грешки во структурата на металите, како што се линиските грешки - дислокации, во кои се вметнуваат многу малите легирни елементи, како на пример јаглерод и азот во челикот, па осетно го зајакнуваат челикот.

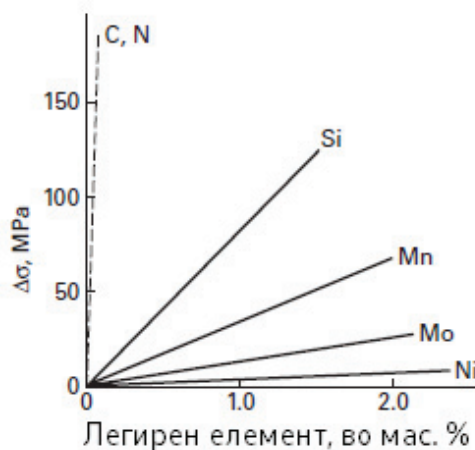
Зајакнувањето на легурите со интерстициски раствори е зависно од:

- концентрација на растворените атом,
- модулот на смолкнување на легирниот метал
- големината на растворените атоми и
- валентноста на растворените атоми.

При легирање на метал, за да се добие легура со повисоки јакосни карактеристики, треба да се внимава на максималната растворливост на легирниот елемент во основниот, што може да се отчита од бинарните или повеќекомпонентните фазни рамнотежни дијаграми<sup>7</sup>. Доколку се додаде поголема содржина на легирен елемент од максималната дозволена, ќе се образува нова фаза, која може да делува во две насоки:

- да ги влоши посакуваните резултати и ја зголеми кртоста на легурата, или
- да ја зголеми јачината, со задржување на добрата пластичност, т.е. подобри особините, каков што е случајот на дисперзно старечките легури.

Зајакнувањето од интерстициските легирни елементи е често поголемо отколку легирањето со супституциски легирни елементи. Тоа особено се однесува на челичните легури на железото. На сликата 2.9 е претставено зголемувањето на зајакнувањето против деформација кај железото предизвикано од интерстициски легирни елементи (јаглерод и азот - со испрекината линија) и другите најчести легирни елементи од супституциски тип. Очигледно е дека интерстициските атоми даваат поголемо зајакнување при легирање, отколку супституциските легирни елементи и тоа по големи на зајакнување - никел, молибден, манган и најголемо



Слика 2.9 Влијание на количината на легирен елемент во челикот на зголемување на модулот на смолкнување.

<sup>7</sup> Рамнотежните фазни дијаграми во дво и трикомпонентни метални системи детално се дадени во темите 4 и 5, како и во посебни прирачници со фазни дијаграми.

силициум.

Интерстициските легирни елементи, како што се јаглердот и азотот, во мали концентрации, може осетно да ги менуваат особините на челичните производи со текот на времето. Тие се подвижни низ микроструктурата на челикот и при релативно ниски температури и можат да се концентрираат во оделни дефектни места во микроструктурата, како што се дислокациите и границите на зрната и да ја зголемат јачината. Зајакнувањето на легура што треба накнадно да се преработува со деформација не е пожелно. Кај интерстициските легури се јавува феноменот на природно стареење и природно зајакнување на легурата при долговременно стоеење, по ладна деформација и соодветна рекристализација<sup>8</sup>.

### 2.2.3. ПОВЕЌЕФАЗНИ ЛЕГУРИ

Повеќе фазни легури се добиваат зависно од фазниот дијаграм на состојбата и растворливоста или реакцијата на компонентите, т.е. дали металите имаат ограничена растворливост во цврста состојба, дали образуваат интерметални фази, дали металите се раствораат во интерметалните соединенија и слично.

Во легурите, што произлегуваат од дијаграми на состојба со ограничена растворливост, во концентрации на легирен елемент над максималната растворливост во цврста состојба, останува дел и од основниот метал. Такви легури се по структура двофазни, составени од основниот метал и цврст раствор. Таква структура имаат легурите од дијаграмите со евтектичка реакција и ограничена растворливост во цврста состојба (погледни тема 4.2.6 двојни дијаграми со ограничена растворливост).

Во легури што произлегуваат од дијаграмите на состојба, во кои се јавуваат интерметални соединенија или фази со евтектички реакции (такви дијаграми се дадени во тема 4.2.8), се формира структура, во која покрај цврст раствор или основниот метал, ќе се појават и зрна на интерметалната фаза. Кај трифазните дијаграми (за тоа станува збор во тема 5) може да се јават и повеќе цврсти раствори или интерметални фази.

Микроструктурата на повеќефазните легури покажува дека тие се образувани од различни видови кристалчиња од чисти метали, од цврсти раствори од интерстициски или супституциски вид, од интерметални соединенија и фази и јонски кристали (како нечистоти). При ладење на растоп на метал или легура во нормални производни услови, согласно на фазниот дијаграм, се образуваат истовремено многубројни мали монокристалчиња (зрна) од рамнотежните фази поставени едни покрај други и меѓусебно поврзани со метална врска. При брзи ладење каде е оневозможено образување на рамнотежни фази, во легурата се образуваат нерамнотежни одделни фази, со хемиските состав кој отстапува од рамнотежниот даден во дијаграмите на фазната состојба. Заради практични причини, фабриците или во литературата се дадени често и структурите на нерамнотежните легури.

Во металите, што не ги исполнуваат правилата за растворливост меѓу чистите компоненти, се образуваат интерметални соединенија, ако едноставно не реагираат меѓусебно, кога ќе се најдат еден до друг или кога е надмината максималната растворливост на легирните елементи. Во тој случај во микроструктурата на легурата, покрај примарниот цврст раствор, се наоѓа и секундарен цврст раствор од друг легирен елемент, согласно рамнотежниот дијаграм, или се формира интерметална фаза.

---

<sup>8</sup> За рекристализација на ладно деформираните метали, како еден од методите за промена на микроструктурата на металите и легурите станува збор во темата 6.



Интерметалните соединенија имаат структури еднакви со чистите метали или цврстите раствори, т.е. тие може да имаат кубна или хексагонална елементарна форма, но може да имаат и структури со комплицирано пакување на елементи со различни радиуси во волуменот на елементарната решетка. Во некои интерметални фази во градба на единечната ќелија учествуваат повеќе атоми, како на пример во  $\gamma$ -фаза од соединението CuZn ( $\gamma$ -месинг) има 52 атоми.

Основната причина за стапување во реакција на два или повеќе метали и образување соединение е: да се добие минимална слободна енергија во системот од повеќе компоненти. Минималната слободна енергија може да биде зависна од: електронската конфигурација, составот на легурата или разликата во атомските и јонските радиуси. Затоа тие се поделени на неколку групи, со слична структура и особини:

- Електронски соединенија
- Интерстициски соединенија и фази
- Густо пакувани фази со повисока координација од 12 (Кагоме фази)
- Соединенија и фази од  $\sigma$ -тип;
- Стехеометриски соединенија од тип АВ;
- Стехеометриски соединенија од тип АВ<sub>2</sub> (Лавесови фази)
- Фази со структура на  $\beta$ -волфрам;
- Фази со структура на NiAs;
- Фази со структура на CaF<sub>2</sub>;
- Соединенија со структура од тип Cu<sub>5</sub>Ca и
- Полупроводнички интерметални соединенија.

Подетално за структурата и особините на интерметалните соединенија и фази може да се најде во литература, на пример во литературата дадена под број [1].

Со појавата на интерметални соединенија или интерметални фази во основниот метал, се јавува посебен механизам на зајакнување на основниот метал - дисперзионото зајакнување. Поради фактот што интерметалните соединенија и фази во основа се потврди и поцврсти од чистите метали и тврдите раствори, тие даваат пообно зголемување на цврстината и не дозволуваат дефомирање на телото од легура со интерметални соединенија.

Зајакнувањето на легурите, во кои легирните елементи образуваат интерметални фази, е многу зависна од големината на зрната на интерметалните фази и нивниот распоред, а помалку од вкупната количина. Големи и многубројни зрна на интерметални фази во легурата ја зголемуваат нивната кртост и полесно се кршливи при удари.

Во повеќефазни легури се вбројуваат евтектичките<sup>9</sup> и евтектоидните легури<sup>10</sup>. Тие се оставени од две или повеќе фази. Евтектичките легури се добиваат со кристализација од металните растопи. Евтектоидните смеси се образуваат при фазните претворби во цврста состојба.

Евтектичките и перитектичките смеси може да имаат различна микроструктура и различни особини, што се зависни од брзината на ладење и други услови.

---

<sup>9</sup> За начинот на формирање микроструктурата на евтектичките легури подетално е дадено во темата 3.3.

<sup>10</sup> За начинот за формирање на структурата во евтектоидните легури, подетално е дадено во темата 6.2.2 - дифузиски фазни претворби.

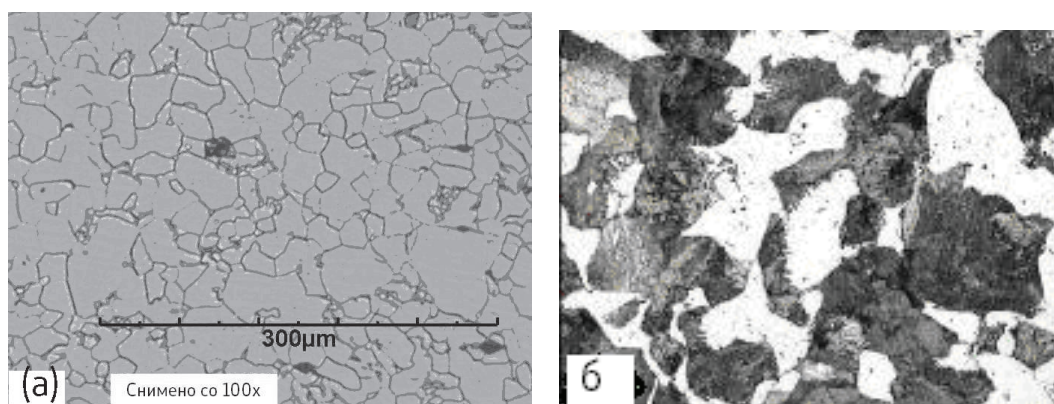
Меѓу металите што не се раствораат меѓусебно како цврсти раствори, по кристализација од растоп, се формира микроструктура што претставува смеша од два или повеќе чисти метали - евтектичка легура од чисти метали.

Кај металните смеси се добиваат комбинирани особини од различните метали. Меките и деформабилни метали, во комбинација со цврсти и тврди метали ги подобруваат затезните особини на мекиот метал. Ваквите легури, поради пониските точки на топење на чистите метали, добрата ливкост и течливост, наоѓаат практична примена како материјали за машиноградбата.

Особините на металните смеси зависи од формата на оделните метални зрна, големината на зрната на оделните метали, од врските на границите меѓу оделните зрна. Во оваа тема ќе бидат наведени некои од особините од најчестите технички легури, што имаат одделни структури од наведените.

## 2.3. МИКРОСТРУКТУРА НА ЛЕГУРИТЕ

Во физичката металургија, монокристалите што ја сочинуваат микроструктурата на легурата или металот, се нарекуваат метални зрна, ако е еднофазен метал или зрна на фазите, кај повеќефазните структури. Метал или легура може да е составен од само еден вид зрна или зрна со различен состав. Зрната во легурите се од чист метал или цврсти раствори. Тие се ограничени со граници, што имаат определен површински напон и површинска енергија.



Слика 2.10 Структура на зрна на еднофазна јаглеродна легура на железо (ниско јаглероден феритен челик) (a) и повеќефазна структура на среднојаглероден челикчелик (белите полиња ферит, темните полиња перлит).

Формата и распоредот на различните зрна во металот или легурата ја формираат неговата микроструктура. Таа е важна за особините и за употребната вредност на определена легура, зашто од микроструктурата се диктирани механичките особини на металите. Примери за тоа се дадени во темата 4 за двокомпонентните, 5 - трикомпонентните системи и во 6- за структурните промени и претворби кај тврдите метали.

## 2.4. ТЕХНОЛОГИИ ЗА ДОБИВАЊЕ НА ЛЕГУРИ

Според постапката на металуршкото добивање, легурите се произведуваат како:

- леани легури
- синтерувани легури
- електрохемиски.

Леаните легури се добиваат на два начини:

- со постапки на екстрактивната металургија,
- со претопување (во лерниците).

### 2.4.3. ДОБИВАЊЕ ЛЕГУРИ СО ЛЕЕЊЕ

#### а) непосредно добивање легури во екстрактивна металургија

Најголем дел од легурите се добиваат директно при екстракција на металите од соодветните руди и во постапките на рафинација на суровите метали.

**Добивање челик.** Пример за добивање легури по постапките на екстрактивната металургија е производството на челик. Челикот се добива со рафинација на суровото железо добиено во високите или електроредуктивни печки. Рафинацијата се врши во конвертори и додавање во рафинираниот течен челик потребните легирни елементи во казаните за транспорт и леење. Во современите металуршки постапки, рафинираниот челик се доработува по казанска металуршка постапка, каде што во посебна постројка, во металот во казанот се удудуваат легирните елементи во прашкаста форма со заедничко удудување на инертни гасови. На тој начин се добива многу рамномерно распоредување на легирните елементи во металниот растоп, а се врши истовремено очистување на челикот од штетните компоненти. Челикот се добива и во електролачните печки, каде наместо руди и редуктивни процеси, се користи отпадно и рециклирачко железо и челик што се претопува, а добиениот суров челик натаму се доработува и легира по казанската технологија.

Добиените течни челични легури се леат во посебни форми во правоаголни форми со двадратен или правоаголна плосната форма, познати како инготи и слабови<sup>11</sup>. Во современите технологии на производство на челик, за леење се користи континуирана машина, со која се зголемува искористување на металот во натамошната преработка. Овие одлеани форми, натаму се преработуваат и обликуваат со топла деформација, валање и ковање, во одредени форми како полуфабрикати, што се доработуваат во секундарната металургија - со ладна деформација или во машиноградбата како конструкцiji материја.

Во постројките на современите челичарници, практично е можно легирање со били кој легирен метал и добивање на голем број челични легури, како што се конструкциските ниско, средно и високо јаглородни челици или легирани микро, ниско, средно и високо челици, со најразлични особини и намена.

Треба да се нагласи и тоа дека, при производството на легурите, се користат голем број претходно добиени легури по екстрактивни металуршки постапки или со постапка на претопување на цврсти метали - примарни феролегури, кои исклучиво се користат како сировини за легирање, а не се користат како конструкциски материјал. Феролегурите или предлегурите за обоените метали се сировини за техничките легури. Тие имаат форма на парчиња или прашоци, што се додаваат во растопениот метал, што се легира и при ладење градат микроструктури, како беше опишано претходно. Во предлегурите, покрај основниот легиран елемент, во голема

<sup>11</sup> Поради важноста на структурата на одлеаните легури во блокови во преработката и обликување на металите, таа е дадена во посебна под тема 3.3.

количина се содржи и основниот метал што се легира. На пример за легирање на челикот, се користат предлегурите (феролегури) кои содржат железо. Феролегури има на никел, силициум, манган, ванадиум, ниобиум, кобалт, калциум и други метали. Во обоената металургија, најчесто како прелегури се користат предлегурите на алуминиум со бакар, манган, силициум, железо, магнезиум и други.

### **б) Добивање легури со претопување**

Постапката на леани легури со леење, во основа ги користи основите на леарството. За претопување суровите метали за производство соодветна легура суровините се топат во индукциони, електроотпорни и казански пламени печки. Сите печки се обложени во просторот на топење со соодветни огноотпорни материјали, како шамот, силика или доломит во вид на плочки, или во вид на огноотпорни пасти. Во осиданиот простор на печката се ставаат металите во определена количина што соодветствува на составот на легурата што се произведува. При тоа се земаат во предвид емпириските сознанија за согорувањето и оксидација на дел од елементите. Оксидите што се образуваат во топењето на површината на растопот образуваат треска. Доколку е потребно, во процесот на топење, се врши и дезоксидација, зависно од видот на металот.

По растопување на металната шаржа, легурата се излива во калапи и форми во готови производи. Леењето може да биде во калапи од песок или во метални форми, во машини за леење. Начинот на леење е зависен од видот на легурата. Нискотемпературно топиви легури, како што се тие на алуминиум и цинк, се леат во специјални машини за леање под притисок. На тој начин се постига големосериско производство и голема продуктивност. Крупните делови од легура или мали серии, особено од легури на основа бакар, се леат во песочни калапи. Во излеаните калапи растопената легура полека се лади и ја формира скоро рамнотежната фазна состојба. При леење во метални калапи, при ладењето на еднаква легура, се постига нерамнотежна микроструктура.

Постапката за добивање на растопена легура може да биде првин со растопување на основниот метал, а потоа, во растопениот метал да се додаваат цврсти парчиња од легирните елементи или леарска предлегура со бараниот легирен елемент, во која има поголема концентрација на легирен елемент од тој што треба да има конечната легура.

**Важна напомена при растопување на металите и формирањето легури.** Во печката секогаш првин се растопуваат металите со најниска точка на топење и најлесните, а потоа во нив се додаваат и се растопуваат другите легирни елементи. Доколку легирниот метал лесно оксидира, подобро е да се користи негова предлегура.

Од добиените шаржи се земаат секогаш примероци за контрола на хемискиот состав и испитување на бараните особини на легурата, во соодветните лаборатории.

### **2.4.4. ДОБИВАЊЕ НА ЛЕГУРИ СО СИНТЕРУВАЊЕ**

Во основа на оваа технологија за добивање легури се процесите на дифузија. При контакт на цврсти честици од прашоци на различни метали, едниот метал дифундира во другиот и формираат:

- а) цврсти раствори - синтерување со растворање во цврста состојба
- б) интерметални фази - реакционо синтерување.

Синтеруваните легури имаат истите особини како леаните, со таа разлика што кај нив може да се контролира порозитетот. Порозноста се бара кај лизгачките лежишта.

Синтеруваните легури се добиваат од метални и други прашоци по методите на прашкастата металургија. Прашоците се мешаат во определени односи за добивање легури со одреден хемиски состав, се формираат делови со пресување во калапи, потоа тие се жарат во заштитна атмосфера на потребната температура и време. Се добиваат цврсти монолитни метални делови. Фазната структура на легура соодветствува на дијаграмот на состојба за дадениот состав. По оваа постапка истовремено се дава формата на предметот и се добива структурата на легурата. Предноста на оваа метода е што е поефтина за голем број производи, особено од специјални и повеќекомпонентни легури. По оваа постапка се добиваат легури од цврсти раствори и интерметални соединенија (реакциско синтерување).

По метод на синтерување се произведуваат, особено производи од легури на бакар, како што се бронза и месинг, за употреба за лизгачки лежишта во електромоторите. Со овој метод може да се произведуваат делови со контролирана порозност, која е потребна во лежиштата за задржување средството за подмачкување, а исто така и порозни делови за вдувување на гасови.

#### **2.4.5. ДОБИВАЊЕ ЛЕГУРИ СО ЕЛЕКТРОХЕМИСКИ МЕТОДИ**

При електролитичкото анодно прекривање на оделни метални предмети, на површината на еден метален предмет, може да се нанесуваат тенки слоеви од метали и легури. Во електролитот се ставаат растворливи соли во определена концентрација и при таложење на металите од растворот на анодата, со вклучување на определен електричен напон, се формираат кристали од легури.

Покрај електрохемијата, за нанесување прекривки на готови производи, што треба да имаат поголема површинска тврдина, се користат и методи со таложење од гасна плазма на легури со имплантација (навлегување на елементи од плазмата во основниот метал) со помош на јонски снопови и други методи.

### **2.5. ИНДУСТРИСКИ ЛЕГУРИ**

Металите, меѓу другите поделби, се делат на:

- црни или железни метали, што имаат метална сива боја и се однесуваат пред се на железото и челикот, како и на легурите што се на основа железо (феролегури)
- обоени метали, во кои спаѓаат бакар, олово, цинк, кадмиум;
- лесни метали, во кој спаѓаат алуминиум, титан, магнезиум и други;
- благородни метали, во кој спаѓаат злато, сребро, платина, иридиум и други што се хемиски инертни.

Соодветна поделба постои и кај индустриските легури. Меѓутоа, најчесто се користи поделбата според основниот метал или според особините и примената. На пример, според основниот метал познати се легури на бакар, алуминиум, железо, цинк и т.н., или според намената електротехнички, корозионо отпорни, нерѓечки, благородни.

Легурите што се користат во индустријата се многубројни. Овде ќе биде даден табеларен преглед на најупотребуваните легури, главните состојки во нив, особините и употребата. Легурите најчесто имаат посебни имиња, дадени во



нивниот историски развој, од производителите, или трговците. Легурите во современата трговија се стандардизирани во интернационални и стандарди на оделни земји. Во Република Македонија се користат имињата од македонските стандарди (МКС стандарди), но и според интернационалните и европските стандардите.

Табела 2.1 Преглед на поважните легури

Име	Главни состојци	Особини	Употреба
Алнико	Алуминиум, никел, кобалт, железо	висок магнетизам	Трајни магнети
Алпака	бакар, цинк, никел	сребрена боја	накит, предмети за дома
Бабит (Babbitt)	калај, бакар, антимон	тврд и цврст	клизни лежишта
Бронза	бакар, калај	отпорни на корозија и абење	клипови, клизни лежишта
Дуралуминиум	алуминиум, бакар	цврст и лесен	велосипеди, воздушни летилки
Замак	цинк, алуминиум, железо	лесен за леење, поцврст од цинк	леани делови
Инвар	железо, нијкел	мало ширење при загревање	мерни инструменти
Константан	бакар, никел	постојан електричен отпор	Отпорници, електрични греачи
Купроникел	бакар, никел	постојаност и трасност	кованици
Легура за свона	бакар, олово, сребро	свона	свона
Лем	калај, олово	ниска точка на топење	лемење
Магналиј	алуминиум, магнезиум	цврст и лесен	летилки
Мишметал	цериум, железо, лантан	врла искри	за запалки
Бакарноцинкови	бакар, цинк	лесно се обликува	музички инструменти, завртки и леани делови
Монал	никел, бакар	отпорен на корозија	хемиски прибор
Нерѓачки челик	железо, никел, хром	отпорен на корозија	прибор за во кујна, хемиска индустрија и хирургија
Нихром	никел, хром	огнотпорен	за печки во метаслургија и греачи
Пермалој	никел, железо	висок магнетизам	електрични машини
Тврд калај	калај, олово	мек	прибор за кујна
Тврдо сребро	сребро, бакар	потврд од чисто сребро	накит, прибор за кујна
Топовска бронза	бакар, калај, цинк	жилав и отпорен на корозија	клизачки лежишта, запчаници
Вудова легура	бизмут, олово, калај, кадмиум	се топи на 70°C	аларми за пожари

Најчесто употребувани во индустијата и праксата се следните легури: челик, нерѓачки челик, железен лив, бронза, месинг, бакарно-никлови, дуралуминиум, германско сребро, замак, монел, инвар, амалгам,

### Легури на бакар

Легурите на бакар имаат различна намена: за леење, гмечење, предлегури или за спојување.

**Месинг** е најчеста легура на бакарот во која главен легирен елемент е цинкот. Има состав кој варира бакар (65-90%), цинк (10-35%). Се изработува како обичен или специјален месинг. Обичниот месинг има основен легирен елемент цинк, што ги менува влијателно особините на бакарот, а содржи и мали количини и други елементи, чие влијание е помало. Другите легирни елементи се најчесто Si, Al, Mn, Ni и др., што му даваат на месингот посебна тврдина, или цврстина, корозиона постојаност, ливкост и др. Основа на оваа легура е фазниот дијаграм Cu-Zn. Се применува за изработка на лимови, цевки, жици, конструкциски делови, бижутерија, арматури, окови за мебел и делови за електроиндустријата.

**Бронза** е бакарна легура во која цинкот не е основен легирен елемент. Составот на бронзата е бакар (78-95%), калај (5-22%), плус манган, фосфор, алуминиум или силициум. Затоа бронзите носат име според главниот легирен елемент, како алуминиумска, калајна, оловна, манганска, берилиумска бронза и други. Голема примена наоѓа калајната бронза, Таа има голем отпор на корозија и добри особини при лизгање, па се користи таму каде има дејство на хемикалии, а истовремено има триење со лизгање на деловите. Тоа се клизните лежишта, полжави за транспорт, навртки, вретена, арматури за водовод и друго.

**Црвен метал** е легура на бакар слична со калајната бронза, само што дел на калајот се заменува со цинк. И таа е наменета за лежишта.

**Алуминиумска бронза** е бакарна алуминиумска легура, со добри механички особини и добар отпор на корозија. Наоѓа примена во изработка на шипки, цевки, лимови, вратила, запчаници, лежишта и други делови.

### Легури на никел

Најчести легури на никелот се монел металот, мелхиорот, ново сребро, хромел, константан. Монел метал има состав Cu (75%), Ni (25%), плус мали количини на манган. Нихром има состав Ni (80%), Cr (20%). Отпорен е на високи температури.

### Легури на алуминиум

Алуминиумските легури се двојни, тројни и сложени. Најчести легирни елементи се Si, Mn, Mg и Cu.

Алуминиумските легури се делат на легури:

- наменети за деформација
- наменети за леење

### Алуминиумски легури со намена за деформација

Легурите на алуминиум со Mn и Mg се наменети за:

- (а) деформација, без термичка обработка;
- (б) за деформација и термичка обработка;
- (в) за легури наменети за работа на повишени температури;
- (г) легури за високи напрегања.

(а) **Легури наменети за деформација.** Во оваа група спаѓаат легури легирани со различна содржина на Mg (1, 2, 4, 5, 6%) и Si(1-2%). Може да се деформираат со валање и пресување, при што добиваат зајакнување од механичката деформација. Се користат за лимови од кои се изработуваат конструктивни елементи.

(б) **Легурите со Cu, Mg, Si и Zn се наменети за деформација и термичка обработка.** При термичката обработка се добиваат подобри механички и физички

особини, како резултат на дисперзионото зајакнување од интерметалните соединенија на легирните елементи со Al.

**Дуралуминиумот** (Al-94%), Cu 4.5-5%, Mg (0.5-1.5%), Mn (0.5-1.5%) е легура што е деформабилна на температури над 350°C. По деформацијата и ладење, ако брзо се излади, материјалот е мек и од него се изработуваат делови, а по термичка обработка ја зголемуваат јачината. Зајакнувањето доаѓа од дисперзионо делување на интерметалните соединенија што ги гради алуминиумот со легирните елементи Cu и Mg. Се употребува за силно напрегнати конструкции, заковки за спојување и друго.

**Авиал** е легура на алуминиум со Mg и Si и Al-Mg-Si-Cu Al, што се употребува за напрегнати конструкции, заковки за спојување и за декоративни елементи во градежништво.

(в) Легурите Al-Cu-Mg-Ni-Fe-Si се наменети за делови што работат на повишени температури (200-350°C) за делови во моторите.

(г) легури со висока цврстина се легирани со Zn-Mg-Cu и имаат намена за многу поголеми напрегања. Посебна намена им е за носачи во конструкции во градежништвото, како и за конструкциски делови на авионите.

### **Алуминиумски легури за леење**

Најчеста легура за леење е силумин (Al-Si). Има повеќе вида од оваа легура. Таа е висока-цврста легура, со 12%Si, со мала густина, па е погодна за делови со мала тежина, а голема цврстина. Има голем отпор на корозија. Таа лесно ги пополнува калапите. Може да се лее во песок и во кокили. Од неа се леат многу делови во моторите автомобилите и бандажи за гумите на автомобилите.

### **Легури на олово**

Најчеста легура на оловото е акумулаторската легура со антимон (Sb), што се користи за изработка на акумулаторски батерии. Содржината на Sb варира од 1-12%. Во поново време легурата има тенденција на смалување на антимонот, со што се подобруваат електрохемиските особини на легурата, така што во современите акумулаторски батерии има 2-3%, наместо 10-12% во оние пред 30 години. Особина на оваа легура е што се лесно лее, а после загревање на ниски температури, се зголемува цврстината на легурата и смалува деформабилноста, со подобрување на електрохемиските особини на оловото.



### ПРАШАЊА ЗА САМОКОНТРОЛА НА НАУЧЕНОТО

- 1) Дефинирајте што се разбира под терминот легура?
- 2) Како се делат легурите и на која основа?
- 3) Каква кристална структура може да имаат еднофазните легури?
- 4) Како се образува легура со супституција (замена) на основниот метал (илустрирај го тоа)?
- 5) Какви празнини образуваат кристалите на чистите метали и зашто служат при образување легури?
- 6) Кои легирни елементи предизвикуваат поголемо зајакнување - супституциските или интерстициските и објасни зашто?
- 7) По кои основни постапки се произведуваат легурите?
- 8) Колку легури на основа бакар или алуминиум можете да наброите, кои се основни легирни елементи и најосновни особини и намена на наведените легури?

## КРИСТАЛИЗАЦИЈА

Преглед на содржини	Цел на учењето
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вовед во кристализацијата;</li> <li>• Процесот на кристализација од растоп и формите на чистите метали и легурите;</li> <li>• формата на кристали при леење во блокови</li> <li>• Формата на кристалите во евтектичката кристализација;</li> <li>• Алотропија и полиморфина;</li> <li>• Ликвација при кристализација;</li> <li>• Лункери при кристализација.</li> </ul>	<p>Целта на изучување материјалот пртставен во оваа тема е да го подготви ученикот да може да одговори на педагошките барања на наставната програма, т.е. да може:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Да го објаснува процесот на кристализација;</li> <li>- да ги прикажува формите на кристалите;</li> <li>- да ги објаснува поимите алотропија и монотропија.</li> </ul> <p>Процесот на кристализација е многу сложен и врз формата на кристалите влијаат многу фактори, технолошки (опрема) и физичко-металуршки. Во оваа тема се обработени основните форми на кристалите, што се образуваат при ладење на растоп, додека процесите на кристализација од пара и со електрохемиски методи, не се дадени, а во основа ги образуваат истите форми на кристали - дендритни и полигонални. Поради ограничениот фонд на часови, не се разгледува детално теоретските причини за создавањето на одделните форми на кристали, туку се земени искази што се теоретски факти. Структурата на течната фаза игра големо влијание на процесот на кристализација, но тука се дадени бегло елементарни сознанија. Посебно внимание е дадено, што се чини во сите учебници по физичка металургија, на процесите што се случуваат во реалните индустриски процеси на кристализација, во кои се создава не само структурата на одлеанокот, туку у неговите особини во натамошната преработка. Тука се дадени само кои форми на кристали се добиваат при леење на легурите во калапи, што многу масовно и често се користат во индустријата, а каде металуршките техничари се најистурени стручни лица, кои треба да имаат задоволителни знаења од структурата на одлеаноците, а технологиите и процесите на формирање на телата се изучуваат во другите предмети од наставниот план. Овде е дадено мало внимание и на кристализацијата на евтектичките легури и системи, како проблемите што се јавуваат во кристализацијата, а имаат природен карактер, како ликвација (сегрегација) на нечистотиите и легирните елементи и лункерите (празнините) поради промените на волуменот на течната и цврстата состојба на металите.</p> <p>Во најкратки црти е даден поимот на ањлотропија и полиморфија, што е дел од наставниот програм.</p>

### 3. КРИСТАЛИЗАЦИЈА

Металите и легурите во индустриската практика, како конструктивен материјал за разни машини и апарати, се користат во цврста или во кристализирана состојба. При секое ладење на метален гас или ладење на метален растоп под точката на стврднување се добиваат кристали на соодветниот метал. При многу брзо ладење и посебни технолошки постапки може да се добијат аморфни метали. Аморфните метали имаат многу карактеристични особини.

При нормалното индустриско леене секогаш се добиваат поликристално стврднати метали - цврсти метали и легури. Во посебни услови и технолошки постапки можно е целиот метал да искристализира во единствен метален кристал - монокристал.

Метал во цврста состојба се добива со кристализација од растопи и од гасови при ладење.

Гасните метали се добиваат во некои металургиски постапки за екстракција на метали од рудите. Најчесто во екстрактивната металургија се добиваат течни метали, кои се леат во определена форма и се испорачуваат за натамошна металургиска преработка во вид на тврди тела, составени од многубројни кристали.

Кај чистите метали се кристализира само еден вид кристали, кои може да имаат различни форми (погледни ја сликата 2.6а), а кај легурите се јавуваат еден вид кристали за легури од цврстите раствори, од интерметалните соединенија или од интерметалните фази или повеќе вида кристали кај повеќефазните системи (види слика 2.6 б). Видот и бројот на кристалните форми зависи од видот на системот на рамнотежна состојба, што ќе бидат разгледани во темата 4 и 5.

### **3.1. ПРОЦЕС НА КРИСТАЛИЗАЦИЈА НА РАСТОП И ФОРМИ НА КРИСТАЛИ**

Честопати, леенето во калапи и давањето определена форма на металот е завршен технолошки процес во преработката на металите. Тоа се прави во леарниците за машински и за делови за градежништвото.

Металите се добиваат во кристална форма, најчесто од растопена состојба. Навлегување подлабоко во објаснувањето на особините на растопите во овој предмет е непотребно и би било преоптоварување со детали за ученикот.

Овде ќе биде само нафрлено дека растопите во близина на точката на стврднување се многу блиски на тврдите метали, чија градба е дадена во тема 2. Разликата од тврдата и течната состојба е само во поголемо учество на меѓујазлените простори околу атомите, во некои делови на течноста. Течноста се состои од многу ситни групации на кристалчиња со зголемено растојание меѓу атомите, поради високата температура. Таквите кристалчиња се нарекуваат кластери (групи), со симетрија слична на цврстите кристали, а меѓу нив се јавуваат области со поголеми растојанија меѓу атомите и со многу ослабена врска. Затоа, под дејство на сопствената тежина од погорните атоми, растопите лесно се деформираат со течење на одделни слоеви над други. За градбата на металните растопи постојат повеќе теории што ги толкуваат особините на растопите, особено особината на течливост.

Течливоста е една од поважните карактеристики на растопите во практичните процеси на кристализација. Обрато пропорционално на течливоста е вискозитетот на течностите.

Вискозитет е особина на течностите кога под дејство на сопствената тежина или на други надворешни напрегања ќе се појави многу лесна пластична

деформација, со лизгање на кластерите едни над други. Триењето на кластерите всушност го дава отпорот на течење - вискозитетот.

Силата неопходна за раздвижување на кластерите ( $F$ ) по единица површина ( $S$ ) е пропорционална на брзината на течноста по законот на Њутн:

$$F = \eta S (dw/dx)$$

каде што се:

$\eta$ —коэффициент на динамичкиот вискозитет, изразен во паскали во секунда (Pa/sec)

$w$ - брзина на течење (m/sec).

Реципрочна вредност на вискозитет е течливоста  $\phi=1/\eta$

Коефициентот на вискозитет е зависен од температурата на растопот по равенката:

$$\eta = A \exp(E\eta/RT)$$

каде што се:  $A$  - константа;  $E\eta$  - енергија на вискозното течење

Металните растопи не се однесуваат идеално. Реалната активност на која било растворена компонента во растопот се определува преку коефициентот за активност<sup>12</sup>.

Леенењето на металите е многу важна технолошка постапка во металургиската индустрија.

При кристализацијата кластерите од растопот се приближуваат еден до друг и ги губат големите меѓупростори, поради намалената топлотната енергија на атомите во растопот при ладење.

За да може да се образуваат кристални нуклеуси (во македонската литература се користи и терминот зародиши), течната состојба мора да се подлади. Тоа произлегува од термодинамичките закони за минимална енергија во термодинамички систем. За одвивање на кристализацијата до целосно исчезнување на растопот движечка сила е намалувањето на енергијата преку намалување на температурата - ладењето. Со намалување на температурата системот добива пониска слободна енергија и станува постабилен.

При ладење на растопениот метал, ако се постигне температура каде што кристалната фаза е стабилна, се формираат нуклеуси на цврстата фаза. Нуклеусите може да се образуваат хомогено (без додадена помош) или хетерогено (со помош на веќе готови површини, врз што ќе се надградуваат металните кластери или металните јони). Тие може да исчезнат од растопот или повторно да се растопат, тогаш тие се ембриони - нестабилни нуклеуси со поткритичен радиус. По некоја големина на нуклеусот, која се нарекува критична<sup>13</sup>, тој понатаму самостојно расте. Критичниот радиус е зависен од површинската енергија на нуклеусот и од големината на неговата слободна енергија.

---

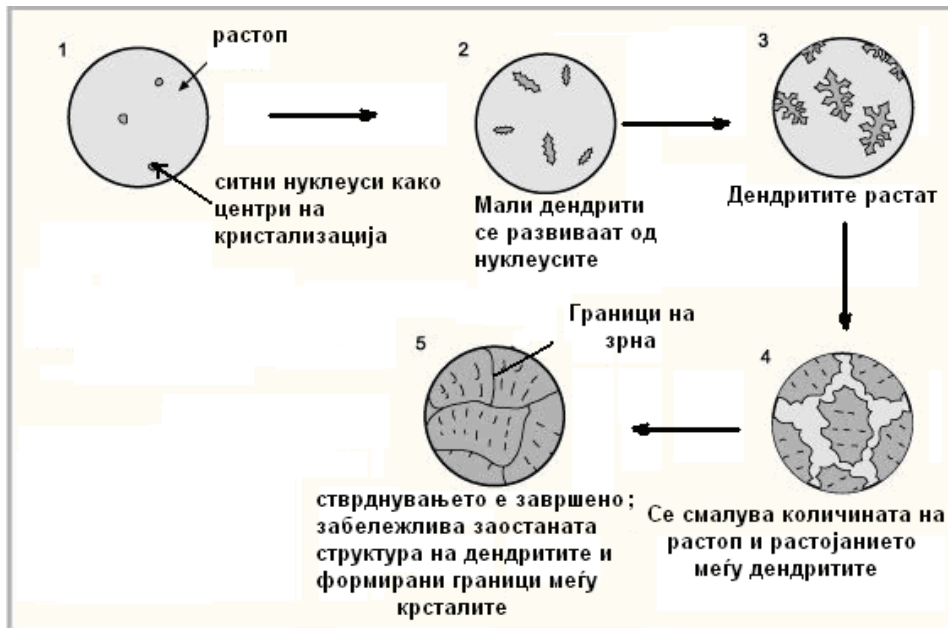
<sup>12</sup>Активноста на растоп е мерило за ефективната концентрација на растворените елементи и е бездимензионален. Се определува од парцијалниот хемиски потенцијал.

<sup>13</sup> Критичниот радиус се определува по формулата  $r_k = \frac{2\gamma}{\Delta G_k}$ , каде е  $\gamma$  површинска енергија, а

$\Delta G_k$  е промената на слободната енергија меѓу растоп и цврста состојба.

Во натамошниот процес на одведување на топлината од растопот, по образување на нуклеусите, кои најчесто имаат форма на топчиња или на други заоблени топчести форми, со најмала површина во однос на масата во него, започнува растот на нуклеусите во кристални форми. Таа фаза на кристализацијата се нарекува фаза на раст на кристалите.

Прегледен начин на претвorbата при константна температура на кристализација е дадена на сликата 3.1. Кристализацијата на течниот растоп во цврст метал се одвива при константна температура и трае зависно од брзината на одводот на температурата - брзината на ладење, додека не се кристализира целата количина на присутниот растоп.

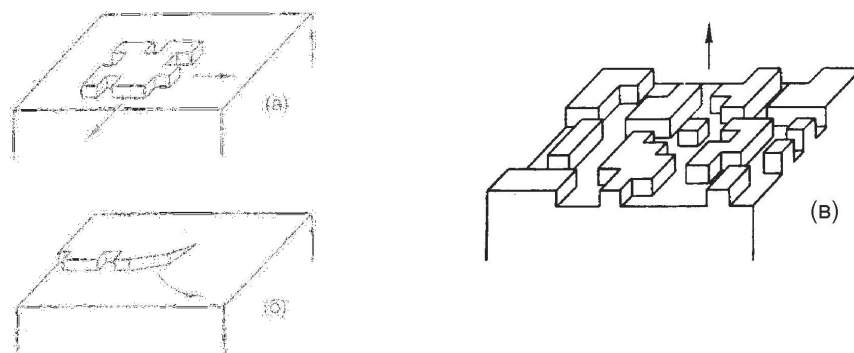


Слика 3.1 Процес на кристализација и растење на кристалите при одведување на топлината од метален растоп.

Во примерот даден на сликата 3.1, е третиран еден вид растење на цврстата фаза во вид на дендрити.

Зависно од начинот на преоѓање на атомите од течната фаза во кристалната фаза и правецот во кој се зголемуваат димензиите на кристалот, растот на кристалите може да биде:

- тангенцијален, по површината се редат нови атоми додека не се исполни целата надворешна површина и
- нормален, кога атомите, пред да ја завршат целосно некоја рамнина, поставуваат атоми и на новата рамнина и растат нормално на центарот на нуклеусот.



Слика 3.2 Скица на тангенцијален (а) и (б) и нормален раст на кристал (в)

По кој механизам ќе се одвива растот на кристалите најмногу зависи од степенот на ладење.

За да се сфати разлика меѓу тангенцијалниот и нормалниот раст на сликата 3.2 се претставени скици на растење на една рамнина од кристалот со надградување на нови атоми или групации (кластери).

Какви форми ќе добијат кристалите зависни од повеќе фактори, а како најважни се:

- видот на елементарната кристална решетка на металот,
- термодинамички рамнотежни фази што се стабилни во системот, во зависност од постигнатата температурата,
- каква е распределбата на топлината на фронтот на растење на кристалот
- дали елементите ја снижуваат точката на топење на металот,
- каде се предава топлината создадена од образуваните кристали (латентната топлина на кристализација, кристализација е егзотермен процес со испуштање енергија), на растопот или образуваниот кристал,
- дали има насоченост на одводот на топлина (насоченост на ладењето) или е еднакво во сите правци. На пример, ако на една страна на казан се прска вода, таму е брзината на ладење поголема и побрз е растот на кристалите,
- каков е хемискиот состав на кристалите,
- каков е коефициентот на распределба на елементите во течната и кристалната фаза,
- дали има анизотропија во кристалот и разлика во густината на пакување на страните на кристалот,
- каков е распоредот на концентрацијата на елементите во растопот ако е легура,
- дали има елементи во составот на металот што го смалуваат површинскиот напон на кристалната површина (дали некои елементи полесно се квасат - нафаќаат на површината на кристалот, а други се концентрираат во растопот,
- други фактори, како влијание на магнетно поле или тресење на системот.

Зависно од наведените фактори се јавува различна макро и микроструктура на одливката, односно формата и другите особини на кристализираниот метал.



Зависно од најголемото влијание на некои од наведените параметри, формата на кристалите во одливката може да биде:

- топчеста или полигонална,
- секторска,
- ќелијна и
- дендритска.

Топчестата форма се јавува најчесто кај чистите или слабо извалканите метали. За нејзиното образување најголемо влијание има промената на ентропијата при топење, концентрациските и температурни услови на границата кристал/растоп, концентрацијата на примесите во непосредната околина околу кристалот, преносот на топлина на кристалот, брзината на ладење и дифузијата низ растопот и непосредниот слој до кристалот што се формира во околина на кристалот.

Секторските кристали имаат форма на многустрани геометриски тела. Тие тела се со густо пакувани рамнини на елементарната густо пакувана коцка, а на страните се јавуваат израсоци како пирамиди, поради погусто пакување на косите рамнини.

Пример на таков вид форма на кристали е претставен на слика 3.3. Меѓутоа, секторската форма на кристалите може да биде стабилна само во почетниот стадиум, а подоцна да образува друга форма, дендритна или полигонална.



Слика 3.3 Секторска форма на кристал во метал

Дендритните кристали имаат форма на гранки на дрво, од рабовите на страните на кристалот растат други кристали во нормални на работ, или на страната. Пример е даден на сликата 3.4.

Дендритните кристали се разликуваат по формата на гранките, кои може да бидат со плоснат и со кружен пресек на гранките.

Основни причини за образување на дендритни кристали се јавуваат при ослободување на топлината на кристализација, при што се лади течноста, или има прераспределба на примесите, кои се концентрираат во растопот, па тој има пониска точка на топење од рамнотежната, т.е. настанало концентрациско подладување. Бидејќи се јавуваат различни топлофизички особини на кристалот, тој расте со различна брзина. Како навлегува кристалот во растопот и се кристализира, пред фронтот врши ново подладување и така расте кристалот таму каде што ќе има концентрациско подладување. Затоа се јавуваат различни правци за раст на гранките.



Слика 3.4 Снимка на сребрени дендрити

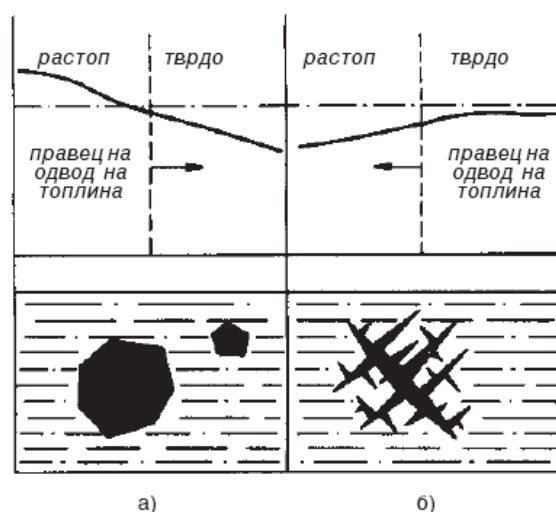
Сосема чисти метали, според термодинамичките закони, не може да се добијат. Поради тоа што во секој метал има мали нечистотии и практично кај чистите метали се јавуваат топчестите форми на кристалите или дендритни. Особено дендритската форма на кристали се јавува кога тие кристализираат со електролиза од раствори и растопи.

При леене на практично чистите метали или интерметални соединенија, во структурата на стврднатите метали може да се јават различни форми на кристалите. Некои кристализираат со топчести кристали, а некои дендритни. Основна причина за да се образува тоа каков вид на кристали е големината на латентната топлина на

кристализација и одводот на топлината; дали е таа со ладење на кристалот или на растопот, како се одведува топлината и со каква брзина. При брз одвод на топлина не се образуваат дендрити, туку ситни топчести кристали, поради големиот број на нуклеуси. Бројот на нуклеуси е зависен од големината на подладувањето и оневозможувањето на загревање на кристалите (голема брзина на одвод на топлина).

При леењето на металите неопходно е да се оствари одвод кон страните на калапот.

Влијанието на распределбата на топлината од кристализација врз формата на кристалите е следно: ако при кристализацијата ослободената топлина ја прима растопот, ќе се формираат кружни полигонални кристали, а ако растопот се лади, топлината оди од кристалот кон растопот, се формираат дендритни кристали. Тоа нагледно е претставено на сликата 3.5, каде што е нанесена промената на температурата на растопот и на кристалот, во двата можни случаи и на формата на кристалите на долниот дел од сликата.



Слика 3.5 Форма на кристалите при кристализација на речиси чисти метали, во зависност од подладувањето на кристалот и растопот.

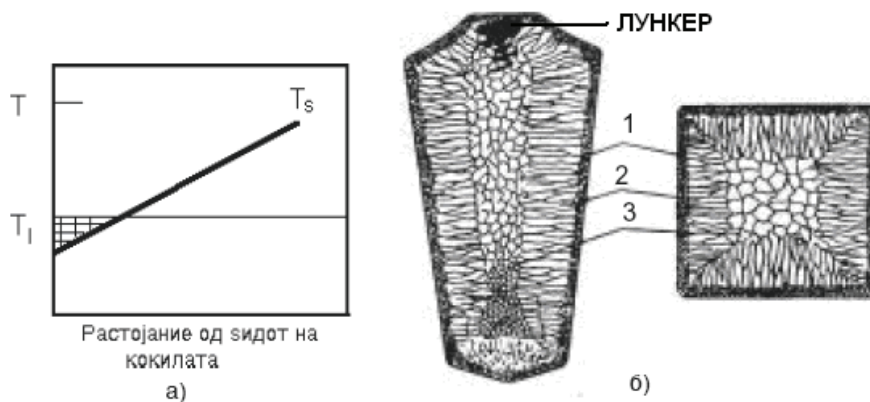
### 3.1.1. ФОРМА НА КРИСТАЛИТЕ ВО ОДЛИВКИ

Рафинираните метали добиени во екстрактивната металургија завршуваат со леење во блокови во метални калапи, наречени инготи и брами. Инготите и брамите се валаат во топлите валалници. Кај леаните блокови се јавува типична структура при нормалното леење. Поради големата брзина на ладење на контактот на растопот со металната кокила<sup>14</sup> и ладење на растопот, се јавуваат голем број ситни критични радиуси, што растат кратко време и се допираат во полигонални зрна. Затоа структурата на блокот на надворешниот слој се полигонални зрна и топчести ситни кристали.

<sup>14</sup> Кокила е метален калап во кој се леат суровите метали или челик. Тие се отворени до горна и долна страна. Се поставуваат со пошироката страна на челична плоча, а се леат до горе со сипање од казан со суров метал. По стврднувањето се подига металниот калап и останува само леаниот блок. Блоките имаат форма на инготи (правоаголни по пресек) и брами (квадар по пресек)

Натаму при кристализацијата на блокот, поради намален одвод на топлина низ кокилата и нејзино загревање, се менува профилот на кривите на загреаност на растопот и кристалите, ако се гледа кон центарот на кокилата. По образување релативно тенок цврст слој од ситни кристали, почнува дендритен раст на кристалите во правец на одводот на топлината, т.е. столбесто нормално кристали, поставени нормално на сидот на кокилата. Поради големиот образуван топол слој од цврст метал, премиот на топлина од растопот кон околината се намалува уште повеќе, па се создаваат услови на образување хомогени нуклеуси во централниот растоп. Тоа е особено олеснето, зашто во преостанатиот растоп се насобрани и сите нечистотии на металот, што доведува до намалување на точката на топење на извалканата легура и улови за образување кристални нуклеуси. Нуклеусите растат во полигонални кристали, кои завршуваат со полигонални зрна.

Поради смалување на волуменот на стврднатиот метал, во однос на волуменот на растопот, горниот средишен дел на блокот останува непотполнет и се јавува празнина во одливката. Таа празнина во металургијата се нарекува лункер. На сликата 3.6 е претставена скица на добиената структура на одлеан блок, со пресек по должина и попречно во средина. Истовремено е даден и соодветниот дијаграм на промената на температурата од растојанието од сидот на кокилата кон средината.



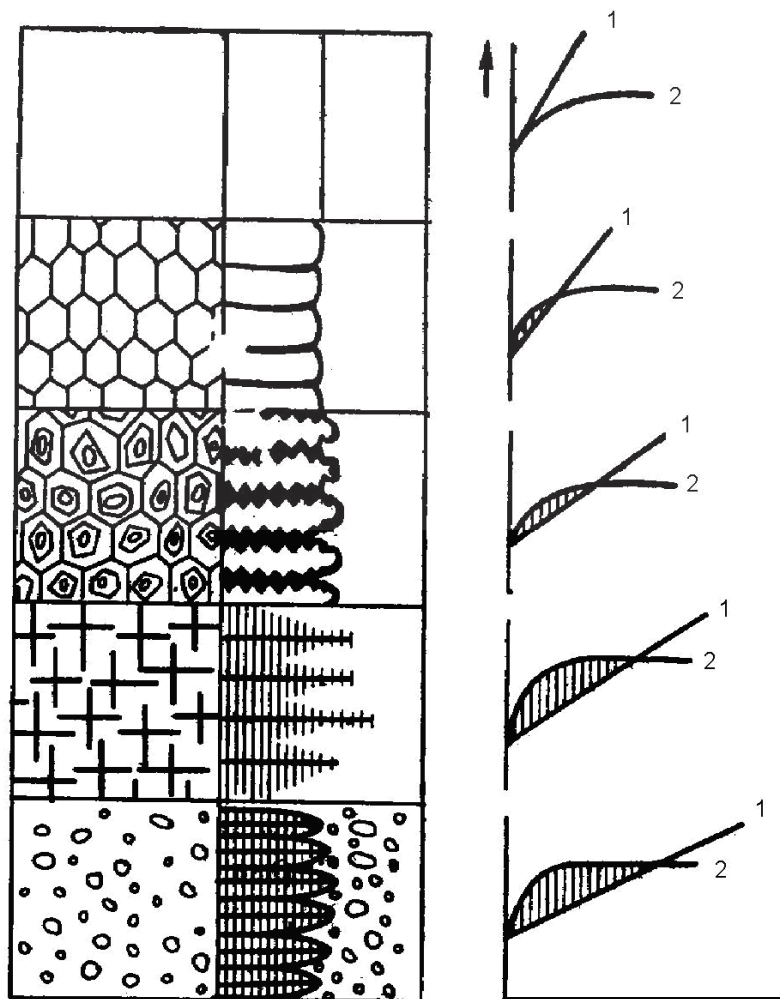
Слика 3.6 Температурен профил на леан метален блок (лево) и макроструктурата на блокот по надолжен (средна слика) и попречен пресек (слика десно).

При континуирано леење, во специјалните машини за леење на метали се добиваат слабови без лункер. Такви машини се користат и во индустријата во Македонија. Структурата на слабовите зависи од начинот на ладење на страните на слабовите, т.е. од постигнатата температура на растопот и кристализираниот метал. Зависно од тоа каде по ширината на слабот, каква е загреаноста на растопот и кристализираниот дел, се добиваат различни структури по пресекот на слабот. На сликата 3.7 е дадена принципиелна шема на кристализација во слабот, според термофизичкиот модел на ладење. Слабовите се ладат со прскање на вода, после образување цврста корка во бакарен кристализатор ладен со вода, а натаму се ладат со вдување воздух или со спреј од воздух и вода.

Во структурата на слабот, поаѓајќи од потесните страни кон центарот и зависно од начинот на ладење, се јавуваат следните форми на кристалите: полиедарски, ќелијни, дендритни (или столбести) и полиедарски во централниот дел на слабот, што нагледно може да се види од сликата 3.7. За различен термофизички модел, каква е загреаноста на металот и растопот, претставени со дијаграмите за

температурата на растоп и стврднатиот метал, се добиваат различни структури на металниот леан блок.

Формата на кристали по пресекот на одливката ги диктира особените на одливката - механичките и физичките. Механичките особини се зголемуваат ако се добие со еден вид кристали, особено ако се полигонални и ако се помали по димензии. Столбестите кристали, а особено дендритите, создаваат сегрегација (собирање на примесните непожелни елементи во одредени области). За менување на видот на кристалната структура и формата на кристалите во одливките постојат многубројни технолошки постапки, чие набројување би било непотребно оптоварување на учебникот, а тие се карактеристични за секој одделен технолошки процес (каква опрема и постапка се користи). Таквите сознанија идните металургиски техничари ќе ги добиваат во текот на практичната работа.



1 - Температура на кристали  
2 - Температура на растоп

Растојание од фронтот  
на кристализација

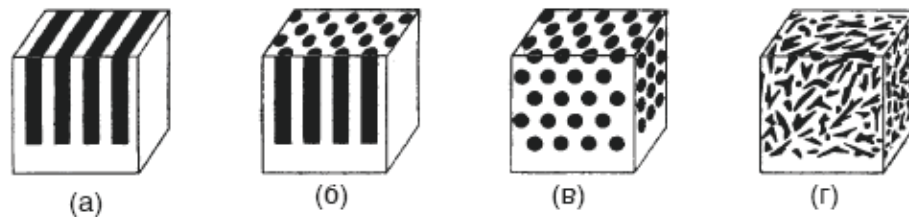
Слика 3.7 Промената на формите на кристалите од надворешниот дел кон средината при леење на метален блок, во зависност од одводот на топлината, т.е. повисока загреаност на растопот или кристализираниот дел.



### 3.1.2. ЕВТЕКТИЧКА КРИСТАЛИЗАЦИЈА И ФОРМА НА КРИСТАЛИТЕ

Видот на кристалите кај евтектичките легури зависи од типот на рамнотежниот дијаграм на состојбата (двокомпонентен или трикомпонентен дијаграм - што ќе бидат разгледани во тема 4 и 5).

Карактеристични структури на кристалите по евтектичката кристализација може да бидат: ламеларни (плочести), стапчести, топчести и иглести. Нивната форма преку цртежи нагледно го имаат следниот изглед:

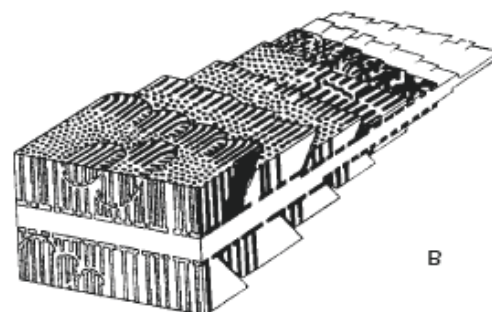


Микроморфолошка класификација на евтектикумите:  
а)- ламеларна; б)- стапчеста; в)- глобуларна; г)- игличеста

Особено интересни и важни во практиката се структурите што се јавуваат кај некои евтектички легури, како што се одливките од сив лив (евтектички легури на основа железо) и силумин (алуминиум со 12-13% силициум). Поради карактеристиките на рамнотежниот дијаграм и едновремена кристализација на две или повеќе фази, што ја сочинуваат структурата на евтектичките легури, се добиваат карактеристични кристални структури. Евтектикумот е најниската точка на температура до која постои растоп од легура, а под таа температура се образуваат ќе видови кристали. Металографската структура на евтектикумот е составена од кристали (зрна) од повеќе фази, кои меѓусебно се држат со меѓуфазни гранични сили.



Слика 3.9 Металографска снимка на микроструктурата на евтектичка легура на Cd+Sn, кристализирана со брзо ладење. Видливи евтектички колонии, а темното поле - примерни зрна на Cd



Слика 3.10 Металографска снимка на микроструктура на ледебурут, со плочести и стапчести колонии (а) и шема на градба на евтектикумот во висина на телото. (в)

Во една легура паралелно може да се јават некои од овие структури, а кај некои само една. На пример, кај силумиинот се јавуваат само иглестите кристали на Si, при бавно ладење, кои се вметнати во масата од зрна на Al. Ако се лади легурата побрзо, се добиваат поситни полигонални зрна на Si. На сликата 3.9 е дадена микроструктурата на евтектичка легура од кадмиум и цинк, а на сликата 3.10 е претставена најчестата практична структура на евтектикум, кај системот железо-јаглерод, наречена ледебурит. Ледебуритот се јавува кај многубројни структури на сивиот лив.

## 3.2. АЛОТРОПИЈА И ПОЛИМОРФИЈА

Металите во елементарна (чиста) форма или како легури имаат особина да се јавуваат во различни елементарни кристални решетки, зависно од температурата на која се наоѓаат.

Кога металот нема промени во кристалната елементарна решетка во целиот температурен интервал при загревање до топење, за него се вели дека е **монотропен**.

Особината на чистите метали да ја менуваат кристалната структура на елементарната решетка на определена температура при загревање или ладење се нарекува **алотропија** или **полиморфизам**, а самата претворба на решетката - **алотропска претворба**. Металите што имаат повеќе модификации на решетката и на соодветно образуваните кристали се нарекуваат алотропни метали.

Определена алотропска кристална структура може да постои само во определен температурен интервал. Ако се промени температурата надвор од определениот интервал, ќе се промени и видот на кристалната структура. Во еден метал може да се јават повеќе алотропски структури (елементарни решетки). На пример, железото има три елементарни решетки, зависно во кој температурен интервал е загреано. Од собна температура до 910°C има волуменски центрирана кубна решетка ( $\alpha$ -Fe), над 910°C до 1400°C има површински центрирана кубна решетка ( $\gamma$ -Fe), а над 1400 до 1536°C има волуменски центрирана кубна решетка со друга големина на параметарот на решетката, од ниско температурната ( $\delta$ -Fe).

Металите што имаат алотропија во чиста состојба, имаат алотропија и во нивните легури. Температурата на алотропската претворба се менува во зависност од хемискиот состав на легурата. Ваквите метали градат цврсти раствори со додадениот легирен елемент, со ограничена растворливост или потполна растворливост. Тоа што беше објаснето за цврстите раствори се применува и овде, затоа нема да се повторува.

Феноменот на алотропија и полиморфија е предизвикан од температурната зависност на зафаќањето на зоните каде што може да се наоѓаат електроните во определена кристална решетка. Промена на кристалната решетка настанува и ако легирниот елемент што навлегува во цврстиот раствор на легурата има поголем број на електрони од тие што може да ги прими решетката. По надминување на максималната растворливост на електрони во определена елементарна решетка, другите атоми ќе се раствораат на тој начин што ќе се образува нова решетка или ќе се зголеми параметарот на решетката (зоните се зависни од параметарот на решетката). Новата решетка продолжува да прима атоми и електрони. Затоа, при еднаква температура, а различен однос на елементите во легура (промена на составот), може да се промени структурата. Тоа ќе стане појасно откако ќе се разгледа рамнотежата во двокомпонентни или тернерни системи во зависност од температурата и составот.

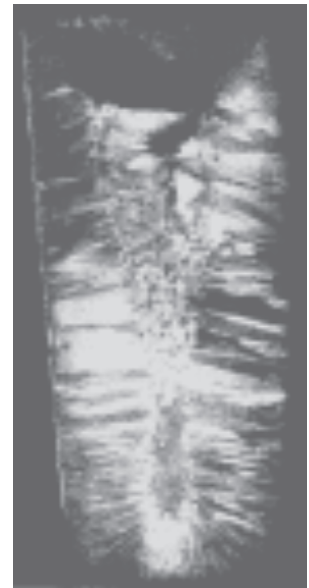


### 3.3. ЛИКВАЦИЈА ПРИ КРИСТАЛИЗАЦИЈА НА ЛЕГУРИ

При леењето на легурите како негативност се јавува нерамномерната распределба на основните елементи на легурата, нечистотиите и штетните елементи во неа, како на пример сулфур и фосфор во железните легури. Појавата на поголема концентрација на одделни елементи во одделни делови на пресекот на одливката се нарекува **ликвација** или **сегрегација**. Таа појава е негативна, а се отстранува со дополнително загревање и жарење на одливките, што го поскапува производството. Затоа се настојува таа да се избегне во самиот процес на леење, со регулирање на брзината на ладење на растопот и негово соодветно прегревање (температура на која се загрева металот пред да се излие). Сегрегацијата се јавува особено ако се образуваат столбести или дендритни форми на кристали во одливката. Ликвацијата може да се јави во мали области и се нарекува - микросегрегација или во поголеми области и се нарекува макросегрегација.

### 3.4. ЛУНКЕРИ (ПРАЗНИНИ) ОД КРИСТАЛИЗАЦИЈА

При леењето на растопот и негова кристализација се менува топлотното собирање на металот, а особено на преминот од растоп во цврсто тело и за време на собирањето на кристалите. Бидејќи кристализацијата се одвива со мала брзина, кристалите се поврзуваат меѓусебно и се повлекуваат пред растопот, а таму каде што останува последниот растоп и се кристализира, еден дел останува неисполнет со маса. Така на пример, ако се наполни еден калап во вид на цилиндер до прелевање, по кристализација на горниот дел ќе има вдлабнатина. Празниот простор во одливката, што некогаш може да биде на горниот дел, но и во средината на одливката, се нарекува **лункер**. Ако е во горниот дел, лункерот се отсекува и се губи метал, што мора одново да се претопува, а ако е во внатрешноста, таквиот дел е често неупотреблив за понатамошно користење. Нагледно лункер е даден на сликата 3.11, на пример во челичен ингот.



Слика 3.11 Попречен пресек на одливка од ингот со лункер во горниот дел.

#### ПРАШАЊА ЗА САМОКОНТРОЛА

- 1) Кои се основни особини на метален растоп?
- 2) Објаснете го процесот на кристализација, кој е првиот стадиум и како завршува кристализацијата?
- 3) Какви кристални основни форми се образуваат при кристализација од растоп?
- 4) Опиши што е дендрит?
- 5) Што е полиморфија или алотропија?

#### 4. ТЕМА

### ФАЗНА РАМНОТЕЖА ВО ДВОКОМПОНЕНТНИ СИСТЕМИ

Преглед на содржини	Цел на учењето
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Основни поими од термодинамиката на рамнотежни системи;</li> <li>• Правило на фази;</li> <li>• Дијаграми на состојбата на двојни легури;</li> <li>• Правило на лост;</li> <li>• Типови на двојни дијаграми: <ul style="list-style-type: none"> <li>- со целосна нерастворливост;</li> <li>- со мала растворливост во течна состојба;</li> <li>- со потполна растворливост во течна и цврста состојба;</li> <li>- со евтектикум</li> <li>- со ограничени цврсти раствори и евтектикум;</li> <li>- со перитектикум;</li> <li>- со интерметални соединенија и фази;</li> <li>- со покриен максимум;</li> <li>- со евтектоидна реакција</li> </ul> </li> <li>• Дијаграм Fe-Fe<sub>3</sub>C</li> <li>• евтектоидни легури и нивни структури; <ul style="list-style-type: none"> <li>- железни ливови и нивна структура.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Да ги познава причините за премин од една во друга фаза;</li> <li>- да ги објаснува дијаграмите на состојба кај двојни легури;</li> <li>- да прикажува двојни легури во дијаграм температура - состав;</li> <li>- да одредува состав на легура, точка на топење и кристализација;</li> <li>- да прикажува крива на загревање и ладење за легура со даден состав;</li> <li>- да го применува правилото на Лост;</li> <li>- да го разбира Fe-Fe<sub>3</sub>C дијаграмот.</li> </ul> <p><i>Оваа тема е најобемна и за неа се предвидени најголем број од наставните часови (преку 1/3). И покрај обменоста на часовите, целите за учење на оваа тема се позахтевни, а се задачи со кои металурзите се среќаваат секојдневно.</i></p> <p><i>Во материјалот за учење по оваа тема, користени се најосновните објаснувања за рамнотежата и условите за неа. Двојните дијаграми на фазната рамнотежа се разгледани според растворливоста во течна и цврста состојба, како и според реакциите што се одвиваат меѓу металните елементи, како што се евтектичката, перитектичката и евтектоидната реакција, а не е, на пример разгледана перитектоидната реакција, која поретко се среќава во практичните легури.</i></p> <p><i>Посебно внимание е дадено на можните практични пресметки што произлегуваат од дијаграмите, определување на составот и количината на фазите, со користење на правилото на лост.</i></p> <p><i>Системот Fe-Fe<sub>3</sub>C е основата на секој металург, затоа е тука даден како типичен двокомпонентен дијаграм, доволно сложен, за да ги демонстрира одделните типови двојни дијаграми. Третиран е метастабилниот систем и начинот на формирање на структурите по него и стабилниот, кој како железен лив наоѓа најголема примена од евтектичките легури.</i></p>

## 4. ФАЗНА РАМНОТЕЖА ВО ДВОКОМПОНЕНТНИ СИСТЕМИ

## 4.1. ОСНОВИ ПОИМИ ОД ТЕРМОДИНАМИКА НА РАМНОТЕЖНИ СИСТЕМИ

Две метални парчиња да се стават во херметички затворен лонец. Лонецот да почне да се загрева додека не се постигне температура што е над растопувањето на металите и да се одржува долго време константна. Да се мери притисокот на садот додека тој не остане константен. Кога притисокот во лонецот е непроменлив, тоа значи дека во лонецот е постигната термодинамичка рамнотежа меѓу фазата растоп (течна фаза) и фазата гас. Гасот го сочинуваат пареите на двата метала. За таков систем од метален растоп и пареите над него, се говори дека е во термодинамичка рамнотежа. Со промена на температурата, ќе се промени испарувањето, па системот ќе има друга вредност за притисокот на пареите, т.е. ќе се постигне друга рамнотежа.

Во затворен систем, како во претходно опишаниот пример, првиот термодинамички закон е:

$$U = q + w$$

$U$  - внатрешна енергија што ја има системот во рамнотежа,  $q$  - топлината што ја има системот, каде што е содржана и топлината што ја имале металните парчиња на почетокот, зголемена со топлината за загревање, за топење и за прегревање на растопот и пареите до определената температура,  $w$  - работата што ја извршува системот.

Во термодинамиката важна е само каква е моменталната состојба, а не патот како е дојдено до неа.

Внатрешната енергија на системот е сума од потенцијалната и кинетичката енергија. За мали промени на некој параметар на системот - температура, притисок или промена на односот на метали (состав на системот), соодветно ќе се промени и внатрешната енергија на системот

$$dU = dq + dw = c_p dT - PdV$$

каде е  $C_p$  - топлински капацитет на сите компоненти,  $T$  - температура,  $V$  - волумен,  $P$  - притисок,  $d$  – математички симбол што означува дека параметрите што се по него се менуваат со многу мали разлики. Во математиката тој се нарекува диференцијал.

Внатрешната енергија на системот ќе се промени ако се промени температурата со истовремена промена на волуменот, за да остане притисокот константен.

Енталпија е внатрешната енергија на системот, зголемена за работата што ја врши системот (производ на притисок и волумен), т.е. ако се шири волуменот со опаѓање на притисокот.

$$H = U + PV.$$

Ако се менува што било од трите големини што ја даваат  $H$ , ќе се промени и  $H$ . Тоа е најчесто во диференцијална форма, каде што се можни сите промени за мала разлика.

При константен притисок енталпијата е:

$$dH = C_p dT.$$

Дали еден повеќекомпонентен систем е среден, т.е. секогаш приближно еден атом од едната компонента е окружен со атоми од другата компонента, се определува со термодинамичката големина – ентропија ( $S$ ). Со други зборови ентропијата е мерило на среденост на системот, или во одредени услови, колку системот е подалеку од рамнотежата.

Промената на ентропијата е секогаш еднаква или помала од топлината што се додава во системот при одредена температура:

$$dS \geq \frac{dq}{T}$$

Кога системот е во рамнотежа  $dq=TdS$ , а во нерамнотежа ако е  $dq < TdS$ .

Енергија на еден систем што може да изврши работа е слободна енергија на системот и се дефинира како:

$$G = H - TS = U + PV - TS.$$

што го претставува вториот закон на термодинамиката.

Ако се менува за диференцијална разлика која било од нејзините составни параметри, ќе се менува диференцијално и слободната енергија.

Ако нема промени во слободната енергија на системот, значи дека тој е во рамнотежа ( $dG=0$ ), а ако има промени - е нерамнотежа (нешто ќе реагира за да се промени или се менуваат фазите во системот). Оттука произлегува дека системот секогаш ќе тежи да ја намалува (минимизира) слободната енергија, за да постигне рамнотежа. Доколку постоенето на некоја рамнотежа или состојба е предизвикана од некои пречки што не дозволуваат да се постигне минимална енергија, за тие услови се образува локална рамнотежа. Ако се отстрани пречката за локалната рамнотежа, на пример со накнадно загревање, ќе се постигне термодинамичка рамнотежа во системот.

Промените на слободната енергија при константен волумен се дефинираат со  $F = U - TS$ , која се нарекува Хелмхолцова слободна енергија.

Во затворен систем со константен состав (даден на почетокот како пример) работа може да се врши само со ширење на системот (од цврсти метали, во растоп, до растоп и гас) може да се обединат првиот и вториот термодинамички закон и по средување, за слободната енергија се добива:

$$dG = -SdT + VdP$$

Во отворени системи во кои се додава или одзема маса на системот, какви што се хемиските реакции, или испуштање на пареата во првиот наведен пример, тогаш слободната енергија на системот се дава и со хемискиот состав, односно со промените на масата на одделните компоненти или фази, или компонентите во фазите (состав на фазите).

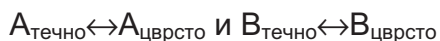
$$dG = -S dT + V dP + \sum (dG/dn),$$

каде што е  $n$  количината на одделните компонентите што го образуваат системот.

Во случај кога се менува само физичката (агрегатната) состојба на фазите или компонентите, сумата во двофазниот монокомпонентен систем претставува сума на слободните енергии на едната и на другата фаза, што се во рамнотежа, при константен притисок и температура. Слободната енергија е нула. Тоа значи дека едната фаза може да ја менува слободната енергија на сметка на иста промена во обратен знак во другата фаза.

## 4.2. ПРАВИЛО НА ФАЗИ ВО ПОЛИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ

Нека е даден двокомпонентен систем од компоненти А и В, што се во рамнотежа цврста и течна фаза. Во рамнотежа компонентите А и В се распределуваат во цврстата и течната фаза:



Ако во системот се додава и трета компонента (С), нејзината количина рамнотежно ќе се распредели во течната и цврстата фаза.

Фазната рамнотежа во еднокомпонентен систем зависи од температурата и притисокот во системот. Во систем со  $k$  компоненти, фазната рамнотежа е зависна од температурата, притисокот и бројот на компонентите. Тие три параметри определуваат колку фази ќе постојат за во нив да се распределат компонентите.

Степенот на слобода ( $f$ ) ја означува можноста да се менува некој параметар што ја дефинира рамнотежата, без да се наруши рамнотежата, т.е. бројот на фазите во рамнотежа. Тој е зависен од бројот на компоненти и бројот на фази, зголемен за двата термодинамички параметри - притисок и температура. Таа зависност се дава со:

$$f = k - \Phi + 2$$

што се нарекува **правило на фази или Џипсово правило на фази**.

Правилото на фази покажува колку елементи на рамнотежата може да се менуваат, а да не се промени бројот на фазите во рамнотежа.

Пример:

Во точка на топење на некој метал во рамнотежа се две фази - растоп и цврст метал, а број на компоненти еден, па за степенот на слобода на тој систем се добива:

$$f = 1 - 2 + 2 = 1$$

Тоа значи дека може да се менува или температурата или притисокот, а да останат двете фази во рамнотежа. Затоа на општиот дијаграм на состојбата P-T, се јавува линијата O-O".

Металите во цврста состојба имаат занемарливо мала испарливост и притисок на пареите, во споредба со притисокот што го создаваат во атмосферата во отворени системи. Атмосферскиот притисок изнсува една атмосфера. Доколку се мери притисокот на металните пареи над растопена легура, близок на температурата на топење, што всушност практично се температури каде што се изведуваат физичко-металургиските процеси во растопи, тогаш може да се занемари притисокот на пареите на металите и параметарот P. Атмосферските гасови не влијаат врз составот на системот. Тоа значи дека останува само еден параметар кој може да се менува во рамнотежата на метален систем - температура. Затоа правилото на фази за металите гласи

$$f = k - \Phi + 1.$$

### 4.3. ДИЈАГРАМИ НА СОСТОЈБАТА НА ДВОЈНИ ЛЕГУРИ

Двокомпонентните системи и нивната фазна рамнотежа се претставуваат на двојните (или двокомпонентни) дијаграми на фазната состојба. Тие се конструирани со време неопходно да се постигне рамнотежа при одредена точка во дијаграмот. На нив се претставуваат рамнотежните фази во цврста и во течна состојба на систем од два метали, во зависност од температурата и од составот. Со нив може да се одреди, при одреден состав на некоја легура и температура, бројот и кои фази се појавуваат во легурата, да се одреди температура на која ќе се топи легурата, да се



определат квантитативно хемискиот состав и количината на фазите, што можат да се јават при промена на температурата на системот.

#### 4.3.1. ОЗНАЧУВАЊЕ ВО ДВОКОМПОНЕНТНИТЕ РАМНОТЕЖНИ ДИЈАГРАМИ

Во двокомпонентните дијаграми на состојбата на апсцисата се нанесува процентниот состав на легурата или односот на смешување на металите (слика 4.1a). На ординатата се нанесува температурата. Дијаграмот внатре е поделен со линии на одделни области каде што опстојуваат:

- еднофазни,
- двофазни и
- гранични линии на еднофазните области.

Косите линии во дијаграмите (види слика 4.2) претставуваат рамнотежи меѓу две блиски фази. Во нив се менува само еден параметар (температура или состав), без промена на бројот на фазите.



Слика 4.1 Двокомпонентен дијаграм состав – температура



Слика 4.2 Двокомпонентен дијаграм состав-температура, во кој е претставена линија што ја прикажува рамнотежата меѓу две фази (течна и цврста фаза)

Линиите паралелни со апсцисата (составот) претставуваат рамнотежи меѓу три фази или реакции, при што се образува или распаѓа една фаза. Во двокомпонентните дијаграми на состојба можни реакции при ладење се:

монотектичка : цврста фаза + растоп(1)  $\leftrightarrow$  растоп(2)

евтектичка: растоп(1)  $\leftrightarrow$  цврста фаза(1)  $\leftrightarrow$  цврста фаза(2)

перитектичка: цврста фаза(1) + растоп  $\leftrightarrow$  цврста фаза (2)

евтектоидна: цврста фаза(1)  $\leftrightarrow$  цврста фаза(2) + цврста фаза(3)

перитектоидна: цврста фаза(1) + цврста фаза(2)  $\leftrightarrow$  цврста фаза(3)

Концентрацијата на металите во двокомпонентните дијаграми се претставува во масени или атомски проценти, или на двата начина заедно. Масените проценти може да се трансформираат во атомски проценти со изведување на едноставни релации, што не е неопходно за овој учебник.

## СПЕЦИФИЧНИ НАЗИВИ НА ОДДЕЛНИТЕ ЛИНИИ ВО ДВОКОМПОНЕНТНИТЕ СИСТЕМИ

Линијата во дијаграмот што ја претставува рамнотежата: течност ↔ цврста фаза, над која нема цврста фаза е **ликвидус линија**. Нагледно е претставена на слика 4.2. Линијата под која се само цврсти фази е **солидус линија**. Меѓу ликвидус и солидус линијата мора да постои двофазна област каде што во рамнотежа се двете фази - растоп и цврста. Во двофазните области може да се менува составот и температурата во системот, без да се промени бројот на фазите (според правилото на фази степен на слобода е 2).

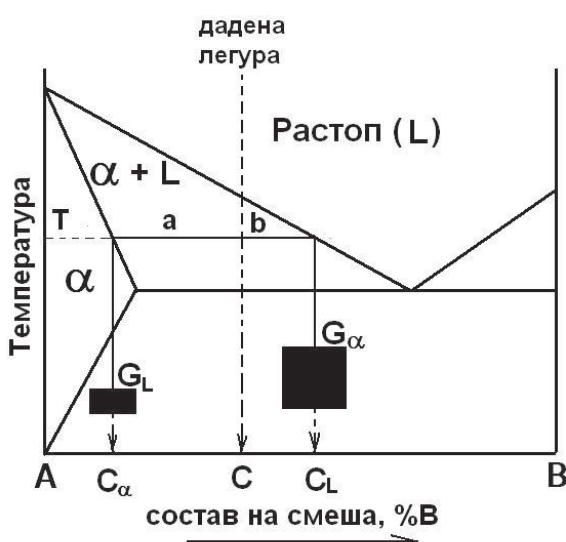
Вертикалните линии лево и десно на дијаграмот ги даваат чистите метали или компоненти на системот. На нив се обележуваат температурите на алотропски модификации и точката на топење. Точките нанесени на чистите метали се двофазни, без степени на слобода. Промената на температурата го менува бројот на фази.

### 4.3.2. ПРАВИЛО НА ЛОСТОВИ

Во двофазните области на дијаграмот, со хоризонтална линија паралелна со координатата за состав на смешување, може да се поврзат границите на соседни еднофазни области. Таквата линија се нарекува **линија на поврзување**. Точките каде што се краевите на линиите го даваат составот на фазата, што е во рамнотежа со фазата од другиот крај на линијата. На таа линија фазите имаат константен состав. Линијата на поврзување не може да пресекува друга линија во дијаграмот при повлекување. Со повлекување на вертикална линија од било која точка на линијата на поврзување се чита хемискиот состав на легурата во таа точка. На пресечните точки на линијата со границите на еднофазните области е составот на соодветната фаза. Линијата на поврзување се користи за определување на:

- хемискиот состав на одделните фази,
- за определување количината и односот на фазите за легури што се на таа линија.

Во линиите на поврзување се користи правилото за рамнотежа на лост од вага



Слика 4.3 Илустрација на примената на сврзната линија и правилото на лостови во двофазната област на еден двокомпонентен дијаграм

за определување на количината на фазите. Пример на сврзна линија и симулација на вага за мерење тежина во зададена растопена смеша на метал А и В и оладена на температура - Т, е претставена на сликата 4.3. На зададената температура се повлекува паралелна линија со координатата за составот. Сврзната права ја сече границата со  $\alpha$ -фазата на левата страна (солидус линија), а на десната страна линија на ликвидусот (составот на растопената фаза - L). Тоа укажува дека легурата на таа температура е во двофазна област.

Со повлекување на вертикални линии од пресечните точки, на координатата на составот, се отчитува соодветниот состав на фазата. На левата страна е тоа легурата а со

состав  $C_\alpha$ , а на десната страна составот на растопот (L). Составот на фазите се изразува во единиците нанесени на дијаграмот (масени% или атомски%).

Сврзната линија е поделена на две отсечки со верикалната линија на појдовната смеша. Во составот на смешата е ослонецот на лостот. За да остане линијата хоризонтална и не се накриви, на подолгата страна мора да се наоѓа фазата со помала маса, а на пократката, фазата со поголема маса. Тоа значи дека должината на отсечката  $b$  ќе ја претставува масата на потешката фаза, што во случајот е тоа ( $G_\alpha$ ), а должината на отсечката  $a$  ќе ја претставува количината на фазата со помала маса ( $G_L$ ). Должината на сврзната права ја претставува вкупната маса на смешата.

Ако  $a+b$  е целата количина на легурата ( $G = G_\alpha + G_L$ ), тогаш деловите  $a$  и  $b$  на сврзната линија ги претставуваат соодветните количини на масите на фазите, што се во рамнотежа на зададената температура. Од рамнотежа на лост на вага, применето на сврзната права од сликата 4.3 се добива релацијата

$$G_L = \frac{b}{a+b} G,$$

со која се пресметува количината на растопот што е во рамнотежа со фазата на цврстиот раствор  $\alpha$ , изразена во единици на маса во кои е зададена појдовната маса на смешата. Односот на отсечките на сврзната права го изразуваат и количинскиот однос на присутните фази.

**Внимание - забележете дека количината се определува на спротивната отсечка од почетниот состав, а хемискиот состав на фазата, на другата страна на сврзната страна.**

Примери за користење на правилото на лостови се дадени при разгледување на одделни типови на двокомпонентни дијаграми.

### 4.3.3. КОНСТРУИРАЊЕ НА ДВОКОМПОНЕНТНИТЕ ДИЈАГРАМИ

Наједноставен начин на конструирање на двокомпонентните дијаграми е со определување на критичните точки на легурата од кривите на ладење. Кривата на ладење, на температурата на која се појавуваат првите кристали во мала количина, ја менува брзината на ладење (превојна точка на кривата дадена како пример на слика 4.4). Кога легурата при ладење ќе ја постигне солидус линијата, се одржува константна температура, додека не се кристализира целата легура (без разлика дали е една фаза или повеќе), а потоа пак се лади.

Од анализа на кривата на ладење се определуваат почеток на кристализација од растопот, потоа постоењето на двофазна област (растоп и цврста фаза) и температурата на солидусот. Согласно претходно неведеното, под солидус линијата е цврста фаза. Овој метод нагледно ќе биде претставен при конструкција на некои типови дијаграми.

Најточен метод за конструкција на двокомпонентните дијаграми, температурите и составите на рамнотежните фази, е со пресметка на слободната енергија и нејзината промена со промена на составот. Тој метод се нарекува термодинамички



Слика 4.4. Крива на ладење на растопена легура од што се кристализира цврста фаза.

метод на конструкција на двокомпонентни дијаграми. Така се определуваат границите на фазите за секоја температура и состав на легурата.

За определување на структурата и видот на фазата мора да се применат и други методи, како што се металографската, рендгенска дифракција, електронски микроскоп и други методи. Исто така, за определување на критичните температурни точки во дијаграмот се користи диференцијалната термичка анализа, покрај кривите на ладење. Диференцијалната термичка метода е многу почувствителна метода од кривите на ладење.

## 4.4. ВИДОВИ НА ФАЗНИ ДИЈАГРАМИ

Двофазните дијаграми се поделени по типови дијаграми, основно по однос на растворливоста на металите во цврста состојба и видовите на реакции што се одвиваат во системот. Металните системи во течна состојба најчесто се мешаат целосно, со исклучок на неколку системи во кои се јавува ограничено мешање на некој течен метал со друг или целосно немешање.

Со оглед на малата застапеност на двокомпонентни дијаграми со мешање или немешање во течна состојба и малото влијание на растопот на таквите дијаграми врз кристализацијата и микроструктурата во цврсто тело, тие нема да се разгледуваат детално во оваа тема.

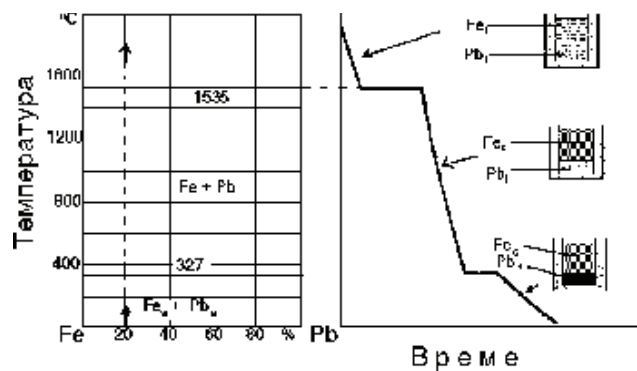
Во оваа тема акцентот ќе биде ставен на најчестите двокомпонентни дијаграми, интересни за практиката.

### 4.4.1. ДИЈАГРАМ СО ЦЕЛОСНА НЕРАСТВОРЛИВОСТ НА МЕТАЛИТЕ ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА

Изглед на ваков тип дијаграм е даден на примерот на Fe-Pb, кои имаат голема разлика во точките на кристализација и во специфичната густина. Изгледот на таков дијаграм е претставен на слика 4.5.

На десната страна на дијаграмот е претставена крива на ладење, која е еднаква за сите состави на легурата, како и симулација на местоположбата и фазната состојба на присутните метални фази. Како што се гледа од дијаграмот, над температури повисоки од точката на топење на железото се наоѓа хомоген растоп од двата метала. Над тие температури е еднофазна област - растоп. На температура на кристализација на железо има задржување на температура, што укажува на типичен процес на кристализација. Откако ќе кристализира целото железо, кое плива над течното олово, до точка на кристализација на олово (327°C) остануваат две фази што не се мешаат. На 327°C се задржува температурата (кристализација на олово), а по целосната кристализација на смесата од олово, на долниот дел, и железо, на горниот дел, тие остануваат присутни до собна температура.

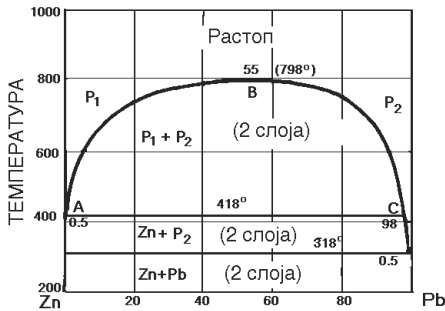
Затоа, при добивање сурово железо не се смета за проблем издвојувањето на оловото во високите печки зашто паѓа на дното и не го онечистува железото.



Слика 4.5 Дијаграм на состојбата за систем Fe-Pb

#### 4.4.2. ДИЈАГРАМ СО МАЛА РАСТВОРЛИВОСТ ВО ТЕЧНА И ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА

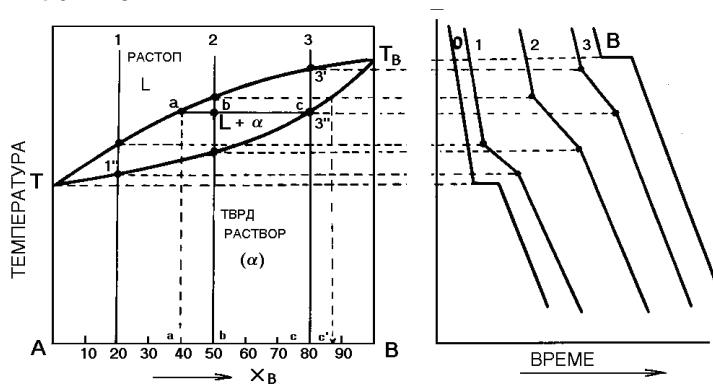
Пример на таков дијаграм е претставен на слика 4.6, кој е типичен за системот цинк-олово. Типично за овој систем е што има поголема растворливост меѓу растопите на двата метала. При високи температури металите целосно се мешаат, а под некои температури се раздвојуваат на два растопи. Поради разликата во специфичните густини растопите се раслојуваат еден над друг. Првин се кристализира цинкот на  $418^{\circ}\text{C}$ , а во преостанатиот растоп има растворено цинк. Под таа температура е двофазна област на кристали на Zn и растоп од цинк и олово. Со ладење се намалува растворливоста на цинк во олово, за на  $318^{\circ}\text{C}$  да останат само 2% растворено олово во цинк. На таа температура кристализира практично евтектикум (смеса на Zn и Pb, што е смеса од чист цинк и олово, со точка на топење  $327^{\circ}\text{C}$ ). Под таа температура се два цврсти слоја - горниот на цинк, долниот слој - на олово.



Слика 4.6. Дијаграм на состојба Zn-Pb со делумно растворање во течно, а нерасторање во цврсто.

#### 4.4.3. ДИЈАГРАМ СО ЦЕЛОСНА РАСТВОРЛИВОСТ НА МЕТАЛИТЕ ВО ТЕЧНА И ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА

Пример од овој тип на дијаграми на состојба е многу чест кај легурите што имаат голема индустриска примена. Неговото конструирање е релативно едноставно, со анализа на кривите на ладење. Таков тип дијаграм е претставен на сликата 4.7, со одреден број на криви на ладење, неопходни за неговата конструкција.



Слика 4.7. Дијаграм на состојба со целосно мешање на елементите во цврста и течна состојба.

Метали со разлика во атомските радиуси под 15% и еднакви елементарни решетки и слична валентност или хемиски афинитет, можат да градат во цврста состојба непрекинатата низа на супституциски цврсти раствори. Цврстите раствори во двокомпонентните дијаграми се означуваат со мали грчки букви,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  и др. Во дијаграмите со целосна растворливост цврстиот раствор се обележува со  $\alpha$ . Овој тип на дијаграм го имаат многу индустриски применети легури, како на пример Ag-Au, Ag-Pd, Au-Cu, Au-Ni, Au-Pt, Co-Fe, Co-Ni, Cu-Ni, Fe-Ni и други.

Левата крива на ладење е за чист метал A, како што се забележува, е единствена промена со задржување на температурата. На таа температура е точка на топење на метал A. На тој начин се определува првата точка за конструкција на дијаграмот  $T_A$ . Кривата на ладење десно е на елементот B, а од неа на дијаграмот е определена и нанесена точка на топење -  $T_B$ . Кривата на ладење е направена за смеса од 20%B и 80%A. На кривата се забележуваат две превојни точки, кои

соодветствуваат на почетокот на кристализација (повисоката) на цврсти раствор - точка на ликвидус линија, а пониската температура е точка на солидус линијата.

Превојни точки се добиваат и за кривите со 50%A и 50%B и 20%A и 80%B. Кога ќе се поврзат сите точки што лежат на ликвидус линијата и точките што лежат на солидус линијата, се добива дијаграмот претставен на сликата 4.7 лево.

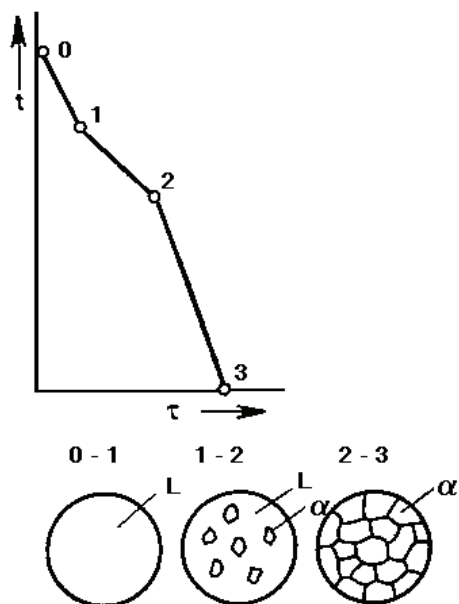
Во горниот дел над ликвидус линијата во растопот се целосно растворени двата метала, во просторот меѓу ликвидус и солидус линијата во рамнотежа се кристали на  $\alpha$ - цврстиот раствор, со променлив состав (кристали со мешан состав) и растоп, чиј состав се менува со промена на температурата. Под солидус линијата е областа на цврстиот раствор.

Особините на цврстите легури се менуваат законито со промената на составот на легурата, како што е на пример електроспроводливоста или топлоспроводливоста, специфичната густина и други особини. Исто така, се менува и параметарот на елементарната решетка, од тој на елементот А, до тој на елементот В. Точката на топење на легурите се определува од ликвидус линијата, кога ќе се повлече вертикална линија за легура со одреден состав.

### КОРИСТЕЊЕ НА ПРАВИЛОТО НА ЛОСТОВИ ВО ДИЈАГРАМ СО ПОТПОЛНА РАСТВОРЛИВОСТ НА КОМПОНЕНТИТЕ

На дијаграмот со потполна растворливост на компонентите во течна и цврста состојба (слика 4.7) ќе биде даден пример за користење на правилото на лостови за определување на количината на фази и нивниот состав за некоја легура на зададена температура.

За пример нека послужи легура со 50%A и 50%B (крива на ладење 2). Ако се растопи таква легура и потоа се лади, на температура што ја прикажува првата превојна точка на кривата на ладење 2, се издвојуваат првите кристали на цврстиот раствор. Како опаѓа температурата, во растопот се образуваат нови кристали по број и по големина, а околу нив се наоѓа растопот. Ако се издвои таква крива на ладење и се разгледува кристализацијата на цврстиот раствор, ќе се добие шематски



Слика 4.8. Шема на кристализацијата на легура од дијаграм со целосна растворливост во цврста и во течна состојба.

сликата за формирање на микроструктурата, што е претставена во круговите на сликата 4.8. Кристалите на цврстиот раствор растат, во температурниот интервал меѓу ликвидусот и солидусот, се во голем број, додека не се допрат меѓусебно и исчезне растопот. Таа микроструктура по кристализација се одржува до собна температура без промени.

Ако се разгледува зададен состав на легура на некоја температура во двофазната област, може да се определи колкава е количината на образуваните фази - цврст раствор, неговиот состав и составот на растопот. Тоа нека биде направено со користење на правилото на лостови.

При температура  $T_2$  од слика 4.7 (соодветна точка 2 на слика 4.8), во рамнотежа се кристалите на  $\alpha$  - цврст раствор, со состав во точка **a**, а составот на растопот е во точка **c**. Составот на легурата е во **b**. Ако почетната



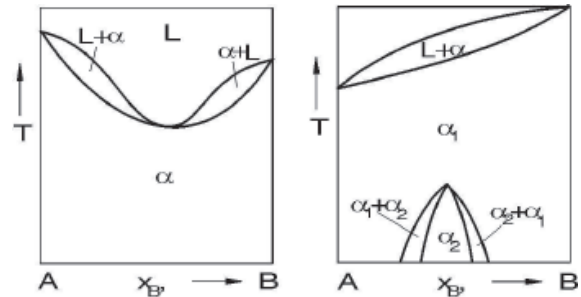
легура била во количина 10 kg, тогаш со примена на правилото на лостови се определува за:

$$\alpha = \frac{c - b}{c - a} \times 10 = \frac{80 - 40}{80 - 40} \times 10 = 0,75 \times 10 = 7,5 \text{ kg и}$$

$$\text{растоп} = \frac{b - a}{c - a} \times 10 = \frac{50 - 40}{80 - 40} \times 10 = 0,25 \times 10 = 2,5 \text{ kg}$$

Составот на цврстиот раствор е 60%A и 40%B, а на растопот е 80%B и 20%A.

Кај некои двокомпонентни системи со целосна растворливост во цврста состојба, ликвидусот и солидус линијата може за двата метала да покажуваат намалување на температура на топење со растворањето на еден во друг, па се добива некоја минимална точка на ликвидусот и солидусот (пример на слика 4.9 лево). Кај некои системи од метали, кај што повисоко топливиот метал, со додавање на другиот метал, ја намалува точката на топење, а пониско топливиот ја зголемува, како и во случајот на слика 4.9 десно, цврстиот раствор да се разлага на пониски температури на два или еден стабилен цврст раствор. На сликата 4.9 десно е даден примерот на систем каде што високотемпературниот цврст раствор во некој температурен интервал се распаѓа на постабилен цврст раствор, настанува средување на атомите во одредени положби во кристалот - среден цврст раствор (суперструктура).



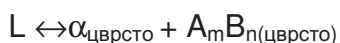
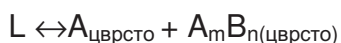
Слика 4.9. Дијаграми на состојба со целосна растворливост, со намалување на точките на топење (лево) и минимум, а на сликата десно, дијаграм со средување на цврстиот раствор во некоја концентрација и температура

#### 4.4.4. ДВОКОМПОНЕНТНИ ДИЈАГРАМИ СО ЕВТЕКТИКУМ

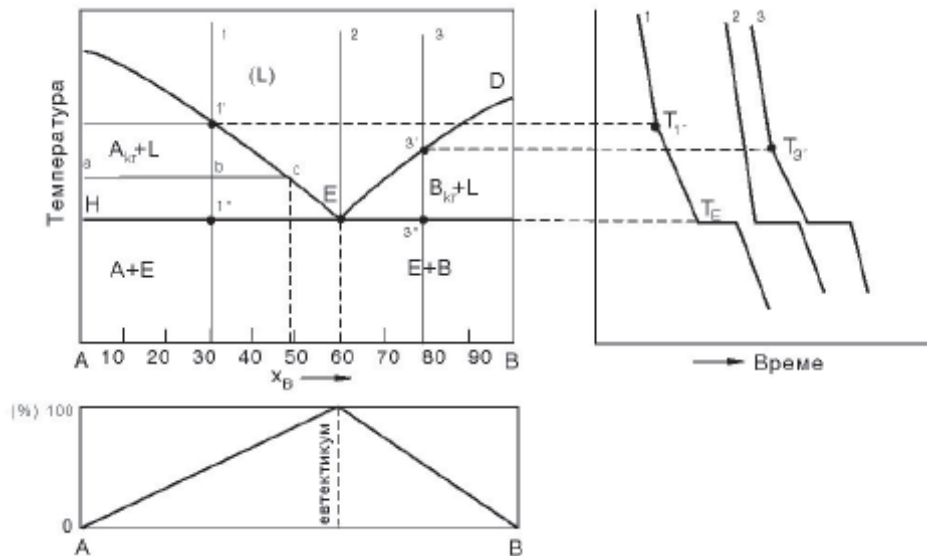
Овој тип на дијаграми се карактеризира со одвивање на евтектичка реакција меѓу некои од компонентите. Евтектичката реакција на дијаграмите се претставува со хоризонтална линија. На евтектичката линија од дијаграмот, во рамнотежа се три фази. Евтектичката линија ја претставува најниската точка во дијаграмот каде што егзистира течната фаза. Кај комбинирани дијаграми, кои се составени практично од споени едноставни дијаграми, се јавуваат и повеќе евтектикуми во одделни концентрациски области.

Евтектичката реакција може во принцип да биде помеѓу чисти метали; меѓу нивни цврсти раствори; меѓу цврст раствор и соединение; меѓу цврст раствор и интерметална фаза; меѓу чист метал и интерметално соединение или интерметална фаза.

Тие случаи напишани како евтектички реакции за распаѓање на некој растоп на цврсти фази се:



Суштината на евтектичките двокомпонентни дијаграми ќе биде објаснета на примерот на наједноставниот, т.е. на дијаграм со нерастворливост на компонентите меѓу себе и евтектичка реакција. Изгледот на дијаграмот со евтектикум и нерастворливост на компонентите е претставен на слика 4.10.



Слика 4.10. Двокомпонентен дијаграм на состојбата за метали што се раствораат неограничено во течната состојба, а целосно се нерастворливи во цврста состојба. На долниот дел е претставена промената на количината на евтектикумот.

Кривите на ладење, што се карактеристични за конструкција на ваков тип дијаграм, се претставени на сликата 4.10. десно. Тие се однесуваат на чисти метали и на легура со евтектичка точка (најниска температура на постоење на каков било растоп). Како што се гледа од дијаграмот, тој има две цврсти фази од чисти метали, што се наоѓаат на двете вертикални граници на дијаграмот (100%A и 100%B) и една течна еднофазна област. Меѓу еднофазните области се наоѓаат двофазни области од најблиските фази. Двофазните области се означени соодветно на дијаграмот (A-растоп, растоп-B и A+B).

Карактеристично за овој дијаграм е што со додавање на легирниот елемент во чистата легура на другиот, се намалуваат точките на топење на двата метала. Со зголемување на додадената количина во системот (промена на концентрацијата) се менува составот на растопот со одредена законитост, претставена со коси линии. Во точката на пресек на двете ликвидус линии (линии на снижување точката на топење на соодветниот метал) е евтектичката точка. Таа е определена точно со состав и температура.

Под евтектичката температура растопот е нестабилен. Термодинамички се распаѓа (по погоре дадената реакција) на смеса од двата метала, а поради специфичниот начин на кристализација (даден во темата 3. кристализација) се однесува како посебна металографска структура - евтектикум. Металите во евтектичките легури се цврсто поврзани едни со други преку границите на металните зрна.

Ако легурата е со концентрација лево или десно од евтектичката точка, се јавува разлика во формирањето на микроструктурата во цврста состојба. Затоа треба, како пример што ќе може да се користи во сите дијаграми со евтектичка реакција, да биде разгледана една легура што е по состав меѓу чистиот метал и евтектичката точка.

Пример за кристализацијата на таква легура е даден со кривата на ладење 1, на сликата 4.10.

Кога ќе се постигне температура  $T_1$  при ладење на растопот со 30%B и 70%A, се јавуваат првите кристали на металот А, а на кривата на ладење се менува текот на кривата. Со намалување на температурата, се навлегува во двофазната област ( $A_{\text{цврсто}} + \text{растоп}$ ). Во температурниот интервал од  $T_1$  до  $T_c$  е двофазната област. Во неа кристалите А не го менуваат составот, а се зголемува нивното учество во смесата. Растопот го менува составот од 70%A и 30%B до 60%B и 40%A.

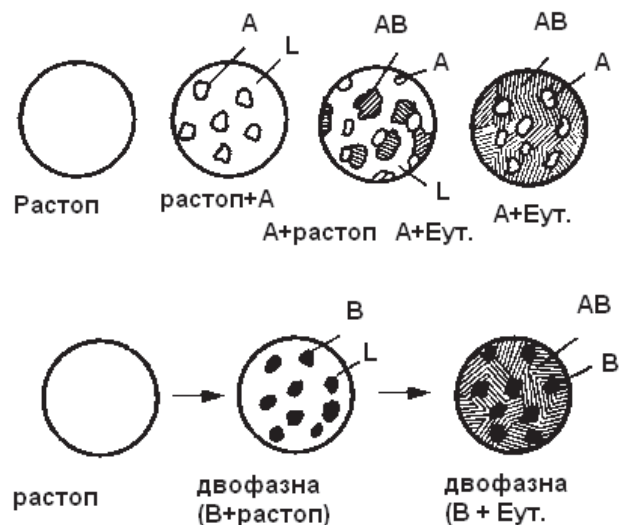
На евтектичката температура чистите кристали на А, присутни во смесата А+растоп, остануваат непроменети, а растопот со состав во Е (60%B и 40%A) се распаѓа на евтектичка смеса составена од А и В кристали. Затоа во интервалот од чист метал А до евтикумот, под евтектичката температура во рамотежа се примарните (од течност образувани кристали А) и евтектичката смеса, составена од А и В кристали.

Истото се однесува и за страната на дијаграмот меѓу метал В и евтектичниот состав, со тоа што во таа област се јавува одвојување на В од растопот и негово присуство како примарни кристали на температура под евтектичката, обиколени со двокомпонентниот евтектикум (смеса од А+В).

Шема на добиената микроструктура со одделни фази на формирање е претставена на слика 4.11.

Во двофазните области, каде што постојат цврсти кристали на А или В и во цврста двофазна област може да се определуваат количините на издвоени А, В или евтектикум во определена маса на легурата. За тоа се користи правилото на лостови.

Овој тип дијаграми се искористуваат во технологиите при рафинација на металите со ликвација (издвојување на цврсти кристали од повеќекомпонентен растоп). На пример, ако е дадена легура со 30%B и 70%A, од двокомпонентниот дијаграм од слика 4.10, на температура над евтектичката, може да се определи количината на цврстите кристали и составот на течноста. Ако со решетка што го пропушта растопот, а ги задржува А кристалите, се извадат А кристалите, ќе остане растоп кој има состав 50%A и 50%B. Тој состав на легурата за таа температура е целосен растоп и се добива легура обогатена со В.



Слика 4.11. Фази на кристализација на легури лево и десно од евтектикумот на дијаграмот на слика 4.10.

#### Задача за вежбање:

Да се определи количината на кристали што можат да се извадат од легура А-В со состав 30%B и 70%A, на температура означена во дијаграмот на слика 4.10 со линија на сврзување, од 10 kg легура. Во задачата треба да се примени правилото на лостови.

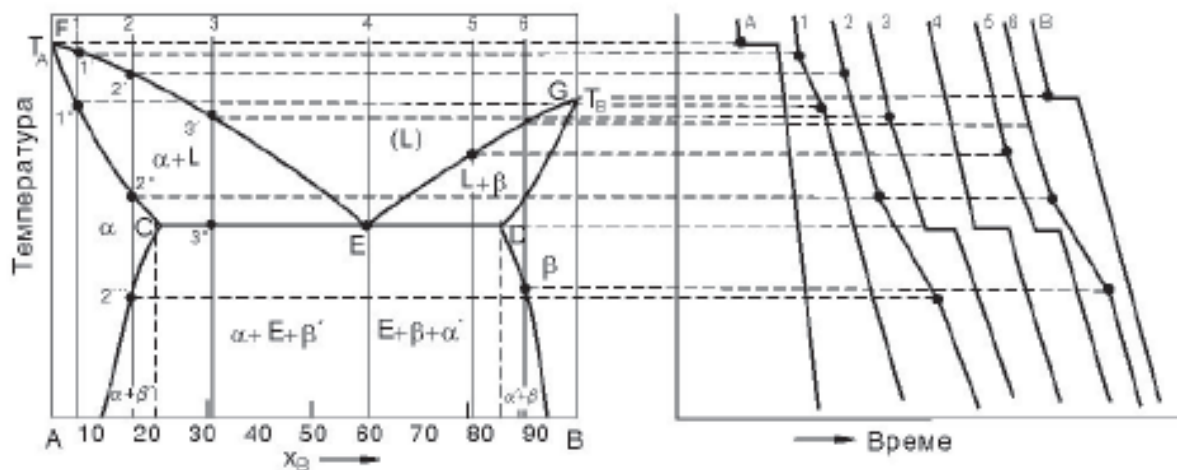
(Одговор за проверка: 2,75 kg)

#### 4.4.5. ДИЈАГРАМ СО ОГРАНИЧЕНА РАСТВОРЛИВОСТ НА КОМПОНЕНТИТЕ ВО ЦВРСТА СОСТОЈБА

Ако металите во една двокомпонентна легура не ги исполнуваат правилата за целосна растворливост, а имаат радиуси што во одредена количина може да навлегуваат во кристалната решетка на другиот, без да ја разрушат, тогаш се образуваат ограничени цврсти раствори во системот. Растворите во таквите системи може да бидат од: супституциски или интерстициски тип (веќе изучено во темата 2 - легури). Ако растворените атоми се поголеми, тие предизвикуваат само локално одбивање, или ако се помали - предизвикуваат локално стеснување на решетката при градењето на супституциски раствори. Ако атомите имаат многу големи разлики, малите може да се сместат во празнините на решетката меѓу поголемите атоми и да изградат интерстициски цврсти раствори.

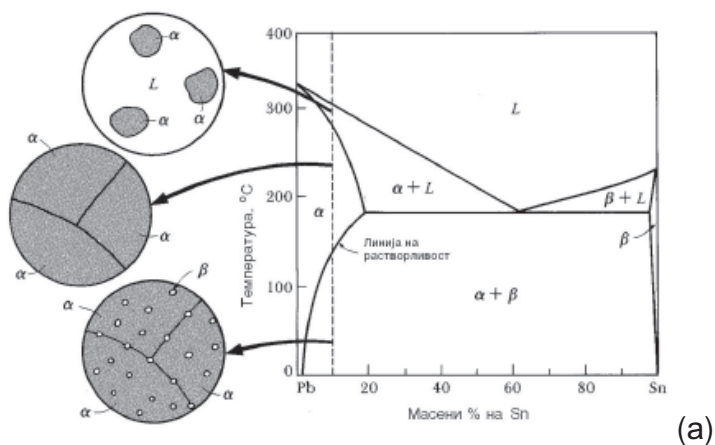
Типичен изглед на такви двофазни дијаграми е претставен на сликата 4.12.

На десната страна од дијаграмот на слика 4.12 се претставени кривите на ладење, што ја даваат основата за неговата конструкција. Претставени се шест криви на ладење, што е доволно за скицирање на овој тип дијаграми на состојба. На дијаграмот може да се видат, со соодветна ознака, еднофазните области (L - целосно мешање на атомите во течна состојба),  $\alpha$  и  $\beta$  цврстите раствори и двофазните области:  $\alpha+L$ ,  $\beta+L$  и  $\alpha$  и  $\beta$ , како евтектичка смеса од цврстите раствори или смеса од примарните кристали на цврстите раствори, образувани над евтектичката температура.

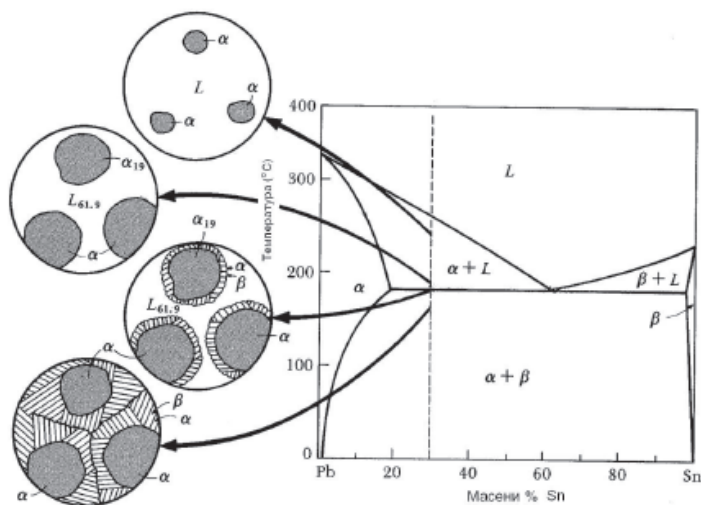


Слика 4.12 Двокомпонентен дијаграм на состојбата со ограничена растворливост на елементите во цврста состојба и евтектичка реакција со образување на смеса од цврсти раствори.

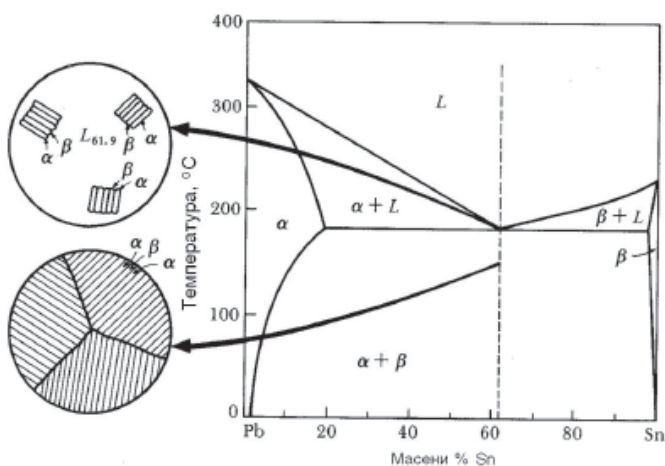
Овој дијаграм има еднаков тек на кристализацијата при ладење, како и во системот со чисти метали, со тоа што се прошируваат областите на стабилност на кристалната структура на елементите, ама во овие системи, како цврсти раствори.



(a)



(б)



(в)

Слика 4.13. Шема на образување на структурата при кристализацијата на одделни легури во систем со ограничена растворливост на компонентите во цврсто. (а) - низ □ концентрациска област; (б) - со концентрација меѓу □ и евтектичка точка (в) - низ евтектички состав.

Максимална растворливост во цврстите раствори е секогаш на евтектичката температура. Во двофазните области кривите на сврзување се меѓу составите на цврстиот раствор по десните линии во областа на  $\alpha$ -цврстиот раствор и левите во областа на  $\beta$ -цврстиот раствор.

Друга карактеристика на ваквите типови дијаграми (со ограничена растворливост) е тоа што, по достигнување на максималната растворливост на елементите во



другата кристална решетка, со намалување на температурата под евтектичката, ја смалуваат количината на другиот растворен метал. Бидејќи металот е во цврста состојба окружен со евтектикум, другиот елемент се издвојува во спротивен цврст раствор, околу примарно образуваниот. На тој начин во областа на постоење на  $\alpha$  се издвојуваат **секундарни  $\beta'$ -кристали** со состав по спротивната линија на дијаграмот. Во овој случај евтектичкиот состав не е посебна фазна граница, туку состав на евтектичката смеса. Евтектикумот е само металографска фаза, а не термодинамичка. Затоа може да се повлече сврзна линија меѓу  $\alpha$  и  $\beta$  во цврстата двофазна област.

На сликата 4.13 е претставен дијаграм со ограничена растворливост меѓу компонентите, со шематска претстава на структурата што се јавува во одредени температурни интервали за различни состави. Составите и соодветната форма на микроструктурата се означена на дијаграмите, а дополнителните кругови ја имитираат оформената микроструктура.

#### 4.4.6. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ СО ПЕРИТЕКТИЧКА РЕАКЦИЈА

Перитектикум е продуктот на перитектичката реакција. Перитектичката реакција беше претходно покажана како повратна реакција на едни цврсти кристали и растоп со одреден константен состав. Перитектикумот има константен состав, на температурата на перитектичката реакција.

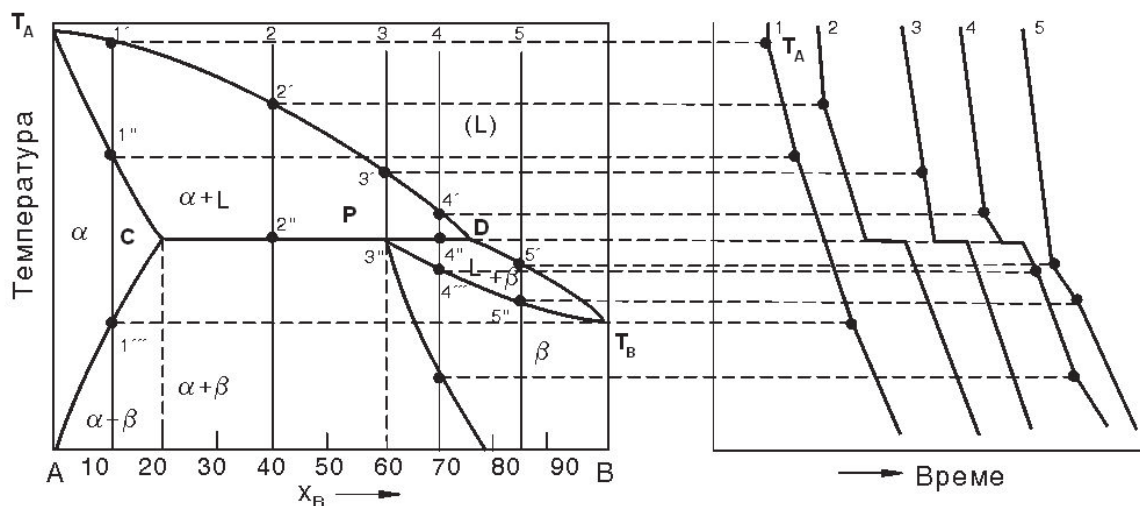
Од погоре кажаното произлегува дека перитектикум може да образува чист метал и некој двокомпонентен растоп, цврст раствор и растоп, и интерметално соединение и растоп. Зависно од природата на двата метала, во фазата - продуктот на перитектичката реакција- може да се растворат едната или двете компоненти, па да образуваат цврсти раствори или интерметални фази со интервал на растворливост на едната или двете компоненти во неговата кристална структура.

Нека биде разгледан случај кога продуктот на реакцијата е цврст раствор. Таков тип на дијаграм е претставен на сликата 4.14. На сликата десно се претставени кривите на ладење на одделни легури, од што се определени одделни концентрациски-температурни точки во дијаграмот.

На двокомпонентниот дијаграм на сликата 4.14 се претставени еднофазните и двофазните области во него. Со L е означен растопот како фаза, а со  $\alpha$ - цврстиот раствор, со  $\beta$ -цврстиот раствор како продукт на перитектичката реакција. Двофазните области се меѓу нив по хоризонтала на дијаграмот.

Десниот дел на дијаграмот, во областа на цврстиот раствор е еднаков со тој дел на дијаграмот со евтектикум и растворливост во цврсто. Карактеристиките на дијаграмот и структурите по овој дијаграм ќе бидат разгледани на примерот на кристализација десно од максималната растворливост на металот B во A, во точката C. Ако се лади некој растоп од легурата со состав 40%B и 60%A, во точката 2` започнува образување на кристали на  $\alpha$ -цврст раствор, со кристална решетка на метал A. До температурата на перитектичката реакција се кристализира сè поголема количина на  $\alpha$ -цврст раствор, чија количина за секоја температура може да биде определена по правилото на лостови. Со намалување на температурата во двофазната област се зголемува растворливоста на B во  $\alpha$ -цврстиот раствор. На температура на перитектичката реакција цврстиот раствор има најголема растворливост.





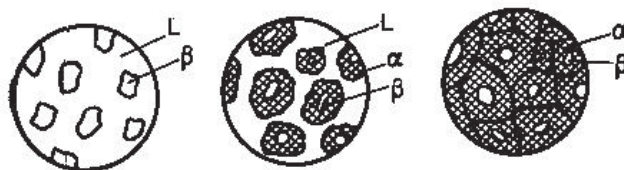
Слика 4.14. Дијаграм со перитектичка реакција и перитектикум цврст раствор.

На температура на перитектичката реакција цврстиот раствор  $\alpha$ , што е збогатен со B компонента и растопот, што исто така е збогатен со B, реагираат меѓусебно и образуваат цврст раствор -  $\beta$ . Цврстиот раствор -  $\beta$  има еднаква елементарна структура со B металот. Перитектичката реакцијата има вид:



Во целиот состав на легурите, што го опфаќаат опсегот на перитектичката реакција, од составот во точката C до составот во точката D, се одвива перитектичката реакција. Притоа реагираат секогаш истите односи (или количина на реактанти) меѓу  $\alpha$  и L. Доколку легурата што се разгледува има состав лево од перитектичката точка P, во легурата на таа температура останува вишокот на цврстиот раствор -  $\alpha$ , а реагира само преостанатиот дел од  $\alpha$ -фазата со течноста, така што под перитектичката температура ќе се јават кристалите на  $\alpha$ -цврстиот раствор, образувани во растопот до евтектичката температура и новообразуваните кристали на  $\beta$ -цврстиот раствор.

Ако легурата има состав десно од перитектичката точка, тогаш се јавува вишок растоп во легурата на перитектичката температура, па затоа ќе се добие  $\beta$ -цврстиот раствор со стехеометриски состав, а вишокот растоп ќе остане стабилен и под перитектичката температура. Затоа во таа област под перитектичката температура, покрај  $\beta$ -цврстиот раствор има и растоп.



Слика 4.15 Шема на кристализација при ладење на легура со перитектички состав.

Продуктот на перитектичната реакција,  $\beta$ -цврстиот раствор, со намалување на температурата ја намалува концентрацијата на компонентата A во него, до постигнување на структурата на елементарен B, т.е. до точката на топење на металот B.

Легурите десно од D директно кристализираат од растопот и преоѓаат во двофазна област растоп и  $\beta$ -цврстиот раствор.

Во цврстите раствори, зависно од нивната температурна растворливост, може да се издвојуваат и секундарни цврсти раствори од спротивните цврсти раствори. Од  $\alpha$  се издвојува  $\beta'$ , а од  $\beta$  се издвојува  $\alpha'$ . Таквата ситуација беше опишана во дијаграмот со ограничена растворливост во цврста состојба.

Шематски приказ на процесот на кристализација и формирање на микроструктурата при ладење на перитектичка легура е претставен на сликата 4.16.

#### 4.4.7. ДИЈАГРАМИ СО ИНТЕРМЕТАЛНИ СОЕДИНЕНИЈА И ФАЗИ

Ако два метала имаат голем меѓусебен афинитет или погодни дијаметри на атомските радиуси, а различни елементарни кристални решетки, тогаш тие може да образуваат интерметални соединенија  $A_mB_n$ . Таквите соединенија, зависно од тоа во какви масени соодноси реагираат (градат кристални структури), ќе се појават и во двокомпонентните дијаграми на состојбата како одделни цврсти фази.

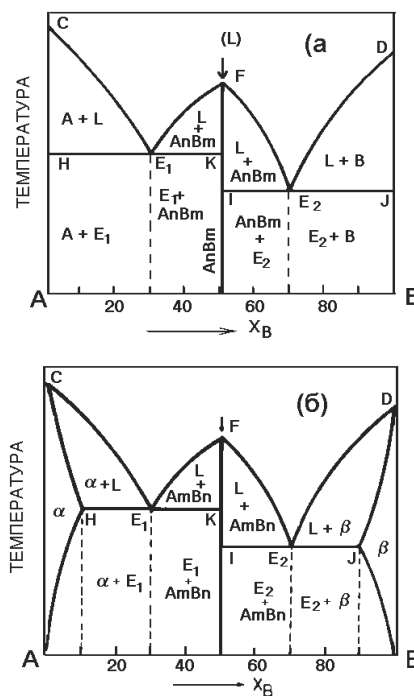
Интерметалните соединенија може да имаат точка на топење или да немаат забележителна точка на топење. Тогаш се јавуваат во два вида дијаграми на состојбата: (а) со точка на топење или дијаграми со отворен максимум, или (б) дијаграм со покриен максимум. Во дијаграмите со отворен максимум интерметалните соединенија или цврстите раствори преоѓаат на точката на топење директно во растопена состојба.

Некои интерметални соединенија немаат точка на топење. Пред да се растопат тие се разлагаат на други компоненти и растоп. Такви дијаграми на состојба во двокомпонентните системи се нарекуваат дијаграми со покриен максимум, т.е. што немаат точка на топење, туку температура на разлагање.

На сликата 4.16 се претставени два типа на дијаграми со интерметално соединение: (а) со откриен максимум со стехеометриски состав на соединението и нерастворливост на металните компоненти еден во друг и (б) со интерметално соединение со растворливост на компонентите во него и растворливост на двете компоненти во структурата на другата компонента, т.е. меѓусебно градат ограничени цврсти раствори.

Во еден двокомпонентен систем може да се јават повеќе интерметални соединенија со различни масени состави. Тие може да бидат со точки на топење, со или без растворливост на компонентите во нив, или на компонентите меѓусебно.

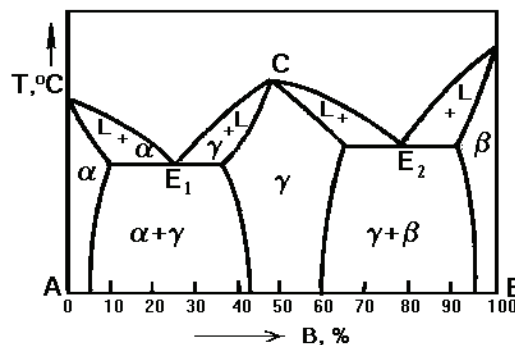
Кога интерметалното соединение се топи со точка на топење при одреден состав, тоа може да нема константен состав во цврста состојба. Тоа значи дека во неговата елементарна решетка се растворени елементите А и В, а соединението е интерметална фаза ( $\gamma$ ) со проширен концентрациски интервал на постоење. Таквите типови на дијаграми со откриен максимум и интерметална фаза може да се јават со растворливост на компонентите и образување ограничени



Слика 4.16 Дијаграми со интерметални соединенија со константен состав (а) и меѓусебна ограничена растворливост на компонентите (б)

цврсти раствори или без растворливост. На сликата 4.18 е претставен дијаграм со ограничена меѓусебна растворливост на компонентите и на компонентите во интерметалното соединение во цврста состојба.

Дијаграмите на состојба со интерметални соединенија или интерметални фази, ако се анализираат детално, ќе се забележи дека тие се составени од два двокомпонентни дијаграма. Едниот дијаграм е од вид  $A - A_mB_n$ , а другиот, на другата страна од интерметалното соединение, е  $A_mB_n - B$  дијаграмот. Соединението  $A_mB_n$  е заедничка компонента на двата дијаграма. Затоа овде нема детално да се разгледува рамнотежата и микроструктурата при ладење, зашто е принципиелно еднаква со досега разгледуваните случаи со нерастворливост и ограничена растворливост на компонентите во цврста состојба.



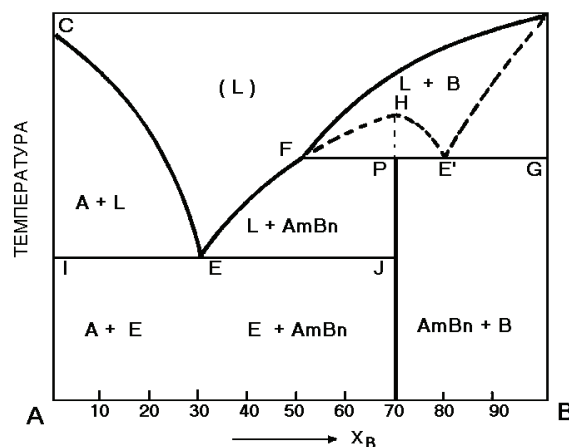
Слика 4. 17. Дијаграм на состојбата со интер-метална фаза и цврсти раствори на компонентите.

#### 4.4.8. ДИЈАГРАМ СО ИНТЕРМЕТАЛНО СОЕДИНЕНИЕ СО ПОКРИЕН МАКСИМУМ

Овој тип дијаграм спаѓа во дијаграми со перитектичка реакција. Разликата од претходно разгледаниот дијаграм со перитектичка реакција е во тоа, што како продукт на реакцијата се јавува интерметално соединение, што може да има константен или проширен состав (цврст раствор на интерметално соединение). Бидејќи соединението не преоѓа директно во течна состојба, туку се распаѓа на растоп и кристали од друга структура и состав, се нарекува со покриен максимум (без точка на топење). Типичен пример е претставен на сликата 4.18.

Бидејќи во другите области на дијаграмот тој е еднаков со претходно разгледуваните дијаграми без соединение, овде се даваат само карактеристиките на овој дијаграм.

Нека биде разгледан делот од дијаграмот во концентрациската област меѓу F и G. Ако се разгледува легурата со состав 70%B и 30%A, која е во растопена состојба и полска се лади, кристализацијата ќе се одвива на следниот начин: Откако ќе се постигне ликвидус линијата, во растопот (L) се издвојуваат кристали на чиста компонента B. Со натамошно ладење се зголемува количината на издвоени кристали B (согласно правилото на лостови). За секоја температура во тој интервал до линијата F-P-G се зголемува количината на B кристали во смесата растоп+B кристали. Составот на растопот ја намалува концентрацијата на B, а ја зголемува A, сè до точката F на дијаграмот. Линија F-P-G е перитектичка, а под таа линија не постои растопот. На линијата F-P-G во рамнотежа се: растопот со состав



Слика 4.18. Двокомпонентен дијаграм на состојба со покриен максимум на интерметално соединение.

во точка F, цврстите кристали на компонентата B и цврсти кристали на интерметалното соединение  $A_mB_n$ . Во тоа соединение m може да биде 1, 2, 3 итн, а n исто така 1, 2, 3 итн. и укажува колку атоми учествуваат во градбата на тоа интерметално соединение. Раствот кој имал состав 70%B и 30%A (точка P) на перитектичката температура се кристализира целосно во интерметално соединение  $A_mB_n$ . Тоа значи дека таа смеса соодветствува на стехеометрискиот состав на интерметалното соединение, а реактантите: растоп со состав F и 100%-ни кристали на B имаат стехеометриска количина. Реакцијата на образување (при ладење) е:



Легури од овој вид дијаграм, што се во концентрацискиот интервал од F до G и се лево или десно од составот на перитектичката точка P, немаат состав што соодветствува со стехеометрискиот состав на соединението. Под таа температура мора да остане вишокот од реактантите. Затоа, под перитектичката температура се јавуваат двофазни области, со соодветниот вишок на реактантот и интерметалното соединение.

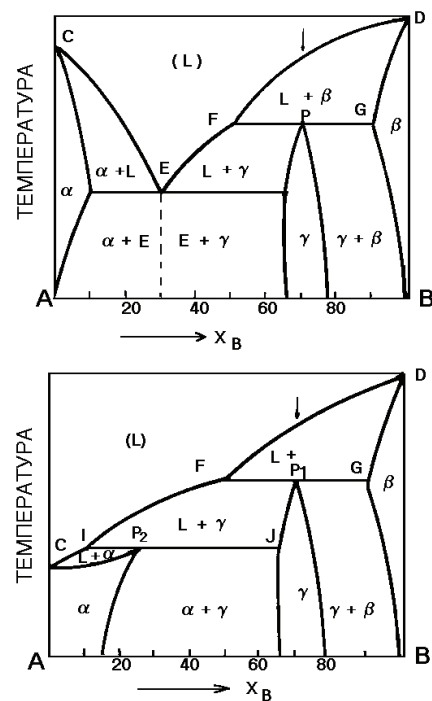
Доколку смесата има состав што лежи лево од P, а десно од G, ќе се потроши на перитектичката температура целата количина на кристалите B и соодветната стехеометриска количина на растоп. Вишок реактант растоп ќе остане и под перитектичката температура. Ако легурата е со состав десно од P до чист метал, тогаш е вишок метал B, па под перитектичката температура ќе остане вишокот B, кој не влегол во градбата на соединението.

При мешање на два чисти цврсти метала A и B и нивно загревање од кој бил сооднос, тие ќе реагираат меѓусебно и ќе создадат интерметално соединение, а зависно од местото на легурата, лево или десно до стехеометрискиот состав на соединението, ќе остане вишокот од едната компонента. Образованото интерметално соединение (има константен состав), кога ќе се најде на перитектичка температура секогаш ќе се распадне на растоп од состав G и чисти B кристали.

На овој начин, како што беше прикажано и кај евтектичката и перитектичката реакција, се одвиваат сите реакции во двокомпонентните дијаграми, само што разликата во овој тип е што се образува интерметално соединение, а не цврст раствор.

Во другите области на концентрација на легурите, кристализацијата од растоп или реакциите при смешување на два чисти метала во соодветна смеса, ќе се однесуваат како и во опишаните начини за другите типови двокомпонентни дијаграми.

Во некои легури, во интерметалното соединение може да се раствораат компонентите и да градат интерметална фаза, или чистите метали да се раствораат меѓусебно и да градат цврсти раствори со ограничена растворливост. Примери на такви дијаграми се претставени на сликата 4.19.



Слика 4.19 Дијаграми со интерметални фази образувани со перитектичка реакција.

#### 4.4.9. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ СО ЕВТЕКТОИДНА РЕАКЦИЈА

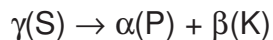
Евтектоидна реакција, е реакција на разлагање на едно соединение или цврст раствор на две цврсти фази при ладење, или од две цврсти фази образување една високотемпературно стабилна цврста фаза, при загревање.

Типични дијаграми со евтектоидна реакција се претставени на сликата 4.20.

Продуктот на реакцијата се нарекува евтектоид, а температурата на која се одвива реакцијата се нарекува **евтектоидна температура**.

Дијаграмот горе на сликата 4.20 е со евтектоидно распаѓање на цврст раствор на два цврсти раствора.

Евтектоидната реакција принципиелно може да се запише:



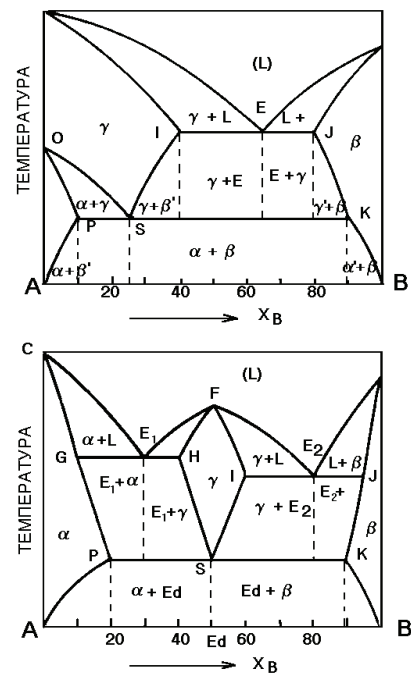
Дијаграм со распаѓање на интерметално соединение со растворливост на компонентите во него на два цврсти раствора ( $\alpha$  и  $\beta$ ) е претставен со дијаграмот на слика 4.21 долу.

Во основа, сè што беше кажано за другите видови реакции во двокомпонентните дијаграми ќе важи и за евтектоидната реакција, со напомена дека таа се одвива во цврста состојба (без присуство на течен растоп). Продуктот и реактантите се цврсти фази што не може да се деформираат лесно како течната фаза, па затоа само механизмите на растење на фазите се различни и придружени со додатни особености, поради отпорот што го даваат цврстите фази при растење на кристалите.

Горе кажаното е основа на термичката обработка на металите и легурите и промената на механичките особини на легурите. Зависно од условите, особено од брзината на снижување на температурата во дијаграмот, не можат да се одвиваат рамнотежно сите реакции и претворби на кристалната структура на компонентите, па се добиваат метастабилни структури. Тие структури понатаму се добиваат во поинакви услови, па затоа ги менуваат структурата и формата на кристалите, во однос на рамнотежната. Затоа се добиваат сосема поинакви механички особини во нерамнотежно ладените легури.

Во овој вид дијаграми промените се третираат во време што мора да биде рамнотежно. Бидејќи се одвиваат во цврста состојба, брзината на нивното одвивање е зависна од дифузијата на одделните елементи низ цврстите фази. Ако не е овозможено доволно време за рамнотежно одвивање на евтектоидните реакции, се добиваат нерамнотежни структури, со сосем поинакви особини од рамнотежните. Подетално за дифузијата и особините на нерамнотежните структури на претворбите во цврста состојба ќе биде објаснето во темата 6.

Типичниот дијаграм со евтектоидна реакција со цврст раствор е во системот Fe-C, кој најмногу се користи во практиката, и е основа на челиците и на сивите ливови. Затоа, тој систем ќе биде посебно објаснет и преку него ќе се даде претстава за двокомпонентните дијаграми со евтектоидна реакција.

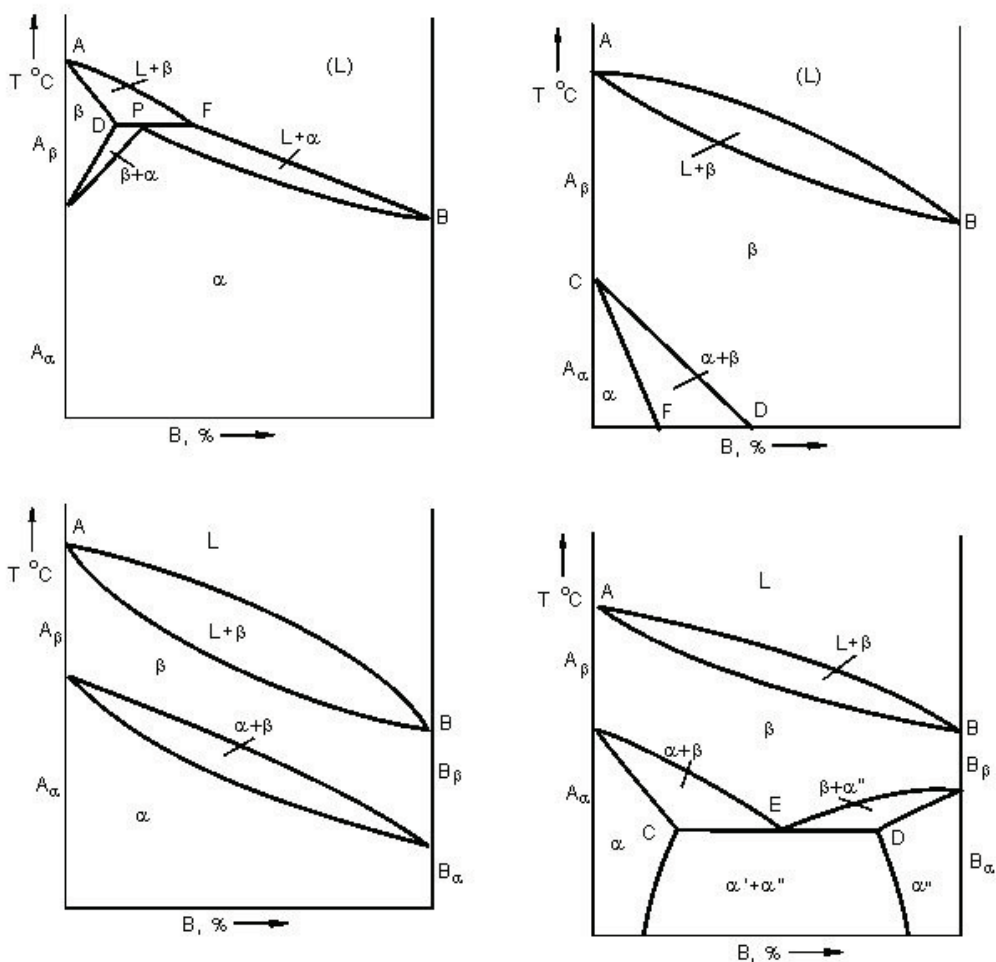


Слика 4.20 Дијаграми со евтектоидна реакција

#### 4.4.10. ДРУГИ ТИПОВИ БИНЕРНИ ДИЈАГРАМИ НА СОСТОЈБА



Зависно од тоа дали компонентите во двокомпонентен дијаграм имаат полиморфизам, тие ќе имаат посебни типови дијаграми. При полиморфизните типови на дијаграми се јавуваат случаи само едниот метал да има полиморфија (алотропски модификации) или да имаат двата. Затоа може да се јават многубројни поттипови, што е честа појава меѓу металите од периодниот систем на елементите. Како илустрација, на сликата 4.21 без навлегување во подробности се претставени некои типови посложени дијаграми на состојба, каде што се појавуваат повеќе реакции и видови на градба на цврстите фази во легурите.



Слика 4.21 Поттипови на дијаграми со алотропски модификации на чистите елементи и цврсти раствори.

#### 4.5. ДВОКОМПОНЕНТЕН ДИЈАГРАМ Fe-Fe<sub>3</sub>C

Фазниот двокомпонентен дијаграм на состојбата на системот Fe-C е претставен на сликата 4.22. Системот најчесто се претставува до делот на образување карбид на железото (Fe<sub>3</sub>C) -цементит.

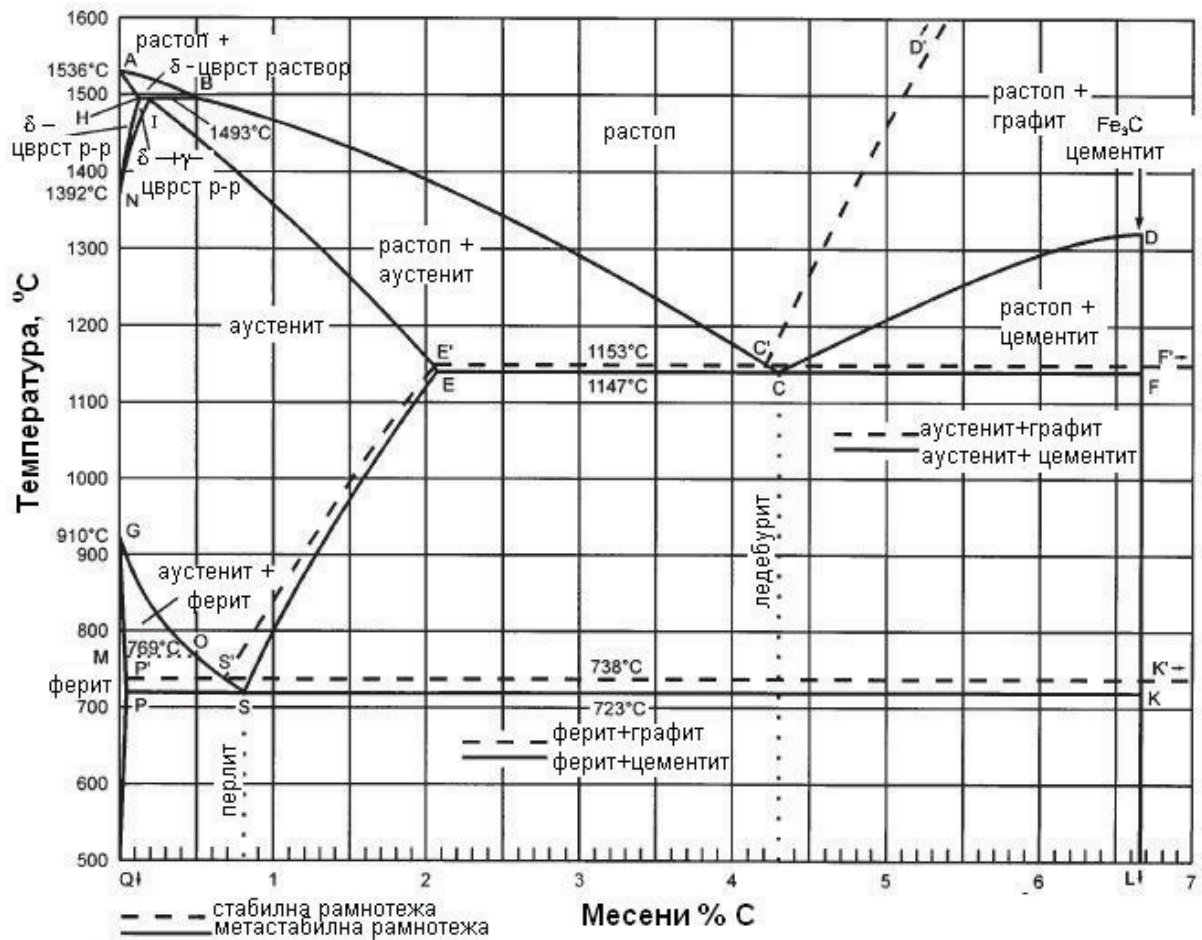
Дијаграмот на состојбата е од сложен тип, со евтектоидната реакција и евтектичка реакција. По евтектоидната реакција цврстиот раствор со површинска центрирана кубна структура ( $\gamma$ -аустенит) се распаѓа на цврст раствор со волуменски центрирана кубна структура ( $\alpha$ -ферит) и соединение Fe<sub>3</sub>C (цементит).



Железото е метал што има три alotропски модификации и структури. Тоа се:  $\alpha$ -Fe (ВЦК) до  $910^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$ -Fe (ПЦК) од  $910^{\circ}\text{C}$  до  $1392^{\circ}\text{C}$  и  $\delta$ -Fe (ВЦК) од  $1392^{\circ}\text{C}$  до  $1536^{\circ}\text{C}$ .

Во трите alotропски структури може да се раствори одредена количина на јаглерод, при што се образуваат три интерстициски цврсти раствори и тоа:

- во  $\alpha$ -Fe до  $0,025\%C$ , на  $727^{\circ}\text{C}$  и се нарекува  $\alpha$ -ферит;
- во  $\gamma$ -Fe до  $2,14\%C$ , на  $1147^{\circ}\text{C}$  во метастабилен и до  $2,08\%C$  на  $1153^{\circ}\text{C}$  во стабилен систем и се нарекува  $\gamma$ -аустенит;
- во  $\delta$ -Fe до  $0,1\%C$  на температура од  $1493^{\circ}\text{C}$  и се нарекува  $\delta$ -ферит.



Слика 4.22 Дијаграм на состојбата на системот Fe-C. Со испрекинати линии е претставена стабилната рамнотежа во системот, а со полни линии - метастабилната.

Зависно од брзината на ладење и од примесите што ги содржи системот, практично тој се јавува во две состојби - метастабилна и стабилна рамнотежа. Метастабилната рамнотежа се јавува при практични бавни брзини на ладење, какви што се најчесто се постигаат во практиката на ладење на челик и ладење на топлодеформираните челици, додека по стабилниот систем претежно кристализираат евтектичките легури при бавно ладење во изолирани калапи.

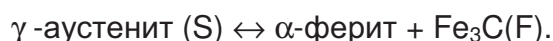
Евтектичката реакција се одвива на температура од  $1147^{\circ}\text{C}$  во метастабилен систем и на  $1153^{\circ}\text{C}$  во стабилна рамнотежа.

Реакцијата се одвива по следно:



Евтектичката смеса меѓу аустенитот и цементитот се нарекува **ледебурит**.

Евтектоидната реакција се одвива на температура од 727°C:



Смесата на продуктите на реакцијата ( $\alpha$ -ферит +  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) се нарекува перлит.

До 2,14%С, легурите меѓу Fe-C се нарекуваат челик. Тој има специфични механички особини, кои се диктирани од составот на легурата и формата и од распоредот на фазите што се образуваат.

Легурите од фазниот дијаграм Fe-C се делат на:

- подевтектоидни до 0,78%С,
- евтектоидни со околу 0,7 до 0,85%С и
- надевтектоидни над 0,85%С.

Подевтектоидните легури (челици) се деформабилни и од нив се изработуваат лимови за ладна деформација, додека евтектоидните и надевтектоидните се со голема јачина и деформацијата се врши на повисоки температури, на кои е еднофазна  $\gamma$ -аустенитна структура, а служат за изработка на алати и на појаки челични делови.

Легурите со над 2,14%С до практично 5%С се нарекуваат железни ливови. Железните ливови се крти и не може да се коваат.

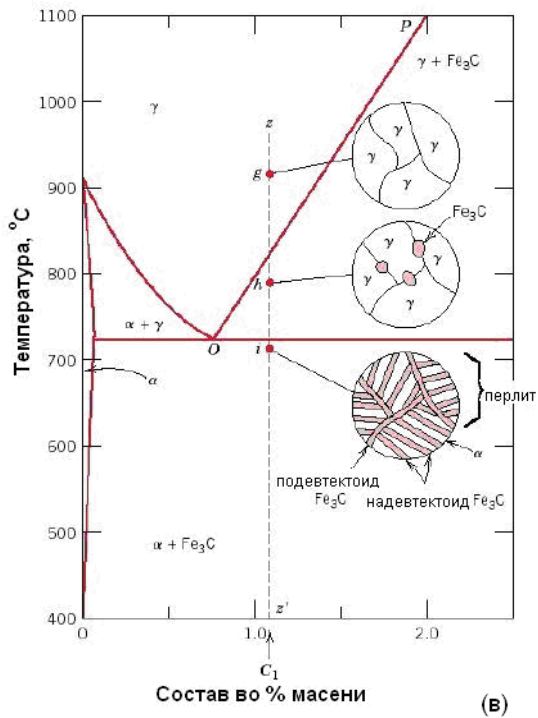
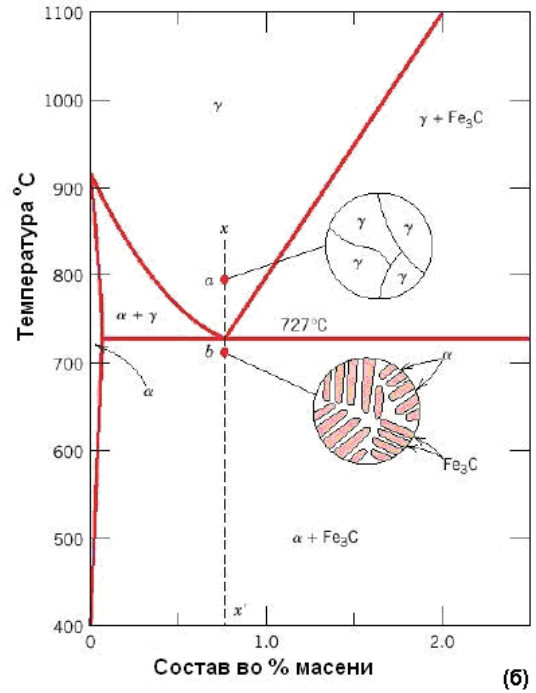
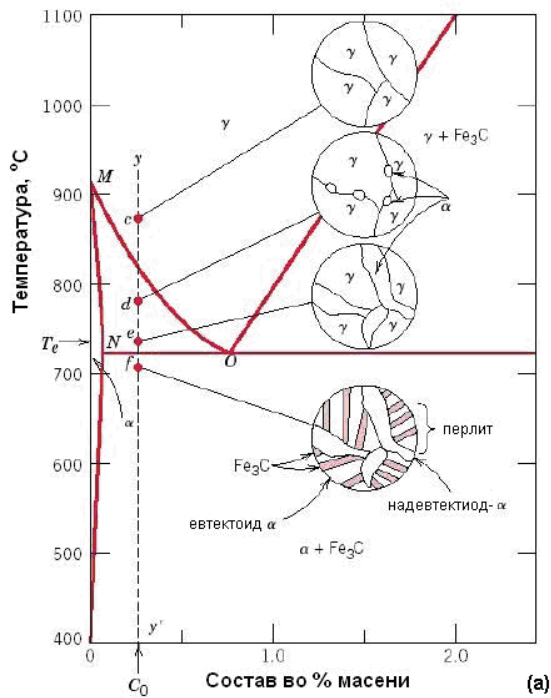
Поради важноста во практиката, на слика 4.23 ќе бидат претставени микроструктурите што се образуваат при метастабилно ладење на легурите во подевтектоидните, евтектоидните и надевтектоидните легури.

Како што се гледа од сликата 4.23, при формирање на микроструктурата на подевтектоидните, евтектоидните и надевтектоидните легури од метастабилниот систем се јавуваат разлики во микроструктурата. Кај подевтектоидните легури е секогаш присутен ферит. Тој има оформени зрна (на металографски снимки со нагрисана микроструктура се гледаат како светли полиња). Феритот се образувал со издвојување од аустенитот на температури повисоки од евтектоидната. Покрај феритот, во микроструктурата секогаш има перлит. На собна температура подевтектоидните легури имаат ферит и перлит. Легури со поголема концентрација на јаглород, кон евтектоидниот состав во дијаграмот, имаат повеќе перлит во микроструктурата.

Перлитот, при метастабилно ладење, има карактеристична микроструктура поради начинот на формирање. Перлитот е евтектоидна смеса од фазата  $\alpha$ -ферит и цементит. При одвивање на евтектоидната реакција  $\alpha$ -феритот и цементитот растат заедно во форма на колонии, составени од плочки од цементит и плочки од ферит, сраснати една со друга (види ја сликата 4.23 б). Ваквата форма на перлитот се должи на дифузијата на јаглородот од аустенитот (подетално во темата 6 за евтектоидната претворба). Овде само накусо: јаглородот дифундира лево и десно во аустенитот и формира нуклеуси на цементит, на границите на зрното. Меѓу зрната на новообразуваните цементитни плочи останува простор од осиромашен аустенит, а кога ќе остане концентрација околу 0,025%С, се формира волуменска центрирана решетка наместо површински центрираната. Тоа се плочките на  $\alpha$ -ферит меѓу цементитните плочки.

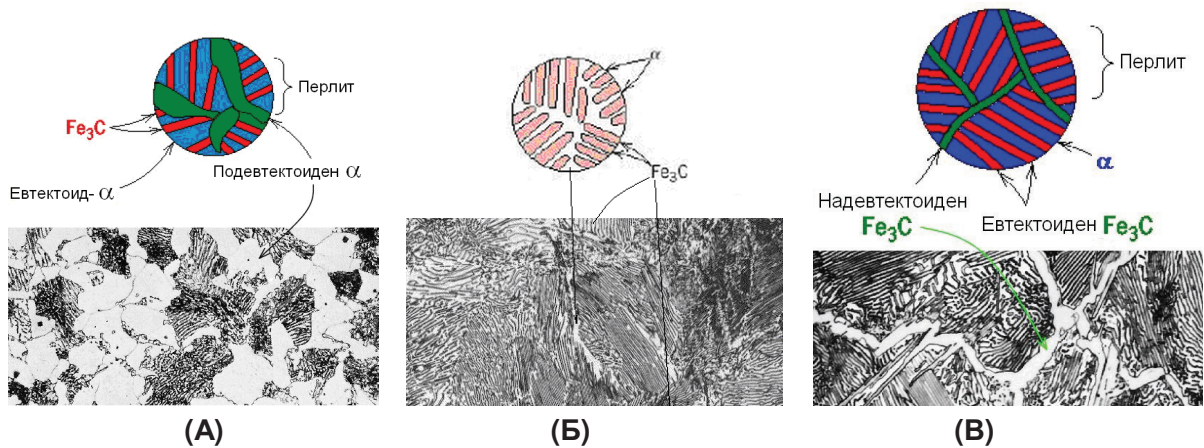
Во евтектоидните легури од дијаграмот Fe-Fe<sub>3</sub>C има само перлит, а во надевтектоидните има перлит и секундарен цементит. Секундарниот цементит се формирал во надевтектоидната температура со издвојување на вишокот на јаглородот од аустенитот. Во надевтектоидните температури и надевтектоиден состав се формира цементит во форма на обвивки околу аустенитните зрна.

Затворените аустенитни зрна потоа се трансформираат по евтектоидната реакција во перлит.



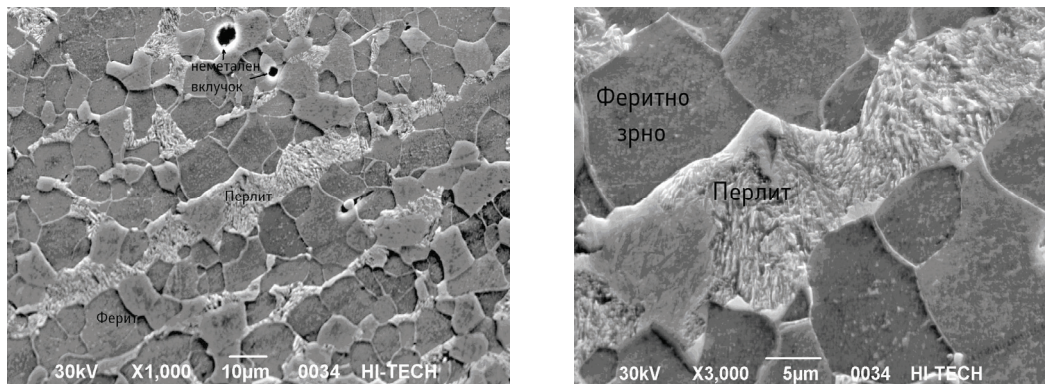
Слика 4.23 Формата на структурата на собна температура и начинот на образување на микроструктурата при ладење на подевтектоидни (а), евтектоидни (б) и надевтектоидни (в) челици.





Слика 4.24 Микроструктурата на подевтектоиден (а), евтектоиден (б) и надевтектоиден (в) челик.

Микроструктурата на челиците се испитува со металографски микроскопи, на кои може да се гледа микроструктурата на легурите. Уште појасни слики за микроструктурата на легурите, во релјефна форма, се овозможуваат со користење на растер електронски микроскоп. Слики на микроструктурата за подевтектоидни, евтектоидни и надевтектоидни челици со металографски микроскоп се претставени, покрај цртежи на микроструктурата и реални микрофотографии, на сликата 4. 24 и сликата 4.25.



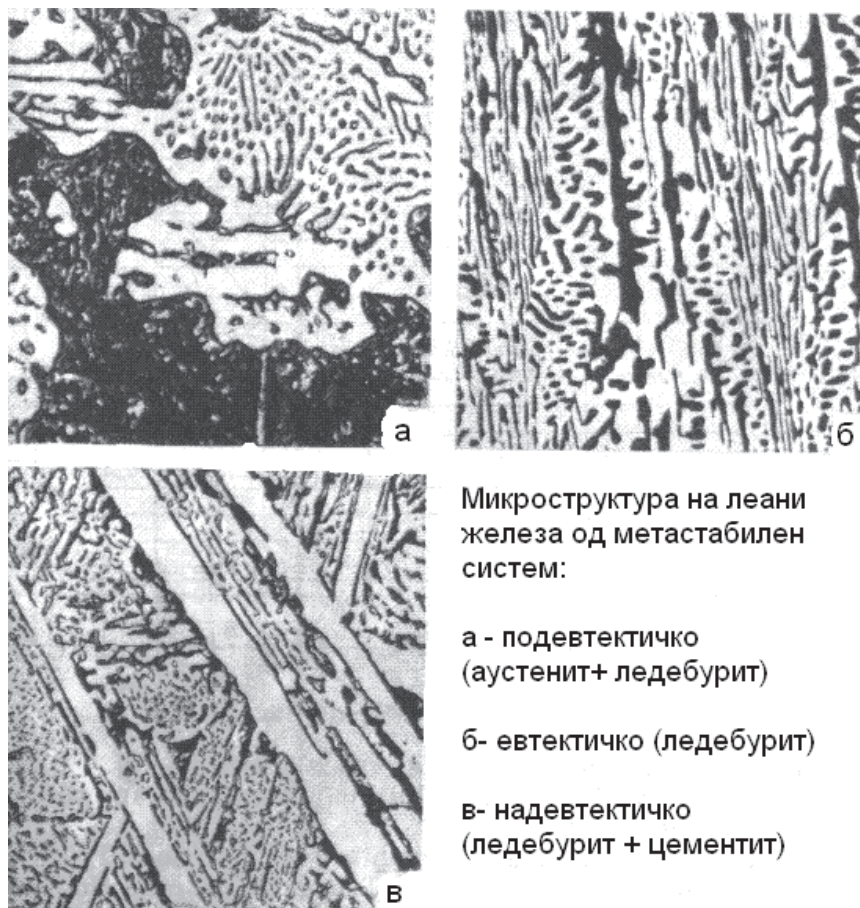
Слика 4.25 Микроструктурата на топлдеформиран и изладен подевтектоиден челик. Видливи полигонални зрна на  $\alpha$ -ферит и перлитни колонии, со тесни и недооформени ламели на цементит. Истото место е снимено со две различни зголемувања.

Микроструктурата на подевтектоидни челици, направени со електронски растер микроскоп од авторот на учебников, за илустрација се претставени на сликата 4.25, каде што јасно се гледаат феритните зрна и колонии од перлитот, кој поради брзото ладење нема изградено убаво видливи плочки на цементитот.

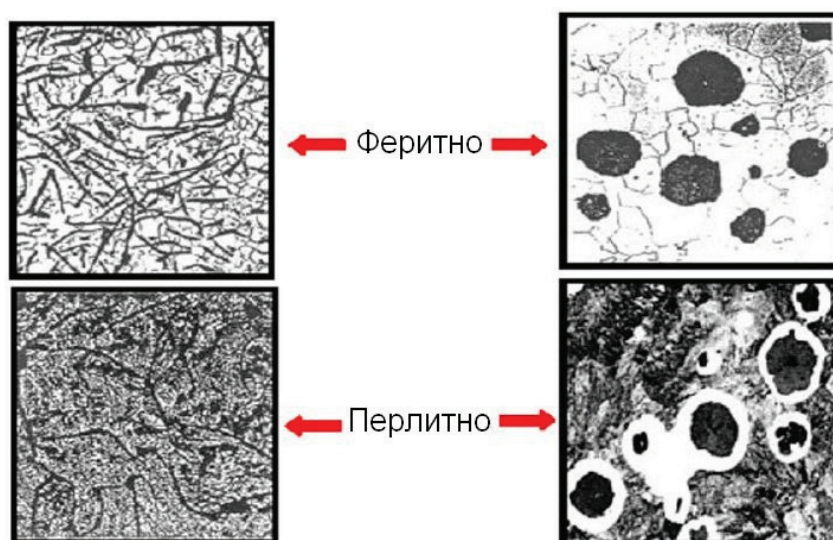
#### 4.5.1. ЖЕЛЕЗНИ ЛИВОВИ

Железните ливови (се нарекуваат уште сиви ливови) се крти и при удар се кршат, без деформација. Тие претставуваат легури со состав под евтектичката линија. Затоа основна фаза во евтектичките легури е ледебуритот. Микроструктурата на леаните железа е различна, зависно од тоа дали се кристализирани по метастабилен или по стабилен систем.

Кај метастабилниот систем целиот јаглерод е во форма на цементит, па затоа сјајот на металот при кршење му е светло сив, типичен за металите. Таквото железо од стабилниот систем се нарекуваат **светло железо**. Светлите железа може да се од подевтктички, евтектички и надевтектички состав, а нивните карактеристични микроструктури се претставени на сликата 4.26.



Слика 4.26 Микроструктури во евтектички сиви ливови.



Слика 4.27 Микроструктури на графит во сивите ливови, ламеларен - леви слики, топчест (нодуларен) слики десно.

Леано железо со кристализација по стабилен систем се нарекува **сиво железо**. Откриената површина на сивите ливови е темносива, а таа боја е предизвикана од графитот кој се образува во структурата, кога железно-јаглеродните легури многу бавно се ладат. Во структурите што се еднакви со стабилен систем, се вметнати кристалите на графитот, што се образува кристализација од растопот или со издвојување од аустенитот, во подевтктичките температури. Основаната структура на сивите ливови може да биде: феритна, перлитна и ферито-перлитна. Графитот во таквите структури може да биде во ламеларна и топчеста форма. На сликата 4.26 се претставени некои структури на сив лив со различна форма на графитот и на основната структура (феритна и перлитна) Во перлитната структура со топчест графит, околу графитот се образува и ферит (види слика 4.27 долу десно).

#### ПРАШАЊА ЗА САМОКОНТРОЛА

- 1) Дали свативте кој е термодинамички услов за фазна рамнотежа?
- 2) Како гласи правилото на фази и што одредува?
- 3) Што се нанесува во двокомпонентните дијаграми на состојбата?
- 4) Кој е основен метод за приближно определување на точките на кристализација?
- 5) Можете ли да скицирате дијаграм со потполна растворливост на компонентите во течна и цврста состојба?
- 6) Што е ликвидус и солидус?
- 7) Дали може да неведете барем три рамнотежни реакции што се одвиваат во двокомпонентните системи?
- 8) Какви типови на дијаграми на состојба постојат во системот Fe-C и по што се разликуваат?
- 9) Што е перлит?
- 10) Што е ледебурит?



## 5. ТЕМА

### ТРИКОМПОНЕНТНИ ФАЗНИ ДИЈАГРАМИ

Преглед на содржини	Цел на учењето
<ul style="list-style-type: none"><li>• Вовед во состојбите во трикомпонентните системи;</li><li>• Графичко претставување на составот во трикомпонентните системи во концентрациски триаголник;</li><li>• Правило на лостови и тежиште за квантитативни пресметки во трикомпонентни системи;</li><li>• Видови на трикомпонентни системи;</li><li>• Претставување на фазниот состав од составот на легурата и температурата на системот;</li><li>• Процесот на кристализација во евтектички троен систем;</li><li>• Некои специфични типови трикомпонентни системи</li></ul>	<p>Наставниот материјал во оваа тема е концепиран така да ги оспособи учениците да ги реализираат целите на програмата, кои се:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Да ја познава формата на трикомпонентните дијаграми;</li><li>- да одредува состав на легура на трикомпонентна легура;</li><li>- да одредува температура на топење врз основа на дијаграми.</li></ul> <p><i>Материјалот за трикомпонентните системи е претставен во најелементарна форма, со цел да се добијат одделни сознанија за фазниот состав на трикомпонентните системи и нивната сложеност за претставување, затоа што четири параметарски систем треба да се прикаже во површина (на хартија) од кој сепак ќе може да се отчитува составот на легурите, нивниот фазен состав и др.</i></p> <p><i>Во претставување на составот на легурите е одбран најраспространетиот метод со нанесување составот во рамностран триаголник. Внимание е дадено на нанесување легури во трикомпонентен систем или читање на фазниот состав во изотермиските пресеци. Такви дијаграми се конструирани за многу тројни системи, кои се користат во екстрактивната металургија, при определување точка на топење на троските, или во производството на тројни легури, во леарниците.</i></p>

## 5. ТРИКОМПОНЕНТНИ ФАЗНИ ДИЈАГРАМИ

Металите може да градат легури, во коишто влегуваат три или повеќе елементи. Во трикомпонентните легури, зависно од составот и температурата, може да се појават различни состојби:

- металите да се раствораат едни во други во растопена состојба;
- да не се раствораат во цврста состојба и да кристализираат евтектички;
- да градат цврсти раствори или соединенија.

Дијаграмите што го покажуваат фазниот состав на легурата, при промена на температурата и составот од три компоненти, се нарекуваат трикомпонентни (тернерни) дијаграми на фазната состојба.

Фазната рамнотежа, која беше прикажана во 4. тема (фазна рамнотежа во двокомпонентни системи), потполно се однесува и на трикомпонентните системи. Затоа нема да се повторува веќе наученото. (Ама, тоа не значи да не се навратите и да го повторите поминатото од четвртата тема. Повторувањето е мајка на знаењето).

Легурите во системот се образуваат со реакции или со мешање на две компоненти, или сите три заедно. Сите реакции, што се јавуваат кај двокомпонентните дијаграми на состојбата, како што се монотектичка, евтектичка, перитектичка, евтектоидна и перитектоидна, се појавуваат и кај трикомпонентните дијаграми на состојбата. Бидејќи трикомпонентните дијаграми на состојбата ги претставуваат фазните рамнотежни состојби на кондензираните фази, т.е. подалеку од точката на вриење на елементите или фазите, кај нив како параметар што ја дефинира рамнотежата на фазите е температурата и составот на системот.

Притисокот има занемарливо влијание, бидејќи во отворени системи, како што се тие во практиката, парите на металите во близината на точката на топење се многу мали, па не влијаат на рамнотежата.

Врз основа на пресметката на степенот на слобода во фазното правило врз трикомпонентен систем, максимален број на фази што се во рамнотежа е 4. На некои температури и состав во рамнотежа може да бидат: растопот и три цврсти фази (чисти метали, цврсти раствори или интерметални соединенија).

Во трикомпонентен систем, која било еднофазна област може да има максимален број степени на слобода 3. Тоа значи дека истовремено може да се менуваат температурата и концентрацијата на двете компоненти, без да се промени фазниот состав на системот.

### 5.1. ПРЕТСТАВУВАЊЕ НА КОНЦЕНТРАЦИЈАТА НА КОМПОНЕНТИТЕ ВО ТРИКОМПОНЕНТНИ СИСТЕМИ

Практичен начин за претставување на составот на смесите во трикомпонентните системи во графичка форма е со рамностран триаголник (слика 5.1). Меѓутоа, триаголникот е површинска геометриска форма, а трикомпонентните системи имаат четири променливи (три компоненти и температура). Затоа претставувањето на фазната рамнотежа во трикомпонентните системи се врши на тој начин што концентрацијата се претставува на површина на триаголникот, а температурата на ордината на волуменски координатен систем.

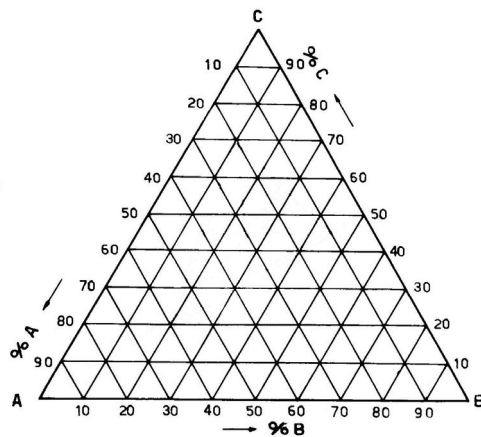
Во просторниот координатен систем, со рамностраниот триаголник се овозможува, со примена на правилата и теоријата на нацртната геометрија, да може да се нанесе влијанието на составот на трикомпонентните смеси и температурата

врз рамнотежата. Во просторниот координатен систем лесно се претставуваат фазните граници меѓу одделните еднофазни и повеќефазните области. Со проектирање на косите линии од просторниот систем на рамнина тие може да се добијат во вид на линија на рамната плошина на триаголникот. Од така проектирани линии, какви што најчесто се промените на ликвидус температурите на одделни трикомпонентни состави, може да се отчитуваат точките на ликвидус состојбата, т.е. целосно топење на легурата со одреден состав.

Како што се гледа од сликата 5.1, на одделните страни на триаголникот се нанесува концентрацијата на компонентите А, В и С во атомски или тежински проценти или удели.

Темињата на триаголникот ги претставуваат чистите компоненти А, В и С. На страните на триаголникот се нанесува промената на концентрацијата на едната компонента, а од спротивната страна е намалувањето на концентрацијата на другата компонента. Концентрацијата се претставува така што, ако се започне од темето означено со С, каде што има 0% А, концентрацијата се зголемува кон соседно теме до 100% А. Во темето со 100%А се претставува чистата компонента А, а 0%В. Од темето А кон темето В (страна на триаголникот А-В) се означува промената на концентрацијата на В во бинарната легура А-В. Во темето В е 100%В. На страната на триаголникот В-С се нанесува составот на двокомпонентни смеси В-С, од 100%В и 0%С до темето С, каде што е 100%С. Во темето С практично се затвора периметарското движење по страните на триаголникот, на којшто се претставуваат двокомпонентните состави меѓу одделните двокомпонентни дијаграми на состојбата.

Темињата А, В и С на триаголникот ги претставуваат чистите компоненти А, В и С, додека на страната А-В се нанесува промената на составот на двете компоненти А и В; на страната В-С се нанесува промената на составот меѓу компонентите В и С, а на страната С-А се претставува промената на составот на двокомпонентните легури меѓу А и С. Во внатрешноста на триаголникот се претставуваат трикомпонентните состави на системот. Секоја точка што лежи во триаголникот, надвор од страните на триаголникот, претставува состав на трикомпонентна смеса или легура.



Слика 5.1 Концентрациски триаголник, на кој се нанесува составот на трикомпонентни легури.

### 5.1.1. ОТЧИТУВАЊЕ НА ХЕМИСКИОТ СОСТАВ НА ЛЕГУРА ВО КОНЦЕНТРАЦИСКИ ТРИАГОЛНИК

Пример како се отчитува состав на тројна смеса е даден со точката М во концентрацискиот триаголник на сликата 5.2.

Составот на легурата ќе се отчитува на следниот начин:

- 1) Отчитување на количината на компонентата А во смесата. Во точката М се повлекува паралелна права со страната С-Д. Точката на пресек на таа права со страната С-А (точка l) дава состав %А. Во примерот тоа е 50%А.
- 2) Паралелно со спротивната страна на темето В се повлекува права со страната А-С низ точката М. На пресекот на таа права со страната А-В се отчитува составот на %В (точка f). На примерот тоа е 20%В.

3) Паралелно со спротивната страна на темето C, низ точката M се нанесува права, а на пресекот со страната B-C (точка h) се отчитува процентното учество на компонентата C во смесата. Во примерот тоа е 30% C.

На тој начин, по претходно извршените опишани операции, се одредува составот на смесата во точката M, а изнесува: 50% A, 20% B и 30% C.

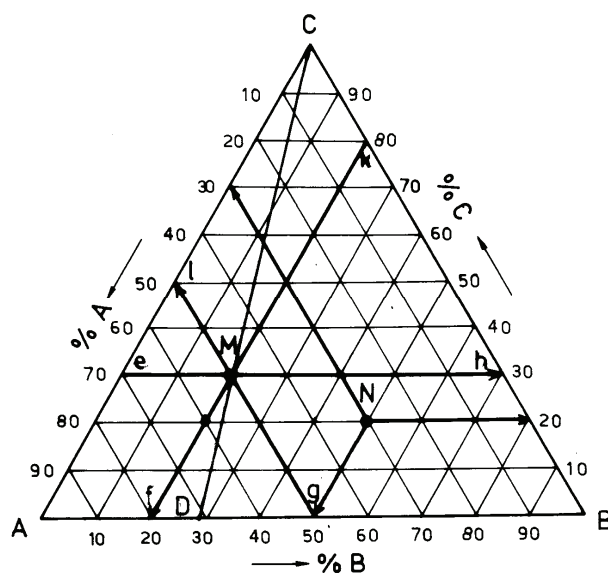
По добивање на извесна рутина во отчитување на трикомпонентните смеси, постапката може да се скуси, на тој начин што не треба да се повлекуваат прави низ дадената точка, туку само од дадената точка до страните, паралелни со страните и веднаш се отчитува составот на смесата.

Често пати при користење на трикомпонентните дијаграми во практика потребно е да се изведува обратен процес од претходниот, т.е. да се нанесе во дијаграмот точка со одреден состав. Тоа се прави на следниов начин: Нека е тоа легура N или смеса со состав 30% A, 50% B и 20% C. На страната на триаголникот, каде што е нанесена концентрацијата на A, ќе се нанесе точката со 30% A и низ неа ќе се повлече паралелна линија на страната што лежи на спротивно на темето A. Се обележува точката со 50% B на страната на триаголникот каде што се отчитува составот на B во трикомпонентниот систем и низ неа се повлекува права паралелна на страната A-C. Во точката во која се сечат двете повлечени прави се наоѓа составот на дадената трикомпонентна смеса. Третата компонента не треба да се нанесува, бидејќи таа мора да изнесува до 100% заедно со збирот на A и B. На тој начин е определено место на смесата N во концентрацискиот триаголник.

При претставувањето на трикомпонентните системи преку рамностран триаголник, произлегува лесно докажувањето на извесни теореми сврзани со трикомпонентните смеси:

- 1) Која било зададена права, паралелна со една од страните, пример со A-B, е геометриско место на точки на составите на легури или смеси, со иста содржина на третата компонента C, а со различен однос на A и B.
- 2) Правата која почнува од кое било теме од триаголникот претставува геометриско место на точки со состав што се карактеризира со константен однос на количините на другите две компоненти. Тој однос се определува како обратен однос на големините на отсечките, образувани на страната на тие две компоненти, со точката на пресек на повлечената права.

Овие две особини на рамностранниот триаголник се полезни при претставувањето на изоконцентрациските пресеци во трикомпонентните системи на состојбата.



Слика 5.2 Примери за отчитување на состав на трикомпонентните смеси.

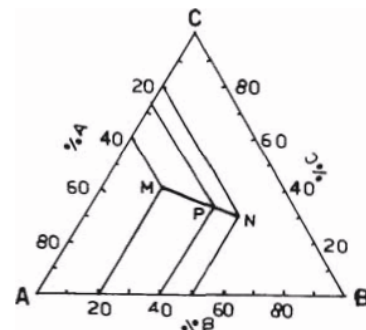
### 5.1.2. ПРАВИЛО НА ЛОСТОВИ И ПРИНЦИПОТ НА ТЕЖИШТЕ ВО КОНЦЕНТРАЦИСКИ ТРИАГОЛНИК

Може да се докаже дека ако од две различни трикомпонентни смеси или легури се добива смеса или легура, составот над добиената легура лежи на правата во триаголникот што ги поврзува двете појдовни смеси и тоа меѓу двете точки. Да се земе примерот за две легури или смеси дадени на сликата 5.3.

Смесата во точка М има состав: 40% А, 20%В и 40%С.

Смесата од точка N има состав: 20% А, 50%В и 30%С.

Смесата што се добива од овие две смеси, ако се измешаат тие во одреден однос, пример 10kg од М и 20kg од N, ќе се добие 30 kg смеса, која по својот состав мора да лежи на линијата М-N. Тоа нека биде докажано на конкретниот пример со пресметка.



Слика 5.3 Пример за примена на правилото на лостови во трикомпонентен систем.

Ако се измешаат двете легури, со состав М и N, ќе се добие трета легура P, во количина од 30 kg. Нејзиниот состав (P) се определува на следниов начин:

Количината на секоја од компонентите што се содржи во М и N се дели со масата на вкупната легура:

$$X_A = (10 \times 0,4 - 20 \times 0,2) / 30 = 0,27$$

$$X_B = (10 \times 0,2 - 20 \times 0,5) / 30 = 0,40$$

$$X_C = 100 - X_A - X_B = 0,33$$

и се добиваат масените удели на компонентите во легурата. Ако масените удели се помножат со 100, се добива процентен состав на смесата. Според тоа легурата P има состав: 27% А, 40%В и 30%С. Ако се нанесе добиената легура на триаголникот на слика 5.3, се гледа дека таа лежи на правата MN.

**Принципот на тежиште** важи во случај кога се мешаат три смеси од различен состав во кој било сооднос. Од трите смешани легури, со даден состав и количина, се добива смеса што лежи во тежиштето на триаголник што го формираат тие смеси. Принципот на тежиште при одредување на составот и количините на смешување на три легури, за да се добие нова легура со одреден состав, ќе биде објаснет преку примери.

Пример 1. Нека се дадени три легури М, N, и Q претставени на слика 5.4 во количини од 10 kg. Од концентрацискиот триаголник се гледа дека процентниот состав на поединечните легури е следен:

М .... 40%А, 20%В и 40%С

N .... 20%А, 50%В и 30%С

Q .... 50%А, 30%В и 20%С

Уделот на посебните компоненти во новата смеса е:

$$X = (4+2+5) / 30 = 0,3667$$

$$X_B = (2+5+3) / 30 = 0,3333$$

$$X_C = (4+3+2) / 30 = 0,3000$$

Ако новата легура P со горниот состав се нанесе на триаголникот, се гледа дека таа лежи во тежиштето на триаголникот MNO.

Ако се мешаат три смеси со различен состав, резултатната легура мора да лежи во внатрешноста на триаголникот, кој го зафаќаат трите легури, кога ќе се поврзат нивните точки во концентрацискиот триаголник.

Пример 2. Да се смешаат три легури М, N, Q, во однос 10:20:10 kg со состав даден во примерот 1, претставени на концентрацискиот триаголник на сликата 5.4.

Процентниот состав на легурата добиена од смешувањето од трите поединечни легури се :

$$m=100 \times 10/40; n=100 \times 20/40; q=100 \times 10/40;$$

$$m=25\%; n=50\%; q=25\%$$

количината на А што се наоѓа во поедините легури мора да е еднаква со количината на А во новодобиената легура. Добиевата легура има маса 40 kg.

$$A \text{ во } M \text{ е } 10 \times 0,4 = 4 \text{ kg}; A \text{ во } N \text{ е } 20 \times 0,2 = 4 \text{ kg} \text{ и } A \text{ во } Q \text{ е } 10 \times 0,5 = 5 \text{ kg}.$$

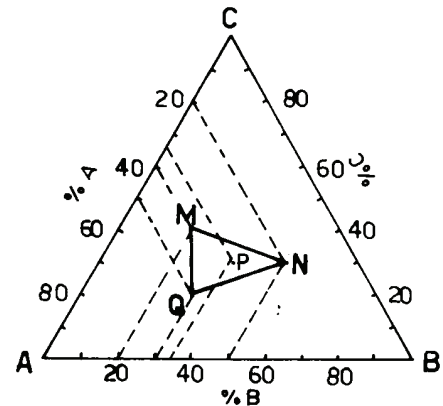
Уделот на А во смесата е

$$X_A = (4+4+5)/40 = 13/40 = 0,325 \text{ или во } \% \text{ помножено со } 100 \text{ е } 32,5\%A.$$

Ако се пресмета по истата постапка за В и С, се добива процентниот состав на легурата добиена со смешување на три легури во одреден сооднос.

Задача: За вежбање пресметајте го учеството на В и С во новата легура.

$$\text{За проверка } (X_B = 37,5, X_C = 30\%)$$



Слика 5.4 Пример за нанесување тежиште на состав на легура од три други смеси

### 5.1.3. ПРИМЕНА НА ПРАВИЛОТО НА ЛОСТОВИ И ТЕЖИШТЕ ПРИ ПРЕСМЕТКИ

Правилото на лостови може да се примени и на тернерни системи што образуваат тернерни цврсти раствори. Примената на правилото на лостови во трикомпонентните системи со цврсти раствори може да се објасни на примерот од сликата 5.5, при определување на количините на одделните видови цврсти раствори во тројна смеса од нив.

На концентрацискиот триаголник претставен е системот од металите А, В и С на температура, каде што во рамнотежа се трите цврсти раствори  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , нека е дадена една точка којашто лежи во триаголникот што го зафаќаат фазите  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , кога ќе се поврзат меѓу себе. Таа легура на сликата 3.5 е означена со Р и има состав: 30% А, 25%В и 45%С.

Фазите  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  ги имаат следните хемиски состави:

$$\alpha - 60\% A, 20\%B \text{ и } 20\% C$$

$$\beta - 10\% A, 45\%B \text{ и } 45\% C$$

$$\gamma - 20\%A, 10\%B \text{ и } 70\%C.$$

Задача е да се најде уделот што го имаат посебните фази, во легурата со состав Р.

За да се реши таа задача, се тргнува од претпоставка дека во таа точка е тежиштето на триаголникот, ако се обесат на точките  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  соодветните количини од фазите. Тоа значи дека трите фази во таа точка се во рамнотежа. Ако се повлечат прави, што тргнуваат од фазите  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  и што минуваат низ точката Р, се добиваат отсечките  $\alpha$ -j,  $\beta$ -h и  $\gamma$ -i.



За двофазните области на концентрацискиот триаголник, како беше потврдено погоре, важи правилото на лостови како и кај двокомпонентните легури, а количината на една фаза од дадената легура, составена од две фази, е обратно пропорционална на отсечката меѓу дадената легура и дадена фаза, исто како и кај двокомпонентните дијаграми.

Ако се примени горното правило, ќе се добие:

$X_{\alpha} = (P - j / \alpha - j) \times 100$  во %;  $X_{\beta} = (P - h / \beta - h) \times 100$  во %;  $X_{\gamma} = (P - i / \gamma - i) \times 100$  во %.

Ако се измерат прецизно во должински единици отсечките, се внесат во горните примери за  $X_{\alpha}$ ,  $X_{\beta}$ ,  $X_{\gamma}$  се добива:

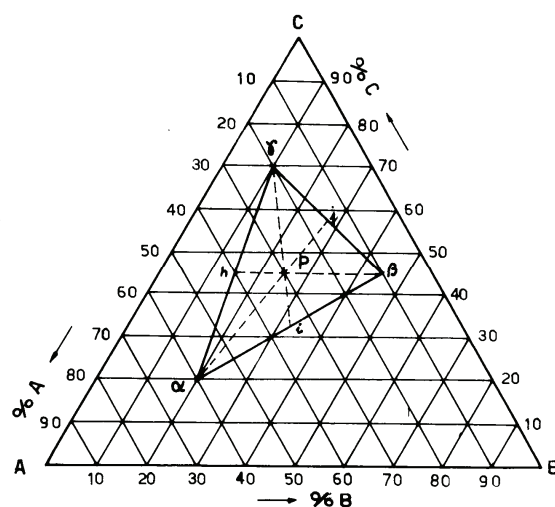
$$X_{\alpha} = 33,3\%$$

$$X_{\beta} = 33,7\%$$

$$X_{\gamma} = 33,0\%$$

$$\text{Вкупно } 100,0\%$$

Како што се гледа од пресметката, претпоставката одговара на вистинската состојба, т.е. вкупната легура е составена од соодветното учество на одделните три фази, што даваат 100%.



Слика 5.5 Пример на примена на правилото на лостови во една точка од концентрацискиот триаголник, во која се во рамнотежа три цврсти раствори.

## 5.4. ВИДОВИ НА ТРИКОМПОНЕНТНИ МЕТАЛНИ СИСТЕМИ

Во трикомпонентните системи компонентите може да бидат нерастворливи во цврста состојба и да не реагираат, да се образуваат цврсти раствори на основната структура на компонентите на системот со целосна супституција или со ограничено растворување (од интерстициски и супституциски тип), или да градат интерметални системи со покриен и откриен максимум (со точка на топење или со разлагање на растоп и друга цврста фаза). Бидејќи станува збор за системи со волуменски изглед, нивното прикажување на хартија е покомплицирано. Единствен начин за прикажување на трикомпонентните системи на рамнина е со проекција на изгледот од горе или со константни температурни пресеци, или со пресеци при одредени концентрации.

Овде ќе биде дадено како се претставуваат проекциите за определување на точка на топење на некој трикомпонентен систем со евтектикум и целосна растворливост на компонентите и изотермни пресеци на системи со ограничена растворливост и евтектички трикомпонентни реакции.

### 5.4.1. ПРОЕКЦИСКО ПРЕТСТАВУВАЊЕ НА ТРИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ СО НЕРАСТВОРЛИВОСТ ВО ТВРДА СОСТОЈБА И ТРИКОМПОНЕНТЕН ЕВТЕКТИКУМ

Трикомпонентните системи со нерастворливост на компонентите во тврда состојба, а целосна растворливост во течна, поради едноставноста и малиот број на фази што се јавуваат во него, дозволува да се претстави и преку проекција во рамнина на фазните граници од просторниот систем. Пример на претставување и начинот на кој тоа се изведува е претставен на сликата 5.6.

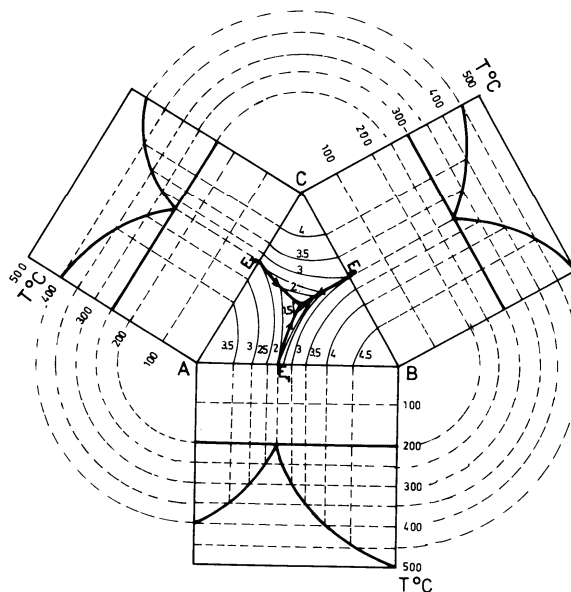
На страните на концентрацискиот триаголник се нанесени двокомпонентните системи, системот АВ на страната А-В, системот ВС на страната В-С и системот АС на страната А-С. На двокомпонентните дијаграми се прават изотермни пресеци (при константна температура пресек на дијаграмот), на пример за 100, 200, 250, 300, 350, 400, 450 и 500 °C, како што е направено на сликата 3.6, со испрекинати линии. Таму каде што изотермските пресеци ја сечат фазната граница во двокомпонентниот систем, се повлекува нормала на соодветната страна на концентрацискиот дијаграм. На тој начин се добива една точка од каде што треба да започне една изотерма на даден трикомпонентен систем.

Истото се прави на другиот двокомпонентен систем. Двете точки се сврзуваат, но така што кривата да соодветствува на пресекот на рамнината на фазната граница во просторниот трикомпонентен систем.

Во трикомпонентните дијаграми се јавуваат три двокомпонентни евтектички точки. Со растворање на трета компонента во бинарната евтектичка легура, двокомпонентните евтектички точки на секој конкретен двокомпонентен систем, ја снижува температурата на одвивање на евтектичката реакција, т.е. внатре во концентрацискиот триаголник евтектичките „двојни“ температури се пониски отколку тие во двојниот систем. Сите три „двојни“ евтектикуми се спојуваат во една точка, која се нарекува трикомпонентен евтектикум.

На температури што лежат под трикомпонентниот евтектикум, во рамнотежа се чистите кристали на А, В и С, стврднати во евтектичка тројна смеса. Тројниот евтектикум претставува најниска температура во еден трикомпонентен систем, до каде што може да постои растоп од трите компоненти. Во примерот на сликата 5.6, трикомпонентниот евтектикум се јавува под 150 °C и при состав 33% А, 33%В и 34%С, а двокомпонентните евтектикуми се јавуваат при 209°C и 60% А, во чистиот систем А-В; на 300°C и 50%В, во системот С-В; при 250 °C и 40% А во системот А-С.

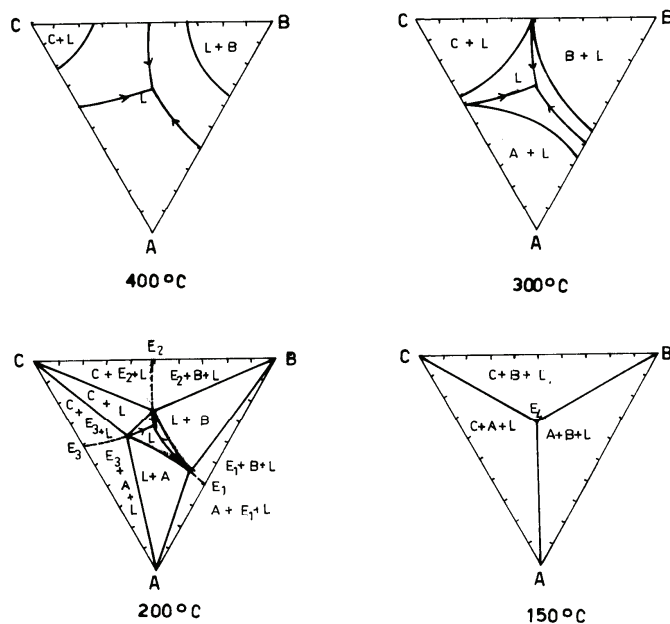
Линиите нанесени во концентрацискиот триаголник за системот АВС, претставуваат фазни граници до каде може да се лади легура со одреден состав без да има влијание на фазната рамнотежа (бројот на фазите) при ладење на легурата. Истовремено, тие ја претставуваат формата и изгледот на фазната граница течност//тврда фаза, што се јавува во вид на испакнати листови, кои се спојуваат преку двокомпонентните евтектички линии во трикомпонентниот систем.



Слика 5.6 Шематско претставување на изотермни проекции на трикомпонентен систем, во концентрациски триаголник. (Изотермите во концентрацискиот триаголник се намалени за 100 единици).

#### 5.4.2. ПРЕТСТАВУВАЊЕ СО ИЗОТЕРМНИ ПРЕСЕЦИ

Ако просторниот фазен дијаграм на состојбата на трикомпонентен систем се пресече при одредени температури, на концентрацискиот триаголник, може да се претстават фазната рамнотежа и фазните граници во трикомпонентниот систем за целото концентрациско подрачје. При изотермското сечење на просторниот систем, пресекот на рамнината (во случајот рамнината на концентрацискиот триаголник за одредена температура со рамнините на фазните граници), се добиваат линии кои ги претставуваат границите меѓу различните просторни области со различен број на фази, што се наоѓаат во рамнотежа во набљудуваниот простор. На тој начин во рамнина може да се претстави фазната рамнотежа и на трикомпонентниот систем. Овој вид на прикажување на трикомпонентните системи е многу практичен. Ако се знаат неколку пресеци при различни температури, може да се оценува целиот температурен и концентрациски интервал, во поглед на фазната состојба, на еден трикомпонентен систем.



Слика 5.7 Изотермски пресеци на трикомпонентниот систем од слика 5.6 при 400, 300, 200 и 150 °C, со фазната состојба при дадените температури.

На сликата 5.7 се дадени изотермни пресеци на трикомпонентниот систем од сликата 5.6, при температури 400, 300, 200 и 150 °C, каде што се прикажани фазите што се јавуваат во одредени температурно-концентрациски области и проекција на двокомпонентните евтектикуми.

Од сликата 5.7 се гледа дека при 400°C се јавуваат две фазни граници и тоа меѓу чистите кристали и течноста, како двофазна област и еднофазната област на растопот составен од трите компоненти; и втората граница меѓу областа каде што егзистираат C кристалите и течноста во двофазната област и монофазната област на растопот. Гледано од горе, на преостанатиот дел, кон пониските температури, се проектираат и линиите на двофазните евтектикуми од трикомпонентниот систем, означени на сликите со стрелки, што значи дека со опаѓање на температура тие се движат надолу.

При 300°C, се појавува веќе и третата граница, покрај двете споменати, а тоа е границата меѓу растопот и двофазната област на A-кристалите и течност. Под 400°C, а повисоко од 300°C, е точката на топење на компонентата A. Границата меѓу областа A-L и L, се соединува со линијата на двокомпонентниот евтектикум AC, што значи на 300 °C е двокомпонентниот евтектикум во чист двокомпонентен A-C систем.

Со опаѓање на температурата од 400 °C на 300 °C другите две двофазни области, спрема темињата на C и B, се зголемуваат, двофазната област се шири и зафаќа поголем простор од трикомпонентниот систем.

На температура од 200 °C се сечат и евтектичките линии од „двокомпонентните“ евтектикуми во тернерната концентрациска област. Областите зафатени од фазните површини меѓу C, пресекот со евтектичката линија и B, во рамнотежа се три фази: C-кристали, B-кристали и L-течноста со состав на пресекот на евтектичката линија 2. Слични трикомпонентни области се јавуваат и на страната A-B и A-C со соодветните цврсти фази и течност од состав на соодветниот двокомпонентен евтектикум. Во средината се гледа дека останува уште област на течност. Меѓу границата на течната фаза и чистите кристали на A, B и C се наоѓа двофазна област, каде што во рамнотежа се соодветните течности и чисти кристали на елементите. Линиите меѓу пресекот на двокомпонентните евтектикуми и чистите компоненти претставуваат граница меѓу двофазната и трофазната област.

150 °C е температурата на трикомпонентниот евтектикум (E<sub>4</sub>). На таа температура, преостаната течност исчезнува преку одвивање на евтектичка реакција на распаѓање на течната фаза на чисти цврсти фази на A, B и C. Производ на таквата реакција е евтектичка смеса на трите метали. Во евтектичката точка E<sub>4</sub> во рамнотежа се четири фази: A, B, C и L.

Под евтектичката температура на трикомпонентниот систем се наоѓаат цврсти кристали на A, B и C, во вид на комбинирана смеса од „двокомпонентен“ и трикомпонентен евтектикум. Металографската структура на трикомпонентните легури од евтектички состав е секогаш од монолитно градена смеса од само трикомпонентен евтектикум, додека при другите состави се јавуваат добро оформени кристали на чистата компонента, потоа „бинарна“ евтектичка смеса која ги опкружува чистите кристали, а меѓу „двокомпонентните“ евтектикуми се појавува нова област - трикомпонентниот евтектикум. Сиве овие компоненти на микроструктурата, поради посебниот начин на кристализација, се одликуваат на металографските снимки, па врз основа на нивната форма и сликата што ја манифестираат, може да се оценуваат процесот и условите на кристализација во тернерните легури.

### 5.4.3. ПРОСТОРЕН ТРИКОМПОНЕНТЕН СИСТЕМ

На сликата 5.8 е даден просторниот трикомпонентен систем ABC, од слика 5.6.

Базисот на просторниот систем е рамностраниот концентрациски триаголник, а на z-оската е нанесена температурата. Вакво претставување се добива кога ќе се подигнат, во вертикален правец, страните на двокомпонентните дијаграми, претставени на слика 5.6.

Точките T<sub>A</sub>, T<sub>B</sub> и T<sub>C</sub> се точки на топење, т.е. на кристализација на чистите метали. Волуменот на просторниот трикомпонентен дијаграм е исполнет со еднофазни (една област), двофазни (три) и трофазни (четири) области. Сите области имаат просторна геометриска форма со нерамни гранични површини.

Секој од двокомпонентните дијаграми има евтектичка точка (означени во дијаграмот со E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub> и E<sub>3</sub> заради разликување), чија температура се намалува кога се додава третата компонента. Овие, т.н. „двојни трикомпонентни евтектикуми“ се соединуваат во една точка, со состав и температура, со најниско можно постоење на растоп, што го претставува трикомпонентниот евтектикум.

Површината на ликвидусот е површина на двофазна рамнотежа и се состои од три слични по форма лепезести површини. Секоја од овие површини од страните е

ограничена со двојните ликвидусни линии, кои со промената на температура се површини. Овие површини претставуваат точки на состав и температура при коишто почнува кристализацијата на компонентите, зависно од тоа на која страна од чистите компоненти се наоѓа соодветната точка.

Линиите  $E_1E_4$ ,  $E_2E_4$  и  $E_3E_4$ , кои поаѓаат од „двокомпонентните“ евтектикуми, истовремено им припаѓаат на две ликвидус рамнини што се сечат. Тие ги изразуваат температурата и составот при кои во рамнотежа се двете соседни компоненти со течната фаза. На пример, меѓу металите В и С се наоѓа линијата  $E_2E_4$ , а тоа значи дека кристалите на В и С се наоѓаат во рамнотежа со составот на течноста, кој лежи по линијата  $E_2E_4$ .

Меѓу ликвидус површината и чистите компоненти се наоѓаат гранични површини. Под тие површини е соодветна двофазна област од растоп и кристали од соодветната компонента на триаголникот. Овие двофазни области завршуваат во точка во трикомпонентниот евтектикум. Тоа значи дека составот на растопот се менува со збогатување со трите компоненти до трикомпонентниот евтектикум.

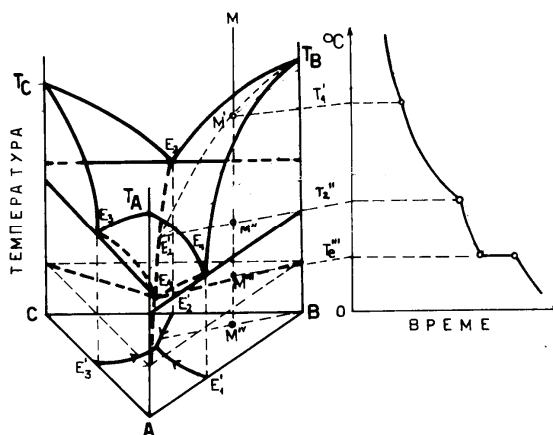
## 5.5. ПРОЦЕС НА КРИСТАЛИЗАЦИЈА

Процесот на кристализација на легура или состав од трикомпонентниот систем, ќе биде објаснет на примерот на ладење на смеса од трите компоненти со состав М, означена со вертикала на просторниот дијаграм на сликата 5.8. Процесот на кристализација може да се следи преку кривите на ладење.

Ако се лади легурата М, во пресекот со ликвидус површината, во точката М', почнува издвојување на кристали од компонентата В. На кривата на ладење на легурата се јавува промена на брзината на ладење под таа температура. Продорот на површината на ликвидусот, се случува на температура меѓу 400 и 450 °С.

Во двофазната област, при секоја температура, во рамнотежа се кристали на В и течната фаза, чиј состав се менува по испрекинатата линија што започнува од темето  $T_B$  на слика 5.8. Испрекинатата линија укажува дека рамнотежата во двофазната област може да биде само со состави што лежат на таа линија и чистата компонента В. Во двофазната област количината на кристалите В и течноста се менува со ладењето, а количината и односот на фазите за која било температура може да се определи според правилото на лостови. Составот на растопот (испрекинатата линија) со ладење се соединува со соодветниот двокомпонентен евтектикум, па понатаму составот на растопот се определува од двојниот евтектикум. На кривата на ладење се јавува нова промена на брзината на ладење (точка  $T_2$ ). Под таа температура до тројната евтектичка точка е трофазна област на В кристали, евтектикум (составен од ВС компоненти) и трикомпонентен растоп.

По постигнување на температура на трикомпонентниот евтектикум (точка  $E_4$ ), температурата останува константна ( $T_3$ ) додека не се искристализира целиот преостанат растоп во трикомпонентен евтектикум. Тројната евтектичка температура во дијаграмот е исцртана со испрекинати линии - изотермен триаголник.



Слика 5.8 Кристализација на легура М во трикомпонентниот систем и нејзина крива на ладење



Трикомпонентниот евтектикум е составен од трите компоненти. На таа температура во рамнотежа се: В кристали, двокомпонентен ВС евтектикум, трикомпонентен евтектикум ABC и растоп. Откако ќе исчезне растопот, под температура на трикомпонентниот евтектикум до собна, составот на легурата е трофазен - примарни кристали В, двокомпонентен ВС евтектикум и трикомпонентен евтектикум. Двојниот и трикомпонентниот евтектикум се смеси од повеќе кристали со различни форми меѓусебно сраснати во посебна фаза. За кристалографската форма на двојниот евтектикум беше објаснето во темата 4, а трикомпонентниот евтектикум има уште посложени форми на одделните составни кристали.

### 5.5.1. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ТОЧКА НА ТОПЕЊЕ И КРИСТАЛИЗАЦИЈА ОД ПРОЕКЦИСКИ ДИЈАГРАМ

Проекциски трикомпонентен дијаграм ја претставува проекцијата на изотермите пресеци во концентрацискиот триаголник. Во дијаграмот се даваат линиите на пресекот на изотермниот триаголник (површина) со двофазните гранични површини. Таквите пресеци во дијаграмот се дадени со концентрични криви со центри во чистите компоненти. На тие линии се точките на составите на растопот што се во рамнотежа со издвоените цврсти чисти кристали на А, В и С. Тоа се точки над кои нема цврсти кристали. Ова е битно при леењето на металите и определување на температурата на леење. Растопот мора да биде без цврсти фази.

На дијаграмот се претставени и линиите на двојните евтектикуми, што се спојуваат во трикомпонентниот евтектикум. Со нивна помош може да се проценат и текот на кристализацијата и составите на евтектикумите што ќе бидат во рамнотежа. Со правилото на лостови може да се определи и нивната количина во структурата како посебни металографски фази.

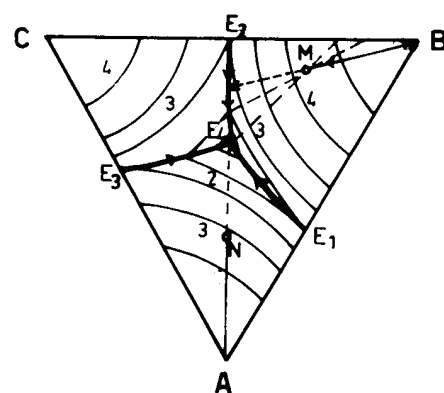
Како се определува температурата на почетокот на кристализација?

Нека е зададена легура со состав во точката М. Низ точката М се повлекува права, која ја поврзува точката со најблиското теме од триаголникот (В) и двокомпонентниот евтектикум. На пресекот со линијата на двокомпонентниот евтектикум се определува рамнотежната концентрација на растопот со В кристалите при ладење. Легурата М се наоѓа меѓу линиите што даваат граница В кристали и растоп повисоко од  $400^{\circ}\text{C}$ , пониско од  $450^{\circ}\text{C}$ . Со интерполација поточно се определува температурата над која нема цврста фаза. Тоа е приближно  $420^{\circ}\text{C}$ . Легурата пред леење мора да се загрева над  $420^{\circ}\text{C}$ .

Доколку треба да се процени микроструктурата на легурата по кристализацијата, тоа се прави на следен начин.

Линијата на сврзување што поминува низ составот М, од чистата компонента В до М е речиси целата течна со први кристали на В, затоа се дава со полна линија. Другиот дел на правата е означен со испрекинатата линија, за да укаже дека под таа температура е двофазна област (В и растоп).

На температура малку под  $250^{\circ}\text{C}$  линијата на сврзување го допира составот на двојниот евтектикум  $E_2$ . Под таа температура сврзната права, која ги дава составите



Слика 5.9 Проекциски дијаграм на легура ABC, со нерастворливост на компонентите во цврста состојба. Линиите означени со 2, 3, 4 ја претставуваат изотермната температура  $\times 100$ . Нанесени се сврзни линии за легурата М при ладење.



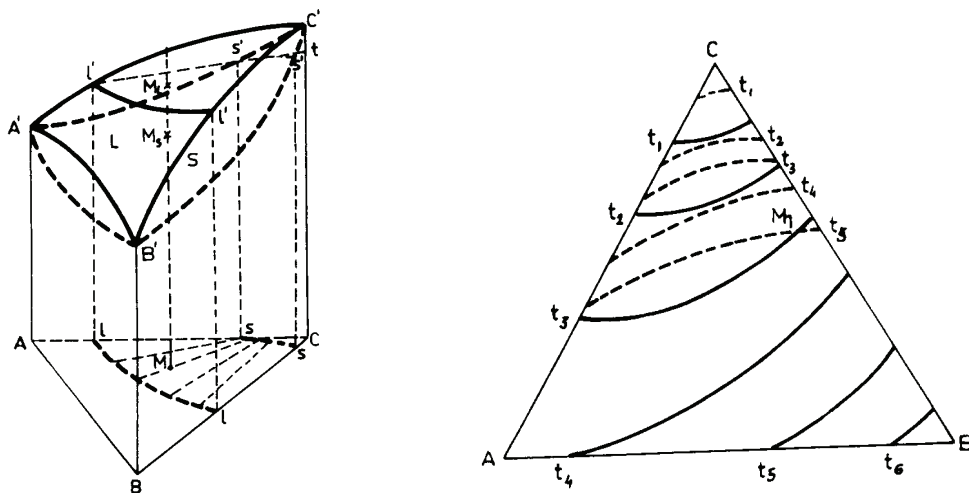
што се во рамнотежа за легурата М, ќе се менува, што е покажано и на сликата 5.9 со двете испрекинати линии што минуваат низ составот М и ја даваат рамнотежата при температура под  $200^{\circ}\text{C}$ , а повисоко од  $150^{\circ}\text{C}$ . По таа сврзна линија во рамнотежа се кристали на В, двокомпонентен евтектикум со состав што се отчитува од пресекот на сврзната права со составот В-С и растоп со состав на пресекот на линијата со двојната евтектичка линија.

Со ладење натаму, кога ќе се постигне температура од  $150^{\circ}\text{C}$ , сврзната линија на фазите се завртува така што да ги спојува составот на двојниот евтектикум со составот на трикомпонентниот евтектикум. Тоа значи под  $150^{\circ}\text{C}$  легурата ќе има фазен состав на В кристали образувани од растоп, двокомпонентен евтектикум ВС и трикомпонентен евтектикум АВС на собна температура, како металографски форми.

## 5.6. НЕКОИ ВИДОВИ НА ТРИКОМПОНЕНТНИ ДИЈАГРАМИ

Трикомпонентните дијаграми со растворливост на компонентите и образување на цврсти раствори веќе се комплицирани за претставување во рамнина. Во практиката ќе се користат само изотермните пресеци или проекциските дијаграми, од што може да се определува температурата на постоење само на растопи или за пресметки на количина на фазите од изотермните пресеци.

Нивното детаљно изучување и претставување би било оптоварување на учебникот, па затоа треба натаму да се изучуваат во посочената литература [1,2].



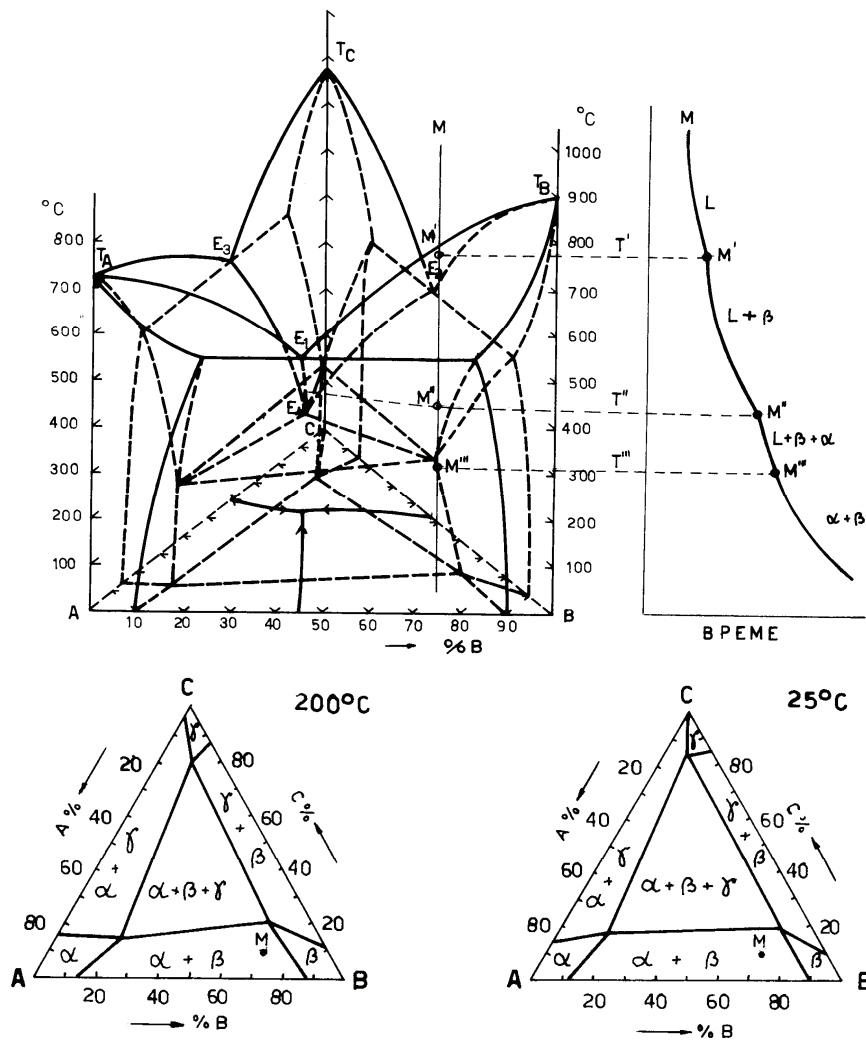
Слика 5.10 Просторен и изотермски дијаграм на состојба на трикомпонентен систем со целосна растворливост меѓу компонентите.

Тука ќе бидат претставени само некои дијаграми што имаат практична употреба и други, за да се види нивната комплицираност, без навлегување во детаљни анализи.

На сликата 5.10 е претставен дијаграм со целосна растворливост на компонентите во течна и во цврста состојба (цврст раствор со супституција), во просторна форма и во проекција на ликвидус и солидус линиите на определени температури.

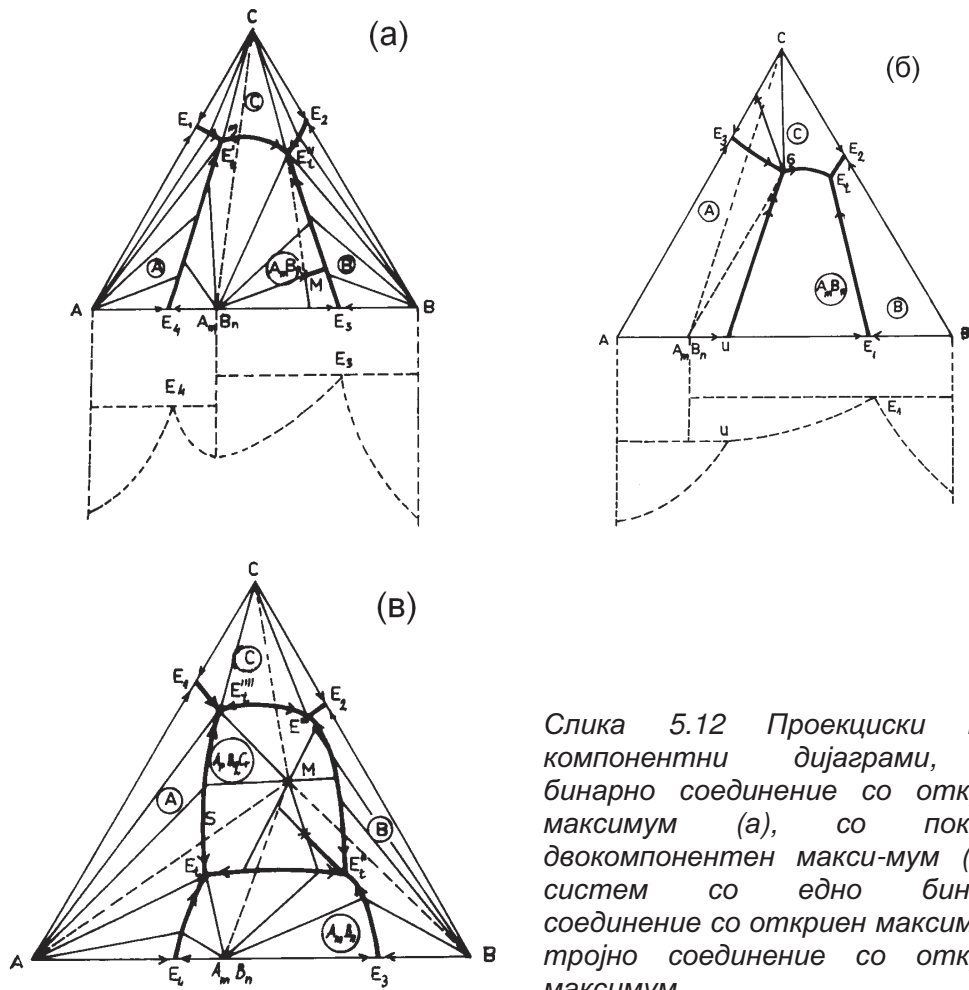
При определување на количината на фазите, мора да се познаваат составите што се во рамнотежа, како што е дадено во просторниот дијаграм (лево) за легурата М. Линиите што ги поврзуваат рамнотежните состави, во трикомпонентните дијаграми се познати како коноди. Конодите често се цртаат во просторните и во проекциските дијаграми.

На сликата 5.11 е претставен дијаграм со ограничена растворливост меѓу компонентите, во просторна форма и некои изотермни пресеци.



Слика 5.11 Просторен дијаграм на трикомпонентен систем со ограничена растворливост на компонентите (горе) и изотермни пресеци на две температури (долу)

На сликата 5.12 се претставени трикомпоненти проекциски дијаграми со образување соединенија, со покриен и откриен максимум меѓу двојните компоненти и комбиниран систем со двојно соединение со откриен максимум и тројно соединение  $A_mB_nC_q$ . Полните дебели линии во дијаграмите ги претставуваат проекциските линии на двокомпонентните евтектикуми меѓу разните компоненти или меѓу компонентите и интерметалните соединенија. На компонентите што образуваат соединенија со покриен и откриен максимум, во развиена форма се претставени соодветните двокомпонентни дијаграми што учествуваат во трикомпонентниот систем.



Слика 5.12 Проекциски три-компонентни дијаграми, со бинарно соединение со откриен максимум (а), со покриен двокомпонентен максимум (б) и систем со едно бинарно соединение со откриен максимум и тројно соединение со откриен максимум.

## ПРАШАЊА ЗА САМОКОНТРОЛА НА НАУЧЕНОТО

- 1) Како се претставува составот на легурите во трикомпонентните системи?
- 2) Како се пресметува кои фази се во рамнотежа во трикомпонентен систе?
- 3) Како се претставува фазниот состав во зависност од темературата и составот на смешата?
- 4) Што претставува проекциски трикомпонентен дијаграм?
- 5) Како може да се отчита температурата на почеток на кристализација од проекциски трикомпонентен дијаграм?

## 6. ТЕМА

### **СТРУКТУРНИ ПРОМЕНИ И ПРЕТВОРБИ КАЈ ЦВРСТИТЕ МЕТАЛИ**

Преглед на содржини	Цел на учењето
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Вовед во темата</li> <li>• Дифузија во металите;</li> <li>• Структурни промени под дејство на надворешна сила;</li> <li>• промена на структурата при деформација и рекристализација;</li> <li>• Фазни претворби</li> <li>• Видови фазни претворби <ul style="list-style-type: none"> <li>○ бездифузиски: <ul style="list-style-type: none"> <li>- нормална претворба</li> <li>- мартензитна претворба</li> </ul> </li> <li>○ дифузиски: <ul style="list-style-type: none"> <li>- издвојување на секундарни фази;</li> <li>- отпуштање на мартензит;</li> <li>- евтектидна претворба</li> <li>- средување и раслојување на несредени легури</li> </ul> </li> <li>- полиморфни претворби</li> </ul> </li> <li>• Други постапки за промена на структурата на металите и легуриите.</li> </ul>	<p>Со изложениот наставен материјал во оваа тема се даваат теоретски основи на процесите на промена на особините на легуриите и металите, процесите на зајакнување преку постапките со делување на надворешна сила (деформација и промена на структура од деформација), потоа процесите предизвикани од промените на температурата и донесената топлинска енергија во системот. Преку обработените содржини, ученикот би бил оспособен:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Да го објаснува процесот на дифузија на металите;</li> <li>- да ги објаснува промените под дејство на надворешна сила;</li> <li>- да ги дефинира поимите рекристализација, алотропија и фазни промени.</li> </ul> <p>Во материјалот се дадени описи на процесите што предизвикуваат промени во структурата, без теоретско навлегување во суштината на физичко-металуршките процеси што се одигруваат при овие промени. Дадени се описи и факти за промените и какви влијанија имаат во технолошките процеси.</p> <p>Сите наведени процеси на промена на структурата, се изучуваат, зашто тие се основа на многу технолошки преработувачки постапки, како што е валањето, термичката обработка и други.</p> <p>Процесите што се одвиваат во промените на структурата на металите и легуриите, а што ја диктираат и практичната примена на металите и легуриите како основни конструкциски материјали, што ги произведува металургијата, се дадени во најелементарна форма, без навлегување на теоријата за таквата промена или причините, освен надворешното влијание на температурата и надворешни сили.</p>



## 5. СТРУКТУРНИ ПРОМЕНИ И ПРЕТВОРБИ КАЈ ТВРДИТЕ МЕТАЛИ

Под поимот структурни промени и претворби во тврда состојба се промените на формите, грешките и големината на зрната што ја сочинува фазата или металното тело, промените на кристалната структура и составот на фазите што учествува во градбата на микроструктурата на металот или легурата, предизвикани од промени на температурата и механички напрегања.

Структурните промени во цврстите метали се вршат со цел да се добие микроструктура што ќе ги подобри механичките особини на металот или да се добијат соодветни технолошки и употребни особини.

Основни применливи постапки во физичката металургија за промена на микроструктурата се:

- фазни претворби со промена на температурата и времето (термичка обработка);
- промена на дефектноста и големината на зрната со деформација и рекристализација.
- фазна промена на структурата и промена на хемискиот состав на површината металните делови.

Промените на структурата на металите и легурите, се врши под влијание на:

- 1) внатрешни структурни напрегање и надворешни напрегања предизвикани од делување на спрег на надворешни сили - пластична деформација, и
- 2) донесување надворешна топлинската енергија (температурата) и контролирано ладење на металните тела.

Влијанието на нанесената топлинска енергија и повишување на температурата, предизвикува промени во структурата на фазите:

- промена внатрешната градба на одделна фаза и образување на помалку дефектни зрна на фазата - рекристализација и
- промена на бројот и составот на фазите - фазни претворби.

Промената на внатрешната градба на структурата на легура или метал, се врши со нанесување надворешни напрегања и промена на распоредот и зголемување бројот и видот на дефектите во фазите, т.е. со пластична деформација на металите и нивно загревање за добивање на бездефектна структура и промена на големината на зрната на металот или легурата.

Фазните претворби во тврда состојба се промени на атомско кристалната структура на металите и легурите, при промена на температурата, притисокот или на хемискиот состав на легурата. Промената на структурата и особините на металите со примена на постапки со загревање и ладење, се нарекува термичката обработка на металите и легурите. Доколку за време на загревањето на металите и легурите доаѓа до промени на хемискиот состав на површината, таквото третирање се нарекува хемиско-термичка површинска обработка.

Температурата и составот на системот ја диктираат фазната рамнотежа на фазите. Основни временски етапи при фазните претворби во тврда состојба се: образувањето на нуклеуси и нивниот раст. Во тврда состојба отпорот на средината за раст на новата фаза е отежнат и тоа ја диктира формата на новообразуваните

фази. Формирањето на нуклеусите и нивното растење е поврзано со доаѓање на нови атоми на површината на новостворената фаза, т.е. со дифузиските процеси.

Фазните промени во тврда состојба може да се одвиваат во рамнотежни услови или во кинетички услови, т.е. кога рамнотежата не е постигната и постои нерамнотежна состојба за дадени температурни услови. Затоа, при постигнување на рамнотежата при фазните претворби, брзината на постигање на рамнотежата состојба игра суштествена улога за вкупниот процес. Времето кога се постигнува рамнотежата е познато како брзина на претворбата или кинетика на фазните претворби.

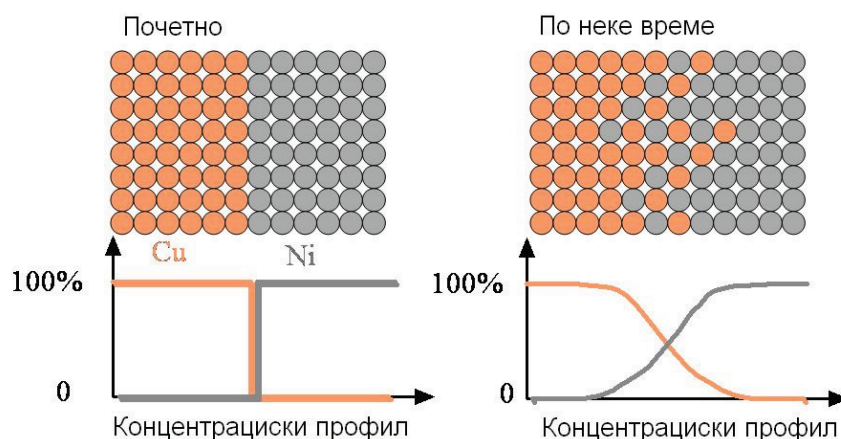
Основен физичко-хемиски процес, што ги диктира структурните претворби во металите е **дифузијата**. Одвивањето или спречувањето да се одвиваат дифузиските процеси во процесите на загревање и ладење, ги диктираат процесите на промената на структурата на металите и легурите. Затоа, првин ќе бидат дадени основите на дифузијата и процесите поврзани со неа.

## 6.1. ДИФУЗИЈА ВО МЕТАЛИТЕ И ЛЕГУРИТЕ

Дифузија е процес на изедначување на концентрацијата во било кој систем. Дифузијата игра пресудна улога во остварување на реакциите во течна и цврста состојба. При дифузија атомите од области и тела со поголема концентрација навлегуваат во средини со помала концентрација на дадени елементите. Дифузијата, во суштина е процес на израмнување на концентрацијата во две области или во две фази.

Многу од основните процеси што се остваруваат во металите и легурите (кристализација, фазна трансформација, деформација, рекристализација, нанесување различни компоненти на површината и т.н) имаат дифузиска природа.

Експериментално е потврдено дека при допир на две различни цврсти фази, патувањето на честичките од една во друга е можно да се следи. Бидејќи природата на честичките што дифундираат се од различна природа, во цврстите фази во коишто се одигрува дифузијата, со мерење на концентрацијата на супстанцијата што дифундира може да се дојде до количински показатели за одвивање на процесот на дифузија.



Слика 6.1 Меѓусебна дифузија на никел и бакар.

На пример, ако се земат две плочки, една од бакар, друга од никел и се стават во добар контакт со страните; плочките што се во контакт да се стават на повишена температура извесно време, по раздвојување на овие плочки, може со анали да се утврди дека во слојот на бакарот што бил во контакт со никелот содржи никел и

обратно, во површинскиот слој на никелот се наоѓа бакар (види слика 6.1). Содржината на никелот во бакар и обратно, бакар во никел, се намалува на растојанијата подалеку од контактната површина. Ако се нанесе на дијаграм, како се менува концентрацијата со промена на растојанието од контактната површин, се добиваат концентрациски дифузииски криви, што се претставени на сликата 6.1 долу. Ова движење на атомите низ цврстата фаза е овозможено благодареејќи на грешките што постојат во кристалната градба на двете метални тела.

Дифузијата упатува дека изместувањето на местоположбата на атомите низ едно кристално тело се одвива со прескоци со меѓуатомското растојание за дадена супстанција. Дифузииски скокови и дифузија се смета само ако е наравен скок со должина на параметарот на кристалната решетка, т.е. од еден јазол во кристалот, атомот пресконе во друг. Ако овие скокови со промена на местата не е поврзана со промена на концентрацијата во разгледуваниот волумен, се нарекува **самодифузија**.

Дифузијата што е следена со промена на концентрацијата што се случува во легурите или во металите во кои има нечистотии, се нарекува **дифузија** или **хетеродифузија**.

Процесот на дифузија во кристалите се базира на атомскиот механизам во кој секој атом има повеќе или помалку случајно движење, т.е. тој остварува многубројни скокови околу рамнотежната положба во кристалната решетка. Секоја атомска теорија на дифузијата започнува со објаснување на механизмот на дифузијата. Прво прашање на кое треба да се одговори е: како даден атом се движи од една позиција во друга?

Можни се повеќе механизми на дифузија, што го објаснуваат процесот на дифузија во цврсто кристално тело: циклично движење, размена на места, субституциски и интерстициски (види слика 6.2).

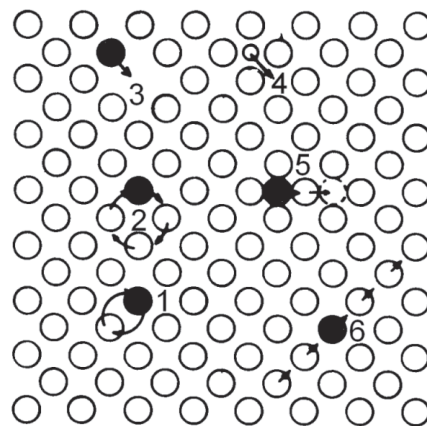
1. **Механизам на замена** се манифестира во тоа што два соседни атоми може да си ги разменат местата.

2. **Циклична замена** на местата може да се одвива во поедини случаи, кога ќе се исполнат други предуслови. При овој механизам група атоми, заедно со примесниот атом, треба истовремено да извршат циклично (кружно) прескокнување и на тој начин, примесниот атом да се најде напреднат за едно место.

3. **Ваканциониот механизам** е најверојатен и најлесно се остварува. Затоа, ако во металот има вакансии, дифузијата доминантно ќе се остварува преку нив. При овој механизам соседниот атом прескокнува во ваканцијата, оставајќи зад себе нова ваканција, каде што може да прескокне нов атом.

4. **Меѓујазолен (интерстициски) механизам** се јавува таму каде што има цврст раствор со интерстиција, така што вметнатиот атом може од една интерстиција да прејде во друга.

5. **Механизмот на истиснување** од меѓујазлите се одвива преку учество на два соседни атоми. Атомот од меѓујазлот го истиснува атомот од јазлот и го зазема неговото место.



Слика 6.2 Можни механизми на дифузија во кристал.

6. **Краудион механизам** се јавува кога на еден атом од група атоми ќе удри друг атом однадвор со неопходна кинетичка енергија, а тој енергијата ќе ја пренесе на соседните атоми, а пак тие на своите соседи (слично како при почетниот удар во играта билјард). Механизмот е последователен и на следната група атоми, па затоа се нарекува краудион (Craudion- англиски израз за група, толпа што се движи). Овој начин на дифузија е сроден на простирањето на брановите. Секој атом се поместува малку, а ефектот на бранување се простира брзо.

Дифузијата на елементите со мали атомски радиуси (C, N и H) во металите се одвива по интерстицискиот механизам (претставен на слика 6.2 со број 4).

Брзината на дифузија е дефинирана како количина на материјата  $m$  што дифундира низ единица површина во единица време. Количината на дифундираната материја  $m$  (во единица време) зависи од концентрацискиот градиент  $dc/dx$  на елементот, во насока нормална на пресекот, и е пропорционална со **коэффициентот на дифузија**  $D$ :

$$m = -D \frac{dc}{dx}$$

каде  $e$ :  $dc$  = мала промена на концентрација

$dx$  = мало растојание во дадената насока.

Оваа равенка се нарекува *прв Фиков закон*. Минусот во равенката укажува дека дифузијата (и самодифузијата) се одвива во насока од волумен со поголема концентрација, кон волумен со помала концентрација. Ако концентрацискиот градиент ( $dc/dx$ ) се менува со времето  $\tau$  (се добиваат различни концентрациски профили), процесот на дифузија се опишува со *второт Фиков закон*:

$$\frac{dc}{d\tau} = D \frac{d^2c}{dx^2}$$

Како е наведено погоре, дифузијата се одвива со движење на честиците (атомите) низ кристалот што ја градат елементарната решетка. За да дојде до движење на честиците низ кристалот потребно е атомите да располагаат со определена енергија, позната како **енергија на активација**. Тоа е енергија која е потребна атомот да ја совлада привлечната сила што потекнува од соседните атоми, и да се премести во друга положба. Исто така, и атомите со интерстициска положба може да се преместат во друга положба, само ако поседуваат активациона енергија.

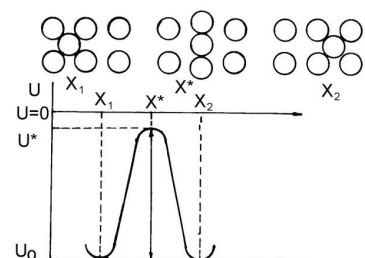
За атомот од положбата  $x_1$  да премине во положбата  $x_2$ , према шемата претставена на сликата 6.3, треба да ја совлада бариерата во местоположбата  $x^*$ . За тоа е потребна енергија:

$$E = U^* - U$$

што претставува енергија на активација на прескокот на атомот од една положба во друга. Ако се зголемува додадената енергија на системот, може да се извршат повеќе прескоци, а со тоа да се забрза дифузијата. Затоа дифузијата е зависна од температурата по следната зависност:

$$D_{(T)} = D_0 \exp(-E/kT)$$

Дифузискиот коэффициент се зголемува со повишување на температурата, а со тоа и процесот на дифузија во системот.



Слика 6.3. Шема за потребна активациона енергија за прескок на атом од една положба во друга

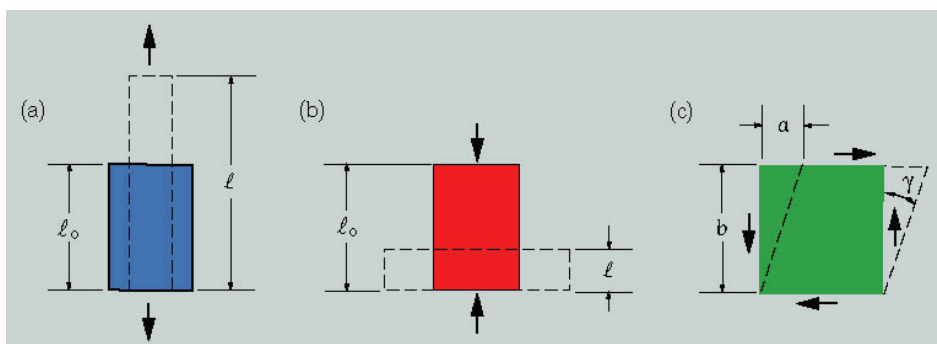
Енергијата на активација не е еднаква за сите видови грешки во кристалот. Ако има само грешки од ваканциски тип (наречени грешки по Шотки), тоа е енергија само на образување ваканција, додека ако грешките се во пар од интерстициски атом и соодветен број вакансии (таа грешка се нарекува по Френкел), таа е поголема зашто содржи енергија за образување на ваканцијата и движење на атомот во меѓупростор.

Према досега изнесеното, во многу реакции, во кои учествуваат цврсти супстанции, при што се издвојува нова фаза, брзината на збирната реакција е определена од процесите на дифузија и процесите на пренос на материјата. Кај монокристалите може да се зборува само за пренос на материјата низ кристалната решетка, додека кај поликристалните метали и легури, неопходно е да се прави разлика меѓу дифузијата низ зрната и дифузијата по границите и дифузијата по површината на самите зрна. Значи, во поликристалните метали и легури има три вида на дифузија. Енергијата за активирање на границите на зрната е забележливо помала во однос на енергијата за активирање на внатрешноста на кристалот. Експериментално е утврдено дека брзината на површинската дифузија и дифузијата по границите на зрната имаат за неколку пати поголема вредност од брзината на дифузија во внатрешноста на зрното.

## 6.2 СТРУКТУРНИ ПРОМЕНИ ПОД ДЕЈСТВО НА НАДВОРЕШНА СИЛА

Ако врз метално тело се делува со надворешна сила, таа предизвикува напрегање во металното тело. Спротивно на надворешната сила, во металот се јавува сила која дава отпор на измена на формата на телото, што се нарекува **отпор на деформација**. Доколку се совлада отпорот на деформација, во металното тело се одвива деформација на формата, како последица на деформација на зрната.

Надворешната сила може да предизвикува различни внатрешни напрегања, зависно од правецот и линијата во која делува спрег од силите. Силите што се нанесуваат на телото може да предизвикуваат: истегнување, притисок или усукување. При делување на било кој од наведените спрегови на сили, металното тело ја менува формата - се деформира. На сликата 6.4 се претставени видовите на деформација на метално тело при делување на различни спрегови на сили.



Слика 6.4 Деформирање на метално тело под дејство на различни спрегови на надворешни сили

Деформацијата на телото е зависна од видот на спрегот на сили. Таа се забележува во физичка промена на должината (или висината) на телото или неговиот геометриски облик. Телото на сликата 6.4 (а) се издолжува, телото на сликата 6.4 (б) се гмечи, телото од сликата 6.4 (с) се смолкнува. На првото тело делувало напрегање на истегнување, на второто тело напрегање на притисок, а на третото делувало тангенцијално напрегање или напрегање на смолкнување. На сликата 6.4 се нанесени ознаките за димензиите пред и после делувањето на надворешните



сили, по кои може да се квантитативно пресмета промената на формата, а при деформацијата со смолкнување е даден и аголот, за кој телото се смолкнало, и растојанието на страната на деформираното тело во однос на појдовната положба.

При секое делување на надорешни сили, промената во формата е предивикана како:

- еластична деформација,
- задоцнета еластична деформација, или
- пластична деформација.

При деформацијата од надворешни сили, покрај промената на формата, телото претрпува и структурни промени. Структурните промени се од различен карактер:

- промена на формата кристалот или зрната, или
- промена во кристалната градба и појава на грешки.

Какви видови деформација настануваат најпрегледно се согледуваат од соодветните испитувањата за механичките особини во лабораториите. При тоа се прават различни испитувања за различни спегови на надворешни сили.

Најчесто се користат резултатите од испитување на однесувањето на металите и легурите со истегнување. Истегнувањето се врши на посебни машини за испитување, познати во праксата како *кидалки*. Проба со стандардна форма и димензии се поставува на машината за истегнување и се мери силата што делува и издолжувањето што го предизвикува. Со посебни инструменти на кидалката, можно е да се мери и стеснувањето што го добива пробата при истегнување. При истегнувањето волуменот на телото занемарливо малку се менува, а се менува само обликот. Пробите за истегнување се стандардизирани со домашни и меѓународни стандарди, како и другите услови што се исполнуваат при испитувањето, за да можат да се користат насекаде добиените сознанија.

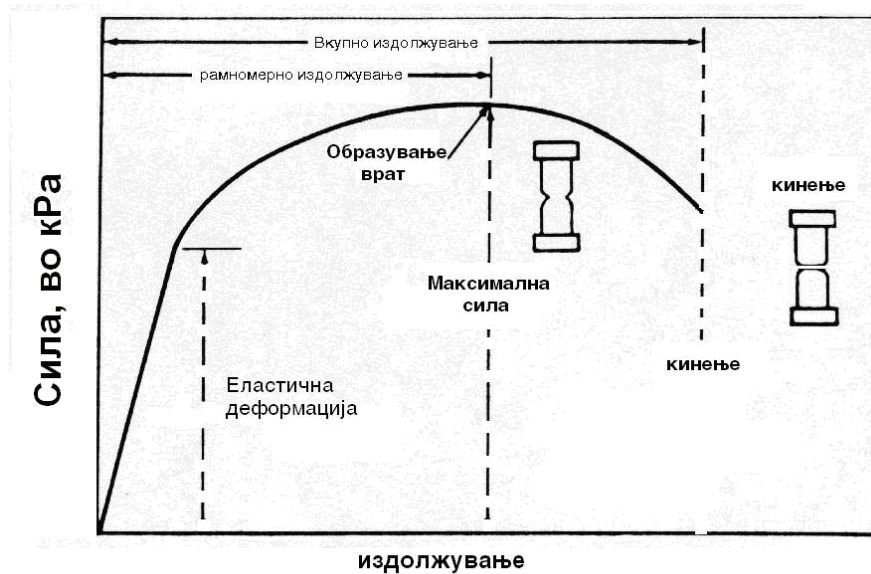
Силата што делува и се мери, како и издолжувањето на пробата се нанесуваат на дијаграм, што се нарекува дијаграм на кинење или дијаграм на деформација со истегнување.

Постојат универзални машини за испитување, на кои може да се врши испитување со истегнување или со притисок. Пример на дијаграм на деформација со истегнување е претставен на сликата 6.5.

При истегнувањето пробата во почетниот период се издолжува по права линија (има линеарна зависност на силата и издолжувањето), а по некоја вредност на силата, се јавува експоненцијална зависност меѓу силата и издолжувањето. Издолжувањето во делот на дијаграмот каде нема линеарна зависност е големо при мали зголемувања на силата. Почетната деформација, што има линеарен карактер е еластичната деформација, додека во другиот дел од делувањето на силата има пластична деформација.

Телото деформирано во линеарната (еластична област), по делување на силата може да се врати моментно во првобитната форма (моментна еластичност) или по извесно време да ја добие почетната форма (задоцнета еластичност), додека телото деформирано во пластичната област, останува трајно деформирано.

Во областа на еластичната деформација, атомите во кристалната решетка може да го зголемуваат меѓусебното растојание, толку колку што дозволува резултатната силата на металната врска, а во пластичната област металните атоми заземаат други положби, т.е. настанува меѓусебно лизгање на некои кристалографски рамнини, по различни механизми.



Слика 6.5. Дијаграм на истегнување на цилиндрична проба при нанесување надворешна сила што предизвикува истегнување.

По постигнување на максималната сила, во пробата што се истегнува, во одреден регион, започнува брзо стеснување на дијаметарот, во однос на другите делови. Местото на брзото стеснување се нарекува образуван врат на пробата. Затоа по постигање на вратот при истегнување, пробата се деформира со намалена сила. Тоа е поради делувањето на надворешната сила на помала површина (силата што делува на единица површина се нарекува напрегање), пробата се издолжува привидно со помала сила. По некој степен на издолжување пробата се кине и прекинува делувањето на силата.

Доколку се мери и стеснувањето на пробата на вратот (со додатен инструмент екстензиометар) се изцртува т.н. дијаграм на деформација со вистински напрегања.

На сликата 6.5, во дијаграмот се означени еластичната и пластичната област, областа на рамномерното издолжување и вкупното издолжување, како и соодветната сила што предизвикува еластична деформација, максималната сила и силата при која настанало кинењето.

Деформацијата во поликристалните метали е збирна деформација на оделните, различно ориентирани зрна во телото. Вкупната сила за деформација ја содржи силата за еластична деформација, силата на триење меѓу зрната што се деформираат и силата за деформација на сите зрна.

Деформацијата на зрната во металот се врши со лизгање на дислокациите (полурамнините) по густо пакуваните кристални рамнини. Преку лизгањето на дислокациите, отпорот на деформација се намалува за 100 пати во однос на метал кој нема дефекти во градбата на кристалот во однос на рамнините и нивното редоследно пакување.

Поради присуството на линиските грешки во структурата на металните зрна, потребната сила за пластична деформација се намалува од 100x до 1000x, во однос на теоретската сила на телото, што произлегува од силината на металните врски во кристалната решетка.

На потребната надворешна сила за предизвикување на деформација или кинење, големо влијание има и големината, бројот и формата на металните зрна. Металите со поситни зрна се појаки и потешко се деформираат. Кај металните

еднофазни легури, зголемување на цврстината се врши со промена на големината на зрното.

При пластичната деформација на металите и легурите, деформиранiot метал има поголема тврдина и цврстина, во однос на појдовниот. Тоа зајакнување на деформиранiot метал се должи на зголемениот број грешки што се јавуваат во структурата на зрната, а особено на линиските дефекти (дислокациите) што се зголемуваат со зголемување на степенот на деформација, како и новата изменета форма на зрната. Пластично деформираните метали и легури имаат зголемена кртост и еластичност, не се погодни за натамошна преработка со деформација, зашто брзо пукаат, кога се нанесе поголема сила од еластичната или при брзи удари.

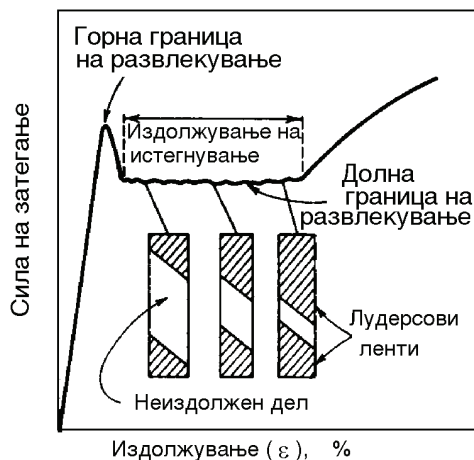
Металите и легурите, под влијание на надворешните сили покажуваат различна пластичност. Некои се пластични и се деформираат, а некои по надминување на еластичното напрегање, се кинат. Кај некои легури, по областа на еластичното издолжување се јавува област со максимална сила и соодветно издолжување, по што, издолжувањето продолжува со намалена сила. Тоа издолжување е брзо и по постигнување одреден степен на деформација, повторно е потребна поголема сила за продолжување на деформацијата, Таквите легури имаат горен напон на течење ( $R_{eH}$ ), по што започнува пластичната деформација на легурата, што се наредува долен напон на течење ( $R_{eL}$ ). Пример на таква легура и дијаграм на издолжување е претставен на сликата 6.6, во којшто се означени областите што полесно се деформираат и областите со помала деформација (Лидерсови област). Горниот напон на течење е многу важен и неговата вредност служи за димензионирање на конструкциите.

Зајакнувањето на металите со пластична деформација е зависно од степенот на деформација (колку се издолжила пробата во однос на појдовната должина), од температурата на која се врши деформацијата и од брзината на нанесување на надворешната сила.

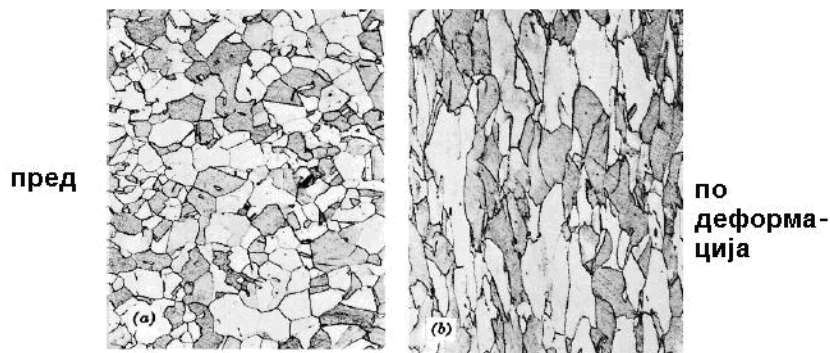
Ако се нанесува брзо надворешната сила со удари, потребна е помала сила за да настане кршење. Некои метали и легури поднесуваат брзи удари и се деформираат (ковливи метали и легури), а некои не. Таа особина на металите да се кршат при удари се нарекува **кртост**, а да не се кршат се нарекува **живавост**.

### 6.2.1. ПРОМЕНА НА СТРУКТУРАТА НА ДЕФОРМИРАНИТЕ МЕТАЛИ И РЕКРИСТАЛИЗАЦИЈА

При деформацијата со истегнување зрната на металот и легурата се издолжуваат, истенчуваат, или при притисок се сплекуваат, зависно од видот на силите (истегнување или притисок). Пример на микроструктура пред и по деформација е дадена на сликата 6.7.



Слика 6.6 Дијаграм на истегнување на метал, со нанесени цилиндрични проби каде што се дадени областите на лизгање во цилиндерот (светли нешрафирани делови) и горна и долна граница на истегнување.

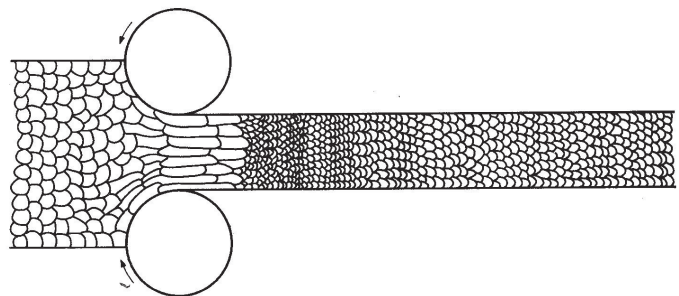


Слика 6.7. Микроструктура на нискојаглероден челик пред и после ладна деформација

При пластичната деформација во топла состојба, на пример топло валање или ковање, со секој степен на деформација, т.е. промена на висината на предметот што се деформира во однос на појдовната, зрната во металот се издолжуваат и стануваат многу дефектни. Во нив, поради деформацијата, се образуваат голем број дефекти од атомски карактер или во градбата на кристалните решетки.

Основен механизам на деформација на металите е лизгањето по густопакувани рамнини со образување на линиски дефекти - дислокации. Полурамнини полесно се лизгаат по другите нормално поставени рамнини, зашто за нивно лизгање е потребно многу помала сила. За време на деформацијата се зголемува бројот на линиски дефекти, а со тоа се зголемува и внатрешната енергија на легурата или металот.

Доколку деформацијата е на зголемена температура, деформираната структура настојува да зафати пониска енергија од таа што е добиена со деформација, па затоа настојува да го испушти вишокот енергија насобрана при деформација. Тоа го прави со повторна изградба на нови зрна од истата легура, што имаат помала дефектност и затоа се постабилни.



Слика 6.8. Рекристализација при деформација со валање на високи температури.

Пример на промена на големината на зрната и нивно намалување е даден при зафаќањето меѓу валците на метален блок, на слика 6.8. Доколку металот што се деформира нема доволна загреаност што ќе предизвика рекристализација на деформираната структура, тогаш се врши дополнително загревање на деформираниот метал, со цел да се рекристализира деформираната основа на металот.

Како што може да се забележи од шемата, а која многу добро ја опишува реалната состојба при валање, меѓу валците металот се притиска, зрната се издолжуваат и сплеснуваат, а непосредно по излезот од валците почнува образување на нуклеуси и раст на помалку дефектни зрна. Како се оддалечува лимот и поминува времето, зрната стануваат покрупни, но многу помали од почетните. Ако вакво валање се повтори неколку пати, како што е во практиката, јасно дека при секое поминување низ валци претходната микроструктура станува поситна, т.е. појака. Ситните зрна во металот даваат поголема јачина на истегнување од покрупните. Исто така, по поминување на топлиот метал меѓу



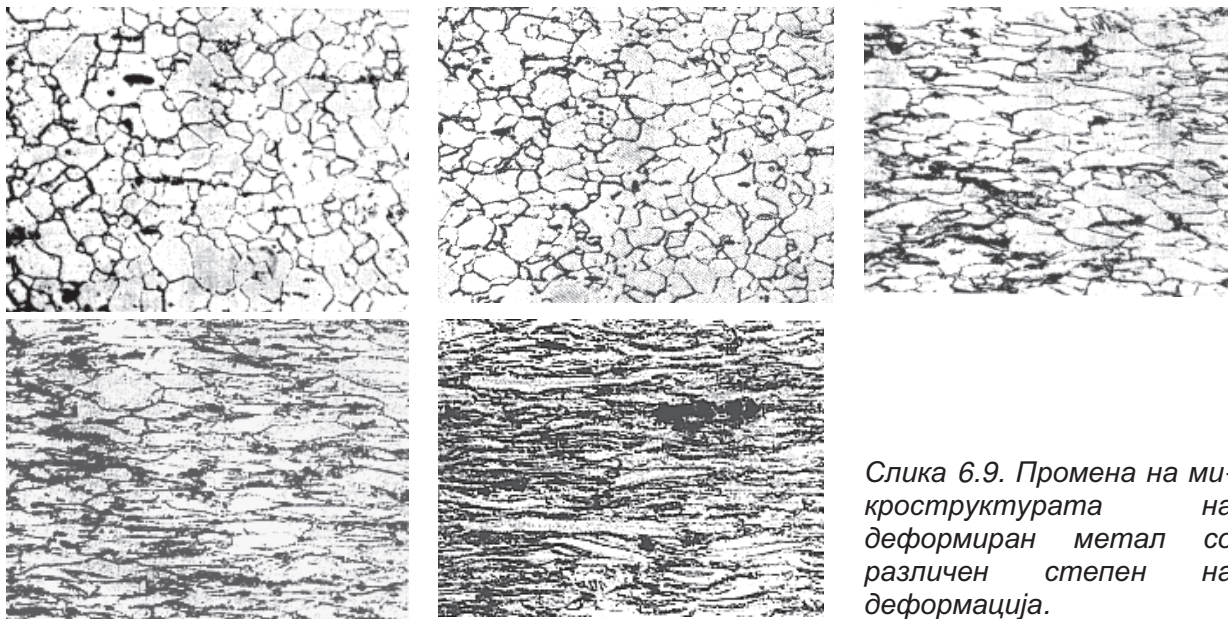
валците, тој се лади толку повеќе, колку што се оддалечува деформираниот метал од валците, па се прекинува менувањето на зрната.

Процесот на промена на деформираната структура со посовршени кристални зрна, без промена на кристалната структура, се нарекува **рекристализација**. Во топлата деформација рекристализација на зрната се врши за време на деформацијата или многу кратко време по деформацијата, поради високата температура и дифузииската подвижност на атомите.

Процесот на промена на деформирани зрна со рекристализација е како сите фазни претворби. Тој е дифузиски процес и се одвива во две временски етапи. На почетокот се образуваат **нуклеуси** во деформираната основа, кои имаат поголемо совршенство во градбата на структурата, а втората етапа е **растот на зрната**.

Со дифузиско загревање на кристали се менува нивната форма и тие настојуваат да зафатат таква форма што ќе има помала енергија на границите на зрната во однос на волуменската (внатрешна) енергија на кристалот. Затоа, при секоје жарење се зголемуваат зрната и се намалува нивниот број. Зголемување на дијаметарот на зрната при жаење се нарекува секундарна рекристализација.

Тоа е уште потипично при ладното валање. При ладното валење голем дел од енергијата што се додава од надвор, на пример ударот со чекан, останува во деформираниот дел како енергија во вид на дефекти во кристалната градба. При ладната деформација се зголемува бројот на дислокациите, што се основни носители на заостанатата енергија во деформираниот метал. Затоа, ако металот се загрее и се овозможат процесите на дифузија на атомите, секој деформиран метал, преку споменатите потпроцеси, ќе добие пониска енергија преку добро оформени полигонални зрна.

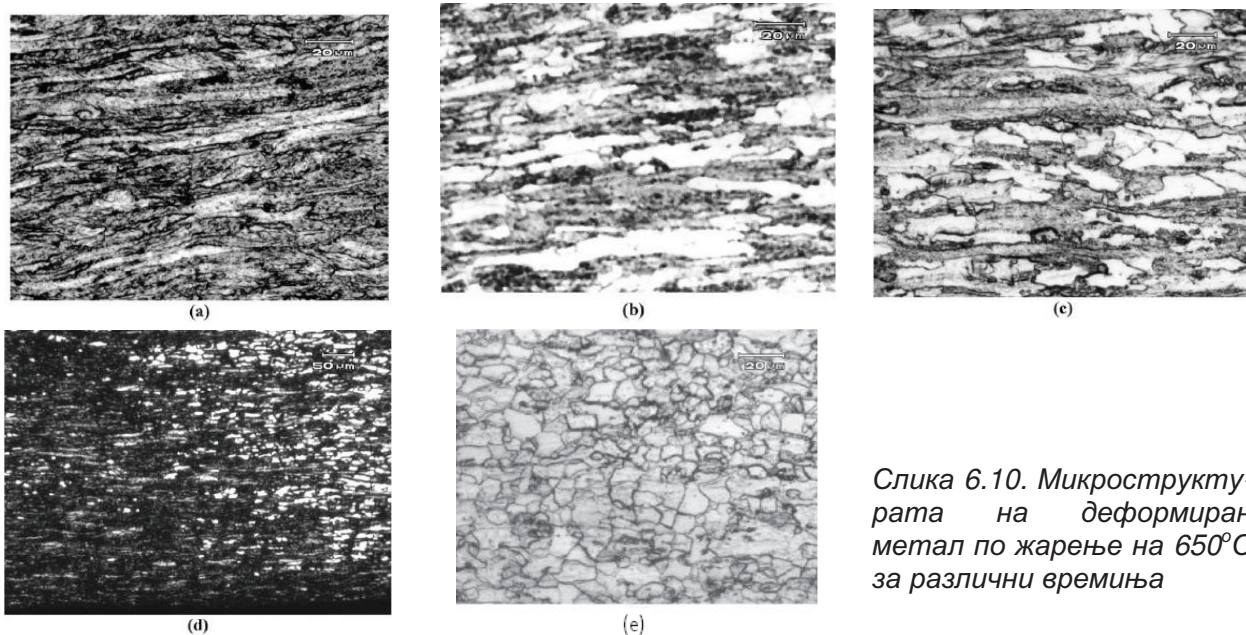


Слика 6.9. Промена на микроструктурата на деформиран метал со различен степен на деформација.

Деформираниот метал, поради заостанатата енергија во него, е појак и потврд, но и покрт на брзи удари. Рекристализираните метали имаат помала јачина, но затоа се пластични и жилави, може понатаму да се деформираат и од нив да се изработуваат други метални делови со деформација.

Ако се разгледува структурата на некој метал што се деформира, ќе се забележи издолжувањето и сплеснување на зрната во правец на дејствување на надворешната сила. Пример за структурата на ладновалан челик во вид на лимови е претставен на сликата 6.9.





Слика 6.10. Микроструктурата на деформиран метал по жарење на  $650^{\circ}\text{C}$  за различни времиња

Ако се загрева ладно деформиран челик на температури повисоки од  $680^{\circ}\text{C}$ , тој ќе почне да ја менува структурата, па наместо деформираната структура, во која не се гледаат зрна, ќе се добијат убаво оформени поситни зрна на челикот. Како што одминува времето на жарење на деформиран метал, сè повеќе се менува неговата структура, од деформирана матрица преку процесот на образување на нуклеуси на нови помалку дефектни зрна, до целосно исчезнување на деформираните зрна и конечно добивање на убаво оформени полигонални зрна, која се нарекува **примарна рекристализација**. Доколку зрната што настанале по исчезнување на деформи-раниот метал и понатаму се жарат, тие ќе се зголемуваат и ќе добиваат поправи граници на зрна (секундарна кристализација). Пример на текот на рекристализацијата е даден со жарење на деформиран метал на  $650^{\circ}\text{C}$  за различни времиња и промените во микроструктурите, претставен на сликата 6.10.

### 6.3. ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ ВО МЕТАЛИТЕ

Фазните претворби во тврда состојба се промени на атомско кристалната структура на металите и легурите, при промена на температурата, притисокот или на хемискиот состав на легурата. При фазните претворби настанува промена на структурата или бројот на фазите, со целосна или делумна претворба на појдовната фаза, во нова фаза со различна структура или состав од појдовната. Во праксата промените во структурата се вршат со донесување на толина на системот и ладењето со различни брзини.

Било која фазна претворба се одвива во две временски етапи:

- 1) образување на нуклеус со критичен радиус;
- 2) растење на зрната на новата фаза, со исчезнување на дел или потполно на постојната фаза.

Прв услов за да се случи фазна трансформација е: **слободната или вкупната енергија во системот, со образување на новата фаза да постане помала**. Овој услов е неопходен, ама не значи дека фазната претворба ќе се одвие. За одвивањето и образување нова фаза треба да се исполнети и т.н. кинетичките услови. Одвивањето на фазната трансформација може да биде

спречено од други услови, како што е, на пример, новата фаза да е цврста и недеформабилна, а исто така и постојната фаза да е недеформабилна и да не може да го прими волуменот на новата фаза, потоа да не се исполнети услови на дифузиско надоаѓање на атоми неопходни за новата фаза, за да може да се образува нуклеус или да расте новата фаза.

**Критичен радиус на нуклеусот** - преставува случајна термички предизвикана формација од насобрани атоми блиски до новата структура, што има оптимален однос на слободна енергија (движечка сила во процесот на претворба) и површинската енергија на нуклеусот (за чие образување е потребна енергија и го спречува растот на нуклеусот).

Нуклеусите со наткритичен радиус спонтано растат, ако е овозможен дотур на нови атоми и да се исполнат други услови. Дотурот на нови атоми до нуклеусот е поврзан со дифузијата на атоми од други области, до границата на нуклеусот и негово вградување во нуклеусот.

Во фазните претворби во тврда состојба се разликуваат два типа на образување нуклеуси: хомогено и хетерогено.

**Хомогено образување нуклеуси** е процес на образувањето нуклеус под влијание на случајна промена на концентрацијата и создавање доволна концентрација и распоред на атоми за создавање на елементарна структура на нова фаза.

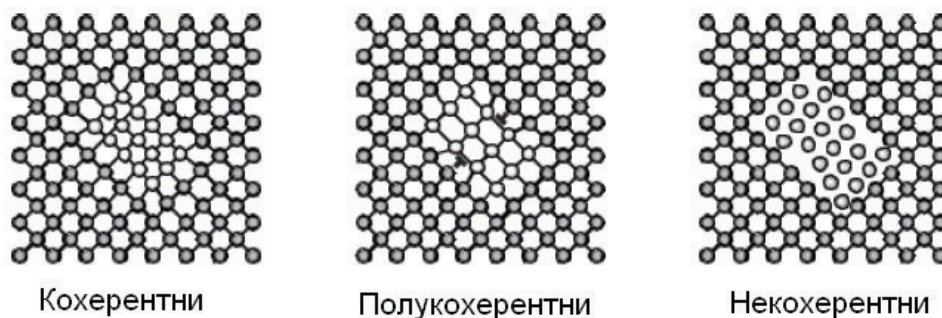
**Хетерогено образување на нуклеуси** е кога на веќе претходно образувана површина од атоми, од кој било вид, што е слична со новата фаза, започнува надградување на атоми за новата фаза. Такви места се најчесто границите меѓу фазите или зрната на постојната фаза или фази, ако новата фаза се образува со реакција меѓу две фази, или на местата со дефекти во распоредот на атомите во кристалната решетка.

За одвивањето на претворбата големо влијание има градбата на меѓуфазната граница на новата и постојната фаза. Меѓуфазната граница се одликува со површинската енергија на едната фаза и енергијата на другата фаза, т.е. од совпаѓањето на атомите од едната фаза со атомите на другата фаза. Доколку е поголема разликата во кристалните структури на појдовната и новосоздадената фаза, нивните елементарни решетки, атомската координација на решетката, големината и особините на атомите, начинот на образување на границата и нејзината „дефектност“, се јавува голема разлика во особините на двете фази.

Границите меѓу појдовната и новата фаза може да бидат: кохерентни (се совпаѓаат), полукохерентни (делумно се совпаѓаат) и некохерентни (не се совпаѓаат јазлите, туку само одделни атоми се во врска). целосно совпаѓање на атомите од едната и другата фаза поставени на границата (кохерентна меѓуфазна граница);

- делумно совпаѓање на граничните атоми и нивно поврзување (полукохерентна меѓуфазна граница) и
- некохерентно меѓуфазна граница (целосна некохерентност).

Нагледна претстава на образување граници со меѓусебно совпаѓање и несовпаѓање е дадено на сликата 6.11.



Слика 6.11. Видови граници според совпаѓањето на новата и постојната фаза.

### 6.3.1. ВИДОВИ ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ

Според влијанието на дифузијата во процесот на образување нова фаза, фазните претворби се делат на:

- (а) бездифузиски и
- (б) дифузиски претворби.

### 6.3.2. БЕЗДИФУЗИСКИ ПРЕТВОРБИ

**Бездифузиски претворби** се нарекуваат оние кај коишто претворбата се одвива само со претворба на кристалната решетка, без промена на концентрацијата на фазите. Претворбата се одвива со прегрупирање на атомите и измена на нивната местоположба во решетката. Во групата на бездифузиски претворби спаѓаат некои полиморфните претворби во еднокомпонентните системи, како и претворбите во некои посложени фази - хемиски соединенија со стехиометриски состав и т.н. масивни претворби. По брзината на одвивање, бездифузиските претворби се делат на:

- нормални (полиморфни) и
- мартензитни претворби.

#### 6.3.3.1. НОРМАЛНА ПРЕТВОРБА

Нормалните претворби се одвиваат при мали подладувања, т.е. тогаш кога е можно прескокнување на атомот од едната фаза во другата само преку границата, па затоа не е потребна дифузиска распределба на компонентите од едната во другата фаза. За таа промена во структурата, атомите не мораат да изведуваат дифузиски прескоци, кои го надминуваат растојанието на параметрите на решетката, што значи не изведуваат дифузиски прескок. Еден ист систем, зависно од подладувањето може да трпи нормална или мартензитна претворба, зависно од подладувањето и температурата на која се изведува бездифузиската трансформација. На повисоки температури се одвива нормална, а на ниски температури мартензитна бездифузиска претворба.

#### 6.3.3.2. МАРТЕНЗИТНА ПРЕТВОРБА



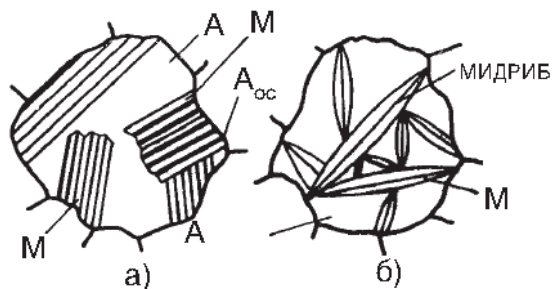
Мартензитната претворба се одвива при големи подладувања на појдовната фаза и на ниски температури, при што е оневозможена дифузијата на атомите. Атомите во кристалната решетка можат со мали меѓусебни поместувања, без да ги напуштаат блиските соседи, да се прегрупираат во нова кристална решетка, постабилна во однос на подладената.

Овој вид претворба се одликува со голема брзина на одвивање и по целиот волумен на појдовната фаза. Мартензитната претворба се одвива во изотермски услови (на постојана температура на подладување), а кај некој метали можна е претворба и при непрекинато ладење, под одредена критична температура (познато под поимот „атермичка“ или „експлозивна“ мартензитна претворба).

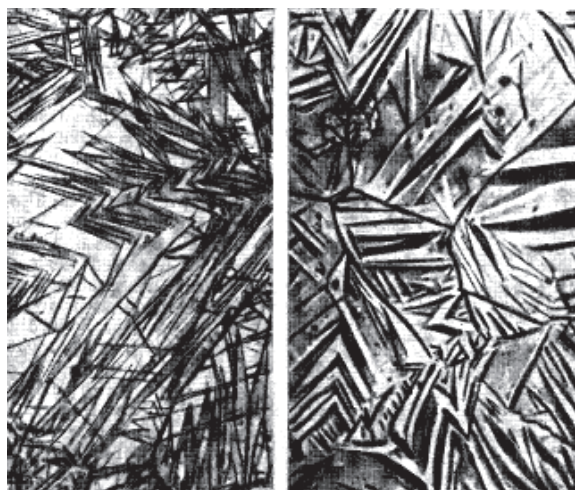
Со колективно (истовремено) движење на атомите во одредени правци, тие можат да зафатат положби што одговараат на друга кристалографска решетка и на тој начин ќе се добие структура што одговара на дадените термодинамички и еластични услови.

Мартензитната претворба е најтипична за железните легури и тесно се поврзува со зајакнувањето што се јавува кај железните легури. Таа се одвива кај една од најстандардните постапки на термичка обработка на челиците - калењето. Принципиелно важи дека секоја претворба што е поврзана со бездифузиско изместување на атомите во една кристална решетка, така што резултат на тоа изместување да биде нова структурна решетка, а што има изглед на деформирана појдовна решетка, да се однесува на мартензитна претворба.

Мартензитната структура е многу цврста, тврда, ама крта. Со овој вид претворби во челичните легури се зголемува цврстината и тврдината. Негативно е што по калење и образување мартензитна структура, челиците не поднесуваат удари, ја губат пластичноста и деформабилноста.



Слика 6.12 Цртеж на типичните структури на мартензитот а) летвест мартензит; б) вретенаст мартензит. (M - мартензит; A - аустенит; A<sub>ост</sub> - остаточен аустенит)



Слика 6.13. Микроструктура на мартензит образуван во челик

Мартензитно закалените челици имаат карактеристична микроструктура, што е составена од тетрагонален мартензит, во кој е растворен јаглеродот, а има и заостанат аустенит. Кристалите на мартензитот имаат форма на плочки, вретена (или игли) или летвици. На сликата 6.12 се претставени со цртеж формите на летvastiот и вретенастиот мартензит, а на сликата 6.13 површината на полиран дел по калење, на која се гледаат формите на мартензитните кристали.

Во вретенастите кристали на мартензитот се појавуваат голем број насобрани дислокации во средината на вретената, што се нарекуваат мидриби.

### 6.3.3. ДИФУЗИСКИ ФАЗНИ ПРЕТВОРБИ

*Дифузиски претворби* се одвиваат со помош на дифузиските процеси низ појдовната фаза. Кај дифузиски претворби појдовната и новосоздадената фаза може да имаат еднаков или различен хемиски состав. За неопходно прегрупирање на атомите или за натамошно одвивање на претворбата потребно е да доаѓаат вишок на атоми низ постојната фаза, кон новата фаза.

Некоја легура може да се доведе на некоја температура со загревање во посебни агрегати за загревање, или ако се лади некоја легура од растоп, па се задржи на некоја температура. Ако е загреана легурата, зависно од постигнатата температура, се постига фазна состојба соодветна на рамнотежниот фазен дијаграм. Ако се лади од високотемпературната област, легурата кога ќе премине некоја фазна рамнотежна граница, во согласност со фазниот дијаграм на состојба, фазата може да се најде на пониска температура од таа во рамнотежниот дијаграм. Во такви услови таа е подладена фаза и е метастабилна, а опстојува поради оневозможена дифузија при ладењето. При создавање на услови за дифузија, а за тоа е неопходното време и минимална температура за подвижност на легирните или основните атоми, започнува претворбата во новата термодинамички стабилна и рамнотежна фаза.

Зависно од фазниот рамнотежен дијаграм на состојбата, се одвиваат различни дифузиски претворби. Најчеста поделба на дифузиски контролираните претворби е на следните групи:

- (а) издвојување на секундарни фази,
- (б) евтектоидна претворба,
- (в) средување на несредени структури,
- (г) масивни претворби,
- (д) полиморфни промени.

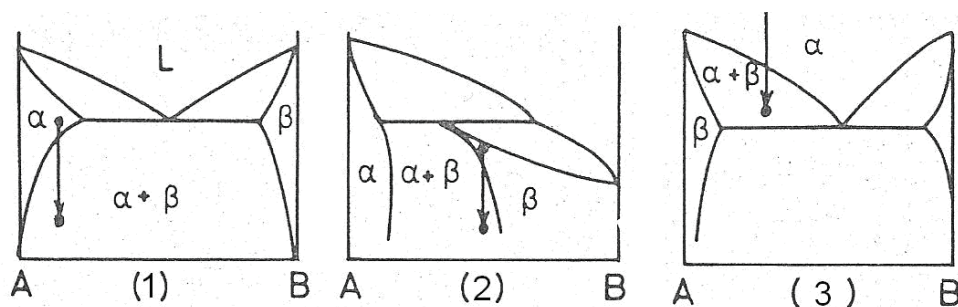
#### 6.3.3.1. ИЗДВОЈУВАЊЕ НА СЕКУНДАРНИ ФАЗИ

При споро ладење на легури од состав, со кои се преминува рамнотежната линија на растворливост на едната компонента во цврстиот раствор, во двофазната област, како што се, на пример, дијаграмите претставени на сликата 6.13, се задржува дел од високотемпературниот цврст раствор и се издвојува соодветна количина на рамнотежниот дијаграм, од секундарната фаза. Меѓутоа, доколку легурата се олади брзо и се најде на температури во кои се стабилни двете фази, а е оневозможена дифузија на легирните елементи, се добива презаситен (нерамнотежен состав) на високотемпературната фаза.

При овозможување на дифузиски процеси во презаситениот подладен тврд раствор, тој се распаѓа на две стабилни рамнотежни фази. Во наведените примери, тоа се структурите на цврстите раствори  $\alpha+\beta$ . Постигањето на рамнотежната состојба се врши со дифузиско издвојување на вишокот легирен

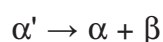


елемент во подладениот нестабилен раствор и формирање на стабилна рамнотежна дво фазна структура, со различен состав од појдовната фаза.



Слика 6.14. Видови на фазни рамнотежни дијаграми во кои е можно издвојување на секундарни фази.

Реакции за издвојување на секундарни фази е претворба што може да се изрази на следен начин



каде што е  $\alpha'$  метастабилен презаситен цврст раствор,  $\beta$  е стабилен или метастабилен талог (издвоена фаза), а  $\alpha$  е постабилна фаза со иста кристална структура како и фазата  $\alpha'$ , но со хемиски состав многу поблизок до рамнотежниот (види слика 6.14).

Издвојување на нова фаза од презаситен цврст раствор е процес кој има големо значење во физичко-металургиската практика, бидејќи со него може да се менуваат механичките и физичките особини на легурите во широки граници. Издвојувањето на секундарната фаза, познато како дисперзиско зајакнување, е процес на зголемување на механичките особини на металите.

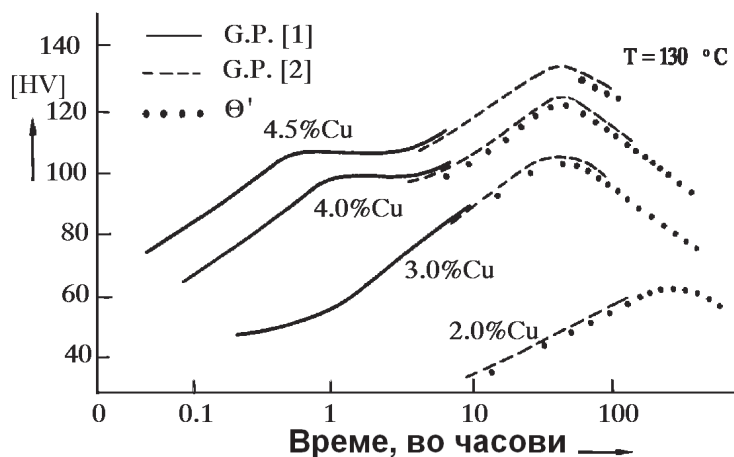
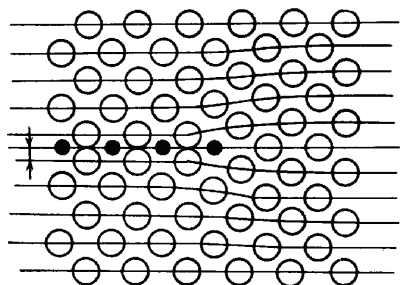
Процесите на дифузиското распаѓање на презаситените цврсти раствори и издвојување секундарни фази зафаќаат посебно место во фазните претворби и во термичката обработка се познати како процеси на **старење и отпуштање**.

Промената на механичките и физичките особини при стареењето на легурите е поврзана со промените на микроструктурата на легурата, поврзани со издвојување на секундарните фази од преситени цврсти раствори. До стадиумот на образување на рамнотежната структура, во кој се трансформира презаситениот цврст раствор, кај многу легури е забележано дека промените на особините се одвиваат во различни временски етапи, зависно од температурата на која се изведува претворбата.

При издвојувањето на секундарните фази на ниски температури, или во почетниот период при повисоките температури, легирните елементи во подладената нестабилна фаза, се поставуваат во облик на низа од атоми во една рамнина, што се нарекуваат Гиние-Престонови зони. Со продолжување на времето на жарење, Гиние-престоновите зони се трансформираат во плочки, со мала дебелина, во кои влегуваат атоми и од основниот метал. Во третата фаза се формира интерметалното соединение, соодветно на рамнотежниот фазен дијаграм. При жарење на повисоки температури и подолго време, зрната на новата фаза се зголемуваат и се намалува нивниот број. Тој период на растење на зрната на секундарната фаза се нарекува **коалесценција**.

Сите наведени процеси се следени со соодветна промена на особините на легурите при секундарното издвојување од презаситени (подладени) цврсти раствори. На сликата 6.15 е претставено формирањето на Гиние-Престонова зона, во Al-Cu легура, а насликата 6.16 е дадена промената особините на истата

алуминиумската легура со различна содржина на бакар. Легурите се познати како дуралуминиум.



Слика 6.15 Шематска претстава на Гиние-Престонови зони во цврст раствор на Al-Cu. Слика 6.16 Стареење на алуминиум бакар легури на (а) 130 °C и (б) на 190 °C.

Зрната на издвоените секундарни фази може да има форма во облик на: **плочки, игли или топчиња**. Чести се издвојувања на секундарната фаза се во вид на плочки или ламели, кои се ориентирани во однос на појдовната фаза и образуваат Видманштетова структура. Тоа е структура на меѓусебно поставени плочки од различни фази.

### 6.3.3.2. ОТПУШТАЊЕ НА МАРТЕНЗИТ

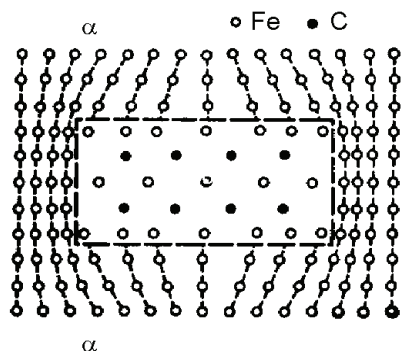
Друг типичен систем на издвојување секундарни фази е издвојувањето на јаглеродот од мартензитно закалените структури, процес познат како отпуштање на мартензит.

При ладење со голема брзина на челик загреан во аустенитната област (најчесто со вронување во вода), се формира по бездифузиски механизам - мартензит, како е претставено во мартензитната претворба. Мартензитно добиената метастабилна структура на ниски температури не е рамнотежна, затоа што постоеле различни пречки да се постигне рамнотежата. Доколку системот добие активациона енергија за да ги совлада пречките, тој ќе прејде во стабилна состојба - ќе ја изгуби тврдината и јачината.

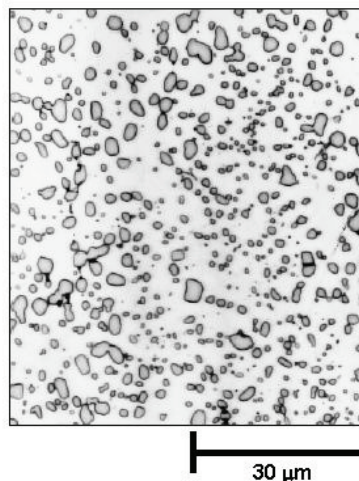
При загревање на мартензитот процесот со најниска активациона енергија почнува прв да се остварува. Тоа е движењето на ваканциите и на јаглеродните атоми. Со жарење на повисоки температури и подолги времиња, се одвиваат слични процеси, како и во подладените легури на дуралуминиум.

Јаглеродот се концентрира и поставува во линии, каде најчесто имало дилокациски дефекти. Потоа во тие линии или мали рамнини од атоми, навлегуваат и железни атоми и се образува преодна хексагонална меѓуструктура, која не е цементит (види слика 6.16). Со покачување на температурата меѓуструктурата добива хемиски состав на цементит ( $Fe_3C$ ). Ако се повишува температурата на 350°C до 450°C, се формираат цементитни кристали во облик на точиња. На тој начин, отпуштениот челик, со издвојување на јаглерод од презаситениот мартензит, добива структура на ферит и топчест цементит, претставена на слика

6.18, што се нарекува структура на отпуштање и се разликува од структурата добиена со рамнотежно ладење.



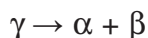
Слика 6.17. Шема на деформации во решетките при образување нуклеуси на карбиди во  $\alpha$  - цврстиот презаситен раствор. Решетките на карбидот и  $\alpha$  - фазата се меѓусебно кохерентни. Белите кружчиња се железните, црните јаглеродни атоми.



Слика 6.18. Микрофотографија на топчест цементит по отпуштање на мартензит

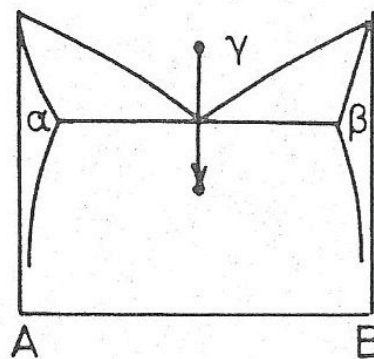
### 6.3.3.3. ЕВТЕКТОИДНИ ПРЕТВОРБИ

Евтектоидни претворби претставуваат реакции каде што се заменува една метастабилна фаза ( $\gamma$ ), со многу постабилни фази на смеса од две ( $\alpha + \beta$ ) или повеќе фази и што може воопштено да се изрази како



Овој вид реакции се карактеристични за дијаграми на состојбата како тој што претставен на сликата 6.19.

Најважната евтектоидна претворба е распаѓањето на со С-богатите кристали на  $\gamma$ -цврстиот раствор во системот железо-јаглерод во С-сиромашни  $\alpha$ -кристали (ферит) и железен карбид ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) - цементит. Оваа претворба е позната како **перлитна претворба**. Перлитот е смеша на  $\alpha$ -ферит (цврст раствор на железо со вцк решетка со јаглерод) и цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Карактеристиките на евтектоидната претворба дадени за случај на системот Fe-C, важат и за сите останати евтектоидни претворби.



Слика 6.19. Дијаграм на состојбата со евтектоидно распаѓање на  $\gamma$ -цврстата фаза.

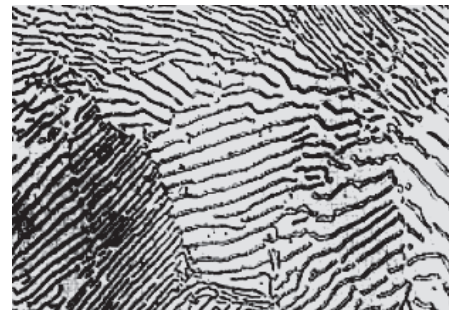
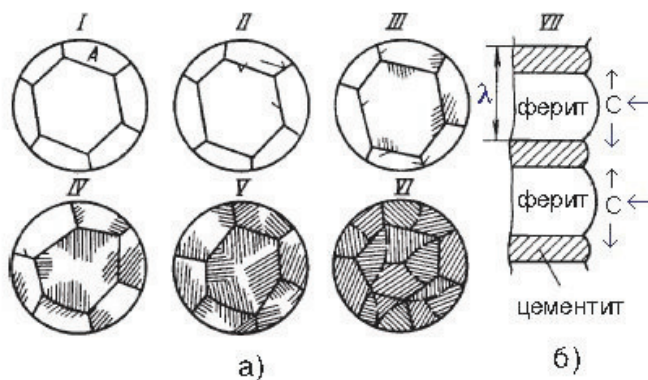
За одвивање на евтектоидната претворба, челичната легура треба да е загреана на температура на која е стабилен цврстиот раствор на железото со п.ц.к. со јаглерод -  $\gamma$ -аустенит. Притоа, аустенитот може да постигне различна големина на зрна и различна супструктура (густина на дислокации, концентрација на точкести дефекти,

различни видови дислокации). Сите тие имаат влијание врз одвивањето на аустенитната претворба. Фактори што влијаат на аустенитот пред неговата претворба во перлит се:

- големината на зрната (кристалите) на аустенитот;
- хемискиот состав на аустенитната фаза (легирана или не);
- структурното (не) совршенство;
- присуство на издвоени секундарни фази;
- присуство на неметални вклучоци во аустенитните зрна, т.е. присуство на нерастворливи микроконституенти во аустенитот;
- брзината на загревање до аустенитната област и др.

За одвивање на евтектоидната претворба мора да се постигне подладување, т.е. температура под евтектоидната линија (кај јаглеродни челици тоа е под  $727^{\circ}\text{C}$ ). Кога се најде аустенитно зрно под евтектоидната температура, се образуваат зародиши од цементит во вид на плочки што растат од границата на аустенитното зрно кон средината (хетероген вид на образување нуклеуси). Во средишниот дел на зрното се среќаваат и прекинува растот на плочките на цементитот, со што претворбата завршува. Јаглеродот кој од аустенитните области на зрното дифундира и образувал цементитни плочки, останува сиромашен со јаглерод и се преобразува во  $\alpha$ -ферит. На тој начин, едни покрај друг се поставуваат плочки на цементит и ферит. Таквата структура е карактеристична и се нарекува **перлитна структура**.

Нагледна слика за текот на процесот на евтектоидното распаѓање на аустенитот во перлит е претставена на сликата 6.20а). На сликата 6.20б) е претставена шема на раст на цементитните и феритните ламели, при што се назначени правците на дифузија на јаглеродот пред фронтот на раст на кристалите на новите фази.



Слика 6.20 Механизам на одвивање на евтектоидната претворба (а), формирање на ламели на цементит и ферит (б)

Слика 6.21. Микроснимка на структурата на ламеларен перлит. Светлото поле -ферит.

На сликата 6.21 е дадена металографска микроснимка на структурата на перлитот, на која се јасно видливи колониите на цементитот, а меѓу нив се наоѓаат ламелите на феритот.

Евтектоидната претворба може да се одвива при константна температура (изотермски) или при континуирано ладење. Во двата случаја ќе се јавува специфичен начин на претворбата, а со тоа ќе се разликува микроструктурата на продуктите на претворбата. Зависно од тоа во какви температурни услови се одвива евтектоидната претворба, и кинетиката на претворбата е различна.

**Дијаграми на аустенитната претворба - ВТП.** Промената на микроструктурата, во зависност од степенот на подладување од рамнотежната евтектоидна

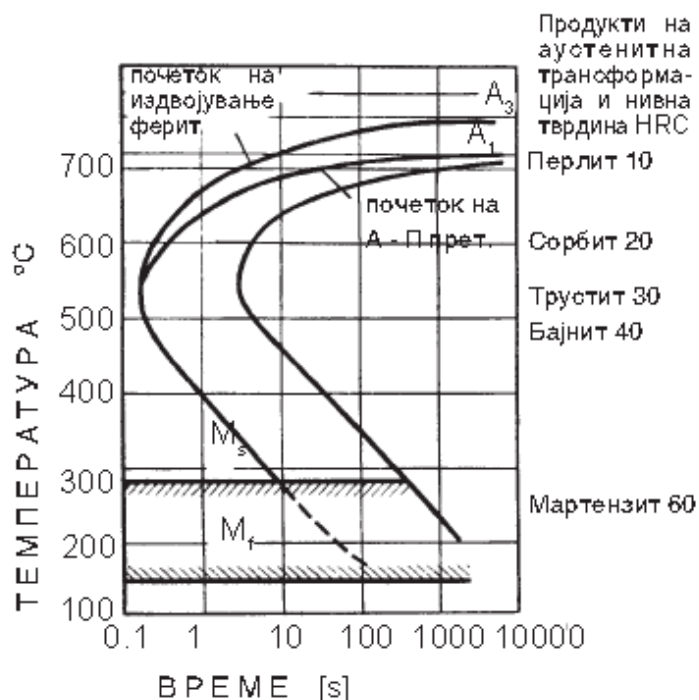


температура и времето жарење, се дава во дијаграми, што се нарекуваат дијаграми на фазната трансформација или дијаграми за време-температурни претворби (ВТП - дијаграми). Дијаграмите го даваат времето и температурата за почеток на претворбата и завршеток. Меѓу линиите на почеток и завршеток на претворбата е двофазната област на аустенит и перлит.

На повисоките температури (мали подладувања) се образува мал број нуклеуси, но тие растат побрзо. Повисоката температура овозможува поголема дифузија и раст на ламелите на перлитот, но се образуваат мал број нуклеуси. Затоа при нискотемпературната перлитна претворба се добива ситна и понеpravилна форма на ламелите во структура, додека на повисоки температури, поблиски до евтектоидната, се образуваат крупни ламели на цементит и ферит, во рамките на едно перлитно зрно (перлитна колонија).

Дијаграмите време-температура претворба, се даваат при константни температури (изотермни ВТП дијаграми) или со континуирано ладење, при што температурата постојано опаѓа со одредена брзина, т.н. континуирани ВТП дијаграми. Двата вида дијаграми имаат голема практична вредност, зашто од нив може да се определи потребната температура и време, за да се одвие аустенитната претворба и да се добијат барани структурни и механички особини на челичните производи при термичката обработка.

Зависно на која температура се формира микроструктурата, таа има различна тврдина и други механички особини. На високи темпепратури на одвивање на аустенитната претворба се добиваат крупни ламели на цементитот и феритот, па се добиваат многу пластични и помекли челици. Ако се врши претворбата на температури под 650 до 500°C, се формираат потесни плочки на цементитот и повисока тврдина. При тоа овие микроструктури на перлитот се познати како - сорбит (со пошироки плочки) и трустит (со потесни и нерамномерни плочки на цементитот).



Слика 6.22. Изотермен дијаграм на перлитната претворба кај подевтектоиден челик

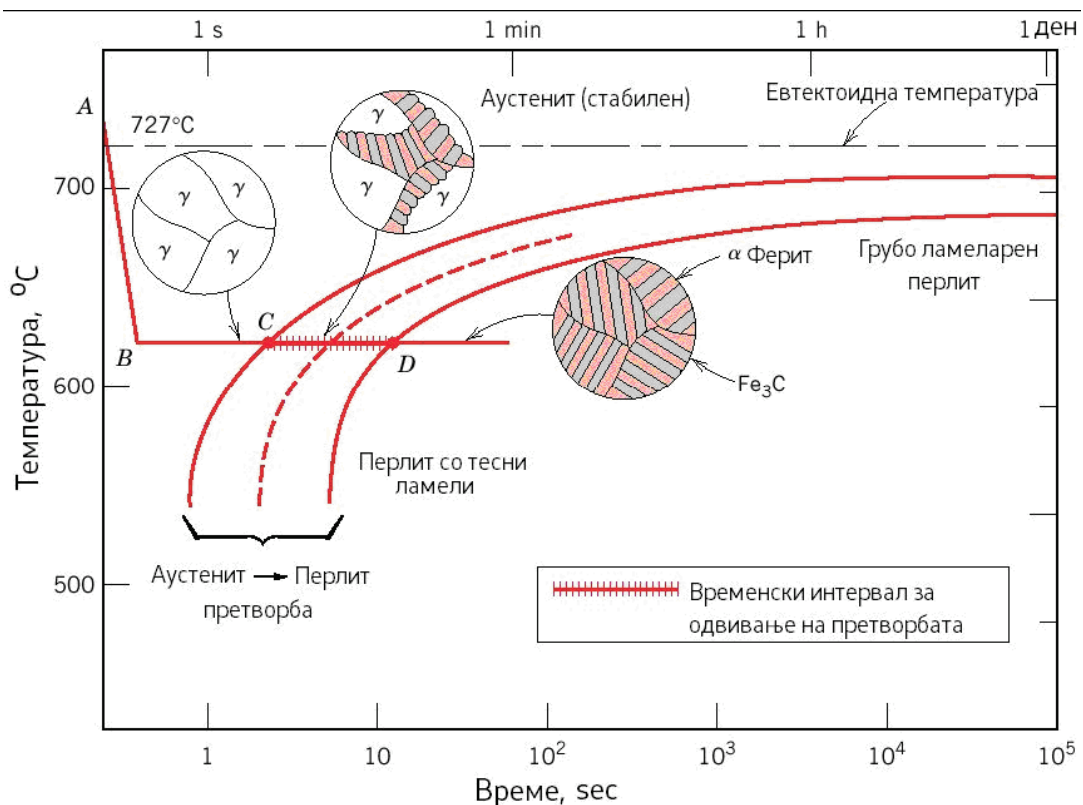


На температури под  $550^{\circ}\text{C}$ , во јаглеродните челици, а за легираните на пониски температури, се формира специфична структура која се нарекува - **бајнит**. Бајниот се формира по посебен механизам од дифузиски и бездифузиски претворби. Тој е доста тврд и цврст, па кај челиците ја зголемува цврстината, но ја намалува жилавоста.

На сликата 6.22 е претставен изотермски ВТП дијаграм за подевтectoиден челик; на десната страна се нанесени називите на микроструктурата што се добиваат во определен температурен интервал и приближната тврдина по методот на Роквел, што ја поседува соодветната микроструктура.

При големи подладувања на челичните легури, на температури каде што е оневозможена дифузиската претворба, аустенитот се трансформира по бездифузиски механизам во мартензитна структура. Затоа на изотермските ВТП дијаграми на долниот дел се дава, преку соодветна крива, температурата на почеток на мартензитната претворба.

На сликата 6.23 е претставен изотермен ВТП дијаграм за евтектоиден состав, со нагледна скица на структурата што се образува, а која е видлива со оптички микроскот, при металографските испитувања, каква што е претставена на сликата 6.24.



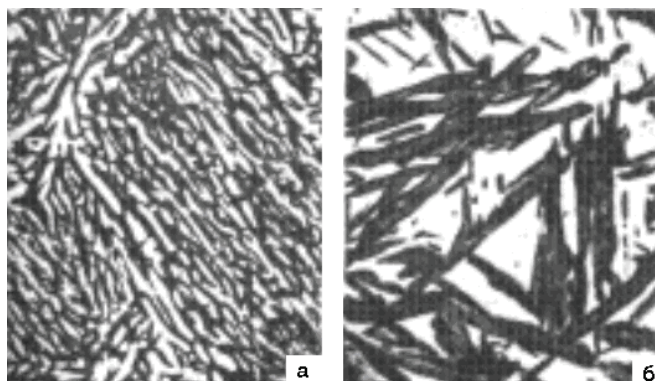
Слика 6.23 Шема за формирање на микроструктурата и нејзиниот изглед при евтектоиден состав на челик. Појаснувањата за ламелите на перлитот и температурниот опсег каде се постигнуваат се дадени со текст во дијаграмот.



Груболамеларен перлит

Финоламеларен перлит

Слика 6.24 Металографски снимци на структурата на груболамеларен (а) и финоламеларен (б) перлит



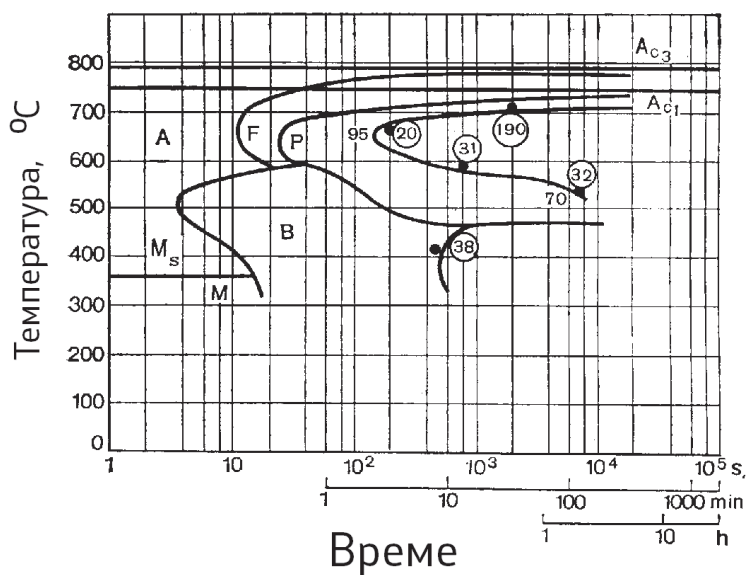
а

б

Слика 6.25. Различна микроструктура на бајнит, според температурата на образување: (а) на висока температура (горен), (б) на ниска температура (долен).

На сликата 6.25 се претставени снимки на микроструктури на бајнит.

Кај легираните челици, дијаграмот на ВТП, покрај кривите за одвивање на евтектоидната реакција, се јавуваат, по посебен интервал, линии што ги означуваат почетокот и крајот на бајнитната претворба. Пример на таков изотермски дијаграм за челик со даден состав е претставен на сликата 6.26.

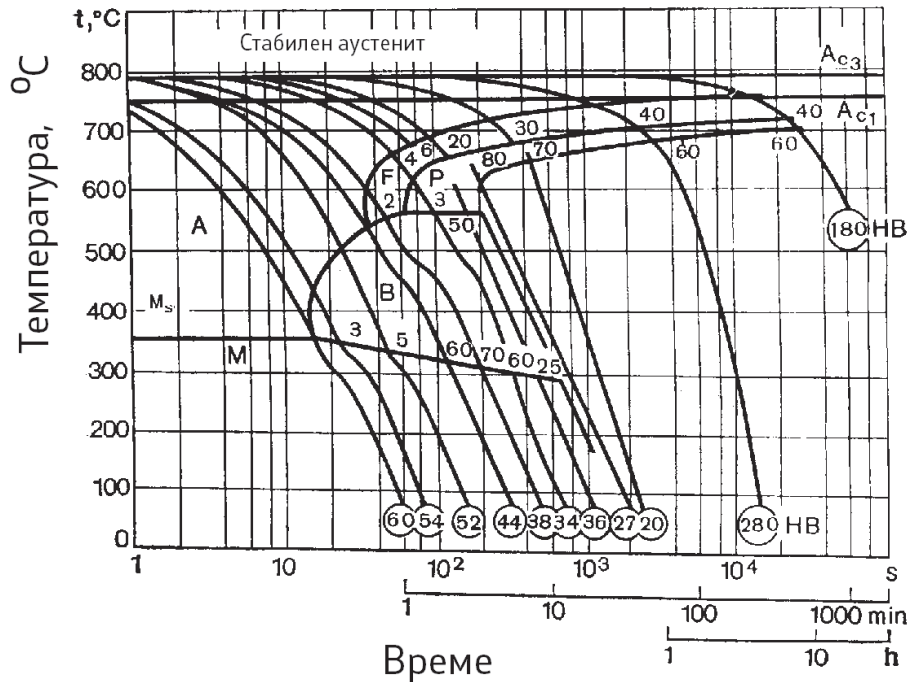


Слика 6.26. Изотермски ВТП дијаграм за легиран челик, со состав: 0,44%С, 0,22%Si, 0,8%Mn, 1,04%Cr. Во круговите бројките се тврдина по Роквел.

**ВТП дијаграм со континуирано ладење.** Во многу физичко-металургиски процеси, како што е на пример топлото валање на челиците, зрна на аустенитот, при континуираното опаѓање на температурата, претрпуваат евтектоидна претворба на аустенитот во перлит. Добиената микроструктура е зависна од составот на челикот-подевтектоиден, евтектоиден или на девтектоиден. Поради нивната практична вредност, посебно се конструираат дијаграми, каде што се нанесуваат брзината на ладење и областите каде што се формира некоја микроструктура. Пример на ВТП дијаграм со континуирано ладење е претставен на сликата 6.27, каде се нанесени

областите во кои постојат одредени структури, кривите со различна брзина на ладење и постигната тврдина за конкретната брзина.

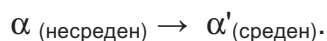
При претворбата на аустенитот со континуирано ладење се добива мешавина од структурите на областите, кои ги пресекува кривата на ладење со некоја брзина. При ладење, заедно со печката, се добиваат структурите што соодветствуваат на дијаграмот со изотермско распаѓање на аустенитот и мали тврдини. Колку се лади со поголема брзина, толку структурата е помешана и потешка да се распознае на металографските препарати.



Слика 6.27. Дијаграм со континуирано ладење и структурите што се добиваат при определено време на ладењето, на челик со состав како и на слика 6.20. Во круговите се дадени постигнатите тврдини по Бринел и Роквел. Соодветните структурни области се означени: А- аустенит, F- ферит, B-бајнит, M- мартензит, P- перлит.

#### 6.3.3.4. ПРЕТВОРБИ СО СРЕДУВАЊЕ НА ЦВРСТИ РАСТВОРИ ИЛИ СО РАСЛОЈУВАЊЕ НА ФАЗИТЕ

Сликата 6.28 го прикажува фазниот дијаграм каде што се одвива средување на несреден цврст раствор. Во овој случај реакцијата може едноставно да се запише како



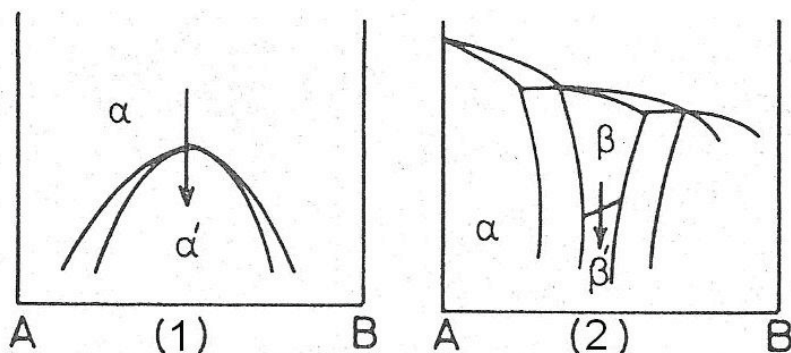
Претворбите, при што со подладување се добиваат несредени цврсти раствори, со неправилен распоред на атомите, а според дијаграмот на состојба, тие треба да заземат строго одредени места во структурата на цврстиот раствор (суперструктури). Затоа со загревање на несредените цврсти раствори на одредени константни температури, каде е овозможена дифузијата на легирните елементи, несредениот цврст раствор се средува по дифузиски механизам.

Средувањето на тврдите раствори се јавува како претворба, во која не се постига концентрацијата на фазите според рамнотежниот дијаграм, туку малите

отстапувања на составот на оделните фази при загревање, предизвикуваат распаѓање на несредениот тврд раствор, во посебни две средени структури, наместо во единствена средена структурата на легурата. Процесот на средување на несредените цврсти раствори со распаѓање на несредениот раствор во два средени раствори, со различен состав од рамнотежниот, е познат како **спиноидално распаѓање на презаситените цврсти раствори** со несредена структура.

Средување на несредените тврди раствори може да се одвива по регуларни дифузиски контролирани процеси на дифузија, при што се добива еднофазна средена структура - суперструктура.

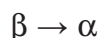
Легурите со средени цврсти раствори имаат релативно мала примена и се ограничени за легури со специјални намени, каде се бара повисока пластичност со истовремено зголемена тврдина. Затоа, нема да биде даден акцент на овој вид претворби.



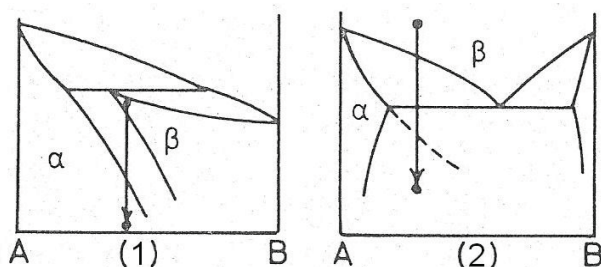
Слика 6.28. Дијаграми на фазната состојба во која се можни претворби со средување на несредени цврсти раствори.

### 6.3.3.5. МАСИВНИ ПРЕТВОРБИ

Во **масивните претворби**, појдовната фаза се распаѓа на една или повеќе нови фази што го имаат истиот состав како појдовната фаза, но имаат различна кристална структура. Сликата 6.29 илустрира два примера од овој вид можности. Високотемпературната фаза  $\beta$ , подладена на температури на нестабилна состојба, со загревање на дифузиски температури, се текот на времето преминува, стабилна фаза, согласно на дијаграмот на состојбата, т.е.



каде што се добива само една фаза. Притоа треба да се напомене дека фазата  $\beta$  може да биде стабилна (слика 6.29 (1)) или метастабилна (слика 6.29(2)).



Слика 6.29. Типови фазни дијаграми на состојба во кои се можни масивни дифузиски претворби

### 6.3.3.6. ПОЛИМОРФНИ ПРЕТВОРБИ



Полиморфните претворби се одвиваат во еднокомпонентни системи кога постојат различни кристални структури, што се стабилни во различни температурни интервали. Најголемиот број познати полиморфни претворби во металургијата се трансформирањето на површинската центрирана кристална структура во волуменски центрираната кубна кристална структура. Овие видови на претворба многу малку се користат како процеси во термичката обработка на металите, но се одвиваат по топлото валање и рекристализација, при ладењето на нискојаглеродните челици. На надевтектичките температури, дел од  $\gamma$ -устенитот (п.ц.к.) преминува во  $\alpha$ -ферит (в.ц.к), а по достигнување на подевтectoидни температури, може да продолжи истото издвојување, а преостанатиот, обично мал дел од  $\gamma$ -устенитот, се пробразува во перлит, по евтектоидната претворба. Таква претворба е карактеристична за подевтectoидните легури на челикот со мала содржина на јаглерод од фазниот дијаграм Fe<sub>3</sub>-C (види слика 4.22). Во чистото железо се одвиваат две алотроски претворби, што немаат практична вредност. Поголемо влијание врз структурата на готовите производи од челик, има алотропската претворба на  $\gamma$ -устенитот во  $\alpha$ -ферит.

Полиморфните претворби се одвиваат по веќе наведените временски етапи - нуклеација и раст на фазите. Нуклеацијата е обично хетерогена, но во одделни едноставни случаи може да има место и хомогената нуклеација, кога во внатрешноста на аустенитно зрно се образува нуклеус на феритната фаза.

Поради промената на слободната енергија на  $\gamma$ -структурата (п.ц.к. решетка) во чистото железо, на температури под 1183K (910 °C) таа преминува во  $\alpha$ -структура (в.ц.к. решетка). При претворбата на  $\alpha \rightarrow \gamma$ , се менува волуменот за околу 1%. Смалување на компактноста на  $\gamma$ -фазата при преминот во  $\alpha$ -фаза, се компензира со зголемување на разликата во специфичните атомски волумени во  $\alpha$ -фазата. Алотропската претворба кај Fe е многу брза, поради карактерот на дифузијата, додека претворбата на цврстиот  $\gamma$ -устенит во  $\alpha$ -ферит е потипично дифузиска. Дифузијата во чистото железо, практично, е само преминот преку границата и вклопување во новата површина на новата фаза што се создава и расте. Тоа се всушност само прескоци на атоми. Таквата претворба се нарекува нормална алотропска (полиморфна) претворба.

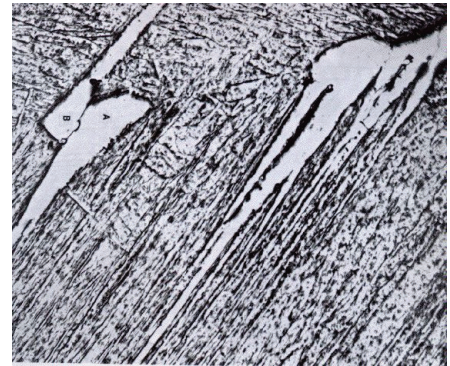
Покрај овие структури добиени со помали подладување или брзини на ладење, при големи брзини на ладење и големи подладувања и во Fe може да се образуваат и други морфологии на железото, предизвикани од кооперативните движења на атомите, како што се мартензитната и Видманштетовата. Мартензитната структура се јавува при поголеми подладувања или големи брзини на ладење (од редот на 10<sup>5</sup> степени/s). Промената на структурата се забележува при зголемувањето на брзината на ладење. На пример, за железото, кое содржи околу 0.003% C масени, промените се забележливи при промени на брзината на ладење од редот на 10<sup>3</sup> степени/s кон 10<sup>5</sup> степени/s или, пак, при константна брзината на ладење од околу 10<sup>4</sup> степени/s.

**Видманштетовата претворба** се нарекува бездифузиската претворба кај метали и легури, што се изведува на повисоки температури отколку тие на мартензитната претворба. При овој вид претворба се јавува карактеристичен облик на микроструктурата, која се нарекува **Видманштетова структура**. Видманштетовата претворба и структура е најкарактеристична кај железните легури со ниска концентрација на јаглерод. Основна нејзина карактеристика кај челикот е таа, што во структурата, покрај издвоениот ферит со дифузиска прераспределба на јаглеродот, преостанатиот аустенит, осиромашен на јаглерод, со кооперативно движење по одредени кристалографски рамнини во одредени правци, п.ц.к. структурата преоѓа во в.ц.к -  $\alpha$ -ферит. Во Видманштетовата структура



карактеристична е истовремена појава на два кристални вида ферит; плочести кристали на ферит, образувани по два механизми. Поради кооперативното тангенцијално поместување на рамнините, се јавува карактеристичната Видманштетова структура (види слика 6.30).

Образувањето на Видманштетовата структура од издвоениот ферит во аустенитната матрица се одвива поради релативната висока бездефектност на кристалите на аустенитот. Бидејќи претворбата се одвива на високата температура, се јавува поништување и намалување на дефектите и голем раст на зрната. Затоа во зрната со помалку дефекти (што ја олеснуваат дифузијата), наместо дифузискиот механизам на прераспределба на примесните атоми или преоѓање на атомите од една фаза во друга и при високи температури, но сепак под критичната точка на  $\alpha \rightarrow \gamma$  претворба, можно е одвивање на бездифузиското поместување на одделни рамнини.



Слика 6.30. Карактеристична Видманштетова микроструктура кај железо.

За појавата на Видманштетовата структура се неопходни високо загревање на аустенитот и крупни зрна, бидејќи низ крупните зрна (слабо дефектни и со мала концентрација на примесните атоми) потребна е помала енергија за одвивање на деформациските процеси. Видманштетовата структура на полиран шлиф дава ефект на релјефност, карактеристичен за бездифузиските претворби.

## 6.4 ДРУГИ ПОСТАПКИ ЗА ПРОМЕНА НА СТРУКТУРАТА НА МЕТАЛИТЕ И НА ЛЕГУРИТЕ

Фазните претворби се секако најексплоатираните постапки за промена на структурата и на особините на металите и на легуриите. Покрај нив, во физичко-металургиските постапки за промена на структурата на метали, се променуваат и големината и формата на зрната, што е во непосредна врска со промената на структурата со деформација. Со намалување на големината на зрната се зголемуваат механичките особини и се променуваат физичките особини. На пример, со многу големо и насочено растење на зрната во трансформаторските челични лимови се зголемува магнетната коерцетивна сила на материјалот и тие не се загреваат кога во нив се менува електромагнетното поле.

Покрај наведното погоре, структурата се менува на делови на кои површината се заситува дифузиски со други елементи. Таква постапка е цементацијата, при што со дифузиско заситување на површината со јаглерод, површинскиот слој може мартензитно да се кали, додека незасистениот дел со јаглерод останува мек и жилав. На тој начин се зголемува површинскиот отпор на триење и абење на деловите што се изложени на триење, како што се разни осовини и лежишта во машините. Покрај јаглерод, на површината на готовите делови на кои треба да им се зголеми отпорноста на триење и абење, се нанесуваат и други елементи и соединенија, кои го менуваат фазниот состав на надворешниот слој.

Во последните две децении голема примена наоѓа нанесувањето атоми на површината на готовите делови со примена на плазмена технологија, како и заситување на површината на деловите со азот и нитриди на други метали ( $\text{TiN}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{CrN}$  и други). Со нанесување на различните цврсти соединенија на

површината на металите, се менува нивната структура по пресекот на делот, во внатрешноста е жилав, а на површината тврд и крт, што има предност во конструкциите каде што има триење меѓу површините.

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Lakhtin Yu. Engineering physical metallurgy and heat treatment, Mir Publishers, Moscow, 1983
- [2] Малахов А.И. - Жуков А.П., Основы металловедения и теории коррозии, Издательство „Висшая школа“, 1978.
- [3] Јован К. Мицковски, Физичка металургија, книга прва, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ Скопје, 1999.
- [4] Јован К. Мицковски, Физичка металургија, книга втора, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ Скопје, 1999.
- [5] R.W. Cahn and P. Haasen, Physical Metallurgy, Third revised and enlarged edition, North-Holland Physics Publishing, Amsterdam, 1983
- [6] Porter D.A. and Easterling, Phase transformation in Metals and Alloys, second edition, CRC Taylor and Francis Group, 2004.
- [7] Peter Haasen, Physical Metallurgy, third edition, Cambridge University Press, Melbourne, 2003
- [8] Hermann Schumann, Metallographie, VDE, Leipzig, 1962.
- [9] George Dieter, Mechanical metallurgy, McGraw Hill Book Company, 1988.
- [10] Branko Božić, Fizička metalurgija, Naučna knjiga, Beograd, 1984.
- [11] Horst Böhm, Einführung in die Metallkunde, BI, Mannheim, 1968.