

# Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 3/2017

**Ђорђе Д. Ивковић**

## **Утицај угљеника и легирајућих елемената на заварљивост и прокаљивост угљеничних и легираних челика**

**завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вукић Лазић, ред. проф. - ментор

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- укаже на врсте, значај и поделу легура гвожђа и угљеника;
- укаже на утицај угљеника и легирајућих елемената на својства прокаљивости и заварљивости челика;
- наведе најважније методе за испитивање прокаљивости челика;
- опише и објасни методе за испитивање заварљивости;
- за дате методе прокаљивости прикаже и објасни утицај легирајућих елемената на прокаљивост челика;
- на основу добијених/наведених резултата изведе закључак о утицају угљеника и легирајућих елемената на прокаљивост и заварљивост челика.

Препоручена литература:

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, *Наука о материјалима I*, основни универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] М. Јовановић, В. Лазић, *Технологија ливења и заваривања*, основни универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [3] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, *Технологија заваривања – приручник*, помоћни универзитетски уџбеник, самостално ауторско издање, Крагујевац, 1996.

Крагујевац, септембра 2020.

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

---

## Садржај

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Уводне напомене.....                                                                                 | 1  |
| 2. Легуре гвожђа и угљеника- челици и ливена гвожђа.....                                                | 3  |
| 2.1. Чисто гвожђе.....                                                                                  | 3  |
| 2.2. Угљеник у легурама гвожђа.....                                                                     | 4  |
| 2.3. Уводне напомене о легурама гвожђа и угљеника.....                                                  | 6  |
| 3. Утицај угљеника илегирајућих елемената на особине челика.....                                        | 8  |
| 3.1. Угљеник у челицима.....                                                                            | 8  |
| 3.2. Примесе, заостали гасови и неметални укључци у легурама гвожђа.....                                | 8  |
| 3.2.1. Примесе и заостали гасови у легурама гвожђа.....                                                 | 8  |
| 3.2.2. Неметални укључци у челику.....                                                                  | 9  |
| 3.3. Легирајући елементи у челику.....                                                                  | 10 |
| 3.3.1. Елементи који утичу на проширење $\alpha$ и $\gamma$ области у систему Fe-Fe <sub>3</sub> C..... | 13 |
| 3.3.3. Карбиди у легираним челицима.....                                                                | 16 |
| 3.4. Подела челика према намени.....                                                                    | 19 |
| 3.4.1. Конструкциони челици.....                                                                        | 19 |
| 3.4.2. Специјални челици.....                                                                           | 24 |
| 3.4.3. Алатни челици.....                                                                               | 27 |
| 4. Методе за оцену прокаљивости угљеничних и легираних челика.....                                      | 32 |
| 4.1. Појам и општи значај прокаљивости угљеничних и легираних челика.....                               | 32 |
| 4.2. Фактори који утичу на прокаљивост.....                                                             | 34 |
| 4.3. Џомини проба.....                                                                                  | 37 |
| 4.3.1. Изражавање карактеристика прокаљивости.....                                                      | 42 |
| 4.4. Метода по Гросману.....                                                                            | 43 |
| 5. Методе за оцену заварљивости угљеничних и легираних челика.....                                      | 46 |
| 5.1. Појам и дефиниција заварљивости.....                                                               | 46 |
| 5.2. Методе за испитивање заварљивости.....                                                             | 49 |
| 5.2.1. Рачунске методе.....                                                                             | 49 |
| 5.2.2. Практичне пробе заварљивости.....                                                                | 54 |
| 5.3. Опште напомене о заварљивости и примени техничких метала.....                                      | 56 |
| 5.3.1. Легуре Fe-Fe <sub>3</sub> C (челици).....                                                        | 56 |
| 5.3.2. Међусобно заваривање различитих легура из групе Fe-C.....                                        | 59 |
| 5.3.3. Заваривање површински заштићених челика.....                                                     | 62 |
| 6. Примери процене прокаљивости и заварљивости неких угљеничних челика.....                             | 64 |
| 6.1. Примери процене прокаљивости.....                                                                  | 64 |
| 6.1.1. Тумачење и приказ резултата добијених практичним извођењем Џомини пробе.....                     | 64 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.2. Тумачење и приказ резултата добијених практичним извођењем<br>методе по Гросману..... | 68 |
| 6.2. Практични примери процене заварљивости неких челика .....                               | 69 |
| 6.2.1. Оцена заварљивости конструкционог С-Mn челика са 0.17% С и<br>1.33% Mn .....          | 69 |
| 6.2.2. Оцена заварљивости алатног челика Č5742 (UTOP 55).....                                | 72 |
| 6.2.3. Оцена заварљивости челичног лива ČL3134 .....                                         | 74 |
| 7. Закључак .....                                                                            | 76 |
| 8. Литература.....                                                                           | 77 |

## Резиме

Успешно пројектовање термички обрађених делова или заварених конструкција је засновано на познавању својстава материјала од којег је део израђен. Комплексно технолошко својство које се разматра при изради заварених конструкција јесте заварљивост, односно способност материјала да образује заварени спој тражених својстава. У том смислу заварљивост се може рашчланити на више делова и сваки од тих делова посебно изучавати. Код пројектовања термички обрађених делова, најчешће се разматра металуршко својство прокаљивости материјала од којег је део направљен. Кључни утицај на ова два опречна својства има хемијски састав материјала/челика - садржај угљеника и легирајућих елемената. У овом раду детаљно је приказан утицај угљеника и легирајућих елемената на заварљивост и прокаљивост, а наведен је и преглед метода којима се испитују ова два важна својства. Коначно, на неколико примера различитих челика, приказан је утицај угљеника и хемијског састава на прокаљивост и заварљивост.

**Кључне речи:** *Заварљивост, Прокаљивост, Џомини метода, Гросман метода*

## Abstract

Being succesful in constructing heat treated parts or welded constructions is based on knowing the material properties of that the specific structural part. The property which is independently observed for welded parts is weldability, which could be observed in many different ways. While for the construction of heat treated parts, observed charachteristic is hardenability of part's material. Both mentioned material properties depend on chemical content of material (namely content of carbon and alloying elements). This work gives detailed influence of carbon and alloying elements on weldability and hardenability as well as a review of methods for examining these properties. Finally, a few examples are given with detailed explanation of influence of chemical composition on hardenability.

**Key words:** *Weldability, Hardenability, Jomini method, Grossman method.*

## 1. Уводне напомене

"Челик је био, остао и још задуго остаће главни конструкциони материјал", овом реченицом ментор овог рада је често на својим предавањима студентима указивао на значај челика као широко заступљеног конструкционог материјала. На широк спектар његове примене указује и податак да око 95% укупне светске производње свих метала чини челик. Челик у основи представља легуру гвожђа и угљеника односно, интерстицијски чврст раствор угљеника у гвожђу при чему гвожђе задржава своју кристалну решетку коју атоми угљеника попуњавају. Појам чврст раствор представља физичко-хемијски систем у којем се растворак (угљеник) раствара у растварачу (гвожђу). У току процеса растварања или замене атома долази до модификације кристалне решетке растварача, при чему могу настати два типа чврста раствора и то:

- Супституцијски- атоми раствора замењују атоме кристалне решетке растварача (у систему Fe-C - Cr, Ni, Mo, V, Ti, ...) и
- Интерстицијски- атоми раствора попуњавају шупљине кристалне решетке растварача (у систему Fe-C - C, H, N и B).

Управо по овом другом механизму настају легуре гвожђа и угљеника Fe-C које се још називају и техничко гвожђе.

Готово све машинске конструкције имају делове који се израђују заваривањем одговарајућих елемената. Заваривање представља сложен физичко- металуршки процес на који утиче много утицајних фактора, а само својство заварљивости се најпростије дефинише као способност материјала да образује поуздан заварен спој. Како су се експлоатациони услови погоршавали, паралелно су се развијале нове класе челика које су имале за задатак да испуне те ригорозне радне услове (у погледу јачине, замора, ударне жилавости, ватросталности, термостойности, отпорности на корозију и тсл.). Разлика тј. разврставање челика се односи на њихов хемијски састав. Варирањем садржаја угљеника (C) и легирајућих елемената (Cr, Ni, Mo, Si, Mn, W, B, ...) изводи се промена својстава челика, нпр. додавањем хрома (Cr) преко 12% челик из електронегативности прелази у електропозитивност и на тај начин постаје корозивно отпоран.

Као што је претходно указано, остваривање завареног споја је изузетно сложен метод, којим се савладавају физичке границе елемената конструкције на макро нивоу, а на микро нивоу долази до спајања атома кристалних решетки формирањем јаким металних веза. Да би се савладале ове енергетске баријере између два дела неопходно је уложити одређену количину енергије (топлота, притисак или топлота у комбинацији са притиском) како би се атоми кристалних решетки приближили довољно да се између њих створе одговарајуће међуатомске везе. Начин извођења овог процеса није исти код свих материјала (пре свега се мисли на различите врсте челике). Поједини челици са завајају боље од других, нискоугљенични знатно лакше у односу на нисколегиране и високолегиране челике. Главни утицај на заварљивост управо има садржај угљеника и легирајућих елемената.

Својство суштински супротно заварљивости јесте прокаливаност. Прокаливаност је својство материјала које показује могућност да се у њему на одређеној дубини формира (образује) слој тврде фазе (најчешће мартензитна или полумартензитна структура). На собној температури растворљивост угљеника у гвожђу је веома мала. Загревањем до одговарајућих температура атомима кристалних решетки предаје се одговарајућа енергија услед чега они почињу да осцилују око свог равнотежног положаја повећавајући запремину у кристалне решетке. Повећање запремине директно утиче на количину угљеника која може да се раствори у њој. Такође, треба узети у обзир да се

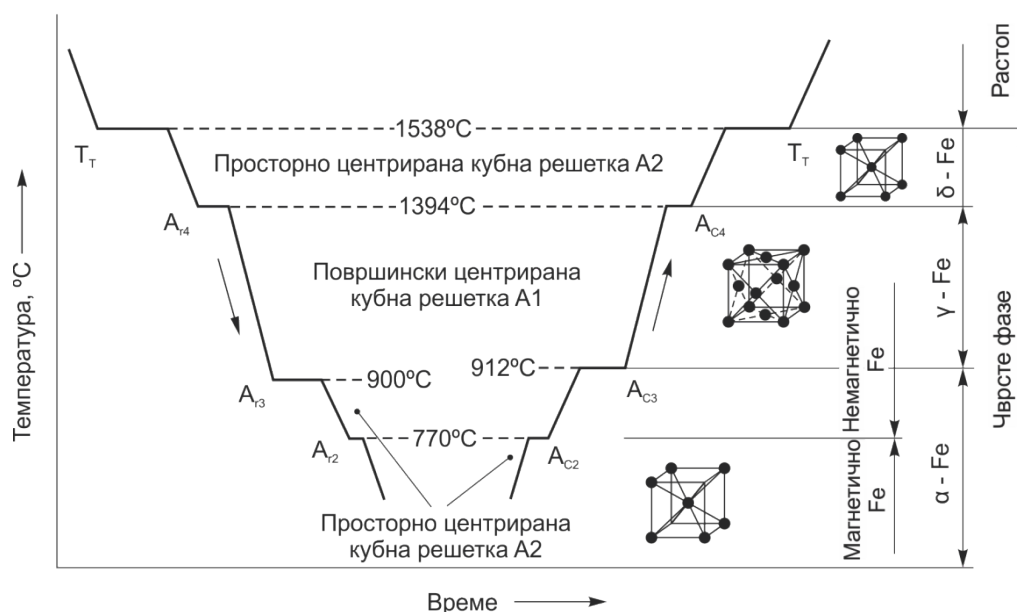
гвожђе у природи може наћи у две алотропске модификације, при чему једна има кристалну решетку типа A2 (просторно центрирану кубну решетку), а друга A1 (површински центрирану кубну кристалну решетку). На температури приближној 770°C гвође са кристалном решетком типа A2 се трансформише у A1 ( $\gamma$ -гвожђа) која има већу запремину од решетки A2 ( $\alpha$ -гвожђа). Узимајући у обзир ова два сазнања можемо да закључимо да је на повишеним температурама у кристалној решетки знатно већа растворљивост угљеника него на собној температури (захваљујући повећању међупростора/шупљина у кристалној решетки  $\gamma$ -гвожђа). Уколико би овако загрејани део гвожђа са повишеним садржајем угљеника споро и равномерно хладио угљеник би дифундовао из кристалне решетки и поново образовао перлит (ферит + цементит), насупрот томе ако би део био хлађен брзином већом од критичне, дифузија би била онемогућена, сав растворени угљеник би се и на собној температури задржао образујући тетрагоналну решетку  $\alpha$ -гвожђа, тј. мартензит (структура која настаје у неравнотежним условима и коју одликује велика тврдоћа и јачина, али и ниска својства пластичности и занемарљива ударна жилавост).

## 2. Легуре гвожђа и угљеника- челици и ливена гвожђа

### 2.1. Чисто гвожђе

Гвожђе (Fe) је хемијски елемент периодног система који припада прелазној групи елемената. Редни број гвожђа је 26, а атомска маса 55.847 g. Температура топљења је 1538°C, а температура кључања 3070°C. Специфична маса (густина) гвожђа износи  $7874 \text{ kg/m}^3$  односно  $7.874 \text{ g/cm}^3$ , специфична топлота (0-100°C)  $463 \text{ J/kgK}$ , термичка проводност  $75 \text{ W/mK}$ , коефицијент термичког ширења  $1.25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , модул еластичности на собној температури  $E = 200400 \text{ MPa}$ , а модул клизања (смицања)  $G = 78000 \text{ MPa}$ .

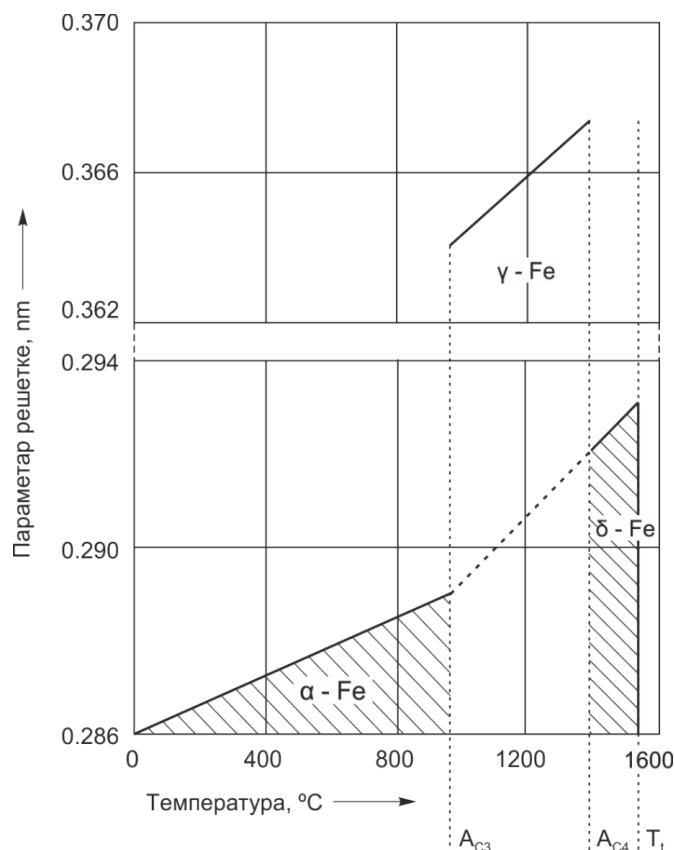
Гвожђе је полиморфан метал што значи да се у природи може наћи у две алотропске модификације  $\alpha$  и  $\gamma$ . Алотропска модификација  $\gamma$  има површински центрирану кубну кристалну решетку (A1), а као стабилна фаза се јавља при загревању од 770 до 1394°C. Модификација  $\alpha$  има просторно центрирану кубну решетку (A2) која је стабилна на температурама испод 770°C и у интервалу 1394-1538°C; у области ниских температура означава се као  $\alpha$ -гвожђе, а у високотемпературној области од 1394 до 1538°C као  $\delta$ -гвожђе. На вишим температурама  $\alpha$ -гвожђе губи феромагнетне особине и у тачки Кири (770°C,  $A_{C2}$ ) постаје парамагнетично (ова модификација је некада грешком сматрана фазом и као  $\beta$ -гвожђе.). Прелазак феромагнетног гвожђа у парамагнетно није праћен променом кристалне решетке, већ се само мења узајамно дејство магнетних момената. Из тог разлога се у чврстом стању могу јавити само два типа кристалне решетке чији се параметри мењају са температуром (слика 2.1). Промена настаје на критичној температури  $\alpha \rightarrow \gamma$  на температури  $A_3$ , промена  $\gamma \rightarrow \delta$  на температури  $A_4$ . Током промене  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  долази до изражаја термички хистерезис, па је управо због тога температура  $A_{C3}$  при загревању виша него при хлађењу ( $A_{C3} > A_{R3}$ ).



Слика 2.1 Крива хлађења и загревања чистог гвожђа

Приказане преображајне (застојне) тачке, одређују се при равнотежном загревању и хлађењу. Наглим хлађењем могу се потпуно или делимично избећи алотропске модификације па се и на собним температурама гвожђе може наћи у метастабилном стању. Ознака „с“ уз слово А односи се на загревање, а „r“ на хлађење.

Кристалној решетки  $\gamma$ -гвожђа припадају 4 атома, а решетки  $\alpha$ -гвожђа 2 атома, због тога се при промени  $\alpha \rightarrow \gamma$ , параметар решетке шири (слика 2.2) што омогућава да се критичне температуре одреде дилатометријски:  $A_3$  (завршетак промене  $\alpha \rightarrow \gamma$ ),  $A_4$  (завршетак промене  $\gamma \rightarrow \delta$ ).



Слика 2.2 Зависност параметра решетке гвожђа од температуре

## 2.2. Угљеник у легурама гвожђа

Челик који се употребљава као главни конструкциони материјал/метал, поред гвожђа и угљеника као компонената, садржи и читав низ других хемијских елемената који му побољшавају најважнија својства (хемијска, физичка, механичка, технолошка).

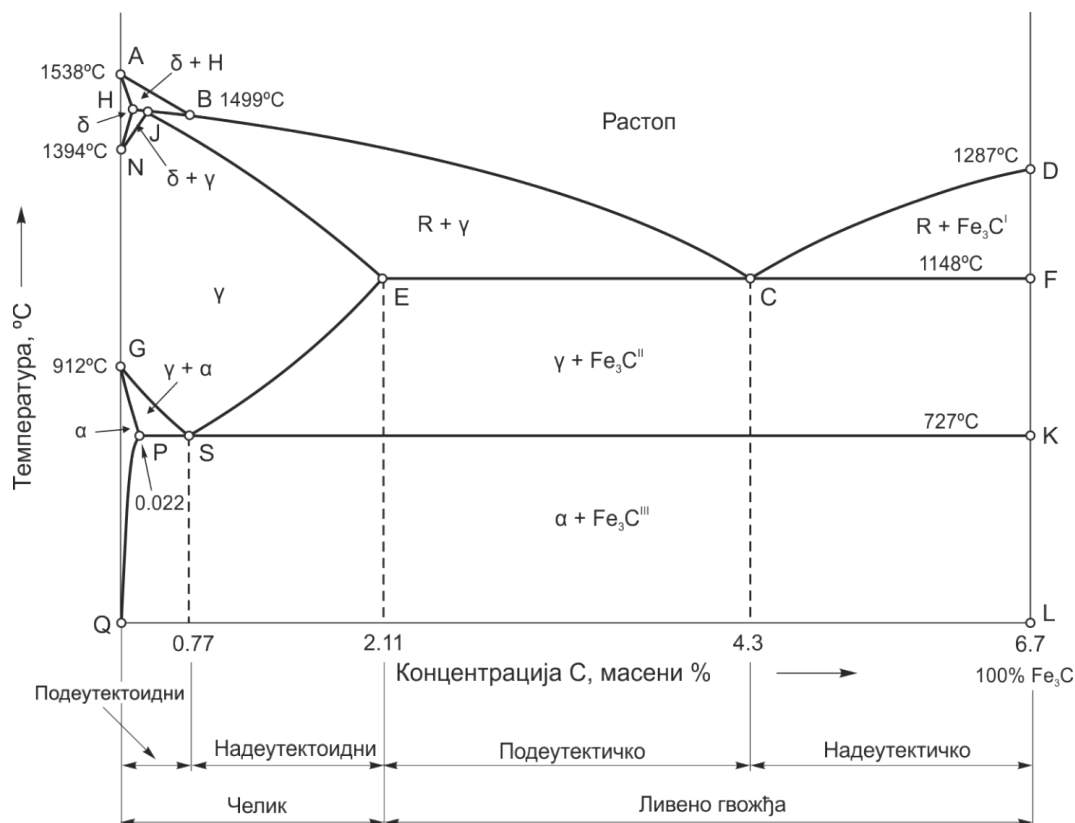
Чисто гвожђе је изузтно кован метал, али његове две главне мане су мала тврдоћа и јачина тј. неповољне физичко-механичке особине. Присуство угљеника у гвожђу, чак и у изузетно малим количинама знатно побољшава особине гвожђа. Угљеник у легурама гвожђа прекрива утицај других пратећих елемената који су увек присутни код угљеничних челика и ливених гвожђа, а такође и одређује коначну структуру легуре гвожђе-угљеник која се директно одражава на механичке особине. Како су атоми угљеника релативно мали ( $R_C = 0.071 \text{ nm}$ ), то им омогућава да са гвожђем граде интерстицијске чврсте растворе:

- интерстицијски чврст раствор угљеника у  $\alpha$ -гвожђу-  $\alpha$ -ферит,
- интерстицијски чврст раствор угљеника у  $\gamma$ -гвожђу- аустенит и
- интерстицијски чврст раствор угљеника у  $\delta$ -гвожђу-  $\delta$ -ферит.

Однос величине атома угљеника и гвожђа  $R_C / R_{Fe} = 0.57$  показује да није могуће веће интерстицијско растварање, нарочито је мало у фериту где празнине нису погодно уређене (решетка има већи број празнина али малих димензија). Без обзира на то,

угљеник има већи утицај на особине гвожђа управо у фериту, него на особине у аустениту ( $\gamma$ -гвожђу) где га има знатно више.

Највећа растворљивост угљеника у фериту је 0.022% на температури 727°C (тачка P, слика 2.3). Са снижавањем температуре, растворљивост угљеника опада по солвус линији до занемарљивих 0.008% на температури 20°C. Максимална растворљивост угљеника у  $\delta$ -фериту је 0.10% на температури 1499°C (тачка H), односно 0.77% у  $\gamma$ -Fe (аустениту) на 727°C (тачка S). Растворљивост угљеника у  $\delta$ -Fe је већа него у  $\alpha$ -Fe, зато што фаза  $\delta$ -Fe има већи параметер кристалне решетке. У чврстом раствору угљеника у  $\gamma$ -Fe, који се као структурна фаза назива аустенит, растворљивост угљеника је знатно већа и достиже максимум 2.11% на температури 1148°C (тачка E).



Слика 2.3 Равнотежни дијаграм метастабилног система  $Fe - Fe_3C$

Садржај угљеника у техничким легурама Fe-C (ливеном гвожђу) по правилу је већи од граничне растворљивости у  $\alpha$ -Fe или  $\gamma$ -Fe. Вишак угљеника образује хемијско једињење  $Fe_3C$ - карбид гвожђа или се издваја у слободном облику као графит.

Карбид гвожђа  $Fe_3C$  који се због велике тврдоће назива цементит кристалише по орторомбичној кристалној решетки ( $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ), а садржи  $\max 6.7\%$  C. Цементит нема алотропске промене, на собним температурама је слабо феромагнетичан, а на температурама преко 210°C постаје парамагнетичан. Температура топљења  $\approx 1287^\circ C$ , специфична маса  $7820 \text{ kg/m}^3$ , а тврдоћа 800-1000 HB. У елементарној решетки цементита неки атоми угљеника могу бити замењени атомима других елемената на пример азота, при чему настају једињења која се називају карбонитриди. Атоме гвожђа из решетке  $Fe_3C$  могуће је заменити другим металима Cr, Mo, W, Mn чиме се добијају легирани карбиди на пример  $(Fe, Mn)_3C$ .

Графит кристалише по хексагоналном систему, не топи се већ директно прелази у гасовито стање на температури приближној  $3370^\circ C$ , специфична маса му је

$2220 \text{ kg/m}^3$ . Механичке особине графита су у односу на механичке особине гвожђа занемарљиве.

За разлику од графита, цементит није стабилна фаза, што значи да није у потпуној термодинамичкој равнотежи и у стању најниже слободне енергије (енталпије) система Fe-Fe<sub>3</sub>C. Систем гвожђе-графит има нижу слободну енергију од система гвожђе-цементит, из тог разлога је карбид гвожђа метастабилна фаза која се жарењем на температурама изнад 727°C разлаже према једначини:



Ова реакција разлагања праћена је ослобађањем реакционе топлоте ( $56929 \text{ J/mol}$ ) и назива се графитизација. Графитизација има велики технички значај, нарочито код графитних ливених гвожђа. Из претходне једначине може се закључити да је у систему гвожђе-угљеник стабилан систем гвожђе-графит, а метастабилан гвожђе-цементит. Без обзира на то, у легурама које не садрже доста угљеника и на температурама испод 727°C, цементит је практично стабилан (стабилност цементита знатно повећавају чак и мале количине карбидотворних елемената, који у кристалној решетки замењују атоме гвожђа дајући легирани цементит.

Узимајући у обзир да угљеник у легурама гвожђа може бити у облику цементита или графита неопходно је разматрати два система легура гвожђе-угљеник:

- метастабилни систем- гвожђе-карбид гвожђа (Fe-Fe<sub>3</sub>C) и
- стабилан систем-г гвожђе-графит (Fe-C).

### **2.3. Уводне напомене о легурама гвожђа и угљеника**

Легуре гвожђа можемо поделити у две групе:

1. Челике и
2. Ливена гвожђа.

Челици представљају легуре гвожђа и угљеника са максималним садржајем угљеника до 2.11% C, па из тог разлога могуће је изводити њихово обликовање технологијама пластичне прераде, како на собној тако и на повишеним температурама (топло ковање, ваљање, истискивање и др.). Осим обликовања пластичном деформацијом на хладно, повољне механичке и друге особине челика могу се добити и термичком обрадом (тзв. изменом својстава).

Ливена гвожђа су легуре гвожђа и угљеника у којима садржај угљеника премашује 2.11%. Ово се такође односи и на сирову гвожђа (бело и сиво) која су намењена за прераду у челик и графитна ливена гвожђа.

Главна разлика између ливеног гвожђа и челика је у томе што ливено гвожђе није ковно. То значи да није могуће вршити његово пластично обликовање. На побољшање својства пластичности не утиче чак ни повишена температура, као што је то случај код топлог ковања челика, где својства пластичности расту на повишеним температурама.

Узимајући у обзир да се у свету производи преко хиљаду врста челика неопходно је груписати их у одговарајуће класе како би се купцима и пројектантима олакшао избор. Челике је могуће поделити на више начина и то према:

- хемијском саставу (на угљеничне и легиране),
- намени (на конструкционе, алатне, специјалне),
- структури (на феритне, перлитне, аустенитне, бејнитне, ледебуритне, мартензитне),

- начину производње (на Томасове, Бесемерове, конверторске (LD), Сименс-Мартенове (SM) и електрочелике (ЕЏ),
- квалитету односно садржају фосфора и сумпора (на челике обичног квалитета, квалитетне челике, челике високог квалитета, племените челике) и
- облику и стању испоруке полуфабриката (на ваљане, вучене, коване, ливене, пресоване, љуштене, брушене).

У челицима се поред гвожђа и угљеника налазе:

- корисни пратећи елементи: Mn, Si, Cu, Al;
- штетни пратећи елементи: S, O, P, N, H и
- додатни легирајући елементи: Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, Co, Ti, Al, Nb, Zr, B, N, Be, Pb и др.

Могуће је уочити да се четири елемента (Mn, Si, Al, N) појављују било као примесе или пак као легирајући елементи, зависно од садржаја у челику.

### **3. Утицај угљеника илегирајућих елемената на особине челика**

#### **3.1. Угљеник у челицима**

Најобичнији угљенични челик у себи садржи најмање шест хемијских елемената: Fe, C, Mn, Si, S и P. На структуру а самим тим и на механичке и технолошке особине највећи утицај има угљеник. Са порастом садржаја C у челику његова структура се мења од феритне, феритно-перлитне, перлитне до перлитно-цементитне. Испитивањем механичких особина челика са различитим садржајем угљеника закључено је да при порасту садржаја од само 0.10% дошло до повећања јачине на кидање ( $R_m$ ) за приближно 90 MPa, а напон течења ( $R_{eH}$ ) за 45 MPa. За исто повећање ( $R_m$  и  $R_{eH}$ ) потребно је приближно 1% Mn, Si, Cr и то појединачно, што значи да угљеник доприноси порасту  $R_m$  и  $R_{eH}$  десет пута више од горе наведених елемената. Код угљеничних челика расте тврдоћа (HB)  $R_m$  и  $R_{eH}$  само до 1.20% C, јер се при даљем порасту садржаја угљеник излучује у облику секундарног цементита по границама перлитних зрна што за последицу има да затезна чврстоћа опада.

#### **3.2. Примесе, заостали гасови и неметални укључци у легурама гвожђа**

##### **3.2.1. Примесе и заостали гасови у легурама гвожђа**

Пратеће примесе Al, Mn, Si потичу из саме руде гвожђа, као и процеса производње сировог гвожђа и челика.

Случајне примесе Cu, Co, Cr углавном потичу из старог гвожђа које се често додаје шаржи при производњи челика и ливеног гвожђа.

Штетне примесе (нечистоће P и S) потичу из руде гвожђа, али и из остатка сагоревања (пепела) железарског или ливачког кокса. Пепео садржи  $K_2O$ ,  $P_2O_5$ , CaO, CaS који реагују са истопљеном рудом, те се због овог ефекта јављају повећане количине P и S. За квалитетне челике ( $P < 0.035\%$ ,  $S < 0.040\%$ ) користе се боље припремљене руде (довољно обогаћене) и посебни начин производње у електричним пећима (двоструко претапање и рафинација). Легиуре гвожђа које садрже више сумпора образују сулфид гвожђа (Fe-S) који се не раствара у челику. При очвршћавању челика настаје нискотопљива еутектика Fe-FeS ( $T_f = 985^\circ C$ ) која попут омотача обавија зрна аустенита и умањује им кохезиону јачину, која додатно опада када се челик загрева до аустенитног подручја било због ковања, ваљања, заваривања или термичке обраде. Као последица појаве ове еутектике у комбинацији са загревањем челика појавиће се топле прслине (црвена ломкост/ломљивост). Из тог разлога повишен садржај сумпора погоршава ковност, заварљивост, жилавост, отежава дисперзију преципитата. Штетно деловање сумпора могуће је ублажити повећањем садржаја мангана (Mn) у челику који везује сумпор и образује једињење MnS чија је  $T_f = 1620^\circ C$  услед чега један део овог сулфида испливава на површину, а преостали MnS се задржава у челику у виду ситних укључака мање штетних од FeS.

Фосфор из руде гвожђа доспева у челик при чему  $P < 0.10\%$ , образује чврсте растворе са Fe, у ливеном гвожђу формира фосфид  $Fe_3P$ . Утицај фосфора у челицима је штетан, он погоршава жилавост, повећава прелазну температуру и изазива хладну ломкост (плави лом), односно појаву прслина на собним температурама.

Кисеоник у челик доспева из околне атмосфере у току производних процеса ливења, ковања ваљања, заваривања и тсл. Кисеоник се у растопљеном челику

раствара, а при његовом очвршћивању стварају се оксиди  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Оксид ( $\text{FeO}$ ) се у гвожђу раствара супституцијски тј. молекули  $\text{FeO}$  замењују атоме  $\text{Fe}$  у његовој кристалној решетки. Овако растворени оксид знатно погоршава све корисне особине челика, па је из тог разлога на крају производног процеса неопходна дезоксидација челика која се врши помоћу  $\text{Mn}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$  и  $\text{Ti}$  те настају оксиди  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , који као лакши прелазе у троску, због познате чињенице да течни метали растварају сопствене оксиде, а стране као лакше избацују на површину растопа.

Азот у течан челик доспева такође из спољашње средине (атмосфере) до износа који зависи од начина производње челика. Азот се у растопу раствара, а у  $\gamma\text{-Fe}$  и  $\alpha\text{-Fe}$  образује чврсте растворе са садржајем азота сразмерном датој температури. При спором хлађењу вишак азота из  $\alpha\text{-Fe}$  се излучује и образује стабилан нитрид  $\text{Fe}_4\text{N}$ , док се при бржем хлађењу издваја  $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$  који је нестабилан па у току времена постепено прелази у стабилно стање. Из тог разлога се по границама зрна издвајају нитриди услед чега жилавост челика опада с временом, те си из тог разлога ова појава назива старење. Старење на собној температури може дуго да траје, зато се тај поступак убрзава загревањем и прогревањем на температури око  $250^\circ\text{C}$ , обрадом на хладно или пак комбиновано (тзв. вештачко старење). Отпорност челика према старењу може се побољшати уносом хемијског елемента који има већи афинитет према азоту од гвожђа. Најпогоднији елемент је алуминијум који са азотом гради (образује)  $\text{AlN}$  и који се већ уноси у челик као дезоксидатор.

Водоник доспева у челик из влажне атмосфере металуршке пећи или из сировина за шаржирање. Током очвршћивања растопа растворљивост водоника нагло опада услед чега се он одваја у виду гасних мехурова. При даљем хлађењу на температури око  $200^\circ\text{C}$  водоник престаје да дифундује услед чега се његови атоми нагомилавају на дефектима кристалне решетки и прелазе у молекуле, што је праћено великим локалним порастом притиска и ширењем иницијалних прелина. Штетно дејство водоника умањује се производњом у посебним вакуумским пећима са додатним жарењем.

### 3.2.2. Неметални укључци у челику

Одређене примесе које се стално налазе у челику, растварају се у фериту ( $\text{Mn}$ ,  $\text{Si}$  и  $\text{P}$ ) или цементиту ( $\text{Mn}$ ). Све остале примесе се појављују као самостални структурни састојци: оксиди, силикати, сулфиди, алуминати и нитриди. Све нечистоће које су нерастворљиве у основном металу ( $\text{Fe}$ ) називају се неметални укључци или инклузије. Пошто настају у току кристализације и у току даљег хлађења до собне температуре, а не из околине називају се ендегени укључци.

Алуминати су тврди оштроугли укључци који се у току прераде ваљањем и ковањем издвајају у тракастом облику. Ова грешка се назива грешком тракавости, а утиче на пад механичких особина: пре свега жилавости и заморне јачине, јер долази до прекида континуитета металне масе.

Силикатни и сулфидни укључци се у току пластичне прераде на топло деформишу и издужују у правцу ваљања, неповољно дејство је изражено готово као код алумината где се одвајају траке које прекидају континуитет металне масе, што доводи до пада механичких особина.

Оксидни и нитридни укључци у челицима представљају фино распршене (дисперговане) честице које су мање штетне када нису међусобно повезане.

Контрола облика и величине неметалних укључака се може обавити металографским испитивањима на одговарајућим узорцима применом оптичког микроскопа.

Хемијски елементи Mn и Si у зависности од садржаја у челику могу да се третирају као пратећи елементи (настали у железари у току процеса производње) или као легирајући елементи ( $Mn > 0.80\%$ ,  $Si > 0.60\%$ ).

Већи део мангана се у фериту раствара супституцијски, мањи део у цементиту при чему настаје легирани цементит  $(Fe, Mn)_3C$  чиме он постаје стабилнији, што заједно са феритом ојачаним манганом доприноси повећању  $R_m$  и  $R_{eH}$  челика са феритно-перлитном структуром.

Силицијум се такође у фериту раствара супституцијски те на тај начин побољшава механичке особине, али има и улогу дезоксидатора.

Бакар није уобичајен састојак челика. Он потиче из неких руда или из отпадних шкољки аутомобила које се пресују и користе као додатак шаржи у конвертору за производњу челика. Примесе бакра у челику не утичу толико на механичка својства, али знатно утичу на отпорност челика на спољашњу атмосферу (атмосферилије).

Садржај цементита код челика са феритно-перлитном структуром може се одредити из дијаграма Fe-Fe<sub>3</sub>C, искључиво за равнотежне услове. Уколико се хлади брзином већом од критичне (равнотежне), удео Fe<sub>3</sub>C у перлиту расте што доводи до пораста  $R_m$  и  $R_{eH}$ . Такође, механичка својста  $R_m$  и  $R_{eH}$  нискоугљеничних челика са истим садржајем угљеника расту са степеном хладне прераде.

У зависности од садржаја угљеника челике можемо поделити на:

- нискоугљеничне ("меке") са садржајем угљеника до 0.25%,
- средњеугљеничне са садржајем угљеника од 0.25 до 0.60% и
- високоугљеничне са садржајем угљеника преко 0.60%.

### 3.3. Легирајући елементи у челику

Осим компоненти Fe и C, примеса (Si и Mn), легирани челици у себи садрже и додатне елементе који се сматрају легирајућим, ако их има више од вредности наведених у табели 3.1. Граничне вредности су дефинисане стандардом EN 10020.

**Табела 3.1** Приказ легирајућих елемената који се могу наћи у челику

| Легирајући елементи | Mn   | Si  | Ni  | V    | Cr  | W   | Ti   | Al  | Co  | Cu  | Mo   | Zr, Nb, B, N, Pb |
|---------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------------------|
| %>од                | 1.65 | 0.6 | 0.3 | 0.01 | 0.3 | 0.1 | 0.05 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.08 | Нема података    |

Велики број горе наведених хемијских елемената образује са гвожђем супституцијске чврсте растворе. Изузетак представљају бор (B) и азот (N), чији су атомски радијуси довољно мали те се могу растварати интерстицијски. Док се год у челику налазе бакар (Cu) и олово (Pb), азот и бор остају у елементарном стању.

Сопствене карбиде граде Mo, Ti, B, W, а комплексне карбиде Cr, Mn, Mo и W. Челици који у себи садрже само један легирајући елемент називају се једноструко легирани челици, а они са већим бројем легирајућих елемената називају се вишеструко легирани челици. Према садржају легирајућих елемената челике можемо поделити на нисколегиране (у свом саставу садрже до 5% легирајућих елемената) и високолегиране челике (садрже преко 5% легирајућих елемената).

Структура као и особине нисколегираних челика најсличније су нелегираним (угљеничним) челицима, али постоји неколико изузетака у којима су легирани челици бољи од нелегираних. Познато је да са порастом температуре долази до пада

механичких својстава (затезна јачина, жилавост и тсл.). Легирани челици за разлику од нелегираних имају блажи пад ових особина на повишеним температурама (до 600°C).

Високолегирани челици могу бити термостойани (задржавају  $R_m$  и  $R_{eH}$  изнад 600°C), али и ватроотпорни (отпорни су на хемијску корозију у спољашњој атмосфери и у врелим гасовима).

Легирајући елементи у челицима могу образовати:

- Чврсте растворе у гвожђу (Ni, Si, Mn, Cr, V, W, Ti, Nb, Al),
- Сопствене карбиде ( $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$ , MoC, VC,  $W_2C$ , TiC, NbC),
- Легиране карбиде  $(Fe, Mn)_3C$ ,  $(Fe, Cr)_3C$  и
- Распршене честице у елементарном стању (Cu, Pb).

У даљем току биће појединачно анализиран утицај најважнијих легирајућих елемената на карактеристике челика.

Легирање челика *никлом* има повољан утицај на механичке особине. Растворени никл у фериту повећава јачину, а задржава добру жилавост и истегљивост. Делује као гарфитизатор, разлаже  $Fe_3C$ , те се челици богати никлом производе са мањим садржајем угљеника. Никл се посебно додаје челицима који су предвиђени за рад у условима екстремно ниских температура (криогена техника), јер омогућава поуздан рад на температурама чак до -200°C

*Манган* се у фериту раствара супституцијски и на тај начин замењује неке атоме Fe у елементарној решетки што се резултује повећањем  $R_m$  и  $R_{eH}$  и спречавањем појаве црвене ломкости, јер везује сумпор при чему образује једињење MnS. Челик који у себи садржи 1% Mn употребљава се за језгра електромагнета. Од манганских челика најпознатији је Хадфилдов челик који у себи садржи приближно 13% Mn и око 1% C, и има велику површинску тврдоћу. Велика површинска тврдоћа јавља се као последица појаве мартензита који у овом случају не настаје каљењем, већ ударним дејством на хладно у површинским слојевима. Хадфилдов челик има велику примену у железничком саобраћају за израду железничких скретница, одбојнике, за платформе расутих материјала, за гусенице возила, ударне греде дробилица и тсл. Када се плитки слој мартензита похаба, поновном излагању ударном радном оптерећењу индукује се из аустенита нови слој мартензита.

*Силицијум* као легирајући елемент повољно утиче на механичке особине (подиже вредност напона течења али и затезне јачине), али смањује истегљивост. Овакви челици се претежно користе за израду опруга, јер силицијум подиже границу еластичности.

*Хром* се у нелегираним челицима може наћи као примеса до 0.30%, легираним челицима се додаје у количинама од 0.70 до 3.5%, у хромним (нерђајућим) челицима, због познатог феномена промене електродног потенцијала садржај хрома се креће у границама од 12 до 18%, а у Cr-Ni челицима садржај хрома је највећи и креће се у границама од 9 до 35%. Порастом садржаја хрома расте прокаљивост челика, а опада заварљивост. Код аустенитних челика додавањем хрома постиже се ватропостојаност у оксидационим условима ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ), али је мање ефикасан од молибдена и ванадијума. У челицима који садрже више угљеника него што је то потребно за формирање перлита, хром формира посебне врсте карбида ( $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  и  $Cr_3C_2$ ), као и сегрегате по границама металних зрна што доводи до локалне међукристалне корозије. Критичан температурски интервал у којем се јављају карбиди хрома је 500-800°C, јер због стварања карбида долази до пада садржаја хрома испод 12% односно испод границе корозивне отпорности. Хром такође утиче на подизање температуре  $A_{C1}$  што за последицу има успоравање растварања карбида хрома у аустениту. Из тог разлога је за

каљење ових челика неопходна виша температура и прогревање него код угљеничних челика, како би се добио хомогени аустенит. Легуре Fe-Cr-C могу бити подеутектоидне, еутектоидне, наеутектоидне, ледебуритне и феритно-карбидне. Челици са високим садржајем хрома имају два пута мању термичку проводност од угљеничних челика, па при обради у загрејаном стању (топло ковање, ваљање и тсл. ) треба водити рачуна о томе, јер услед слабе проводности може доћи до локалног прегревања неких подручја, уместо равномерне расподеле топлоте.

*Молибден* са садржајем од 0.20 до 0.50% у челицима утиче на уситњавање металних зрна, што доводи до повећања својстава жилавости, прокаљивости, напона течења и затезне јачине.

*Волфрам* при кристализацији уситњава метална зрна, јер се карбиди волфрама излучују по границама зрна и спречавају њихов пораст. Прокаљивост се незнатно повећава, док заварљивост драстично опада нарочито код челика са повишеним садржајем угљеника. При порасту садржаја волфрама расте електрична отпорност, а опада термичка проводност. Волфрам такође повећава својство отпорности према корозији, као и отпорност према међукристалној корозији аустенитних челика.

*Ванадијум* се у челицима најчешће среће у границама од 0.20 до 0.85%, а код челика за рад на топло у границама од 1.0 до 1.5%. Ванадијум утиче на повећање прокаљивости, а самим тим утиче и на погоршање заварљивости. У процесима загревања повољно делује као заштита од прегревања, јер карбиди ванадијума који се формирају спречавају (коче) пораст металних зрна.

*Тантал* је високо карбидотворан легирајући елемент, па је његова најчешћа улога да изврши стабилизацију челика отпорних на киселине, јер везује угљеник и спречава дифузију хрома из  $\gamma$ -Fe, те у чврстом раствору садржај хрома премашује 12% (граница отпорности челика на корозију).

*Титан* делује као стабилизатор код нерђајућих хромних челика, јер везује угљеник и задржава хром у чврстом стању у  $\gamma$ -Fe. Титан такође формира нитрид који није растворљив у челику, те делује као центар кристализације при фазним променама што даје ситнозрнасту структуру.

*Ниобијум* има велики афинитет према угљенику те образује карбид NbC. Често се може наћи као састојак финозрних микролегираних челика повишене јачине (садржај до 0.05%). Такође утиче на спречавање сегрегације, па код хромних нерђајућих челика умањује склоност ка топлим прслинама. Ниобијум сужава аустенитно подручје, смањује прокаљивост и погоршава заварљивост.

*Бакар* се сразмерно додаје конструкционим челицима до 0.50% чиме се повећавају напон на граници течења и затезна јачина, док својства пластичности готово не опадају. Бакар такође утиче на заштиту челика од атмосферских утицаја, из тог разлога се челичне жице за заваривање у заштити гасова (Ar, CO<sub>2</sub>) бакаришу (наношењем танког слоја бакра).

*Азот*, слично угљенику повећава својства јачине аустенитних челика на собној и повишеним температурама. Предност у односу на угљеник је та што се не сједињује са хромом те не утиче у толикој мери на заваривање Cr-Ni челика. Неповољно дејство азота се огледа у томе што смањује својства пластичности аустенитних челичних лимова и тиме отежава прераду на хладно нпр. дубоким извлачењем.

*Алуминијум* има велику склоност ка образовању нитрида те умањује старење челика, тако што формира нитриде са азотом. Челици који садрже алуминијум у границама од 0.02% до 0.2% имају ситнија зрна првобитног аустенита, јер се око њих формирају оксидне и нитридне скраме (AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) које коче раст зрна. Алуминијум се

такође у малим количинама додаје нерђајућим челицима како би се спречила њихова оксидација на ваздуху и врелим гасовима, јер се на граничној површини образује заштитни слој  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Ако се у челику налази више од 1% алуминијума заварљивост му се нагло погоршава.

Бор је карбидотворни елемент који знатно повећава прокаљивост челика, чак и при веома малом садржају (0.003%). Спада у легирајуће елементе који утичу на проширење  $\gamma$  области, те у аустенитним челицима повећава термостојаност тако што ојачава границе зрна.

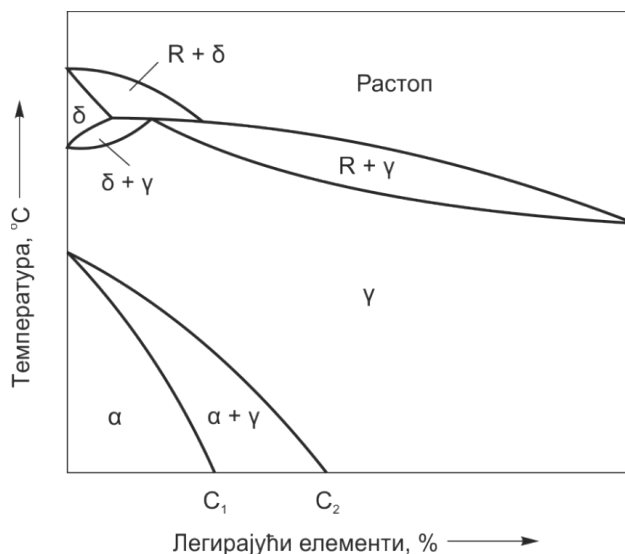
### 3.3.1. Елементи који утичу на проширење $\alpha$ и $\gamma$ области у систему Fe-Fe<sub>3</sub>C

Сви легирајући елементи утичу мање или више утичу на температуре прекристализације, а самим тим и на величину феритне и аустенитне области. За термичку обраду, најважније је познавати утицај легирајућих елемената на  $\gamma$ -област, те стога разликујемо:

1. Елементе који у потпуности отварају  $\gamma$ -област,
2. Елементе који проширују  $\gamma$ -област,
3. Елементе који потпуно затварају  $\gamma$ -област и
4. Елементе који сужавају  $\gamma$ -област.

#### 3.3.1a Елементе који у потпуности отварају $\gamma$ -област

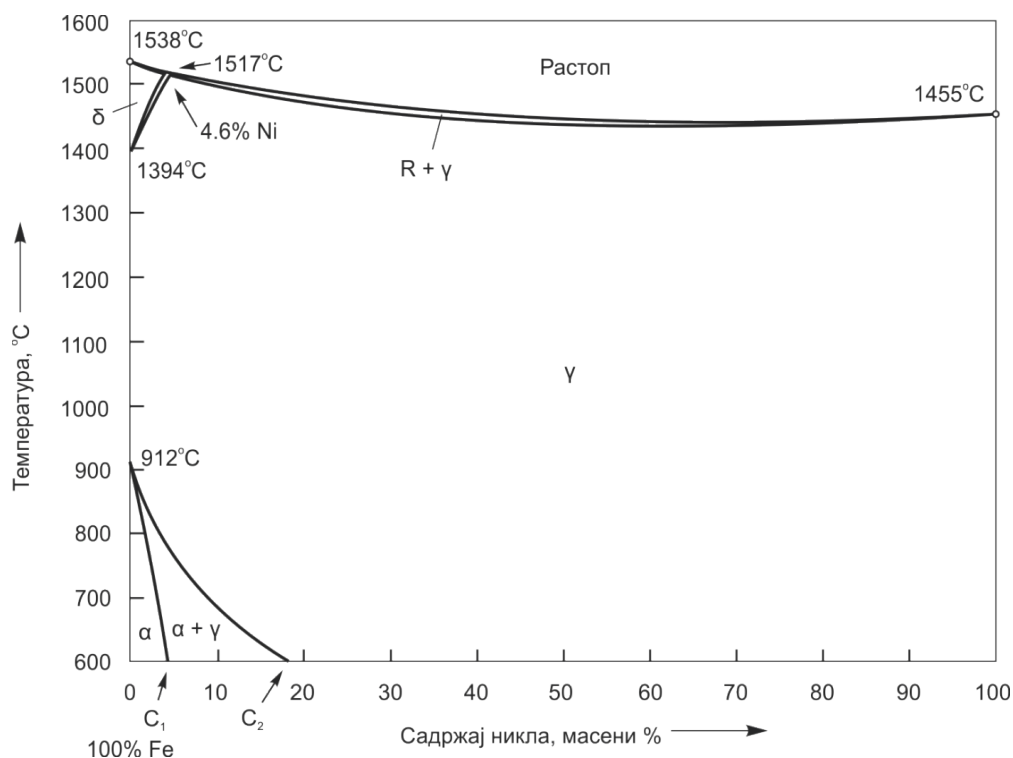
У равнотежном бинарном дијаграму Fe-M<sup>1</sup> неки елементи проширују аустенитну област, те се  $\gamma$ -фаза, може одржати све до собне температуре (слика 3.1).



**Слика 3.1** Равнотежни бинарни дијаграм са отвореном гама облашћу

Све до концентрације  $\gamma$ -геног елемента М дате тачком  $C_1$  (слика 3.1), одвија се потпуна прекристализација  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Када је садржај елемента М између тачака  $C_1$  и  $C_2$  одвија се делимична прекристализација  $\gamma$  у  $\alpha$ . Ако се садржај елемента М повећа изнад границе  $C_2$  легуре ће и на собној температури имати само  $\gamma$ -фазу. Дијаграм потпуно отворене  $\gamma$ -области са гвожђем образују елементи чији су атомски радијуси приближни по величини атому гвожђа, а елементарна кристална решетка приближно слична фази  $\gamma$ . Најпознатији гамагени елементи су Ni и Mn, а пример равнотежног дијаграма са потпуно отвореном гама области је дијаграм Fe-Ni дат на слици 3.2.

<sup>1</sup> М- уопштено означава неки метални легирајући елемент.



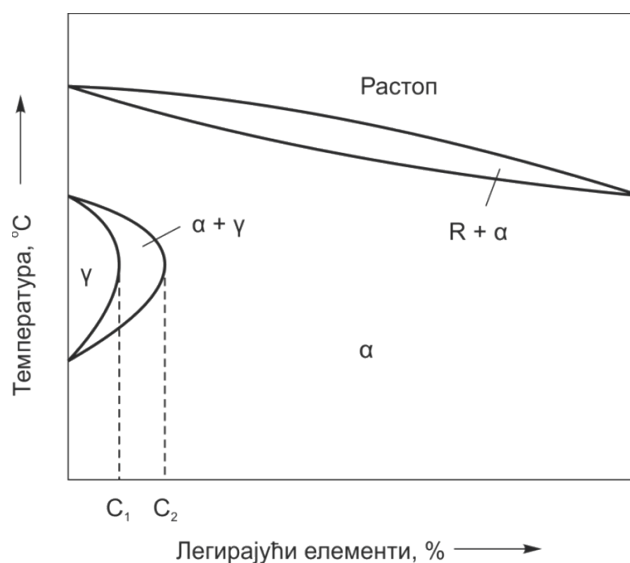
Слика 3.2 Равнотежни бинарни дијаграм Fe-Ni са отвореном гама облашћу

### 3.3.1б Елементи који проширују $\gamma$ област

Додатни елементи као што су Cu и N проширују  $\gamma$  област, али недовољно да се она отвори у потпуности како би прекристализација  $\gamma \rightarrow \alpha$  била у потпуности потиснута. Ови елементи проширују  $\gamma$  -област али не у тој мери да се аустенитна фаза задржи и на собним температурама.

### 3.3.1в Елементи који потпуно затварају $\gamma$ област

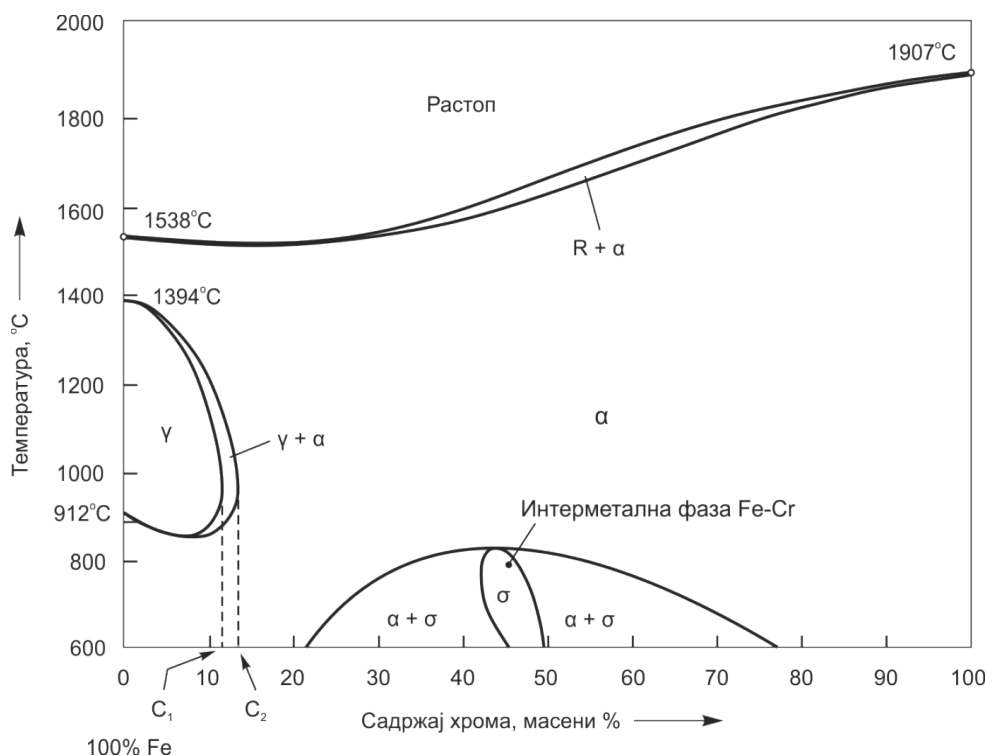
Ако челик садржи легирајуће елементе који подижу температуру прекристализације, доћи ће до затварања  $\gamma$ - области као на слици 3.3.



Слика 3.3 Равнотежни бинарни дијаграм са затвореном облашћу гама

При загревању легура које садрже легирајуће елементе М испод тачке  $C_1$  у једном интервалу температура десиће се потпуна рекристализација  $\gamma$  у  $\alpha$ , док се за

легуре између  $C_1$  и  $C_2$ , одвија делимична трансформација  $\gamma$  у  $\alpha$ . Коначно код легура са садржајем легирајућег елемента изнад границе  $C_2$ ,  $\alpha$  се задржава све до собне температуре. Ове легуре не врше прекристализацију ни при загревању нити при хлађењу, те се ферит који је настао из растопа означава као  $\delta$ -ферит, за разлику од  $\alpha$ -ферита који настаје прекристализацијом  $\gamma$ -фазе. У феритотворне елементе или  $\alpha$ -гене који у потпуности затварају област  $\gamma$  спадају: Cr, Mo, V, W, Si, Al, Ti и P. Типичан пример бинарног дијаграма који затвара  $\gamma$ -област је равнотежни дијаграм бинарни Fe-Cr приказан на слици 3.4.



**Слика 3.4** Равнотежни бинарни дијаграм Fe-Cr са затвореном облашћу гама

### 3.3.1г Елементи који сужавају $\gamma$ -област

Елементи који се употребљавају за сужавање ове области су: ниобијум, тантал, цирконијум и церијум. Ови елементи се, осим у неким посебним случајевима микролегирања, не употребљавају за легирање челика.

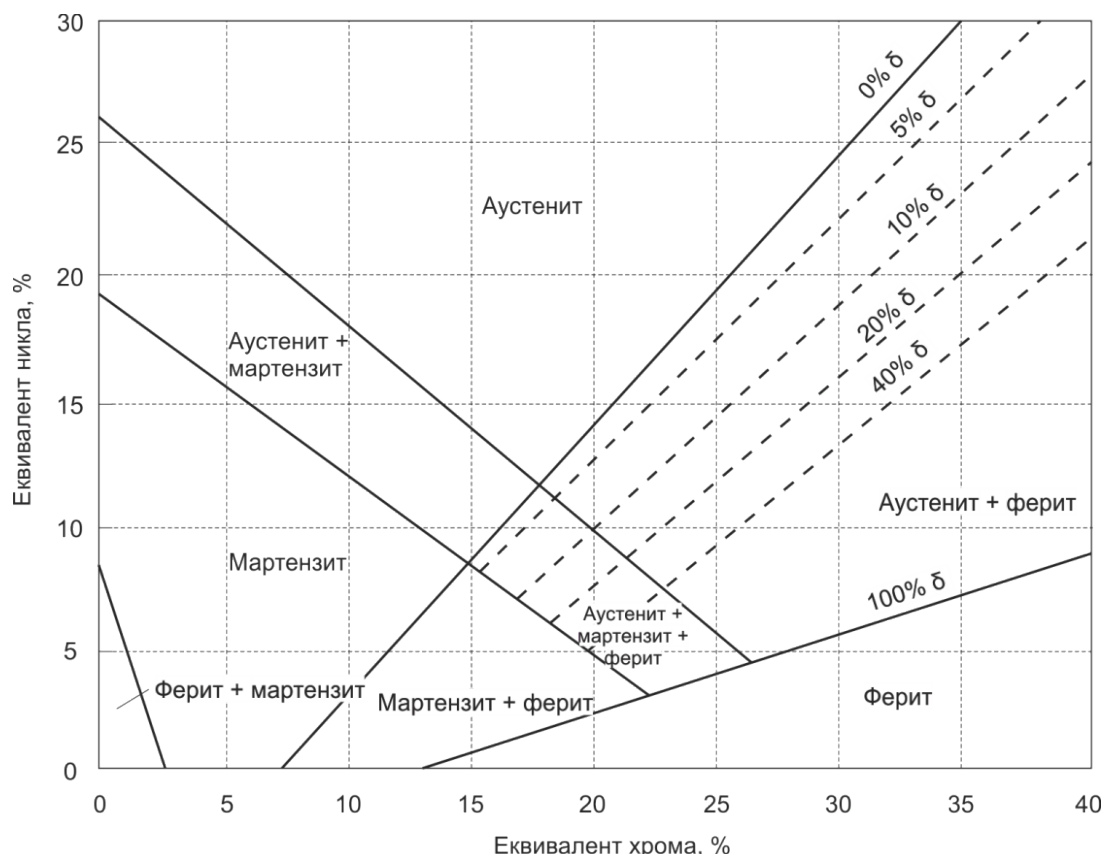
#### *Утицај легирајућих елемената на фазне промене челика*

Легирајући елементи у челику делују готово идентично као и у Fe-Fe<sub>3</sub>C дијаграму. Са порастом садржаја  $\gamma$ -генних елемената опада температура прекристализације челика, што не утиче само на проширење  $\gamma$ -области већ и на особине самог челика. Особине челика зависе од преображајне температуре аустенита у перлит. Ако се температура трансформације аустенита довољно снизи потхлађивањем, дифузиона промена у перлит може бити потиснута, те ће се аустенит преобразити у мартензит механизмом клизања. Порастом садржаја аустенитотворних елемената изнад одређене границе, задржаће се аустенитна структура и на собној температури. То значи да се поступком легирања могу добити челици који и на собној температури имају аустенитну структуру односно, аустенитни челици који нису магнетични, имају ниску границу течења, малу тврдоћу, али високу жилавост и истегљивост.

Са повећањем садржаја феритотворних елемената (Cr, Mo, V, Si),  $\gamma$ -област ће се сужавати, тако да се  $\delta$ -ферит може задржати од солидуса па све до собне температуре.

Типичан пример су феритни нерђајући челици са 12-30% Cr, и веома ниским садржајем угљеника. Хром без већих потешкоћа образује легиране карбиде, што смањује корозивну отпорност феритних челика, јер Cr излази из чврстог раствора гвожђа.

Легирани челици истовремено могу да садрже елементе који проширују аустенитно подручје ( $\gamma$ -гени елементи: Ni, Mn, Cu), као и елементе који проширују феритно подручје ( $\alpha$ -гени елементи Cr, Mo, Si, Nb) те се коначна структура таквих челика може утврдити само металографским испитивањима. На бази тих испитивања амерички металург Шефлер (Schaffler) је конструисао дијаграм (слика 3.5) који служи за процену структуре вишелегираних челика, као и за друге сврхе (избор додатних материјала при заваривању нерђајућих челика).



Слика 3.5 Шефлеров дијаграм

За одређивање структуре према Шефлеровом дијаграму најпре треба израчунати еквивалент никла ( $(Ni)_e$ ) и еквивалент хрома ( $(Cr)_e$ ):

$$(Ni)_e = Ni + 30 \cdot C + 0.5Mn \text{ и}$$

$$(Cr)_e = Cr + Mo + 1.5 \cdot Si + 0.5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti.$$

После израчунавања еквивалента хрома и никла потребно је те вредности унети у Шефлеров дијаграм те на основу тих података очитати структуру датог челика (мартензитну (М), аустенитну (А), феритну (Ф) или комбиновану).

### 3.3.3. Карбиди у легираним челицима

Велики број легирајућих елемената се у челику и ливеном гвожђу сједињује образујући сложена једињења која се називају карбидима.

Експериментално је утврђено да карбиде у челицима образују само они легирајући елементи у чијем се поднивоу налази мање електрона него код атома гвожђа. Што елемент има мањи број електрона у подслоју  $d$  (табела 3.2) то ће му

склоност ка образовању стабилног карбида бити већа. У табели 3.2 се поред схеме расподеле електрона појединих хемијских елемената, налазе и други битни подаци о датом елементу нпр. односи радијуса атома  $r_c/r_M$ .

**Табела 3.2** Атомски бројеви, енергетска стања неких легирајућих елемената, атомски радијуси карбидотворних елемената и однос  $r_c/r_M = 0.71/r_M$

|                                       |                                       |                                       |                                       |                                       |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Ti<br>22<br>$3d^2 4s^2$<br>0.147/0.48 | V<br>23<br>$3d^3 4s^2$<br>0.132/0.54  | Cr<br>24<br>$3d^5 4s^1$<br>0.125/0.57 | Mn<br>25<br>$3d^5 4s^2$<br>0.112/0.63 | Fe<br>26<br>$3d^6 4s^2$<br>0.124/0.57 |
| Zr<br>40<br>$4d^2 5s^2$<br>0.155/0.46 | Nb<br>41<br>$4d^4 5s^1$<br>0.143/0.50 | Mo<br>42<br>$4d^5 5s^1$<br>0.136/0.52 |                                       |                                       |
| Hf<br>72<br>$5d^2 6s^2$<br>0.157/0.45 | Ta<br>73<br>$5d^3 6s^2$<br>0.143/0.50 | W<br>74<br>$5d^4 6s^2$<br>0.137/0.52  |                                       |                                       |

У складу са претходно поменутиим правилом о склоности ка образовању карбида можемо формирати следеће редове:

Ti←V←Cr←Mn←Fe,

Zr←Nb←Mo,

Hf←Ta←W.

Посматрајући истовремено табелу 3.2 и претходно постављене редове можемо закључити следеће:

Легирајући елементи чији је подниво  $d$  поседнутиј иелектронима него гвођже, уопште не образују карбиде у легурама гвођђа, нарочито они који имају у потпуности испуњен тај подниво (Cu, Zn).

Кад се у челику нађе више карбидотворних елемената, онда ће се угљеник најпре везивати за елемент чија је склоност ка формирању карбида већа, нпр. челик легиран титаном и ванадијумом. Посматрајући таблицу јасно можемо закључити да ће се најпре образовати карбид титана, па после тога карбид ванадијума, док се карбид  $Fe_3C$  уопште не формира.

Карбидотворни елементи (Zr, Hf, Ti и др.) образују кристалне фазе следећих карактеристика (однос  $r_c/r_M$ ) је мањи од 0.59:

- имају стехиометријски однос MC или  $M_2C$ , где је метал M, а C угљеник,
- имају просту кристалну решетку коју чине атоми на рогљевима призме, као и површински центрирану кубну решетку мешовитих кристала (карбиди типа MC) или хексагоналну решетку (карбити типа MC или  $M_2C$ ),
- могу образовати кристалне решетке без атома угљеника, тј. могу се кристалисати на такав начин да неке чворне тачке остану непопуњене и
- стабилна једињења са изузетно високом температуром топљења (2500-3500°C) и готово нерастворљива у аустениту и са високом тврдоћом.

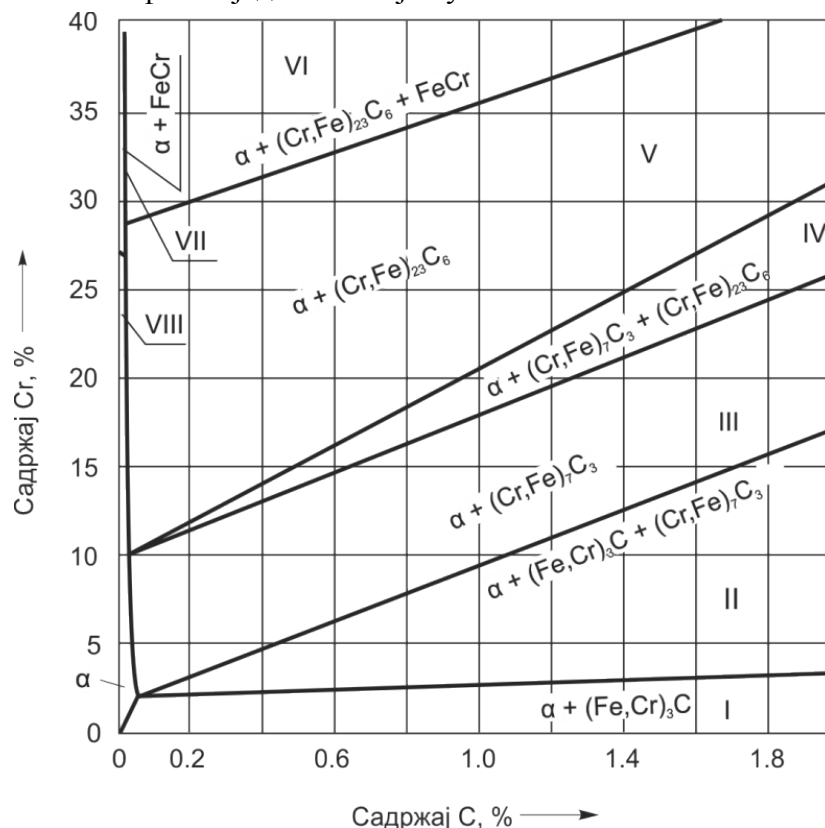
У зависности од вредности односа радијуса угљеника према радијусу атома карбидотворних елемената већег од 0.59 (нпр. Mn) карбиди имају сложену структуру  $(Fe,Mn)_3C$ . Велики део познатих карбида кристалише се у три кристалографска

система: кубном, хексагоналном или ромбичном, при чему неки елементи могу образовати две врсте карбида, док манган и хром могу образовати чак три врсте карбида са различитим решеткама.

Најпростији карбиди кристалишу према кубном систему примитивне кристалне решетке типа MC. Такве карбиде образују V, Ti, Nb, Ta и Hf. Нешто сложенији карбиди кристалишу се по хексагоналном систему са решеткама типа MC и M<sub>2</sub>C. Хексагоналне решетке типа MC образују карбиди молибдена и волфрама, а типа M<sub>2</sub>C осим молибдена и волфрама, образују још ванадијум, тантал и ниобијум. Хексагоналну решетку такође има и карбид Fe<sub>2</sub>C (ε-карбид) који се може јавити у каљеним и нискоотпуштеним челицима. Елементи који образују карбиде ромбичне кристалне решетке су: Cr, Mn, Fe, Co и Ni.

Из аспекта отпорности на високе температуре и хабање, посебну улогу имају карбиди хрома и њему слични карбиди мангана који могу имати различите кристалне решетке: кубну, хексагоналну (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и Mn<sub>7</sub>C<sub>3</sub>), као и ромбичну (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> и Mn<sub>3</sub>C). Осим карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, сви остали се могу појавити у ливеном гвожђу, при чему један број атома гвожђа може бити замењен у другим металом.

На слици 3.6 је дат дијаграм који показује структурне фазе у легурама Fe-C-Cr у зависности од садржаја угљеника и хрома. Када је садржај угљеника минималан нема појаве карбида хрома, јер је сав хром растворен у фериту и цементиту, док поље I садржи (α + (Fe,Cr)<sub>3</sub>C), поље II (α + (Fe,Cr)<sub>3</sub>C + (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>), а поље III (α + (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>). У пољу IV се налазе α и два карбида хрома (Cr,Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> и (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Поље V само (α + (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub>). У пољу VI поред ферита и карбида (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> налази се и фаза FeCr (δ-фаза, 22% Cr). У пољу VII налази се само ферит и интерметална фаза FeCr. Коначно у пољу VIII налази се само ферит. Остали системи типа Fe-M-C су слични хромном, али имају знатно мање фаза и једноставнији су.



Слика 3.6 Различите фазе система Fe-C-Cr у функцији % C и % Cr (T= 20°C)

У карбидима легирајућих елемената, могу се појавити два карбидотворна елемента чији садржај у раствору није сталан. Елементи који образују овакве растворе су Мо и W, а раствори могу бити облика  $\text{Fe}_3(\text{W},\text{Mo})_3\text{C}$  до  $\text{Fe}_4(\text{W},\text{Mo})_2\text{C}_5$ .

Карбиди које образује хром, могу се појавити самостално или заједно са гвожђем. Први од њих је  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  који има елементарну површински центрирану решетку, са параметром решетке  $1.066 \text{ nm}$  и којој припадају 16 атома. Други карбид хрома  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  кристалише по хексагоналном систему. Оваква елементарна решетка садржи 80 атома и параметар решетке  $a=1.398 \text{ nm}$  и  $c=0.453 \text{ nm}$ .

Хром се раствара у цементиту замењујући атоме гвожђа, при чему се добијају легирани карбиди  $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{C}$  и  $(\text{Cr},\text{Fe})_7\text{C}_3$ .

Карбиди свих елемената, осим Ni, Co, Fe, Mn и Cr, а у неким случајевима Мо и W, у одређеним случајевима образују фазе интерстицијског типа. Типичан представник ове фазе је карбид ванадијума (VC). Елементарна решетка ванадијум карбида не мора у потпуности бити испуњена атомима угљеника већ могу постојати и празнине (ваканције). Аналогно карбиду  $\text{Fe}_3\text{C}$  образују елементи Co и Ni.

Од посебног је значаја волфрам-карбид (WC) који има изузетно велику отпорност на абразивно хабање. Доставља се у облику жица пуног пресека или цевчица пуњених карбидима. Тврдоћа волфрам-карбида се креће у границама од 2400-2700 HV.

Један од слабијих карбидотворних елемената јесте манган који у челику не образује посебан карбид, већ се раствара у цементиту као легиран цементит  $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$ .

Из разлога што се специјални карбиди теже растварају у аустениту него у цементиту (мања брзина дифузије), легиране челике је неопходно дуже задржавати на температури аустенизације. У појединим ситуацијама пожељно је обрнуто, да у структури легираних челика један део карбида буде нерастворен. Ово је пожељно, јер нерастворени карбиди спречавају даљи раст аустенитног зрна (нпр. код брзорезних челика). Специјални карбиди, имају тврдоћу већу од цементита и мартензита. Када су ови карбиди равномерно распоређени по мартензитној матрици, утичу на повећање отпорности челика на хабање, која не зависи само од тврдоће карбида, већ и од њиховог самог распореда, али и облика и величине. Груби карбиди су непожељни (лако се откидају са оштрица алата за резање), као и међусобно повезани карбиди по границама зрна.

Одговарајући елементи образују са азотом нитриде велике тврдоће, те као такви служе за повећање отпорности на хабање, узимајући у обзир да је тврдоћа нитрида изузетно велика. Елементи који образују нитриде овог типа су: Al, Ti, V, Mo и Cr.

### **3.4. Подела челика према намени**

Према намени челике је могуће поделити на конструкционе, алатне и специјалне. За све челике свих намена, осим за челике трговачког квалитета, битна је чистоћа, односно квалитет који директно зависи од начина производње челика. На основу тога, челике је према квалитету могуће поделити на:

- челике обичног квалитета (угљеничне) (S до 0.060% и P до 0.070%),
- квалитетне челике (угљеничне и легиране) (P, S до 0.035-0.040%),
- висококвалитетне челике (легиране) (P, S до 0.025%) и
- племените челике (легиране) (P, S до 0.015%).

#### **3.4.1. Конструкциони челици**

Конструкциони челици могу бити угљенични (нелегирани) и легирани, а садржај угљеника је мањи од 0.60%; имају широку примену за израду машина и уређаја

које раде у темепратурском опсегу од -25 до 300°C. Ови челици такође служе за израду носећих и грађевинских конструкција (табела 3.3).

**Табела 3.3** Пример примене конструкционих челика

| УГЉЕНИЧНИ ЧЕЛИЦИ                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Општа подела                                                                                                                                                      | Посебне намене                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• обичног квалитета</li> <li>• квалитетни челици</li> </ul>                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• за грађевинарство</li> <li>• за бродоградњу и железнице</li> <li>• за котлове и судове под притиском</li> <li>• за каросеријске лимове</li> <li>• за цеви, жице, завртњеве, закивке</li> <li>• за заварене алке ланаца</li> <li>• челици за аутомате</li> <li>• за електротехнику</li> </ul> |
| ЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Опште намене                                                                                                                                                      | Посебне намене                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• за побољшање (0.50-0.60% С)</li> <li>• за површинско каљење</li> <li>• за цементацију</li> <li>• за нитрирање</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• за опруге</li> <li>• за котрљајуће лежајеве</li> <li>• за рад на ниским температурама</li> <li>• за вентиле</li> <li>• челици повишене јачине (<math>R_{eH} &gt; 360 \text{ MPa}</math>)</li> </ul>                                                                                          |

#### **3.4.1a Угљенични (нелегирани конструкциони челици**

Угљенични челици обичног квалитета се најчешће разврставају на основу механичких својстава ( $R_m$ ,  $R_p$ ,  $A_5$ ), а примењују за слабије оптерећене делове машина, уређаја и конструкција. Угљенични челик трговачког квалитета се најчешће користи за израду шипки, решетки, жичаних мрежа. Сви нелегирани челици обичног квалитета се примењују у сировом стању односно без било какве термичке обраде. Нискоугљенични квалитетни челици (садрже С до 0.25%) имају гарантован хемијски састав и механичке особине. Користе се за израду мањих зупчаника, делова бицикла итд.

Средњеугљенични челици (0.25 до 0.60% С) користе се најчешће у нормализованом стању, а у побољшаном за делове мањих пресека. Челици са 0.50-0.60% С примењују се за израду делова изузетно отпорних на хабање нпр. за израду зупчаника, пужних транспортера, ексцентре, клинове. Најчешће се испоручују у нормализованом стању.

Мањи машински делови израђују се такође од средњеугљеничних челика који се испоручују у облику лимова, трака, жица, као и хладно вучених или ваљаних шипки.

Високоугљенични челици ( $C > 0.60\%$ ) служе за израду пробојаца, секача, тестера, длета за обраду дрвета, за зупчанике и кокиле (за ливење).

Челици који се примењују у грађевинарству су углавном меки челици, односно челици са садржајем угљеника максимално до 0.25%. Ови челици се испоручују у виду полуфабриката тј: профила, лимова, шипки, жица и бетонског гвожђа (мрежа за армирани бетон). Високоугљенични челици високог квалитета, који су незаварљиви (услед високог садржаја С), користе се за израду армираног преднапрегнутог бетона. За ову намену се такође користе жице од С-Mn челика повишене јачине, као и жице за израду мостовских конструкција.

Челици за бродоградњу се испоручују у облику лимова, профила и плоча од меког (заварљивог) челика, док се у железници примењују посебни профили добијени ваљањем и ковањем нискоугљеничних или средњеугљеничних челика (шине, точкови, каросерија, ...).

Каросеријски лимови се израђују вишеструким топлим и хладним ваљањем умирених или неумирених ингота. Пресовањем неумирених лимова се израђују делови шкољке аутомобила, с тим што се пресовање мора обавити најкасније четири недеља након што је полуфабрикат напустио железару, јер су неумирени инготи склони старењу које директно утиче на механичке особине (пораст јачине, пад пластичности). Лимови који су умирени алуминијумом имају мању склоност ка старењу, али је површина отпреска наборана. Челици који се примењују у поступку дубоког извлачења имају следећи састав: угљеника до 0.10% и нечистоћа (P и S) до 0.035%. На основу састава произлазе следеће механичке карактеристике:  $R_{eHmax} = 160 \text{ MPa}$ ,  $R_m = 280 \text{ MPa}$ , однос  $R_{eH} / R_m \cdot 100\% = 0.60\%$ , издужење  $A_5 = 45\%$ . Структура ових челика је најчешће феритно-перлитна с тим што треба обратити пажњу да се по границама њихових зрна не сме појавити терцијарни цементит.

Челици за патентиране жице (0.30-1.00% C) служе за челичне конопце, жице точкова (код бицикла), жице кишобрана, жичане мреже и опруге највишег квалитета.

Челици за аутомате се најчешће испоручују у виду ваљаних или вучених шипки. Примену имају у масовној производњи мањих делова (завртњева, навртки, подлошки, расцепки и тсл.) на аутоматским машинама. Најчешће се користе угљенични челици са нешто већим садржајем P (до 0.11%) и S (до 0.30%), или Pb (до 0.35%) што има даје крту и лако ломљиву струготину, односно омогућава примену оштријих режима машинске обраде и бољи квалитет обрађене површине, него код челика трговачког квалитета (због олова). Олово се не раствара у очврслом челику, јер не испуњава Хјум-Родери правила, већ у челику остаје у елементарном облику, фино распршеном (диспергованом) по целој запремини припремка те при резању делује као мазиво.

#### **3.4.16 Легирани конструкциони челици**

Легирани челици за побољшање (0.25-0.60% C) могу бити:

- мангански (1.20-1.60% Mn, користе се за вратила и осовине, Mn-Si за веће зупчанике),
- хромни (1-1.5% Cr-Si)- за јако оптерећена коленаста вратила и зупчанике,
- хром-молибденски (1% Cr, 0.20% Mo) за ситније делове који захтевају велику жилавост и
- хром-никлови (0.6-1.5% Cr и 3-5% Ni)- зупчаници мењача, делова турбине који раде на температурама до 500°C.

#### **Челици за површинско отврдњавање**

За површинско каљење користе се Cr-Si или Mn-Si челици са 0.30-0.50% C. За цементацију се употребљавају челици са садржајем угљеника до 0.25% било да се ради о угљеничним или челицима који су легирани са Cr, Cr-Mo, Cr-Mn и Cr-Ni. Од хромног челика израђују се брегасте осовине, осовинице клипова, вретена машина алатки и други делови који су изложени хабању. Аналогно овоме, хром-никлови и хром-мангански челици за цементацију употребљавају се за израду зупчаника мењача и диференцијала. Хром-молибденски челици су намењени изради брегастих осовина, зупчаника и карданских зглобова.

*Челици за нитрирање*, у ову групу челика спадају легирани челици: Cr-Ni, Cr-Mo и други. Ови челици се након извршеног побољшања (каљење + високо отпуштање) подвргавају посебној термичкој обради у којој fine честице нитрида (Al, Cr, Mo) доспевају у површинске слојеве те им повећавају тврдоћу у границама од 900 до 950 HV. Такође код претходно наведених челика садржај угљеника је ограничен на 0.45% како би се спречила појава карбида Cr и Mo који су мекши од нитрида. Нитрирање се најчешће примењује на: цилиндри мотора, зупчанике, пумпе, ливачке кокиле, калупе за ливење под притиском, пресерски алат и тсл.

#### *Легирани челици за посебне намене*

Одлика челика за опруге је висока граница еластичности ( $R_e^7$ ) коју прате велика истегљивост (за случај прекорачења  $R_e$  при ударном оптерећењу или обликовању) и велика динамичка издржљивост (опруге, одбојници вагона, ослонци темеља машина). У појединим условима захтева се отпорност на корозију и повишене температуре. Захтеване карактеристике се постижу деформисањем на хладно, као и термичком обрадом. Код опруга код којих је радно оптерећење мање (кревет, кључаонице) и код опруга од Cr-Ni челика изложених корозији довољна је само деформација на хладно. Својства еластичности се побољшавају додавањем Si у границама од 0.15 до 1.80% јер се подиже вредност напона на граници течења. Својство прокаљивости се побољшава додатком 1% Mn или 1% Cr или комбиновано (Cr, Mn). На овај начин се мање квалитетан силицијумски челик користи за подлошке и тањирасте опруге, а квалитетнији за коничне вагонске опруге, лиснате гибљеве, спиралне вагонске опруге, Cr-Si челик за спиралне опруге изложене ударним оптерећењима, такође и за опруге вентила, а Cr-Mo челик за израду опруга код најоптерећенијих друмских возила.

Челици за котрљајне лежајеве, њихове одлике су најпре велика тврдоћа и отпорност на хабање, које су праћене добром обрадљивошћу резањем и деформисањем. Од ових челика се такође захтева и добра прокаљивост уз минималне деформације. У ову категорију спадају висококвалитетни хромни челици (1% C, 0.50-1.50% Cr и P и  $S_{max}$  0.025%). Ови челици се термички обрађују на следећи начин: каљење са 850°C при чему се као расхладни медијум користи уље, после каљења следи ниско отпуштање. Делови који се најчешће термички обрађују на овај начин су: прстенови лежaja, куглице, ваљчићи и кошуљице.

Челици за рад на ниским температурама у себи садрже никл или манган, али и угљеник у малим границама (0.10-0.15% C). Када се у челику налази 3-5% Ni, прелазна температура челика у крто стање је око -100°C, а када је садржај Ni 8-10% прелазна температура иде и до -200°C. Овакви челици се користе за израду транспортних и стационарних резервоара за суви лед (CO<sub>2</sub>) или течни метан (CH<sub>4</sub>). За рад на још нижим температурама (складиштење и транспорт течних техничких гасова) користе се аустенитни Cr-Ni челици са малим садржајем C или Cr-Mn-Ni-N челици. Cr-Ni челици такође се употребљавају за израду расхладних система и конструкције које раде у променљивим годишњим условима (промена услова услед промене годишњих доба).

Челици за вентиле мотора са унурашњим сагоревањем, ови челици су при раду изложени високим температурама (до 900°C издувни вентили), али и цикличним променама температуре тј. термичком замору. Стога је јако битно да челик садржи добре махеничке особине на повишеним температурама ( $R_m$ ,  $R_{eH}$ , HB) и да буде ватропостојан. Најчешће се примењу високолегирани хромни челици Cr-Si, Cr-Mo (0.50% C, 16.5% Cr, 2.0% Mo), за најоптерећеније вентиле Cr-Ni (0.45% C, 1.50% Si, 14.5% Cr, 1.30% Ni и 3% W). За мање оптерећене усисне вентиле одговара челик следећег хемијског састава: 0.60% C, 1.70% Si и 0.70-1% Mn.

Челици повишене јачине имају напон течења  $R_{eH} > 360 \text{ MPa}$ , а развијају се у последњих тридесетак година с циљем да се смањи тежина мостова, бродова, резервоара цистерни, цеви под притиском и тсл. На пример за цистерну запремине  $80 \text{ m}^3$  која се израђује од неког челика са  $R_{eH} = 240 \text{ MPa}$  дебелина зида износи  $28 \text{ mm}$  а само  $14 \text{ mm}$  када се израђује од челика са  $R_{eH} = 440 \text{ MPa}$ . Овладавањем технологијама микрولةгирања омогућена је производња нове класе челика, који су у суштини угљенични, са минималним додацима легирајућих елемената (сума свих легирајућих елемената је мања од 0.50%) који повећавају напон течења, затезну јачину и тврдоћу. Ови челици су се најпре користили за израду лимова. Касније је започета њихова израда у облику шипки како би се избегла скупа термичка обрада након операције ковања. Ове шипке се употребљавају у аутомобилској индустрији за изузетно одговорне делове као што су управљачке споне, осовине турбокомпресора, стабилизационе полуге, У-завртње и универзалне зглобове. Осим у аутомобилској индустрији имају широку примену и у осталим гранама привреде, те се од ових челика израђују погонски делови пумпи које служе за вађење нафте и анкер завртњи за грађевинске конструкције. Најважнија примена челика повишене јачине је управо у области транспортних возила, где смањење тежине конструкције директно утиче на дозвољену носивост. Данас се ови челици испоручују у облицима свих стандардних ваљаних профила. Заштита од корозије се врши као и код обичних челика односно галванизацијом, цинковањем, наношењем антикорозивних превлака. Лимови и плоче се користе за израду шасије возила, делове багера, разне делове машина за равнање путева и терена, за железничке вагоне, платформе и бродске конструкције. Дизалице, кранови, мешалице у цементарама, пољопривредне машине, теретна возила, приколице и бандере високог напона израђују се од челика минималног напона течења  $350\text{--}490 \text{ MPa}$ . Код ових челика присутна је анизотропија механичких особина према правцу ваљања па обрадивост деформисањем и јачина знатно варирају зависно од правца.

У принципу напон течења челика се може повећати додавањем угљеника, што погоршава заварљивост, обрадивост деформисањем на хладно и отпорност према кртом лому. Уместо челика са високим садржајем угљеника развијени су челици повишене јачине са  $C < 0.20\%$  који могу бити :

- микрولةгирани (Fe, C, V, Ni, Ti, Nb),
- бејнитни (Fe, C, Mo, B) и
- каљени+отпуштени.

#### *Микрولةгирани (финозрни) челици повишене јачине*

Ови челици повишене јачине у свом саставу садрже елементе као што су V, Ni, Ti, Nb који су познати по томе што у челику образују нитриде, карбонитриде и карбиде који при кристализацији ограничавају раст зрна у аустенитном подручју, те се последично добија ситнозрнаста феритно-перлитна структура на собној температури. Ови челици у себи садрже угљеник максимално до 0.20% што значи да имају добру заварљивост. Примену налазе за израду судова под притиском, цевоводе високог притиска, за делове друмских возила и железничких вагона, цистерне за превоз течног нафтног гаса и за решеткасте носаче мостова и индустријских хала.

#### *Бејнитни челици повишене јачине*

Ова класа челика је развијена у Енглеској након финозрних, а добили су назив *Fortoweld*, у себи садрже до 0.10% угљеника уз благо повишен садржај мангана и силицијума, као и додатке до 0.50% молибдена+ 0.009% ванадијума. Испоручују се у нормализованом или нормализованом+ отпуштеном стању. Због комбинације садржаја

молибдена 0.50% и бора 0.003% ови челици имају бејнитну структуру и при веома спором хлађењу (чак и на ваздуху), а додавањем мангана и хрома снижава се температура бејнитне трансформације са 600 на 300°C. Када се бејнитна промена одвија на нижој температури (300°C) добија се ситнозрна структура и боља дисперзија карбидних честица, које утичу на повећање напона течења  $R_{eH} = 400-600 \text{ MPa}$  равномерно по целом попречном пресеку делова дебљине 100 mm. Уобичајен састав једног оваквог челика је : 0.10% C, 0.96% Mn, 0.41% Si, 0.58% Cr, 0.61% Ni, 0.33% Mo, 0.10% V, 0.009% B, 0.018% P, 0.016% S и 0.017% Al. Бејнитни челици се користе за израду дизалица, железничких платформи, транспортне цистерне и грађевинске машине. Једино ограничење у примени ових челика је што се не препоручују за рад на ниским температурама.

#### *Нисколегирани побољшани челици повишене јачине*

Највећа својства отпорности челика повишене јачине се добијају када се челика са 0.16% C, 0.90% Mn, 0.87% Ni, 0.50% Cr, 0.45% Mo, 0.06% V и 0.003% B, кали како би се добила мартензитна структура а затим се отпушта да се добије  $R_{eH} = 400-800 \text{ MPa}$ . Повећању јачине највише доприноси бор, који делује тако што уситњава примарна аустенитна зрна, дезоксидише и денитрира растоп, и повећава својство прокаљивости. У многим земљама се производне челични одливци од сличних челика. Процес производње ових челика је изузетно сложен и скуп јер је за ваљање, каљење и отпуштање потребна посебна технолошка опрема. Каљење се изводи воденим млазевима са 900 на 300°C и то одмах након тоглог ваљања. Отпуштање се врши накнадно у проточној пећи (500-700°C/1h, хлађење на ваздуху). Ови челици су познати под називом ТМО- термомеханички обрађени. Користе се за дизалице, железничке цистерне, платформе, резервоаре за гориво, бродску опрему, мостове итд.

У супер јаке челике се убрајају ТМО и марагинг (мартензитно старени) челици, код њих је однос  $R_{p0.2}/E \geq 50$ , а ТМО челици достижу  $R_m = 2500-3000 \text{ MPa}$ .

#### **3.4.2. Специјални челици**

У ове челике за специјалне намене спадају:

- Нерђајући челици (отпорни на киселине и ватростални челици),
- Челици за повишене температуре (термопостојани Cr-Mo-V челици) и
- Челици отпорни на хабање.

##### **3.4.2.a Нерђајући челици**

Када се говори о нерђајућим челицима треба напоменути да постоје две класе ових челика, нерђајући челици отпорни на киселине и ватростални челици. Као што само име каже, прва поменута класа је отпорна на електрохемијску корозију у органским и неорганским киселинама, једињењима азота и у агресивним срединама. Ватростални челици не оксидирају на температурама изнад 600°C у прегрејаним гасовима (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и SO<sub>2</sub>), врућем ваздуху и пепелу.

Челици отпорни на киселине садрже више од 12% Cr, а ватростални челици више од 6% Cr уз додатке Si и Al који спречавају продирење корозије по дубини материјала. У зависности од хемијског састава нерђајући челици могу бити: хромни, хром-никлови и хром-мангански, а према стању испоруке ливени или ваљани. Дужим излагањем челика отпорних на киселине на високим температурама (изнад 500°C) може доћи до издвајања хрома по границама металних зрна, па ће се чврст раствор Fe-Cr осиромашити у хрому, који је утрошен на формирање, карбида хрома. Ако садржај Cr у чврстом стању спадне испод 12%, у агресивној средини настаће селективна

међукристална корозија. Склоност корозији умањује се стабилизацијом челика помоћу Ti, Nb или Ta, односно помоћу елемената који имају већи афинитет према угљенику од хрома или смањењем садржаја угљеника у челику испод 0.03%.

Ваљани нерђајући челици према металуршкој структури могу бити: аустенитни, феритни, мартензитни и таложно ојачани, а ливени могу бити термостојани и отпорни на корозију. У аустенитне челике се убрајају легуре: Fe-Cr-Ni-Mn, Fe-Cr-Ni и азотом ојачане легуре. Садржај угљеника је испод 0.15% а хрома 16%. Никла и мангана има таман толико, колико је потребно да се не наруши аустенитна структура од криогене па све до солидус температуре. Азотом ојачани аустенитни челици су легуре: Fe-Cr-Mn-N, а неке врсте садрже и Ni. Напон течења у жареном стању им је за око 50% већи него код легура које не садрже азот. Аустенитни челици нису магнетични и такви остају чак и након вишеструке прераде на хладно. Азот се на сличан начин као угљеник раствара у кристалној решетки  $\gamma$ -гвожђа и повећава јачину челика, предност му је што не реагује са хромом, те не може доћи до пада садржаја хрома, а самим тим и губитка својства отпорности на корозију. У почетку је поступак увођења контролисане количине азота био отежан, данас се то чини једноставно поступком AOD (*argon-oxygen decarburisation*).

Аустенитни нерђајући челици употребљавају се у главном за уређаје код којих су отпорност на корозију и жилавост примарни захтеви. То су делови који су најчешће изложени морској води (осовине, пумпе, поклопци), опрема и постројења у хемијској и прехрамбеној индустрији, посебно у млекарама. Најпознатији челици из групе аустенитних нерђајућих челика су Cr-Ni легуре које су истовремено отпорне на електрохемијску корозију и ватросталне. Ови челици могу бити нестабилизовани и стабилизовани додавањем Ti, Nb, Ta. Код транспорта хемикалија користе се аустенитни 18Cr8Ni челици где % Ni може достићи и удео од 10%. Испоручују се у гашеном стању, након посебне термичке обраде која даје стабилан аустенит велике жилавости. Гашење се изводи потапањем челичних делова у воду са почетне температуре 1000-1100°C.

Феритни нерђајући челици садрже од 10.5 до 27% Cr и по AISI стандарду припадају серији 400. Применом поступка аргонско-кисеоничког разугљенисавања (AOD-методе) производи се неколико класа феритних челика: 18Cr-2Mo, 26Cr-1Mo, 29Cr-4Mo, 29Cr-4Mo-2Ni. Садрже мање угљеника а више хрома него мартензитни челици па се не могу калити, већ се њихово ојачавање врши пластичном деформацијом (деформационо ојачање). Феритни нерђајући челици су магнетични, а ако садрже Cr и Mo у довољним количинама задржавају полазну феритну структуру све до тачке топљења. Јачина на кидање феритних челика је за 50% већа од угљеничних челика. Првобитно су намењени за израду делова од којих се очекује средња корозивна отпорност, а жилавост није првобитни захтев. Такође се често примењују у средњима у којима постоји опасност од напонске корозије појачане деловањем хлороводоничне киселине. Стога се највише примењује за израду издувних система мотора СУС, за опрему за пренос топлоте у хемијској и петрохемијској индустрији, за унутрашњу опрему моторних возила, као и за кухињску опрему.

Мартензитни нерђајући челици такође припадају серији 400 (према AISI). Ваљани мартензитни челици садрже угљеник (до 1%) и хром (11.5 до 18%), а релативно мало других легирајућих елемената. Они су магнетични, могу бити ојачани термичком обрадом тако да се након каљења и отпуштања не добија само велика јачина, већ и осредња жилавост. Пластична прерада ових челика се мора извести у жареном стању пре каљења. Мање су отпорни на корозију него аустенитни и феритни челици. Развијене су две врсте мартензитних нерђајућих челика, они који су добро машински обрадиви, а намењени су за израду делова код којих су чврстина и тврдоћа битнији од

отпорности на корозију (куглични лежаји, ливачки калупи, ножеви медицинских инструмената итд.). Једна врста мартензитних челика употребљава се израду калупа за ливење пластике и за делове од којих се тражи велика отпорност на корозију. Сви феритни, феритно-мартензитни и неки мартензитни челици склони су отпусној кртости при спором хлађењу у интервалу од 300-400°C.

Таложно ојачани нерђајући челици и мартензитно старени челици (Марагинг) постижу веома велику јачину после ниско температурске термичке обраде која готово не мења димензије и облик третираних предмета (важно код прецизних предмета). Састав ових челика је такав да је могуће преципитационо ојачање тј. таложење интерметалних једињења у металним зрнима и истовремено отпуштање мартензита. Кад се тражи максимална јачина и невелика корозивна отпорност, употребљавају се челици са приближно 17% Cr, 7% Ni, 1% Al и марагинг челици са приближно 18% Ni и 7% Co. Први се растворно жари (1052°C), а затим вештачки стари на 482°C да би настали преципитати (продукти таложења). Код марагинг челика се најпре изводи аустенитизација на 815°C ради растварања исталожене фазе, а затим брзо хлађење чиме се добија релативно мек нискоугљенични мартензит. У овом стању радни предмет се пластично прерађује и завршно обрађује машински. Кад се све заврши, следи загревање и прогревање на 482°C/3h што доводи до старења. Порасту тврдоће и јачине једним делом доприноси и мартензитна структура, а другим делом преципитационо старење којим се постиже велика чврстина, невелика корозивна отпорности и добра обрадивост. Користе се за израду рударских бушилаца, делова пумпи високог притиска, вискотемпературске пумпе и затварача, компоненте авиона и тсл.

Ливени нерђајући челици одговарају по саставу сличним врстама ваљаних челика. Производе се две класе одливака: термопостојани (ознаке Н) за радне температуре између 650 и 1200°C и корозивно- отпорни (ознаке С). Садржај С и Ni знатно је виши у класи Н него у класи С. Термопостојани одливци користе се за делове парних турбина и за делове индустријских пећи, а одливци отпорни на корозију користе се за вентиле, арматуре и пумпе које раде у агресивним срединама.

#### ***3.4.2.6 Челици за повишене температуре (термопостојани Cr-Mo-V челици)***

Термопостојаност је способност материјала да издржи краткотрајно и дуготрајно оптерећење на повишеним температурама. Од челика ове класе праве се делови парних котлова, гасних турбина, реактивни мотори, хемијска постројења, у суштини опрема која ради на повишеним температурама (до 600°C) и краткотрајно на температурама изнад 600°C. Обични нелегирани конструкциони челици своје механичке особине задржавају до око 300°C. Изнад ове температуре механичке особине  $R_m$  и  $R_{eH}$  знатно крећу да опадају. Од термопостојаних челика се тражи отпорност на пузање и релаксацију- појаве карактеристичне за повишене температуре. Пузање се може дефинисати као лагано издужење при константном оптерећењу на повишеним температурама ( $\sigma = \text{const}$ ,  $T > 0.3 \cdot T_T = \text{const}$ .), а релаксација као појава преласка еластичних деформација у пластичне ( $\epsilon_{el} \rightarrow \epsilon_{pl}$ ,  $\epsilon_T = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} = \text{const}$ .). Као термопостојане легуре углавном се користе хромни челици (Cr-Mo или Cr-Mo-V), а ређе аустенитни челици (Cr-Ni са додацима).

Хромни-нисколегирани челици намењени су за температуре до 600°C, а средње и високолегирани за преко 600°C. Код нисколегираних хромних челика ограничава се садржај С до 0.30%, Cr до 3% и Мо, V (W) до 1%. Челици који су легирани са Cr, Мо и V користе се за вијке и навртке, цеви грејача, прирубнице, котловске лимове и резервоаре. При  $T \approx 600^\circ\text{C}$  могу се оптеретити неограничено, без опасности од разарања. Најчешће се користе у побољшаном стању, а заварљивост им је условна (предгревање + термичка обрада)

Средњелегирани хромни челици садрже 5-10% Cr, 0,5-1% Mo, а понекад V и W. Користе се за израду делова постројења за прераду нафте, за рад са компримованим водоником или сумпор-водоником на повишеним температурама.

Високолегирани хромни челици, постојани су на веома високим температурама, развијени су од познатог феритног нерђајућег челика са 12% Cr и  $C < 0.20\%$  и додацима Mo, V, W (Ti, Nb) који дају стабилније карбиде него хром ( $Cr_{23}C_6$ ). Овде спада феритни термпостојани челик применљив у гасној, сумпорној средини до  $1100^{\circ}C$ .

Аустенитни челици типа 18Cr8Ni задржавају постојаност до  $600^{\circ}C$  (стабилизована варијанта). Знатно боља термпостојаност се постиже легирајућим елементима за отврдњавање (Mo, W), тако да челик из ове групе Cr-Ni (25% Cr, 20% Ni, 2% Si)- тзв. прохром 19- може да ради на температурама до  $900^{\circ}C$ . Није отпоран у гасној средини која садржи сумпор.

#### **3.4.2.ч Челици отпорни на хабање**

Процењује се да 50-80% свих отказа на машинама настају због хабања, а остало услед замора материјала, преоптерећења или грубог нарушавања радних услова. Отпорност челика на хабање је условљена хемијским саставом (у већини случајева C и Mn) и структуром, као и врстама хабања. Врсте хабања су: адхезионо, абразивно, ерозионо, кавитационо, заморно, вибрационо итд.

Абразивно хабање се може јавити при:

- дејству ударних сила: кашике багера на каменитом тлу, ударне греде и облоге дробилица за камен и
- утовару расутих материјала: руда, шљаке, камена, песка, цемента итд.

Добру отпорност на удар има мангански аустенитни челик познатији под називом Хадфилдов челик ( $\approx 13\%$  Mn и  $1.2\%$  C). Користи се у пластично прерађеном стању или као одливак, остаје дуго отпоран на абразивно хабање само ако при раду настаје пластична деформација у површинском слоју (не деформационо ојачање, већ површинска мартензитна трансформација индукована плитким трајним деформацијама). За отпорност на абразивно хабање расутим материјалом неопходна је што већа тврдоћа па се користе нисколегирани побољшани челици, алатни ледебуритни челици, одливци добијени одбељивањем. Осим тога, резне делове машина на коповима и грађевинским путарским машинама корисно је наварити легурама са високим садржајем угљеника и више од 20% хрома. Од Хадфилдовога челика се израђују ударне греде дробилица за камен, кугле млинова за дробљење руда, а највише скретнице железничких и трамвајских шина.

#### **3.4.3. Алатни челици**

За алатне челике се постављају високи захтеви у погледу тврдоће, отпорности на попуштање, жилавости, резних особина и отпорности на хабање, добре прокаљивости и димензионалне стабилности. Угљенични алатни челици имају довољну тврдоћу већ при садржају угљеника од 0.6 до 1.5%. Међутим, каљењем добијају велику тврдоћу само на дубини од око 2-3 mm, док језгро остаје незакаљено, тј. меко и жилаво. За неке врсте алата то је корисно, јер је језгро жилаво па алат може да издржи мања ударна оптерећења, али је мана ових алатних челика та што им тврдоћа нагло опада при радном загревању изнад температуре  $150^{\circ}C$ .

Алатни челици служе за израду различитих врста алата и прибора намењених за обраду деформисањем, обраду резањем, за ливачке калупе, алате за млевење камена, мерне и контролне приборе, као и ручне алате и приборе. Алати се израђују и од синтерованих карбида, а у неким случајевима и од конструкционих челика или неких

врста белог ливеног гвожђа. Делови резних алата намењених за најтеже радне услове се израђују од тврдих легура, керамичких материјала и вештачких дијаманата.

Добри алати би требало да имају велику тврдоћу и жилавост, отпорност на хабање и попуштање, као и димензионалну стабилност. Тако на пример резни алат за машинску обраду треба да има тврдоћу најмање 1.3 пута већу од тврдоће предмета обраде. Код закаљеног угљеничног челика тврдоћа зависи од садржаја угљеника, највећа је за еутектоидни састав кад достиже тврдоћу од 64 HRC и даље се са порастом садржаја угљеника не мења. Нисколегирани челици имају нешто већу тврдоћу, јер у структури садрже специјалне карбиде уместо цемента, те су постојани и при загревању. За повишене радне температуре, користе се алатни легирани челици са карбидотворним елементима Cr, V, W и Mo, који имају бољу термостојаност и прокаљивост од нелегираних челика.

Алатни челици припадају групи племенитих челика (садржај P и S до 0.015%), произведених од посебно одабраних сировина у електропећима (лучним или индукционим). Произвођачи испоручују алатници полупроизоде за алате у облику топло ваљаних или кованих шипки, хладно вучених шипки, откованих комада и топло и хладно ваљаних трака.

Према хемијском саставу алатни челици се деле на:

1. Угљеничне челике,
2. Легиране челике,
3. Брзорезне (BRW) челике и
4. Остале материјале за алате.

#### **3.4.3.a Угљенични алатни челици**

На располагању су нискоугљенични челици (до 0.25% C), средњеугљенични (0.25-0.60% C) и високоугљенични челици (преко 0.60% C). Израда алата од нискоугљеничног челика је ограничена, а у ствари је реч о спорадичној изради алата од конструкционих челика.

Нискоугљенични челици се користе за израду малих цементираних калупа који служе за бризање пластике и гуме, мерних алата и контролника, шаблона и тсл.

Средњеугљенични челици се користе као материјал за израду ручних алата и прибора, резних алата за обраду дрвета, јефтинијих ножева и ливачких калупа.

Високоугљенични челици са садржајем угљеника од 0.60 до 1.40% погоднују изради алата за просецање, матрица за дубоко извлачење, алата за обраду дрвета и термопласта, стезне алате, као и за ручне алате и приборе; нпр. од еутектоидног челика који садржи приближно 0.80% C израђују се алати за занатску обраду дрвета, мекших метала, пробијачи папира, маказе за меке метале и алати за обраду камена.

Надеутектоидни челици ( $C > 0.80\%$ ) намењени су за израду свих врста коса, а челици од 1.0 до 1.3% C служе за израду урезница и нарезница, развртача, глодала, турпија, ножева за дрво и месарских ножева.

Угљенични алатни челици се кале у води, а пошто имају малу прокаљивост, језгро остаје жилаво. Надеутектоидни челици имају добру тврдоћу и отпорност на хабање, као и жилавост те су с тога погодни за израду алата за обраду резањем. Највећа мана нелегираних челика је та да они своје механичке особине и отпорност на хабање губе на температурама око 200°C. У табели 3.4 могу се видети неке од најважнијих примена угљеничних алатних челика.

**Табела 3.4** Пример примене угљеничних алатних челика

| УГЉЕНИЧНИ АЛАТНИ ЧЕЛИЦИ            |                                                           |                                                                                                                                       |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нискоугљенични челици<br>C < 0.25% | Средњеугљенични челици<br>C = 0.25-0.60%                  | Високоугљенични челици<br>C > 0.60%                                                                                                   |
| Калупи за бризгање пластике и гуме | Ручни алати за дрво                                       | C = 0.70-0.90% - чекићи, ковачки алати, турпије за дрво, ножеви пољопривредних машина, ножеви за сечење и бушење средње тврдог камена |
| Контролници                        | C ≈ 0.50% српови, секире, чекићи, јефтинији ножеви        | C ≈ 0.70% - турпије за метал                                                                                                          |
| Метални лењери                     | Бургије за дрво (0.5% C, 0.3% Si, 0.6% Mn, P, S ≈ 0.035%) | C ≈ 0.80% за косе                                                                                                                     |
| Шаблони                            |                                                           | C ≈ 0.90% за нарезнице, урезнице, касапске ножеве                                                                                     |
| ЦЕМЕНТИРАЈУ СЕ                     | КАЛЕ СЕ И ПОТОМ ОТПУШТАЈУ                                 |                                                                                                                                       |

### 3.4.3.6 Легирани алатни челици

Употребљавају се када је потребна постојаност на повишеним температурама и већа прокаљивост. Готово сви легирани алатни челици, како за рад на хладно тако и за рад на топло садрже у одређеној мери хром. Само неколико челика који су намењени за рад на хладно садрже од легирајућих елемената хром, док су остали челици легирани додатно волфрамом, ванадијумом и молибденом, а када раде у условима на топло додаје се још и никл.

Легирани алатни челици могу бити нисколегирани (садржај легирајућих елемената мањи од 5%) и високолегирани (садржај легирајућих елемената већи од 5%). Захваљујући легирајућим елементима, а пре свега хрому, повећава се прокаљивост што омогућава да се каљење изводи у уљу или на ваздуху што значајно доприноси смањењу деформација при извођењу ове термичке обраде.

Нисколегирани челици за рад на хладно се користе за израду разних алата за обраду челика, обојених метала, дрвета, пластике и папира. Обрада резањем се одвија на собној температури (на хладно), с тим што температура резног дела ножа услед трења не сме бити већа од 300°C. Поред резних алата који су намењени обради мекших метала, дрвета, термопласта, то важи и за алате који су намењени за просецање и обраду деформисањем на хладно, калупе за обликовање делова од пластике и гуме и калупе за пресовање цигли и шамотних производа. Као пример се могу навести W-V челици од којих се израђују завојне бургије, глодала, урезнице и нарезнице, хируршки инструменти, W-Cr челици за ножеве за обраду дрвета и папира, хромни челици за пресерске алате и Cr-V челици за алате који трпе јака динамичка оптерећења.

Нисколегирани алатни челици намењени за рад на повишеним температурама раде у условима у којима температура радне средине премашује 300°C. Најчешће је реч о ковачким калупима мале и средње величине, алатима за топло пресовање и истискивање железних и нежелезних метала, металним калупима за ливење под притиском, алатима за опсецање на топло итд. У ову групу челика спадају Ni-Mo челици.

Високолегирани алатни челици за рад на хладно углавном садрже више хрома и угљеника. Типичан представник је хромни челик са 12% Cr и 2% C. Овај гранични садржај угљеника за челике, омогућава формирање карбида хрома велике тврдоће и високе отпорности на хабање. У питању је ледебуритни хромни челик који незнатно

мења димензије при каљењу, па је погодан за израду алата сложенијег облика, може да поднесе велике притиске, али је јако осетљив на савијање. Намену проналази за израду профилисаних глодала, бургија за лаке метале (уз водено хлађење), калупа за прераду пластике и пресовања керамике и порцулана, као и алата који служе за просецање лимова на пресама (динамо и трафо-лимови).

Високолегирани алатни челици за рад на топло садрже 5 до 10% W, 0.25-0.45% C и додатке Cr, V, Ni и Co. Задржавају потребну тврдоћу и на високим температурама, а нису склони ка стварању прслина. Ови челици се највише примењују за израду алата који поред јаког динамичког оптерећења трпе и високе температуре. То су најчешће у питању алати који служе за екструзију бакра, за опсецање на топло и за ливачке калупе намењене за израду бакарних одливака под притиском. За ковачке и пресерске матрице употребљава се волфрамско-хромни челик, као и за трнове, алате за ваљање вијака и алате за дубоко извлачење итд. Cr-Mo челици примењују се за израду калупа са којима се топло пресују лаки метали и њихове легуре за ливење под притиском.

Другу врсту алатних челика из ове групе чине Cr-Ni челици аустенитне структуре, отпорни на попуштање, задржавају механичка својства и на повишеним температурама, те се користе у условима изузетних механичких и термичких напрезања (матрице за екструзију бронзе и месинга).

У табели 3.5 наведени су примери примене неких најважнијих легираних алатних челика.

**Табела 3.5** Пример примене угљеничних алатних челика

| ЛЕГИРАНИ АЛАТНИ ЧЕЛИЦИ                               |                                                                                                 |                                                                                 |                                                                  |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Нисколегирани челици<br>Σ легирајућих елемената <5%  |                                                                                                 | Високолегирани челици<br>Σ легирајућих елемената >5%                            |                                                                  |
| За рад на хладно<br>T<300°C                          | За рад на топло<br>T>300°C                                                                      | За рад на хладно<br>(↑C, Cr)<br>T<300°C                                         | За рад на топло<br>T>300°C                                       |
| W-V челик за<br>нарезнице, бургије,<br>глодала       | Ni-Cr челик за ковачке<br>и пресерске матрице,<br>калупе за ливење под<br>притиском алуминијума | Cr челик за просекаче<br>динамо и трафо лимове,<br>тестере, глодала,<br>бургије | Садрже од 5 до 10% W,<br>0.25-0.45% C и додатке<br>Cr, V, Ni, Co |
| W-Cr челик-за<br>пресерске алате                     | Ni-Mo челик за ковачке<br>алате                                                                 |                                                                                 | W-Cr челици за<br>пресовање бакра                                |
| W-Cr челик- за ножеве<br>за дрво                     | Ni-Mo челик- за<br>ливачке калупе                                                               |                                                                                 | Cr-Mo челици за топло<br>пресовање                               |
| Cr-V челик- за јако<br>динамички оптерећене<br>алате |                                                                                                 |                                                                                 | Cr-Ni челик аустенитне<br>структуре                              |

### 3.4.3.ц Брзорезни челици (БРЧ)

Почетком 20-ог века дошло се до закључка да најбоље резне особине имају челици са високим садржајем волфрама (6.3-18% W) и угљеника (0.80-1.4% C), који се после израде алата закале и високо отпусте. У појединим случајевима додатно садрже хром и ванадијум, а понекад молибден и кобалт. Брзорезни челици задржавају тврдоћу до око 650°C, а имају око 10 пута већи капацитет резања и 30 пута дужи век трајања у односу на нелегиране и нисколегиране алатне челике.

Првобитни BRW-челик (W-B) је у себи садржао: 0.75% C, 18% W, 4.5% Cr и 1% V. Карбиди ( $W_2C$ ,  $B_4C_3$ ) имају ситнозрну структуру и равномерно су распоређени (дисперговани), оваква структура постиже се специфичним поступцима израде, ковања и термичке обраде брзорезних челика.

За време Другог светског рата прешло се на производњу BRW челика са мањим садржајем волфрама који је тада био дефицитан. Ово је за последицу имало смањење радног века резних алата. Даљи развој ових челика је био усмерен на челике са 10-12% W и 3-5% V са додацима Mo и Co ( $Mo5W7Co12V2$ ).

Проблем је био то што се код високолегираних и високоугљеничних челика тешко постигао равномеран распоред уситњених карбида уобичајеним металуршким методама. Шведска фирма ASEA STORA је дошла до решења, челик са око 60% карбида се меље до зрнастог стања, а затим синтерује, екструдира и најзад кује на топло (тзв. металургија праха). Резне особине овог челика, уз исту жилавост су за трећину боље од првобитних BRW челика.

#### ***3.4.3.д Остали материјали за алате***

Савремени алати за обраду резањем се данас не израђују само од челика, већ и од: синтерованих карбида, стелита, керамичких материјала, тврдих термopостојаних једињења и вештачког или природног дијаманта.

Синтеровани материјали (карбиди W, Ti, Ta, везиво Co) у Немачкој (1932. године), под ознаком „widia“ што значи сличан дијаманту. Видиа плочице се поступком тврдог лемљења причвршћују на врх ножа или сличних алата. Ове плочице се одликују високом тврдоћом, постојаношћу на високим температурама и отпорношћу на хабање.

Стелити су ливене тврде легуре (карбиди Cr, W-везиво Co и 10% Fe) које се у већини случајева наварују на радне ивичне површине алата, нпр. алата за опсецање.

Керамички материјали су у ствари синтеровани материјали на бази  $Al_2O_3$  имају изузетно велику тврдоћу, хемијски су инертни, али су веома крти. Користе се за израду плочица за фину обраду сивог лива и челика.

Метало-керамички материјали су смеше  $Al_2O_3$ , Cr и Mo, а карбидно-керамички материјали смеше  $Al_2O_3$  и карбида Mo, W и Ti. Осим за израду резних плочица употребљавају се за облагање радних површина мерних алата и специјалних матрица за вучење жица у циљу остваривања веће отпорности на хабање и дужег века трајања.

Тврда термopостојана једињења добијају се синтеровањем нитрида, борида и оксида елемената постојаних на високим температурама. Тако нпр. синтерована смеша TaN и  $ZrB_2$  има за 40% боље резне особине него чист  $Al_2O_3$ . Велику тврдоћу има нитрид бора чија је тврдоћа по величини одмах иза дијаманта (највтрђег елемента у природи). У почетку се користио као материјал од којег су се израђивале брусне плоче, а данас се користи као материјал за израду резних алата.

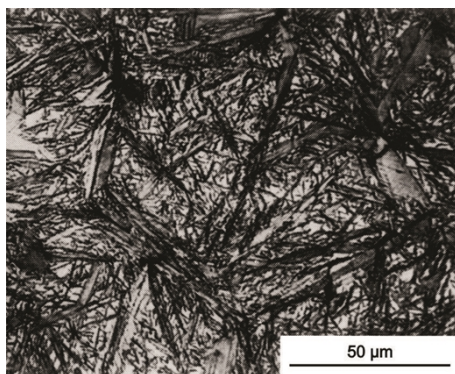
Дијаманти (природни или синтетички), користе се за алате само у специјалним случајевима, за обраду дуропласта, керамике, брушење тоцила и тсл. Температура топљења дијаманта је приближно  $3550^\circ C$ , а на Мосовој скали тврдоће је убедљиво најтврђи материјал.

## 4. Методе за оцену прокаљивости угљеничних и легираних челика

### 4.1. Појам и општи значај прокаљивости угљеничних и легираних челика

Каљење представља један од најбитнијих поступака термичке обраде чијом се применом може знатно утицати на механичка својства материјала. Нпр. каљењем се може повећати тврдоћа, затезна јачина, напон течења, али може доћи и до промене саме структуре челика. Будући да нису сви челици подједнако погодни за каљење потребно је одредити способност одређених челика да се окале, као и да им се промене механичка својства и структура. Способност челика да се кали везана је директно за хемијски састав, односно садржај угљеника (минимално 0.25%). На самом почетку потребно је направити разлику између два кључна појма: *прокаљивост* и *каљивост*. *Прокаљивост* представља способност челика да при утврђеним условима постигне одређену тврдоћу на различитим одстојањима од каљене површине. Појам *каљивост* представља способност челика да буде обрађен термичком обрадом каљења и везује се за минимални садржај угљеника у челику ( $\% C > 0.25\%$ ). Стога се у ширем смислу, прокаљивост може представити као квантитативни израз овог својства, односно мера каљивости

Поступак у којем се ствара мартензит подразумева да се одговарајући део челика загреје до аустенитног подручја, а потом хлади, при чему је брзина хлађења већа од критичне. Како састав челика може да варира у односу на температуру, позната је чињеница да челици на собним температурама могу да имају одређени садржај угљеника, а на температурама аустенизације је тај садржај већи. Уколико се део са температуре аустенизације хлади споро (одвијају се равнотежне промене), садржај угљеника ће опадати (вишак угљеника дифундује) у складу са падом температуре, тако да се на собној температури поново добија равнотежни садржај угљеника, као и на почетку загревања. У случају када се загрејани комад нагло охлади вишак угљеника остаје заробљен у кристалној решетки и на нижим температурама. Због велике брзине хлађења, вишак угљеника не успева да дифундује из чврстог раствора, већ остаје у челику где се механизмом клизања ствара мартензит. Мартензит представља фазу челика која се одликује пре свега својом тврдоћом али и кртом структуром. На слици 4.1 приказан је металографски снимак чисте мартензитне структуре. Велика тврдоћа настаје због задржавања вишка угљеника на собној температури, те услед тога сама кристална решетка челичног предмета постаје напрегнута. Како би се смањила крост предмета, често се после каљења спроводи неки вид отпуштања (ниско, средње или високо) како би један део угљеника изашао из решетки и тако се релаксирала сама структура решетки. Ово доводи до побољшања својстава пластичности. За оцену прокаљивости примењују се аналитичке и експерименталне методе.

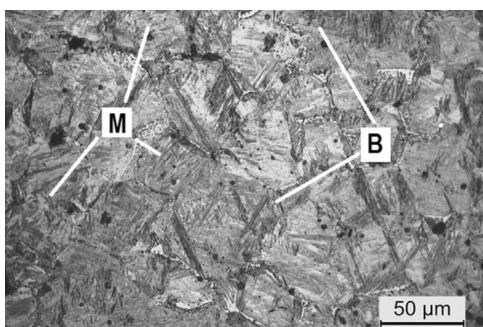


**Слика 4.1** *Металографски приказ мартензитне структуре*

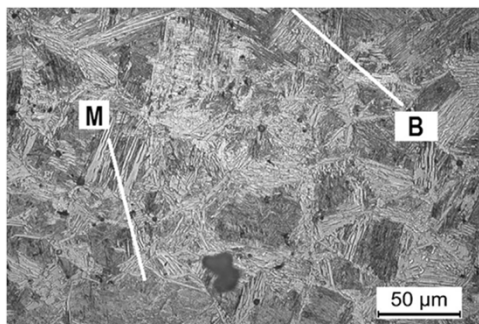
У пракси се показало да су аналитичке методе прилично непоуздане, стога широку примену имају практичне методе. Најчешће примењене методе су:

1. Цомини проба и
2. Метода по Гросману.

За обе методе веома је значајна појава полумартензитне структуре састава: 50% мартензита + 50% осталих микроструктура (бејнит, сорбит...). На сликама 4.2 и 4.3 приказани су металографски снимци структура (4.2- са око 50% мартензита и 50% бејнита и 4.3- са мање од 50% мартензита).



**Слика 4.2** *Металографски снимак структуре са око 50% мартензита и 50% бејнита*



**Слика 4.3** *Металографски приказ структуре са садржајем мартензита мањим од 50%*

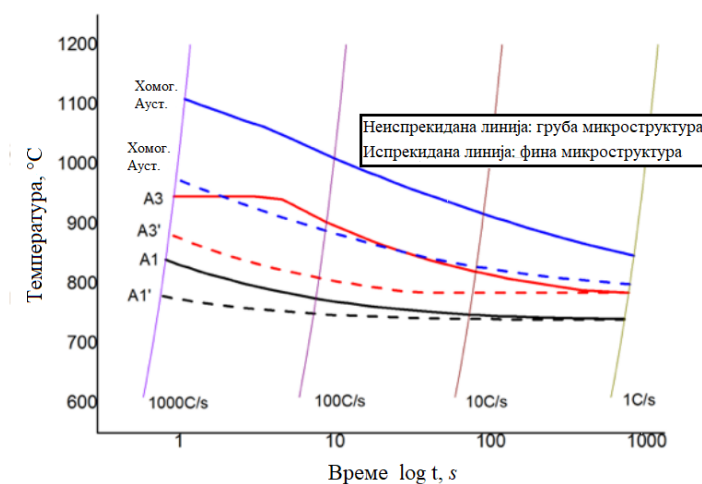
Својство прокаљивости челика има посебан значај при одређивању режима термичке обраде, како за само каљење, тако и за друге поступке термичке обраде. При термичкој обради побољшања (каљење + високо отпуштање), каљењем се добија мартензитна структура у површинским слојевима дела, док се накнадним отпуштањем постижу погодна својства пластичности и релаксира структура решетке. Уколико је прокаљивост челика позната могуће је одредити добијање жељене структуре и тражених својстава по пресеку.

## 4.2. Фактори који утичу на прокаљивост

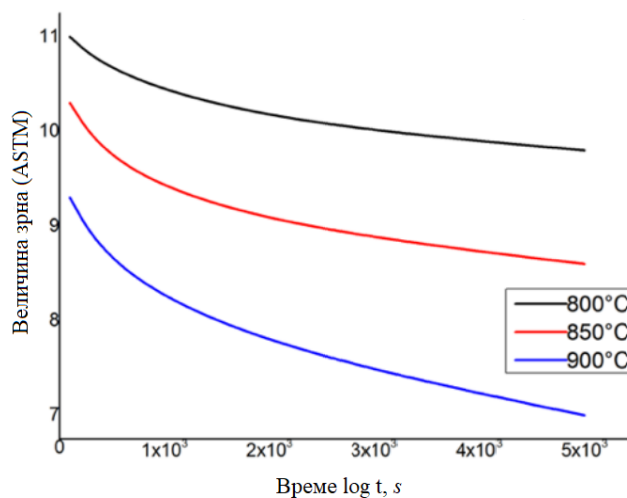
Уопштено посматрано, термичка обрада има велики утицај на прокаљивост. Само процес термичке обраде могуће је поделити на две целине, при чему прву целину чини процес аустенитизације, а другу целину каљење. Сврха аустенитизације је да се добије хомогена аустенитна структура са прецизно дефинисаном величином зрна.

У току процеса аустенитизације одвијају се два веома битна металуршка феномена. Први феномен се односи на трансформацију ферита и перлита у аустенит, а други на растварање карбида у аустениту. У току времена при којима се одвијају ови процеси аустенитна зрна расту услед загревања. Хемијски састав и величина зрна, подједнако утичу на прокаљивост челика.

Виша температура аустенитизације и дуже време загревања повећавају величину аустенитних зрна (слика 4.4), док је утицај времена прогревања у односу на температуру аустенитизације занемарљив. Челик AISI 4140 има величину зрна 10 (по ASTM стандарду) после аустенитизације на 850°C, а после аустенитизације на 1050°C величина зрна износи 6.5 (ASTM).

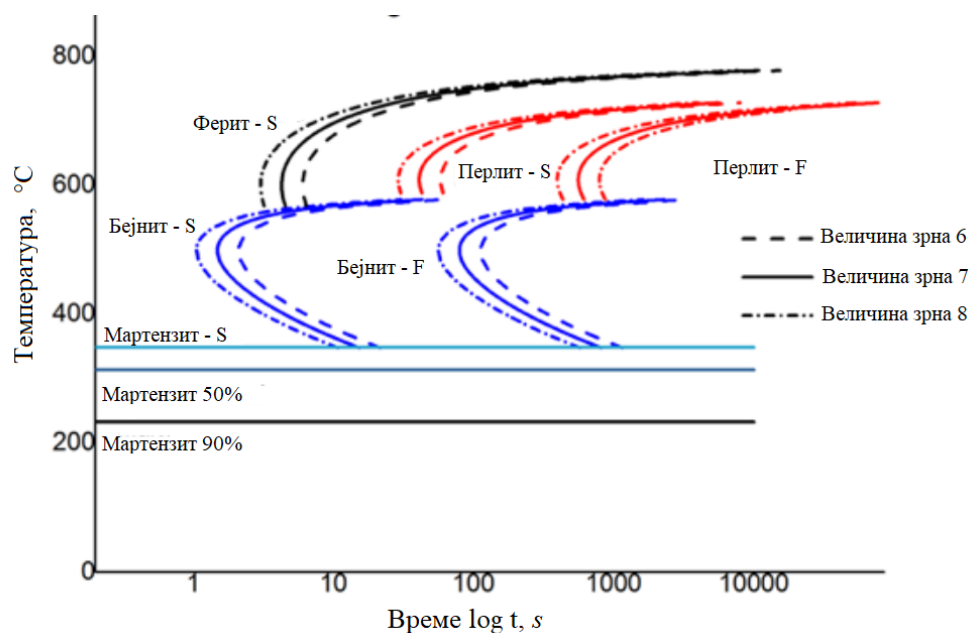


a)

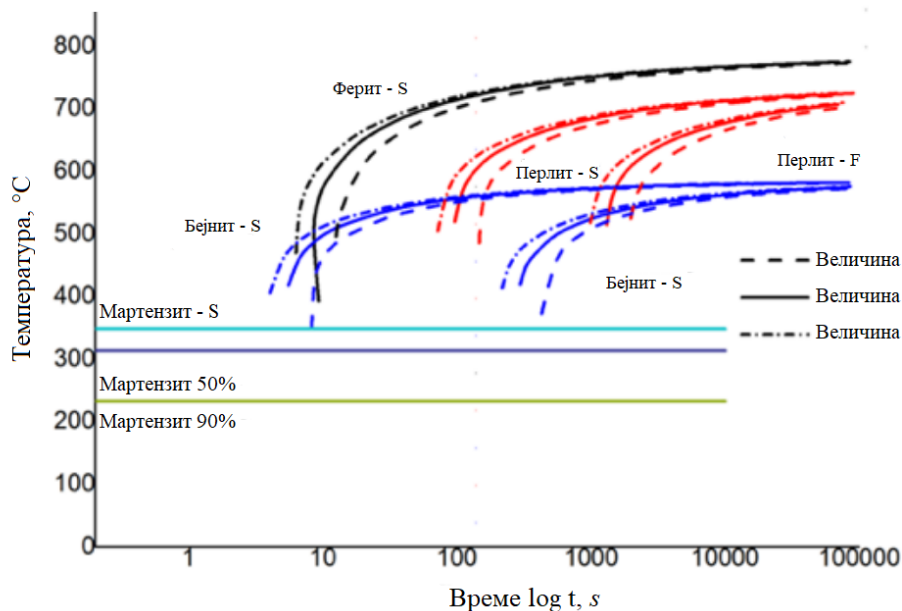


б)

Слика 4.4 ТТА дијаграм за челик 4140 (AISI) (а) и дијаграм утицаја времена прогревања на величину зрна (б)



а)

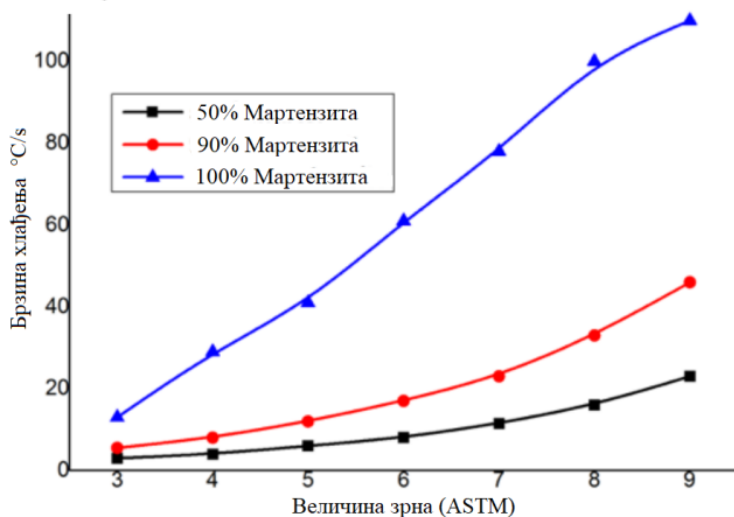


б)

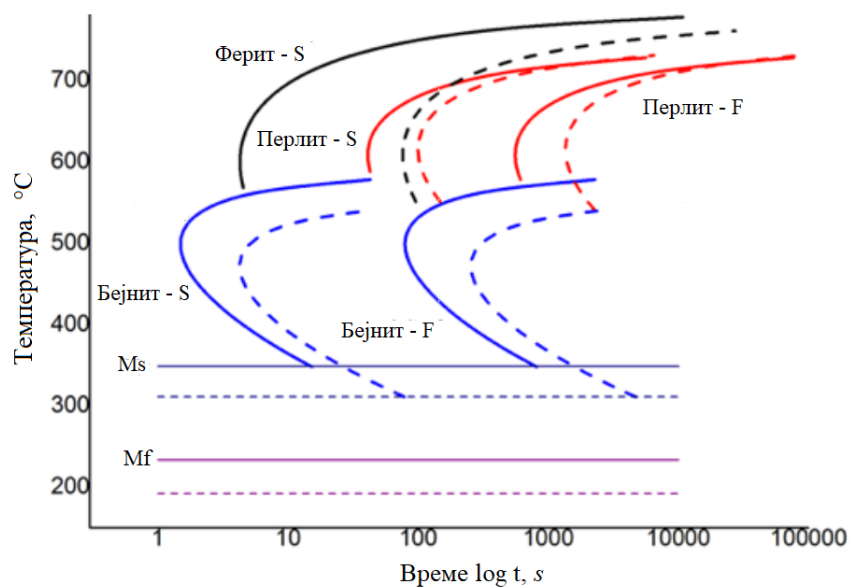
**Слика 4.5** TTT дијаграми за челик 4140 различите величине зрна (а) и KHZ дијаграм за челик 4140 различите крупноће зрна (б)

Како је приказано на сликама 4.5 и 4.6, већа зрна повећавају прокаљивост. Упркос томе што је прокаљивост код крупнозрне структуре већа она се у индустрији избегава због свог утицаја на својства отпорности.

Додавањем легирајућих елемената прокаљивост челика се повећава. Варијације у садржају хемијских елемената такође имају утицај на TTT и ARA дијаграме. Хемијски састав за дрећену класу челика варира у малим границама, али чак и те мале варијације имају утицаја на наведене дијаграме који одређују прокаљивост челика. У табели 4.1 дат је хемијски састав челика AISI 4140, а утицај легирајућих елемената на његову прокаљивост приказан је на дијаграму 4.6б. Уобичајено је да се дијаграм TTT помера удесно са повећањем садржаја легирајућих елемената (C, Cr, Mn, Si, Mo).



а)



б)

**Слика 4.6** Утицај величине зрна на формирање мартензита (а) и утицај легирајућих елемената на ТТТ дијаграм и прокаљивост (б)

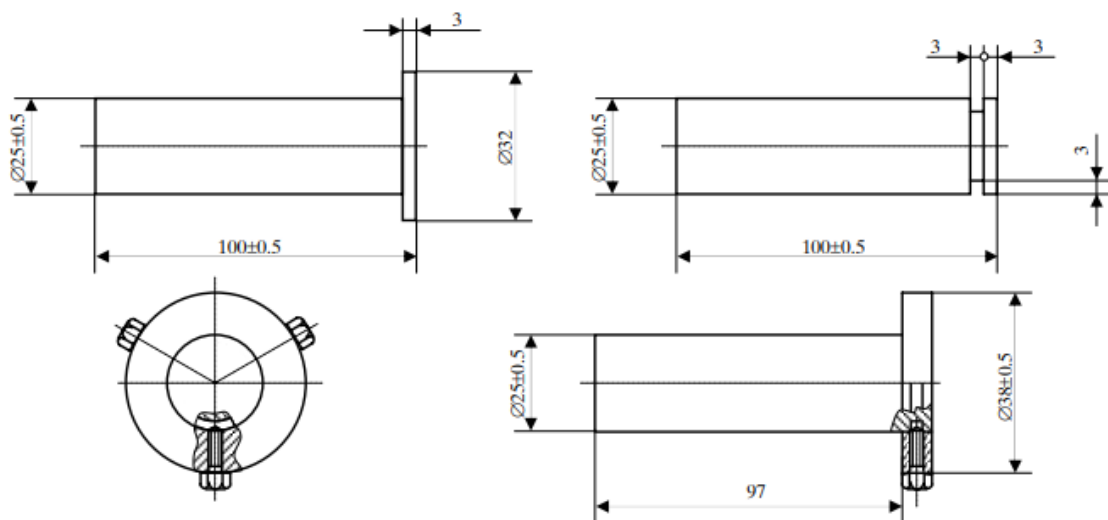
**Табела 4.1** Садржај хемијских елемената у челику 4140 (AISI)

| Хемијски елемент | Садржај, %   |
|------------------|--------------|
| Fe               | 96.785-97.77 |
| Cr               | 0.80-1.10    |
| Mn               | 0.75-1.00    |
| C                | 0.380-0.430  |
| Si               | 0.15-0.30    |
| Mo               | 0.15-0.25    |
| S                | 0.040        |
| P                | 0.035        |

Почетна структура, хемијски састав, величина зрна, температура аустенитизације, време загревања, као и време прогревања имају утицај на прокаљивост. У стандарду који ближе дефинише Џомини пробу, наглашава се да испитивани узорак треба равномерно загревати до усвојене температуре, држати на њој најмање 20 min, а потом прогревати додатних 30 min како би са сигурношћу температура по целом узорку била уједначена.

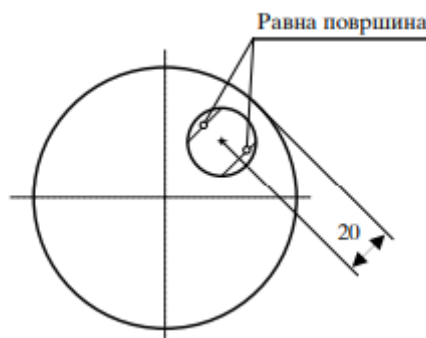
### 4.3. Џомини проба

Џомини проба представља експеримент који за задатак има да утврди прокаљивост испитиваног материјала (челика). Сама проба се састоји из неколико целина: Прва целина обухвата одабир места са којег ће се узети узорак и саму операцију израде узорка/епрувете. Израда епрувете прописана је у зависности од димензија узорка из којег се епрувета добија. За узорке, пречника или дебљине једнаке или мање од 40 mm, епрувета се израђује резањем, с тим да се осе епрувете и узорка поклапају (слика 4.7).



Слика 4.7 Облик и димензије стандардних епрувета за испитивање прокаљивости

Ако је пречник узорка или његова дебљина већа од 40 mm а мања од 150 mm, пре него што се приступи изради епрувете резањем, узорак се обрађује ковањем и своди на пречник 40 mm. Када су димензије узорка веће од 150 mm, епрувета се израђује резањем из узорка/производа али тако да оса епрувете буде удаљена од његове површине 20 mm (слика 4.8).



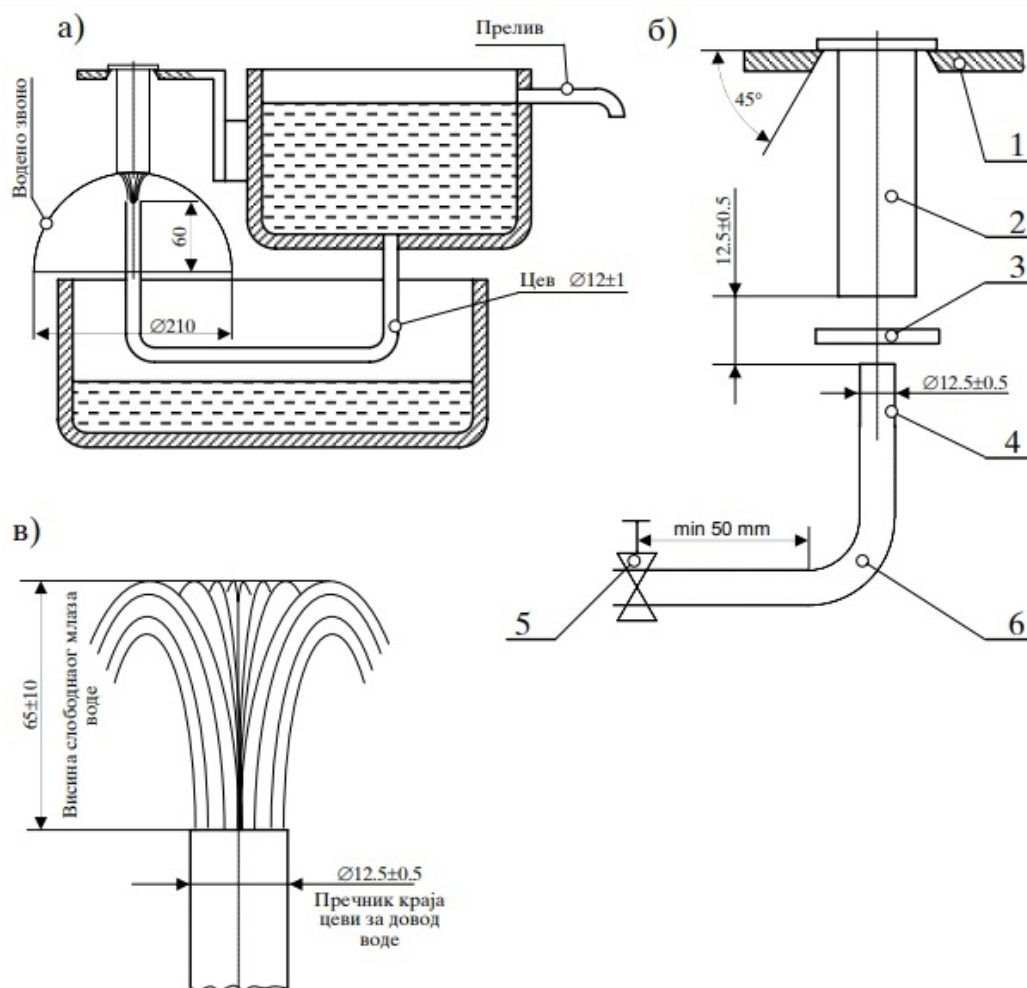
Слика 4.8 Положај епрувете у производу када се она израђује резањем

Како се палета производа од челика свакодневно шири (ваљани профили, ковани профили, континуално ливени полуфабрикати и др.) веома је битно дефинисати

начин на који ће се узорак изградити. Познато је да профили добијени ваљањем имају различите карактеристике у различитим правцима (анизотропност материјала), те је при провери изотропности материјала битно контактирати произвођача и усагласити детаље експеримента како би истоветност експеримента била потпуна. Када су детаљи везани за позицију са које се узорак израђује усаглашени, следи сама израда пробног узорка. Најчешће се пробни узорци добијају стругарском обрадом, а димензије узорка су:  $\varnothing 25 \times 100 \text{ mm}$ . Један крај узорка има пречник  $25 \text{ mm}$ , а други има мало већи (стандардном дефинисан) пречник који служи да се епрувета ослони при каљењу слободног краја.

Уређај за чеono каљење треба да обезбеди одређени положај епрувете у односу на крај цеви за довод воде, односно облик и димензије слободног млаза воде и његову снагу. Сви услови су приказани на слици 4.9.

Снага воденог млаза дефинише се пречником површине ( $210 \text{ mm}$ ) коју кваси вода одбијена од чела епрувете (водено звоно), а у равни која је удаљена  $60 \text{ mm}$  испод цеви отвора (4.9а). Другим условом одређена је висина слободног млаза на слици 4.9в).



**Слика 4.9** Уређај за извођење Цомини пробе

Уређај/апаратура се састоји од два суда, у горњи се доводи расхладна течност (вода) чији се ниво подешава помоћу преливне цеви и на тај начин остварују захтеви у погледу снаге воденог млаза. Са доње стране одводи се вода расхладном цеви до млазнице чија је оса коаксијална са осом држача епрувете (4.9б). Вода која је употребљена за хлађење епрувете сакупља се у доњем суду и из њега одводи у

канализацију. Температура воде којом се расхлађује епрувета мора бити у границама од 5 до 30°C. У просторији у којој се врши испитивање, у току каљења епрувете ваздух мора бити миран.

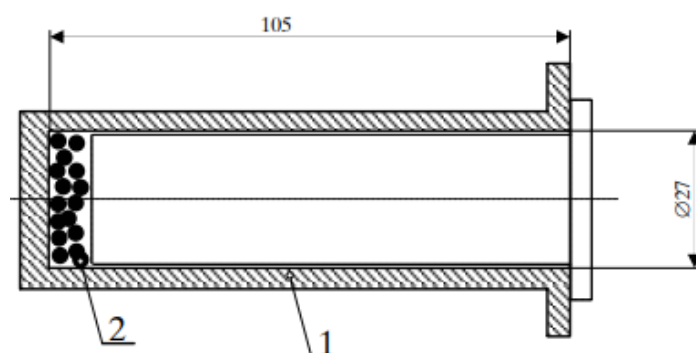
После извршене машинске обраде епрувете, на њеној површини се не смеју уочити трагови претходне обраде. Цилиндрична површина епрувете се обрађује финим стругањем, а површина која се излаже млазу воде се бруси.

Када је пробни узорак припремљен, следи његово загревање до температуре аустенитизације. Температура аустенитизације зависи од хемијског састава челика и за већину челика те температуре се креће у границама од 850-950°C (табела 4.2). Загревање епрувете врши се у пећима са неутралном атмосфером како би се разугљеничавање свело на минимум. Ако се овај услов не може испунити, епрувета се убацује у посебну цилиндричну посуду израђену од меког челика (слика 4.10). Дно посуде се прекрива гранулама графита или опиљцима од сивог лива.

**Табела 4.2** Вредности температура аустенитизације и нормализације у зависности од садржаја угљеника

| Садржај угљеника,<br>% | Температура нормализације,<br>°C | Температура аустенитизације,<br>°C |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| до 0.25%               | 925°C                            | 925°C                              |
| од 0.26 до 0.36%       | 900°C                            | 870°C                              |
| преко 0.37%            | 870°C                            | 800°C                              |
| преко 0.50%            | 900°C                            | 870°C                              |

Време загревања зависи од температуре загревања и најчешће је подељена у две фазе: прва, загревање комада, а друга прогревање које осигурава да је температура узорка једнака по целој запремини. Време загревања зависи искључиво од температуре загревања и по правилу не сме бити краће од 20 min. У посебним случајевима када је ово време краће, укупно време загревања (загревање + прогревање) не сме бити краће од 50 min. Време прогревања износи 30±5 min. Одступање од ове вредности настаје у случају када се температура у центру епрувете мери помоћу термопара, у том случају прогревање се врши све док се у центру не оствари/достигне задата температура.



**Слика 4.10** Приказ цилиндричне посуде (1) са опиљцима од сивог лива (2)

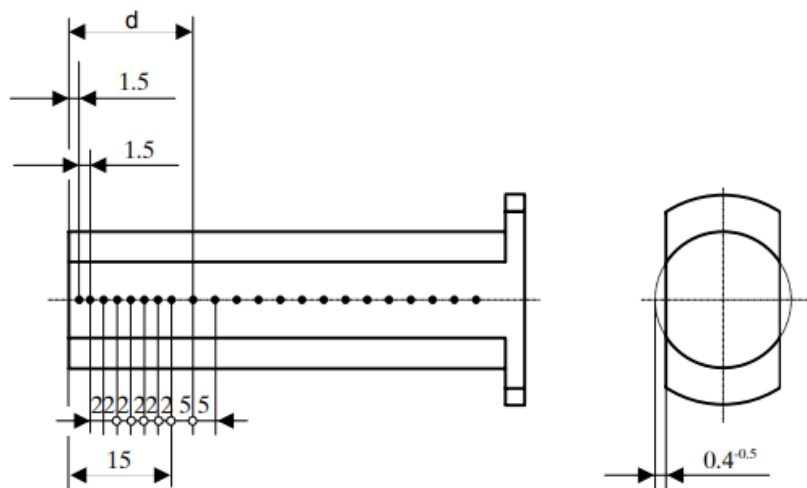
Када се достигне температуре аустенитизације узорак се вади из пећи и у што краћем року (до 5 s) се поставља на посебан ослонац који обезбеђује тачно растојање између узорка и отвора славине кроз коју тече вода чија се температура креће у границама од 5 до 30°C. Растојање између славине и узорка једнако је половини пречника узорка и износи 12.5 mm што одговара и пречнику отвора кроз који пролази вода. Када се узорак постави у ослонац помоћу посебног вентила се укључује

протицање воде која у директном контакту са узорком обезбеђује хлађење узорка које не сме да траје мање од 10 min. Хлађење комада по висини комада је различито. Највећа брзина хлађења је на самом крају узорка који долази у директан контакт са водом, и у том делу формирање мартензита је неизбежно. Крећући се даље од окаљеног краја ка ослоњу комада брзина хлађења опада па је структура узорка по висини променљива.

Када је узорак потпуно охлађен следи његова припрема за мерење тврдоће. Ова припрема се састоји у брушењу цилиндричног комада. Ово брушење се изводи у циљу уклањања површинског слоја узорка који у себи садржи нечистоће и друге загађиваче које могу да покажу лажне вредности на мерним тачкама. Дубина брушења износи 0.40 mm. Брушење се изводи тако да се добију две паралалне површине (по једна са сваке стране комада) које су паралелне оси испитиваног узорка. При брушењу треба водити рачуна о утицају температуре. Она не сме бити превелика, јер услед високе температуре може доћи до омекшања структуре што сам испитивани узорак чини непогодним за испитивање. Да би се утврдило да ли је дошло до прегревања, испитивани узорак се најпре опере у топлој води, а после тога потапа у 5%-ни раствор азотне киселине у води, а после тога 3 s потапа у раствор хлороводоничне киселине. Уколико је дошло до промене тврдоће услед прегревања на брушеним површинама ће се појавити тамнији делови који указују на те зоне мање тврдоће. У тамнијим деловима је дошло до недозвољеног пораста температуре услед којег узорак постаје непогодан.

Када је узорак (епрувета) успешно обрушен (без појаве тамних делова) следи мерење тврдоће. Мерење тврдоће се најчешће изводи методом по Роквелу (скала С) са силом на утискивачу 1470 N или Викерс методом са силом на утискивачу од 294 N. За мерење тврдоће користе се обе површине, с тим што се после завршеног мерења на првој, трагови мерења морају обрусити. Узорак се поставља у специјални прибор који не дозвољава померање у вертикалном правцу и потом се врши мерење. Ослонац на који се комад поставља при сваком експерименту мора бити сув. Тежња је да се прва тачка мерења налази што ближе уз слободни (окаљени крај), а потом све друге тачке се постављају на тачно одређеној удаљености једна од друге. У зависности од литературе налазе се различите препоруке. Поједини извори препоручују да то буде 1 mm од сваке тачке, док у другим налазимо друге вредности у зависности од тога да ли је у питању угљенични или легирани челик. Код челика са малом прокаљивошћу друга тачка се налази на 0.75 mm од прве. Ово међусобно растојање се задржава све до одстојања 12 mm од каљеног чела епрувете. Последње четири тачке се налазе на 15, 19, 22 и 25 mm од чеоне површине.

Схематски приказ мерења тврдоће окаљеног узорка од челика С60 (JUS - Č1730) по Џомини проби је дат на слици 4.11, док је на слици 4.12 дат фотографски приказ узорка после мерења тврдоће.

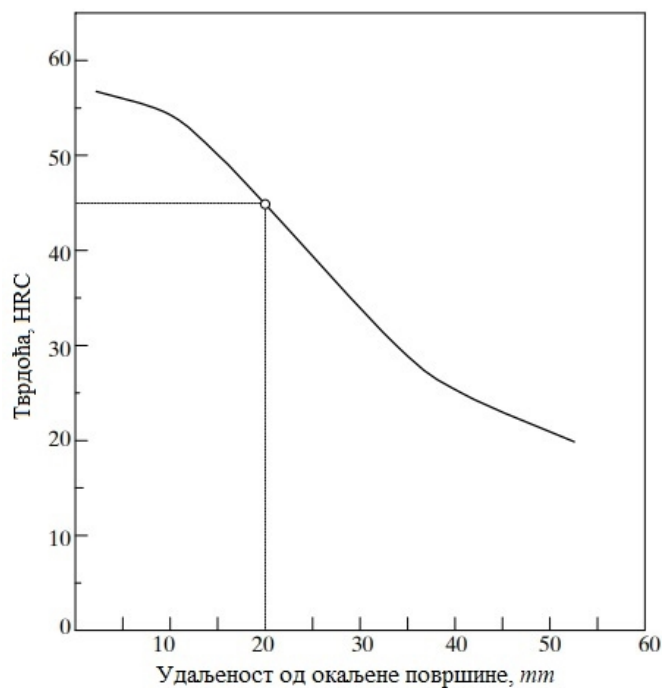


**Слика 4.11** Приказ примера мерних тачака за испитивање тврдоће окаљеног узорка



**Слика 4.12** Приказ реалног узорка са мерним тачкама после извршеног мерења тврдоће

Приказивање резултата се изводи тако да се формира крива која показује промену тј. пад тврдоће са порастом растојања од окаљене површине (слика 4.13). Будући да се тврдоћа може мерити у више тачака на одређеном одстојању од чела епрувете, као и обе брушене површине, при цртању криве прокаљивости вредности на ординати одговарају аритметичкој средини тврдоћа измерених на истом одстојању (са једне и друге стране) од чела епрувете/узорка.



**Слика 4.13** Изглед криве прокаљивости за челик

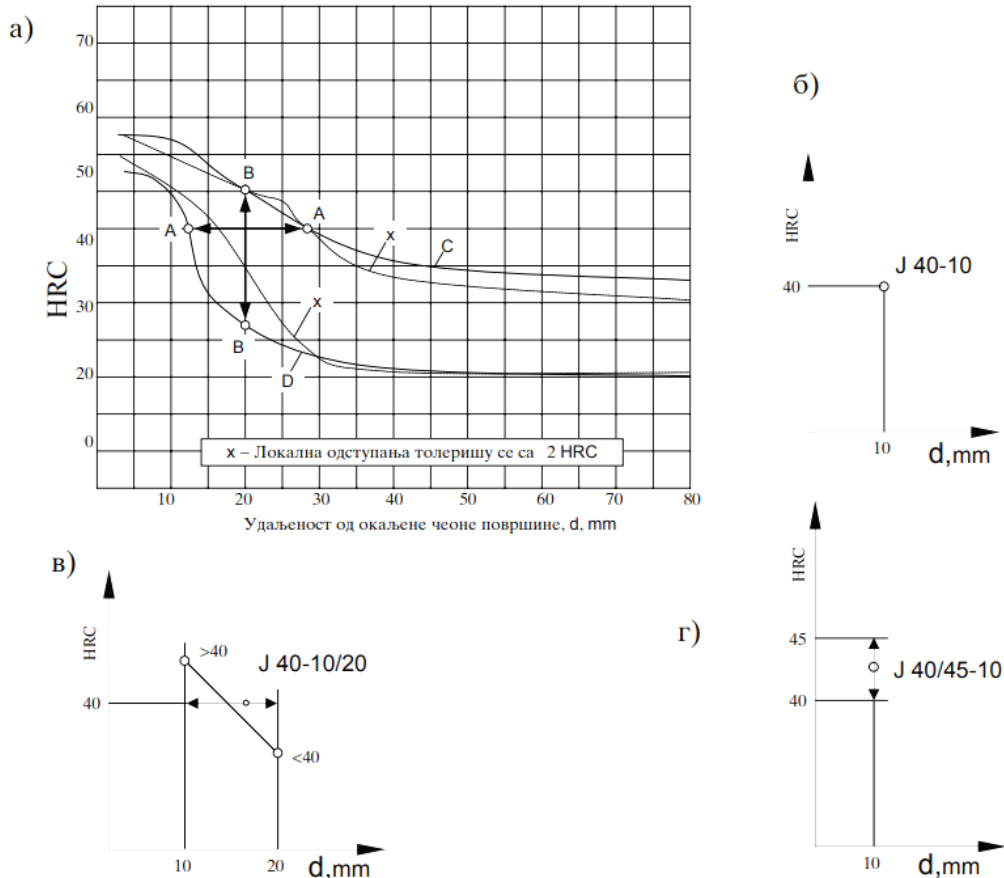
#### 4.3.1. Изражавање карактеристика прокаљивости

После извршеног испитивања прокаљивости челика добијени резултати се могу изразити на један од следећих начина:

- цртањем криве прокаљивости (слика 4.13)-што значи да је испитивање вршено у складу са сликом 4.11,
- вредностима тврдоћа одређених у три тачке: једна је на одстојању  $1.5\text{ mm}$ , а друге две на задатом одстојању од чела епрувете (непотпуно испитивање),
- вредностима тврдоћа измерених у две тачке на утврђеном одстојању од чела епрувете и
- вредношћу тврдоће на задатом одстојању од каљене чеоне површине епрувете.

С друге, захтев у погледу прокаљивости може се изразити на следећи начин:

1. Дефинисањем криве прокаљивости, односно:
  - задавањем криве горње границе испод које мора да лежи крива прокаљивости,
  - задавањем криве доње границе изнад које мора да лежи крива прокаљивости и
  - дефинисањем горње и доње границе између којих мора да лежи крива прокаљивости (слика 4.14а).
2. Задавањем неколико карактеристичних тачака којима се дефинише положај криве прокаљивости:
  - утврђивањем тачке на горњој граници прокаљивости,
  - утврђивањем тачке на доњој граници прокаљивости и
  - задавањем интервала између две границе.



Слика 4.14 Изражавање карактеристика прокаљивости

При цртању самог дијаграма потребно поштовати размеру: 10 *mm* на ординати једнако је 5 HRC или 50HV, а 10 *mm* на апциси једнако је одстојању од 5 *mm*.

Захтеви у погледу прокаљивости који су наведени под 2) могу се изразити на два начина:

- за утврђену вредност тврдоће, задаје се одстојање од каљене чеоне површине (слика 4.14в) и
- за утврђено одстојање од каљене површине, задаје се вредност тврдоће (слика 4.14г).

Својство прокаљивости се изражава индексом прокаљивости, односно бројчаним показатељем којим се исказује вредност тврдоће на задатом одстојању од каљене чеоне површине епрувете и састоји се од симбола J и два броја, у облику:

Jxx-d

где је:

xx- вредност тврдоће у задатој тачки по методи Роквел (скала C) и

d- одстојање тачке од каљеног чела епрувете у *mm*.

Ако се тврдоћа изражава по методи Викерса HV<sub>30</sub>, индекс прокаљивости мора садржати симбол HV.

Примери индекса прокаљивости:

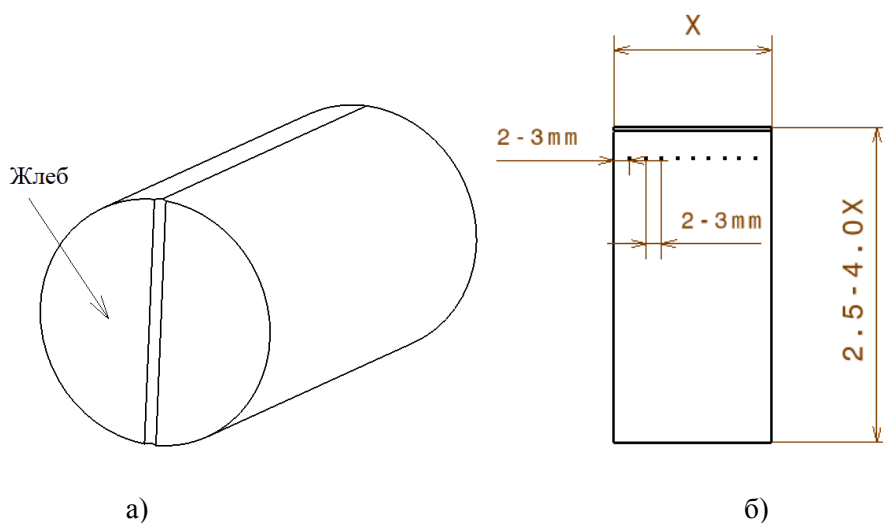
- J40-10- резултат мерења је тврдоћа 40 HRC на одстојању 10 *mm* од каљеног чела епрувете (слика 4.14б),
- J40-10/20- треба остварити тврдоћу 40 HRC у тачки која припада интервалу 10 до 20 *mm* од каљеног чела епрувете (слика 4.14в),
- J40/45-10- треба остварити тврдоћу у интервалу од 40 до 45 HRC у тачки на одстојању 10 *mm* од окаљеног чела епрувете (слика 4.14г) и
- J HV 300/400 -12- треба остварити тврдоћу из интервала 300 HV<sub>30</sub> до 400 HV<sub>30</sub> у тачки на одстојању 12 *mm* од каљеног чела епрувете.

#### 4.4. Метода по Гросману

Метода по Гросману представља практичну методу по којој је такође могуће одредити прокаљивост челика. Разликује се у односу на Џомини пробу првенствено по начину каљења, начину мерења тврдоће и припреме узорка. Код Џомини пробе, хлађење загрејаног узорка се вршило по једној површини (чеоној), док се по методи Гросман узорак хлади свестрано.

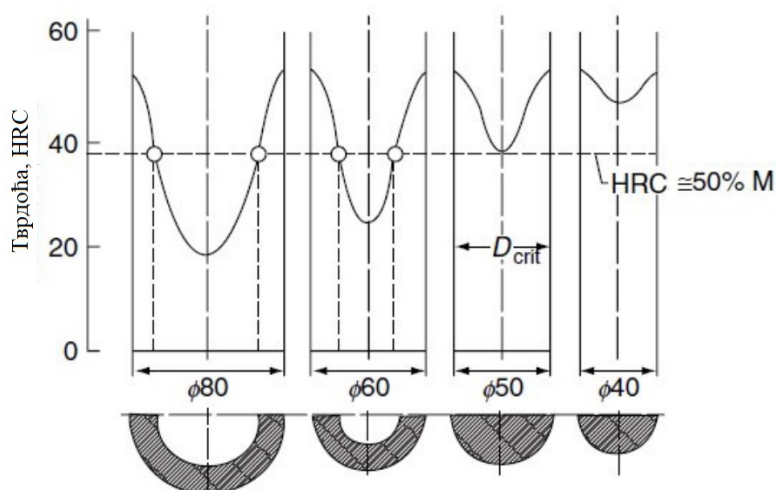
За разлику од Џомини пробе где се припремао један узорак, код методе по Гросману испитивање се може спровести на више епрувета/узорака, различитог пречника, али од истог материјала. При изради самих епрувета јако је битно да се испоштује стандардом одређен однос висине и пречника епрувете (слика 4.15а). Свака епрувета се пре загревања благо засеца по средини чеоне површине у циљу лакше обраде и припреме узорка за испитивање у даљем току експеримента. Када су димензије испитиваних епрувета усвојене следи њихова израда, а потом и загревање у пећи до температуре аустенитизације, после чега следи хлађење (каљење) у одговарајућој средини. Када се узорци охладе врши се њихово расецање по жлебу који је претходно формиран. Функција жлеба је да олакша продор резном алату при сечењу каљене структуре. Будући да је потребно расећи део који је управо окаљен (има високу тврдоћу) ова операција представља један од највећих недостатака ове методе

одређивања прокаљивости. Када су узорци расечени, једна половина узорка се припрема за металографска испитивања (бруси, полира и нагриза одговарајућим средством) а друга половина се бруси и касније служи за мерење тврдоће (најчешће по Роквелу).



**Слика 4.15** Приказ узорка за испитивање тврдоће по Гросману (а) и приказ мерних тачака на расеченом узорку (б)

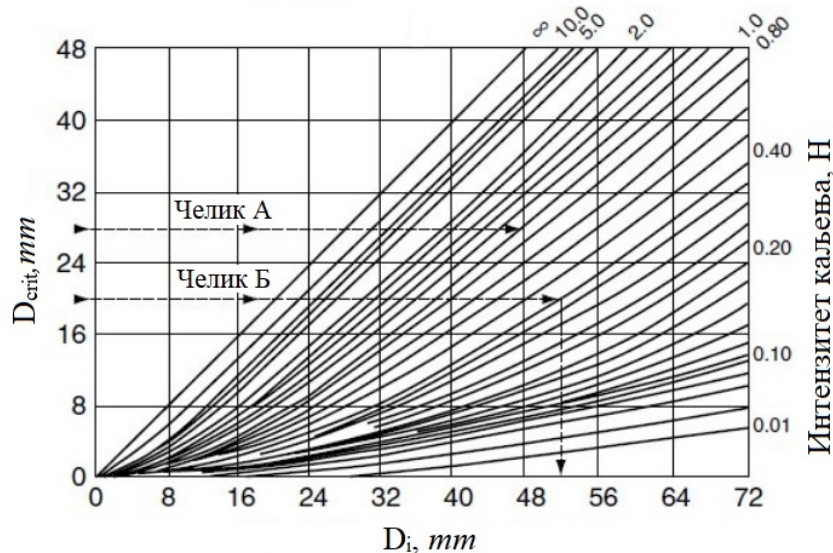
Тврдоћа се мери на другој половини расеченог узорка и то крећући се од обода узорка преко средине па све до другог дела обода узорка на растојањима од 2 до 3 mm (слика 4.15б). Оваквим мерењем тврдоће добија се крива која показује пад тврдоће од обода ка центру, а потом раст од центра ка другом делу обода. Ово јасно указује да се спољашњи делови узорка готово увек преобразе у мартензит док је тај преображај упитан крећући се све више ка центру (слика 4.16).



**Слика 4.16** Приказ промене тврдоће у функцији пречника узорка

Пречник узорка који у свом центру има 50% Мартензитне фазе се узима као критична вредност и он се означава као  $D_{crit}$ . Узорци већег пречника имају мање од 50% Мартензита у свом центру, а мањи пречници више од 50%. Тврдоћа у центру шипке са пречником  $D_{crit}$  се напредно утврђује. Такође, је важно напоменути да вредност  $D_{crit}$

зависи од средине у којој се узорци кале, нпр. за узорке од истог челика који су каљени у различитим срединама, један у води други у уљу, добијају се различите вредности  $D_{crit}$ . Да би се узео у обзир утицај средине у којој се узорци хладе, Гросман је увео фактор  $N$  који представља интензитет каљења. Вредност овог фактора је различита у зависности од средине. Како би могао да израчуна прокаљивост зависно од средине каљења Гросман је увео и параметар  $D_i$ . Овај параметар представља вредност пречника узорка који би имао 50% Мартензитне структуре у свом центру при интензитету каљења  $N = \infty$ , при чему  $N = \infty$  представља идеалан теоријски интензитет каљења, односно идеалну средину у којој се узорак са температуре аустенитизације охлади на температуру средине за  $t=0$  s. У суштини овај параметар представља универзалан параметер прокаљивости који изједначава и упоређује параметер каљења у сврху одређивања челика са већом прокаљивошћу. Челик са већом вредношћу параметра  $D_i$  има већу прокаљивост. Гросман је такође са својим сарадницима успео да конструише дијаграм помоћу којег се на основу вредности за  $N$  и  $D_{crit}$  добија вредност  $D_i$  (слика 4.17).



Слика 4.17 Дијаграм за одређивање вредности  $D_i$  на основу  $N$  и  $D_{crit}$

На пример шипка од челика А критичног пречника  $D_{crit}=28$  mm која се хлади у води ( $N=1.0$ ) има вредност идеалног пречника  $D_i=48$  mm (према дијаграму/слици 4.17).

Челична шипка од челика Б критичног пречника  $D_{crit}=20$  mm која се хлади у уљу ( $N=0.4$ ) има вредност идеалног пречника  $D_i=52$  mm. На основу  $D_i$  други челик има већу прокаљивост јер је вредност  $D_i$  већа.

## **5. Методе за оцену заварљивости угљеничних и легираних челика**

### **5.1. Појам и дефиниција заварљивости**

Заварљивост представља комплексну технолошку карактеристику материјала којом се изражава утицај процеса заваривања на заварени спој, као и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања. На основу овога може се рећи да појам заварљивости представља способност материјала да ствара заварене спојеве унапред одређеном технологијом заваривања, као и да спојеви задовољавају све захтеве који се постављају у радним условима. нпр. при РЕЛ заваривању, материјал који је заварљив овим поступком мора образовати спој чије су особине идентичне особинама основног материјала. Својства која се захтевају свде се на испуњавање техничких услова који се односе на механичке, структурне и хемијске особине метала шавова, зоне око шавова и самог споја посматраног као целина.

Узимајући у обзир комплексност својства заварљивости, дефиниције и оцене, подела на уже појмове олакшава проучавање и оцену погодности материјала за одређене заварене конструкције. Из тог разлога се посебно разматрају: металуршка, конструкциона и технолошка заварљивост.

Металуршка заварљивост материјала зависи од одређених фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова, неметалних укључака итд. На заварљивост у металуршком погледу утичу све металуршке промене које се дешавају под дејством унете топлоте при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног пада механичких и технолошких особина завареног споја, нарочито у зони око шавова. Ово указује на појаву да код материјала са лошом заварљивошћу могу настати драстичне промене хемијског састава, односно може доћи до појаве тврде и крте структурне компоненте као и до појаве прслина.

Истраживањем је утврђено да метали и легуре нису заварљиви са металуршког аспекта ако се њихови саставни хемијски елементи међусобно не растварају у чврстом стању, већ образују тврда и крта једињења (Fe-Al, Fe-Cr, Ni-Al итд.).

Насупрот томе, металуршки су заварљиви сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који су металуршки заварљиви могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на пројектовање саме заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, број и распоред шавова које конструктор поставља пројектним захтевом за дати случај а зависно од врсте оптерећења и других радних услова.

Технолошка заварљивост обухвата технолошке параметер који утичу на особине заварених спојева нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, погонску енергију (унос топлоте), брзину хлађења, итд. При томе се цени да ли се технолошки поступак изводи без потешкоћа или уз примену посебних мера (предгревање, догревање, отпуштање након извршеног заваривања итд.), а оцена заварљивости се формира на основу предузетих додатних мера.

Са оперативног становишта које се односи на понашање материјала у току заваривања или наваривања, они се оцењују као добро заварљиви, када је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал сједињују у хомогену легуру и при

томе се топе без већих потешкоћа, без великог прштања, појаве гасних прелина, гасних мехурова и других грешака.

Нечистоће које се налазе на страницама жлеба (прљавштине, масти, уља, коварине итд.) пожељно је уклонити у фази припреме заваривања, јер оне погоршавају оперативну заварљивост.

Општа заварљивост представља оцену појединачно објашњених компонената заварљивости при чему се за коначну оцену процењује већи број фактора као што су основни материјал и додатни материјал, заваривачки рад, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона. При процени склоности завареног споја ка кртом лому, битан је критеријум да ли је спој способан да све сопствене велике напоне поништи или смањи пластичним деформисањем, тј. конверзијом еластичних деформација у пластичне.

Генерално посматрано оцена заварљивости метала и легура своди се на предвиђање особина завареног споја након завршене операције заваривања. Коначне особине за дати материјал и технологију зависе од процеса и појава који се дешавају и настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом а затим очвршћава,
- у прелазној зони-зони стапања-полуистопљеног материјала и
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где се основни материјал у чврстом агрегатном стању различито понаша због неједнаких максималних температура и брзина хлађења у појединим тачкама ЗУТ-а.

Само се одређене промене које настају у овим зонама могу непосредно запазити, док се већина промена откривају на основу испитивања изведеним на пробним спојевима, тј. оцењује се склоност материјала ка настанку прелина, склоност ка кртом лому, старењу итд.

Из изнетог се може закључити да је при заваривању одређеног материјала потребно утврдити:

- како се материјал понаша при заваривању одабраним технолошким поступком и
- како се заварени спој понаша у најнеповољнијим процесним условима заваривања.

Ово значи да ће материјал који има добру заварљивост образовати поуздане спојеве односно компактне и непрекидне заваре, и довољно јаке и пластичне шавове и ЗУТ, да издрже сва напрезања у процесу заваривања тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстоћу и да се одупру свим могућим преоптерећењима у току рада тако што ће се пластично деформисати. Укратко речено основни материјал осим добрих својстава отпорности мора да има и добра својства пластичности и жилавости.

Формирање нових структура у завареном споју највише зависи од кинетике кристализације и преображаја унутрашње грађе у чврстом стању, зависно од услова заваривања, хемијског састава основног и додатног материјала и стања растопа.

Стога за неке материјале (ливено гвожђе, бакар), добра металуршка заварљивост не значи и довољну глобалну заварљивост, јер метал шава и ЗУТ поред добре металуршке заварљивости се могу знатно разликовати у односу на основни материјал нарочито по механичким особинама и херметичности споја.

Зато и при задовољавајућој металуршкој заварљивости, тек технолошка заварљивост показује способност основног материјала да се одабраном технологијом заваривања остваре тражена својства као и да се добије компактан спој. Ова чињеница

показује да се полазећи од добре металуршке заварљивости може наћи одговарајући поступак којим би се добиле одговарајуће особине завареног споја.

Из досадашњих знања за дефинисање и оцену заварљивости запажа се да за ову јако битну карактеристику не постоје једнозначне бројне величине. Као пример могуће је навести најраспрострањенију дефиницију заварљивости међународног института за заваривање која гласи:

“Метални материјал се сматра, на одређени начин заварљив, ако помоћу заваривања, при коришћењу одговарајуће технике спајања, настају јединствени метални спојеви, који испуњавају захтеве, који се постављају за својства локалних шавова и њихов утицај на чврстину конструкције”.

Суштина ове дефиниције и других дефиниција је та да су непотпуне и неподобне за практичну примену, што упућује на даље истраживање и испитивање заварљивости, нарочито у погледу поузданости. Долази се до запажања да се за оцену заварљивости треба узети у обзир узајамна веза конструкције (крутост, дебљина, врста споја), материјал (способност заваривања) и технологије (могућност заваривања). Због повезаности ових чинилаца није увек могуће оценити заварљивост једном врстом проба, те се за челик уводе допунски параметри заварљивости који се односе на:

- структуру,
- компактност и
- механичка својства и др.

У пракси се оцени заварљивости најчешће приступа на два начина:

- процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
- избор услова и других мера при заваривању да би се постигли задовољавајући резултати (потврда технологије).

Практичним пробама одређују се поједини видови заварљивости и доносе закључци о подобности испитиваног материјала и одабране технологије. Најбитнији критеријум за доношење оцене заварљивости је одржавање металног континуитета тј. целовитости завареног споја, што може бити нарушено кад год се појаве прслине одређене величине. Према механизму настајања прслине могу бити:

- топле,
- хладне,
- ламеларне и
- прслине жарења.

Осим наведеног критеријума целовитости, битне су и граничне механичке особине:

- тврдоћа завареног споја (метал шава, ЗУТ, ОМ),
- својства отпорности и
- ударна жилавост (метал шава, ЗУТ, ОМ).

Вредност тврдоће и затезне јачине, као линеарно зависне величине код челика користе се као једноставан показатељ заварљивости јер њихово повећање у ЗУТ-у указује на смањење пластичности и ударне жилавости (погоршање заварљивости).

Ударна жилавост је индикатор који најбоље приказује утицај технологије и/или режима заваривања, које се највише јављају у ЗУТ-у, те се неретко оцена о

заварљивости доноси и на основу испитивања жилавости у ЗУТ-у, зони стапања и основном материјалу (проба Чабелке, ВУЗ-Братислава, Словачка).

## 5.2. Методе за испитивање заварљивости

У практичним условима не постоји идеална заварљивост, односно не може се ниједном методом заваривања добити спој потпуно истих особина у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу.

Како се због неизбежних промена особина насталих при заваривању, идеална заварљивост разликује од реалне, неопходно је проценити граничне величине неких показатеља заварљивости.

По многим препорукама полазна основа за процену заварљивости непознатог материјала, јесте одређивање хемијског састава и механичких особина, у том смислу примењују се:

1. Рачунске и емпиријске методе и
2. Практичне пробе заварљивости.

Подаци који су потребни за оцену заварљивости наведеним методама су:

- хемијски састав материјала (челика),
- дебљина, тип и крутост завареног споја и
- начин заваривања.

### 5.2.1. Рачунске методе

Процена заварљивости према хемисјком саставу заснива се на израчунавању тзв. хемијски еквивалентног угљеника-  $CE$ , који изражава познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника у челику погоршава својство заварљивости. Утицај других елемената изражава се преко коефицијента еквивалентности у односу на угљеник. Тако се за закаљиве угљеничне челике еквивалентни угљеник рачуна помоћу израза:

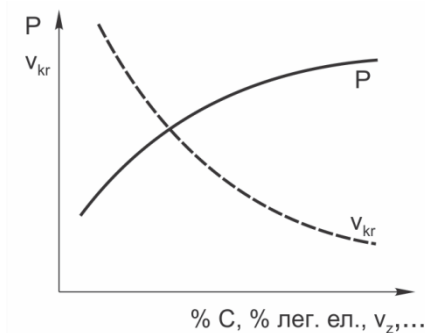
$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \%$$

Из претходне формуле може се закључити да пораст садржаја угљеника четири пута више погоршава заварљивост него пратећи елементи ( $Si$ ,  $Mn$ ). За угљеничне челике са увећаним садржајем мангана, хрома и молибдена, који погоршавају заварљивост, хемијски еквивалент угљеника се рачуна према изразу:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \%$$

У формулама за израчунавање  $CE$ , хемијски симболи појединих елемената означавају њихове масене садржаје изражене у процентима.

Повезујући заварљивост ( $Z$ ) са прокаљивошћу ( $P$ ) као реципрочним својствима ( $Z=1/P$ ) и познавајући факторе који повећавају прокаљивост и смањују критичну брзину хлађења може се графички приказати утицај тих фактора на само својство заварљивости (слика 5.1).



**Слика 5.1** Однос заварљивости и прокаљивости

Промена заварљивости у зависности од квалитативно-квантитативног садржаја челика и легирајућих елемената сразмерно угљенику, проучавало је много научника, те се због тога у литератури могу наћи различити изрази за израчунавање CE и оцену заварљивости. У пракси највише се примењује израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \%$$

Ова формула се примарно користи за оцену заварљивости угљеничних челика као и угљенично-манганских челика, а не и за нисколегиране челике повишене јачине и нисколегиране Cr-Mo челике.

Проучавањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је линеарна корелација:

$$HV_{\max} = 1200 \cdot CE - 200 \text{ и}$$

$$HV_{\min} = 1200 \cdot CE - 260,$$

која важи у границама  $0.2 < CE < 0.6$ , јер изван ових граница зависност HV-CV није више линеарна. Уз велика упрошћења, занемаривањем низа утицајних фактора, може се прихватити да је челик заварљив ако коначна тврдоћа ЗУТ-а не премашује 350 HV, јер се сматра да се до те границе не формира мартензит у зони утицаја топлоте. Ова гранична тврдоћа одговара вредности  $CE = 0.45\%$ , па се усваја да су челици са  $CE < 0.45\%$  заварљиви без употребе посебних мера, док су челици  $CE > 0.45\%$  условно заварљиви, захтевају употребу посебних мера, или незаварљиви.

На готово идентичан начин поједини научници процењују заварљивост челика повишене јачине помоћу параметарских једначина, које осим хемијских елемената на погоршање заварљивости уводе и утицај дебљине, дифундованог водоника и крутост споја. Тако су јапански аутори *Ito* и *Bessyo* предложили параметарске једначине:

$$P_c = CE + \frac{S}{600} + \frac{H}{60}, \%$$

$$P_w = CE + \frac{K}{4 \cdot 10^4} + \frac{H}{60}, \%$$

При чему је:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{15} + \frac{Cr}{20} + 5B,$$

CE- хемијски еквивалентни угљеник,

s- дебљина челичне плоче у mm,

H- садржај дифундованог водоника у ml на 100 g метала шава и

К- 69·s- интензитет крутости у  $N/mm$ , само за плоче дебљине  $s < 150\text{ mm}$ .

Осим наведених параметарских једначина у литератури се може наћи и једначина Мусипићенка и Косаткина:

$$P_{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{15} + \frac{P}{2} + 0.0024 \cdot s.$$

Предгревање материјала (челика) пре заваривања препоручује се када су вредности параметарских једначина ( $P_C$ ,  $P_W$ ,  $P_{CE}$ ) веће од 0.30%.

Садржај водоника, тврдоћа, дебљина и крутост утичу на појаву хладних прслина, па се због међусобног међудејства не може одредити максимална дозвољена тврдоћа ЗУТ-а, а да се притом не узме у обзир дифундовани водоник. Из тог разлога се код челика повишене јачине, код којих се параметарским једначинама углавном оцењује заварљивост, вредност максималне тврдоће повезује се са садржајем дифундованог водоника према следећем:

| Садржај дифундованог водоника, Н у $cm^3/100g$ | Допуштена тврдоћа ЗУТ-а, НV |
|------------------------------------------------|-----------------------------|
| 20                                             | 350                         |
| 10-20                                          | 375                         |
| 5-10                                           | 400                         |
| 1-5                                            | 450                         |

Количина дифундованог водоника се одређује стандардним пробама по SRPS С.НЗ.018:1983, глицеринским тестом, а у новије време хроматографски- методом која се заснива на различитој апсорпцији од стране апсорбената појединих делова полазне смеше; предност је што испитивање траје неколико сати уместо више дана као код глицеринског теста. Грубо се може усвојити да се садржај дифундованог водоника за поједине методе заваривања, налази у границама датим у табели 5.1.

**Табела 5.1** Садржај дифундованог водоника у металу шав

| Начин заваривања                        | Садржај дифундованог водоника у $cm^3/100g$ |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| У смеси гасова $Ar$ и $CO_2$ :          |                                             |
| • Чиста жица                            | 2-7                                         |
| • Прљава жица                           | 6-12                                        |
| Ручно електролучно:                     |                                             |
| • Електроде сушене на $400-500^\circ C$ | 3-7                                         |
| • Електроде базичне несушене            | 12-20                                       |
| • Електроде сушене на $100-150^\circ C$ | 6-12                                        |
| • Електроде рутилних облога             | 20-35                                       |
| Под прахом (ЕРР):                       |                                             |
| • Чиста жица и сушен прах               | 5-10                                        |
| • Прљава жица и несушен прах            | 10-25                                       |

За угљеничне и нисколегиране челике може се очекивана максимална тврдоћа у ЗУТ-у израчунати на основу њиховог хемијског састава:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr.$$

Новијим истраживањима уведен је посебан израз  $A(C)$  за корекцију утицаја легирајућих елемената зависно од садржаја угљеника у челику:

$$CEN = C + A(C) + CE',$$

Где је  $A(C)$  дато таблицом:

|      |         |       |       |       |       |       |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C, % | до 0.08 | 0.08  | 0.12  | 0.16  | 0.20  | 0.26  |
| A(C) | 0.500   | 0.584 | 0.750 | 0.916 | 0.980 | 0.988 |

а  $CE'$  изразом:

$$CE' = \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5B.$$

Помоћу  $CEN$  прецизније може да се донесе одлука да ли је потребно предгревање које спречава преображај аустенита у мартензит у ЗУТ-у.

Статистичком обрадом експерименталних резултата дошло се и до једначине облика:

$$CEK = \frac{2C + CE'}{3} + 0.05.$$

Из практичних испитивања закључено је да једначина  $CE$  одговара челицима који имају  $C \geq 0.17\%$ , а комбинована једначина  $CEK$  или једначина  $CEN$  за челике са садржајем  $C < 0.17\%$ .

Упоредивањем наведених формула за  $CE$  запажа се разлика у величини коефицијената утицаја појединих хемисјких елемената. Ова разлика настаје као последица различитих индивидуалних приступа и експерименталних појава.

#### 5.2.1.1. Прорачун температуре предгревања

Велики број челика, а нарочито челици повишене јачине, склони су ка појави хладних прслина, те је неопходно предузети мере како би се спречила њихова појава. Те мере се у највећем броју случаја односе на одабир поступка и технологије заваривања које искључују повећање кртости услед трансформационих појава. Хладне прслине се појављују ако у ЗУТ-у настане мартензитна или доња бејнитна структура и истовремено се појаве велике количине дифундованог водоника и сопствени напони. На последња два набројана критеријума може се утицати различитим конструкционо-технолошким решењима. Јасно се закључује да постоји могућност да се избегну структуре каљења при трансформацији аустенита, што се углавном постиже повећањем уноса топлоте (линијске енергије заваривања) или предгревањем. У оба случаја брзина хлађења се смањује. За прорачун температуре предгревања највише се користи формула Сеферијана:

$$T_p = 350 \sqrt{|CE|_u - 0.25}, ^\circ C$$

где је:

$$|CE|_u = |CE|_h + |CE|_s$$

$|CE|_h$  - Хемијски еквивалентни угљеник одређен из формуле:

$$|CE|_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90}$$

$|CE|_s$  - еквивалентни угљеник дебљине (s) и mm:

$$|CE|_s = 0.005 \cdot |CE|_h,$$

односно

$$|CE|_u = |CE|_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$$

Знатно сложеније одређивање температуре предгревања је ( $T_p$ ) је по методи BWRA (*British Welding Research Association*).

Температура предгревања неких челика одређује се помоћу параметарских једначина (P):  $T_p=1440 P_i=392, ^\circ C$ .

- Стварна брзина хлађења ЗУТ-а  $v_h$  при  $300^\circ C$  и критична брзина  $v_{kr}$ , при којој у ЗУТ-у настаје чисто мартензитна структура, одређују се по једначини:

$$\log v_{kr} = 3.0 - (4.62C + 1.05Mn + 0.54Ni + 0.50Cr + 0.66Mo) \cdot ^\circ C/s.$$

У завареним спојевима са  $\log v_h/v_{kr} < -0.6$  прслине се не јављају док се за  $\log v_h/v_{kr} > 0.3$  прслине увек јављају. Брзина хлађења израчуната из односа  $\log v_h/v_{kr} < -0.6$  који одређује услове заваривања са предгревањем или без њега.

- За оцену склоности ка прслинама примењује се и израз којим се узима у обзир садржај дифундованог водоника и крутост споја (к):

$$P_s = \log \frac{v_h}{v_{kr}} + \frac{H}{10} + \frac{k}{500},$$

при  $P_s=-0.5$  прслине се не појављују, за  $P_s= 0.3$  вероватноћа појаве прслине је 50%, а при  $P_s>1$  прслине увек настају.

- Интензитет крутости (k) израчунава се у зависности од дебљине лима (s) у mm према изразу  $k= 66 s$ , а (H) се усваја из табеле 5.1, или боље, експериментима на пробним узорцима.

Користећи у горњем изразу  $P_s=-0.5$  може се израчунати повољна брзина хлађења при  $300^\circ C$  и на основу тога, за познате параметре заваривања и температуре предгревања.

Без обзира на начин прорачуна температуре предгревања, није оправдано да она буде већа (изнад) температуре  $M_s$ - температуре почетка мартензитног преображаја. У противном могло би доћи до појаве топлих прслина или да се код термостојаних челика пониште добијене карактеристике. Ово уједно представља и један од разлога због којег се данас ретко користе дијаграми изотермалног или континуалног разлагања аустенита за дати челик, јер се при употреби тих дијаграма добија температура предгревања која је за  $30-50^\circ C$  већа од температуре  $M_s$ .

Из аспекта поспешивања издвајања водоника из области завареног споја велики утицај има накнадно загревање (отпуштање) шави пре коначног хлађења до собне температуре. Уношење завареног споја одмах након заваривања у пећ  $T=100-200^\circ C$  смањује брзину хлађења за температуре испод  $300^\circ C$ . У случају да се отпуштање

напона не може извести одмах после заваривања, комплетан заварени спој може бити изложен температури која омогућава да се аустенит трансформише у повољну структуру. Ова накнадна термичка обрада такође поспешује дифузију водоника из радног предмета. За велики број челика температура накнадне термичке обраде износи од 590 до 675°C. За конструкционе челике повишене јачине често је довољно накнадно загревање од 30 до 60 минута на температури 100-150°C, док је за дебљине изнад 40 *mm* понекад потребно накнадно загревање у трајању од неколико сати (3-5 h). При заваривању веома великих предмета (дебљине изнад 300 *mm*) заваривање се мора више пута прекидати и предмет накнадно предгрејати чиме се добијају поуздани заварени спојеви.

### 5.2.2. Практичне пробе заварљивости

Експериментална процена заварљивости заснована је на проучавању настанка прлина у завареном споју: (1) у току процеса заваривања, (2) непосредно након завршеног процеса или (3) после одређеног времена (~48 часова). Експериментална процена заварљивости се у новије време проширује и на испитивање појаве прлина услед накнадног загревања (термичке обраде) и услед радних напрезања која могу довести до настанка експлозационих прлина.

Уопштено говорећи прсине у завареним спојевима настају као последица напонско-деформационог стања које настаје због неравномерног ширења и скупљања при заваривању. Код материјала недовољне пластичности, у завареном споју се могу појавити прсине.

Оцена способности материјала да се одупре настанку прлина заснива се на одређивању критичне деформације у функцији температуре, као и на одређивању критичног напона при коме се јављају прсине.

Због великог броја практичних метода за испитивање заварљивости ( преко 900), практично није рационално сваку појединачно обрадити, али је важно запазити да се све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног узорка услед односа топлоте и неслободних деформација.

Код већег броја практичних метода испитивања заварљивости узорци се излажу термичким циклусима: локално, по целом профилу или загревању и хлађењу исто као и при заваривању (симулација термичког циклуса) и тсл. Настанак промена утврђује се стандардним методама испитивања ( затезање, савијање, мерење тврдоће, жиљавости итд.) пре и након одрађеног термичког циклуса. По потреби заварени спој се испитује металографски.

У циљу суштинског приказа неких од ових испитивања, објасниће се само карактеристичне пробе из појединих група.

#### Пробе склоности ка лому (топлом и хладном)

Ова испитивања имају велики значај, посебно када се код неких конструкција предвиђа употреба нових основних и додатних материјала. Нови материјали се могу употребити тек након што је извршена провера њихових термофизичких и механичких особина као и њихове појединачне склоности ка одређеним методама заваривања. Најширу примену имају пробе које испитују настанак хладних прлина, јер се при испитивању може разматрати и утицај параметара заваривања тј. уноса топлоте.

Пробе хладног лома деле се на две групе:

1. Пробе слободних (неукрућених спојева) и
2. Пробе укрућених спојева.

У другој групи се разликују:

- пробе са самоукљештењем које се изводе погодном монтажом елемената пробног споја тако да долази до самоукљештења шави и споја.
- пробе са насилним укљештењем помоћу посебних алата и направа којима се елементи споја фиксирају. При томе код неких проба постоји могућност промене степена укрућења или брзине хлађења тј. топлотне строгости. Тако се може оценити појединачни утицај на хладни лом како укрућења тако и брзине хлађења.

Пробе са диригованим напрезањима примењују се за оцену склоности ка хладном лому после заваривања; чим се спој изведе, делује се спољним оптерећењем на заварене узорке. Предност ових проба је свакако могућност избора врсте и величине оптерећења, који највише утичу на хладни лом.

Пробе симулирањем термичких циклуса се изводе на посебно конструисаним уређајима- симулаторима и по методи BWRA. У симулатору се пробни незаварени узорци излажу температурским циклусима који копирају заваривачке циклусе у појединим тачкама различито удаљеним од осе шави. На тај начин могу се утврдити промене својстава отпорности и пластичности у ЗУТ-у, зависно од режима загревања или хлађења.

Постоји неколико врста симулатора заснованих на електроотпорском или индукционом загревању пробних узорака. У свету су данас најпознатији симулатори *Umet* (Русија), *Weld thermal cycle simulator* фирме *Smit-Welds* (САД) и *Thermoredtor-W* (Јапан), фирме *Fuji Electronic Industrial Co. Ltd.* Најбољи су симулатори који имитирају не само термички већ и деформациони циклус заваривања као и утицај водоника на особине испитиваног челичног узорка.

За испитивање по методи BWRA користи се једноставна техника симулирања која се састоји у загревању узорка у пећима до 950°C и затим хлађењу различитим брзинама хлађења. Након тога узорци се испитују затезањем и/или ударним затезањем (одређивање ударне жилавости). Преглед неких практичних метода за испитивање заварљивости дат је у табели 5.2.

На основу резултата аналитичке процене рзаварљивости и њене провере практичним пробама (табела 5.2), могуће је проценити заварљивост и предложити мере да се она побољша. Критичне вредности параметара који показују заварљивост (тврдоћа, жилавост, склоност ка прелинама, итд.) могу се добити:

- без посебних мера, када се каже да је материјал заварљив,
- уз примену посебних мера, кад је материјал условно заварљив и
- уз примену таквих мера да су оне неоправдане и економски неисплативе; када је материјал тешко заварљив или незаварљив.

За тачнију оцену заварљивости, будући да је структура ЗУТ-а, зависна од низа фактора: хемисјког састава, дебљине, као и од параметара заваривања (нпр. уноса топлоте) који су повезани са температурским циклусом, треба узети у обзир и трансформационе температуре које се за конструкционе челике у условима континуалног хлађења могу усвојити из модификованих дијаграма континуалног хлађења (KNZ). Упоредивањем трансформационих структура из дијаграма континуалног хлађења са реалном структуром добијеном при заваривању- оцењује се могућност промене структуре тј. својства завариваног челика.

**Табела 5.2** Преглед практичних проба за оцену заварљивости

| Критеријум            |                     | Врста пробе                        | Назив пробе                                | Оцена                                 |
|-----------------------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| Склоност ка прелинама | Хладним             | Самоукрућење                       | CTS, крстаста, Fisco, Tekken, кружна       | Прелине се појављују или не појављују |
|                       |                     | Са регулисаним напоном             | TRC, RRC, IMPLANT, LTP                     |                                       |
|                       |                     | Симулирање термичких циклуса       | BWRA имитацијом загревања:                 |                                       |
|                       | Топлим              | Укрућена                           | -електричним отпором                       |                                       |
|                       |                     | Са регулисаним напоном             | -Индукцијом (струјом високе фреквенције)   |                                       |
|                       | Ламеларним          | Металографска-структурна механичка | Tekken, Fisco, kružna                      |                                       |
|                       | Жарења              |                                    | Varestraint, Bauman                        |                                       |
|                       |                     | Изотермичка кратковременог течења  | Испитивање затезањем у правцу дебљине лима |                                       |
| Механичке особине     | Тврдоћа             | Мерење тврдоће                     | Метода Викерс                              | $HV < HV_{max}$                       |
|                       | Својства отпорности | Испитивање затезањем               | Затезање                                   | $R_m^{OM} < R_m^{шава}$               |
|                       | Ударна жилавост     | Испитивање ударне жилавости        | Метода Шарпи                               | Прелазна температура                  |

### 5.3. Опште напомене о заварљивости и примени техничких метала

#### 5.3.1. Легуре Fe-Fe<sub>3</sub>C (челици)

Већина заварених конструкција се израђује од ваљаних профила нискоугљеничних и нисколегираних челика.

Нискоугљенични челици представљају основне легуре гвожђа и угљеника до 0.25% са примесама силицијума до 0.60% и мангана до 0.80%, као и нечистоћа: фосфора до 0.070% и сумпора до 0.060%. Челици са веома ниским садржајем угљеника (0.04-0.15%) користе се за израду каросеријских лимова. У великом броју случајева заварују се тачкасто, методом ГПЗ или у заштитној атмосфери CO<sub>2</sub>. Челици са садржајем угљеника у границама 0.15-0.30% тзв. меки челици, користе се за армирани бетон, израду челичних мостова, цевовода, делова пољопривредних машина и сличних производа. Меки челици се могу лако спајати свим методима заваривања топљењем, а добијени спојеви су високог квалитета. Ови челици се у највећем броју случаја заварују методама ГПЗ, РЕЛ и МАГ.

Средњеугљенични челици (0.26-0.60% C) припадају групи условно заварљивих челика. Користе се у изради машина, трактора, млинова. Због условне заварљивости, при самом поступку заваривања неопходно је предгревање, а након завршеног поступка заваривања, заварени делови се морају термички обрадити. За чеилке са C>0.40% додатни материјал за РЕЛ су обложене електроде као и за меке челике. Средњеугљенични челици се такође примењују за израду делова отпорних на хабање, као што су зупчаници, пужни транспортери, клинови итд. Мањи машински делови израђују се од средњеугљеничних челика испоручених у облику лимова, трака, плоча, жица и хладно вучених и ваљаних шипки (хладном обрадом челика долази до повећања

својства отпорности, а својства пластичности опадају). Заварљивост ове класе челика процењује се на основу еквивалентног угљеника (CE).

Високоугљенични челици ( $C > 0.60\%$ ) се у највећем броју случајева заварују или наварују у циљу поправке (репаратурно заваривање и наваривање) оштећених радних делова и склопова или пак наношења слојева високе тврдоће на радне површине изложене знатном хабању.

Алатни угљенични челици садрже 0.60-1.50% C, те се с тога веома тешко заварују. Гасно заваривање долази у обзир само за челике са доњом границом садржаја угљеника. Додатни материјал се прилагођава основном материјалу. Пре самог поступка заваривања, неопходно је површину која се заварује предгрејати неутралним пламеном, а након заваривања споро је охладити (заварени део се затрпава у суви песак или пепео). Када се ови челици заварују РЕЛ-ом потребно је најпре одабрати најпогоднију электроду и оджарити радне предмете, а након заваривања, извести термичку обраду са циљем да се успоставе првобитне особине материјала. Други начин је да се користе две врсте електрода. Најпре се првом (меким) електродом облажу прегрејане површине односно цео предмет. Након облагања жлеба он се даље попуњава електродом која је подобра основном материјалу. На овај начин се концентрација угљеника у шаву разблажује те се спољне површине лакше уварују у шав, а спој има довољну истегљивост, пластичност и жилавост.

Високомангански челици садрже 12% Mn или више, познатији су под називом Хадфилдови челици. Ови високомангански челици се углавном употребљавају за израду железничких скретница и трамвајских шина, за вођице покретних степеница, за чекиће млинова за разбијање руда, као и друге делове који су изложени изразитом ударном оптерећењу (кашике багера, греде дробилица итд.). Од манганских челика се такође израђују делови транспортних уређаја који су изложени абразивном хабању расутим материјалима, млинови за руду и делови траке за транспорт шљаке, песка, цемента и тсл. Почетна структура високоманганских челика је аустенитна, док се за време рада образује веома тврд мартензитни слој, који има повећану отпорност на хабање. Овим се постиже да подлога остане пластична и жилава, а хабајући слој постаје изузетно тврд. При дуготрајној експлоатацији се овај слој хаба те је временом потребно извршити његову репарацију. За репаратурно наваривање овог типа погодно је РЕЛ-наваривање електродама које су легиране манганом која је готово идентична основном материјалу. При самом наваривању треба применити посебне мере заштите на раду, будући да манган у ваздуху оксидише у отрован оксид  $Mn_2O_4$ . Пошто је наварени покривни слој веома тврд и крт потребно је вршити повремене прегледе због појаве прслина које се могу појавити не само у навареном слоју већ се могу и проширити у аустенитну подлогу. У случају да се то деси, потребно је се тај део демонтира, а прслине пребрусе и навари нови слој.

Челици повишене јачине се све више употребљавају за израду заварених конструкција повећане отпорности ( $R_{p0.2}$  и  $R_m$ ). То омогућава да се маса конструкција смањи за 10-30% у односу на исту направљену од нискоугљених челика. Зависно од класе, челици повишене јачине могу бити добро или условно заварљиви. Највише се примењују за израду каросеријских лимова и грађевинских конструкција. Разликујемо следеће врсте челика повишене јачине:

- С-Mn челици ( $C < 0.20\%$ ,  $Mn \approx 1.20\%$ ,  $Si \approx 0.50\%$ ); испоручују се у облику шипки, профила, плоча и лимова;
- микролегирани финозрни челици (термомеханички ваљани челици), незнатно легирани са Nb, Ti, V, Al, Ta и Zr, збир легирајућих елемената  $< 0.20\%$ ;

- нисколегирани челици повишене јачине а) бејнитни-0.50% Mo, 0,003% B, 0.18% C, са нешто повећаним садржајем Mn и Si б) побољшани (каљени+ високоотпуштени) нпр. амерички T1 и шведски Weldox и Hardox, ...

Наведени челици се могу заваривати готово свим електролучним методама, али је неопходно предгревање како би се избегло закаљивање. Када се заварују предмети различитих дебљина, температура предгревања се бира према дебљем предмету. Такође, потребно је спречити апсорпцију угљеника тако што ће се користити нисководоничне електроде (сушене базичне код РЕЛ-а) или код ЕПП-а суви прах који даје нулти водоник. Накнадна термичка обрада се ретко примењује.

Заварљиви хром- молибденски челици садрже до 0.35% C, 0.50-0.90% Cr и 0.50-1.0% Mo. Могу у себи садржати мале мале количине V, Ti или Nb и то углавном код челика посебне намене. Због тога што у себи садрже Cr, ови челици су отпорни на корозију. Примењују се кад је неопходна и термостойаност тј. одржавање својстава отпорности ( $R_{p0.2}$  и  $R_m$ ) на повишеним и високим температурама. Пре заваривања предмета је потребно предгрејати на 150°C и 260°C. Челици који имају еквивалентни угљеник већи од 0.45% (по формули МИЗ-а), након заваривања се подвргавају накнадној термичкој обради тако што се температура завршног заваара подиже за 100°C, па се заварени спој довољно прогрее да из шава дифундује водоник. Препоручује се да дужина електричног лука буде што мања чиме се умањује апсорпција гасова из ваздуха и губитак хрома из шава. За спојеве који у радним условима нису изложени високим температурама спајање се може извести и заваривачким лемљењем. Хром-молибденски челици могу се заваривати РЕЛ-ом, ТИГ-ом, МАГ/МИГ-ом и пуњеним жицама, заваривачким лемљењем окси-ацетиленским пламеном.

Нерђајући челици се сврставају у четири групе легура:

1. Аустенитне,
2. Феритне,
3. Мартензитне и
4. Преципитационо (таложно) ојачане

*Аустенитни* нерђајући челици се највише употребљавају у савременој индустрији. Они садрже 16-30% Cr, 3-37% Ni и 2% Mn. Да би челик био отпоран на корозију, мора да садржи више од 12% Cr, а Ni даје челику жилаву аустенитну микроструктуру и на собној температури. Садржај угљеника у ковним аустенитним челицима креће се од 0.03 до 0.25% C. Мале количине Si, P, и S налазе се као укључци. Из ове групе челика најпознатији је 18Cr8Ni (18% Cr, 8% Ni и 0.08 до 0.20% C). Са гледишта заварљивости, пожељно је да челик садржи што мање угљеника, јер услед повећаног садржаја C у зони утицаја топлоте може доћи до излучивања кртих карбида хрома и то у појасу око шава који је при заваривању био изложен температурама у интервалу од 625 до 815°C. Може се заварити било којом методом електролучног заваривања са додатним материјалом истог хемијског састава као и основни материјал. Пошто је производња ових челика који имају низак садржај угљеника значајно скупља производња оних са више угљеника је исплативија, с тим што се проблем образовања карбида решава додавањем стабилизатора (титана или ниобијума). Наведени хемисјки елементи имају већи афинитет према угљенику него хром, те везују вишак угљеника, а хром остаје у челику у количини изнад 12%, која представља услов за корозивну отпорност. Како је процес излажења хрома из кристалне решетке дифузионе природе, то је потребно и одређено време да из наведених појасева око шава дифундује угљеник. Стога се препоручује што брже загревање а потом хлађење, било прскањем воденим

млазом било расхладним плочама које се постављају на радне предмете (око шава). На овај начин неће бити довољно времена за дифузију хрома из челика.

*Феритни* нерђајући челици садрже 10.50%-30% Cr, с тим што ковне феритне легуре имају 0.08% и 0.20% C, а ливачке 0.50% C. Додају се и Al, Mo, Zn, Nb као стабилизатори ферита. Ови челици се могу електролучно заварити применом уобичајених метода као и код других врста челика. Поједине класе челика најбоље је заварити применом пуњене жице. Феритни челици који садрже веће количине Cr и C подложни су појави прслина. Осим тога зона утицаја топлоте феритног челика склона је порасту металних зрна ако је у току заваривања дуже време био изложен повишеним температурама. Крупнозрнаста структура око шава, доводи до пада жилавости. Ова штетна појава се може предупредити заваривањем са мањим уносом топлоте (нижи напон, струја мање јачине, већа брзина). На овај начин смањује се: време излагања на високој температури, а самим тим и максимална температура, наведени параметри се другачије означавају као параметри аустенитизације који су од пресудног значаја јер утичу на величину аустенитних зрна. Температура предгревања треба да буде од 150 до 232°C, што доприноси смањењу унутрашњих напона и хладних прслина. Како би се смањио пораст зрна у зони утицаја топлоте неопходно је вршити међупролазно догревање. Накнадна термичка обрада спроводи се у виду жарења у интервалу од 700 до 840°C након чега следи брзо хлађење до интервала између 540 и 370°C. Више врста електрода се могу употребити за заваривање феритних челика. Када се усвоји аустенитна електрода она мора имати виши садржај Cr него основни материјал. На овај начин се могући губици хрома из споја надокнађују. Код ТИГ-а треба користити додатни материјал сагласан основном металу. Заштитни гас може бити Ar, He или њихова мешавина. Код МИГ-а уочени су различити видови трансфера додатног материјала са врха жице у метално купатило. За пренос у облику спреја препоручују се Ar са 1% CO<sub>2</sub>. Комбинација He, Ar и 2.5% CO<sub>2</sub> даје краткоспојени пренос металних капљица.

### ***Заваривање хромних мартензитних челика***

Ови челици имају веома велику тврдоћу, а малу пластичност и жилавост. Садрже око 11-18% Cr и 0.15-1.20% C. Висок садржај C и Cr доводе до образовања мартензита кад год брзина хлађења завареног споја постане већа од критичне.

Хромни челици се могу заварити свим електролучним методама. Предгревање на температури 260°C је неопходно како би се смањила брзина хлађења. Накнадна термичка обрада тј. жарење може се применити за побољшање особина метала шава и ЗУТ-а. Овом се термичком обрадом смањује тврдоћа, а повећава пластичност и жилавост. Жарење се изводи тако што се површина шава загрева приближно до 700°C, а затим се заварени спој хлади у пећи загрејаној на 590°C. Најзад се радни предмет вади из пећи и споро хлади на мирном ваздуху.

Мартензитни челици се у великом броју случајева заварују аустенитном електродом, нарочито ако је накнадну термичку обраду тешко извести. Кратак лук се препоручује при заваривању свих нерђајућих челика, јер се тиме умањује оксидација и ублажавају губици хрома. Мартензитни нерђајући челици који садрже више од 0.20% C се теже заварују, због склоности ка хладним прслинама.

### **5.3.2. Међусобно заваривање различитих легура из групе Fe-C**

Веома често је у пракси потребно заварити одливке од LG и челика, притом треба имати у виду да се њихов хемијски састав, структуре а тиме и механичке особине знатно разликују. Те разлике се не могу занемарити ни при заваривању нерђајућег челика са меким челиком, нисколегираног челика са меким челиком, и легура никла са

нерђајућим челиком и другим легурама. Пре самог поступка заваривања неопходно је одредити хемијски састав и особине метала који се спајају. У току заваривања у металној купки долази до мешања и растварања различитих легирајућих елемената из основног и додатног материјала. Из тог разлога се избор електроде врши веома прецизно како би метал шава имао жељене карактеристике. Легирање шава и промене у ЗУТ-у могу се предвидети применом KHZ дијаграма (дијаграм конт. хлађења) за одговарајући челик. У току поступка заваривања треба одржавати мале димензије заваривачке купке како би растварање било што мање. Попуњавање жлеба се препоручује вишеструким праволинијским заварима, а не широким попречним слојевима. Прецизније речено боље је полагати праволинијске заваре него шав попуњавати њихањем електроде између бокова жлеба. Ако се температуре топљења спајаних метала разликују у границама до око 95°C, заваривање се може извршити класичном процедуром без икаквих потешкоћа. Међутим, уколико је та разлика већа, неопходне су посебне мере, препорука је да се први слој за облагање жлеба положи од додатног метала чија температура топљења одговара средњој вредности два различита метала. Полагање завара треба почети са стране метала више температуре топљења. Ово наношење посредног метала назива се облагање жлеба. Ако је само за један метал у хетерогеном споју потребно предгревање, он се мора предгрејати независно и изоловано од другог метала. Накнадна термичка обрада заварених спојева од различитих метала такође може бити критична јер након ње може доћи до пада јачине споја испод јачине основног материјала. Други начин спајања различитих метала је заваривачко лемљење. Тврдо лемљење може да буде изведено на температури која неће довести до топљења ниједног метала у споју. Пошто се не топе основни метали нема ни разблажавања нити мешања метала. У том случају јачина споја је мања од јачине основног метала.

#### **5.3.2.1. Заваривање ливеног гвожђа**

Због велике течљивости растопа, ниске пластичности и велике крутости ЗУТ-а ливено гвожђе је теже заварити него челик. Све врсте техничких легура Fe-C које се сврставају у ливено гвожђе имају висок садржај угљеника (2-4%). Део угљеника (0.80% C) може бити у везаном стању као карбид гвожђа (цементит) а део у слободном стању као графит. Разликују се следеће врсте ливених гвожђа:

- Сиво ливено гвожђе,
- Бело ливено гвожђе,
- Темперовано или ковно ливено гвожђе и
- Нодуларно ливено гвожђе.

Висока температура заваривања и неконтролисана брзина хлађења, могу створити нежељене микроструктуре и прслине у металу око шава. На границама шава може се образовати карбид гвожђа цементит или високолегирани мартензит. Ове структуре су веома крте и имају малу јачину на кидање. Неравномерна расподела температура у радном предмету доводи до појаве високих унутрашњих напона у овим кртим металима. Нодуларни и темпер лив су пластичнији те се лакше заварују. Сиво ливено гвожђе се при добијању одливака споро хлади и стога има структуру која се састоји из феритне, перлитне или феритно-перлитне металне основе и ламеларног графита.

Сиво ливено гвожђе се може заварити РЕЛ-ом где се као додатни материјал користе електроде од никла или његових легура: Ni-Fe, Ni-Fe-Mn и Ni-Cu. Захваљујући никлу у додатном материјалу, метал шава имаће довољну пластичност и добру машинску обрадивост, што је веома битно нарочито код репаратуре блокова мотора са

унутрашњим сагоревањем. Као додатни материјал такође се може употребити гвожђе са незнатним садржајем угљеника. У овом случају може доћи до отврдњавања метала шава услед дифузије угљеника из основног материјала. Сиви лив је могуће успешно спојити заваривачким лемљењем помоћу окси-ацетиленског пламена и месинганих жица као додатног материјала.

Бело ливено гвожђе се добија од сировог гвожђа које се брзо хлади. Висок садржај угљеника задржава се потпуно у микроструктури. Због тога је гвожђе веома крто и сматра се незаварљивим.

Темперовано ливено гвожђе (темпер лив) се добија термичком обрадом одливака чија је првобитна структура била бело ливено гвожђе. Поступком темперовања долази до издвајања графита у облику снежних пахуљица тзв. темпер-угљеник. На тај начин се добијају боља својства пластичности него код сивог и белог ливеног гвожђа, јер је код темпер-лива угљеник из цементита прешао у заобљени графит. Већа пластичност подразумева бољу заварљивост, те се темпер лив може заварити коришћењем додатног материјала на бази никла. Потребно је водити рачуна о температури предгревања и међусобној температури у циљу контролисаног уноса топлоте.

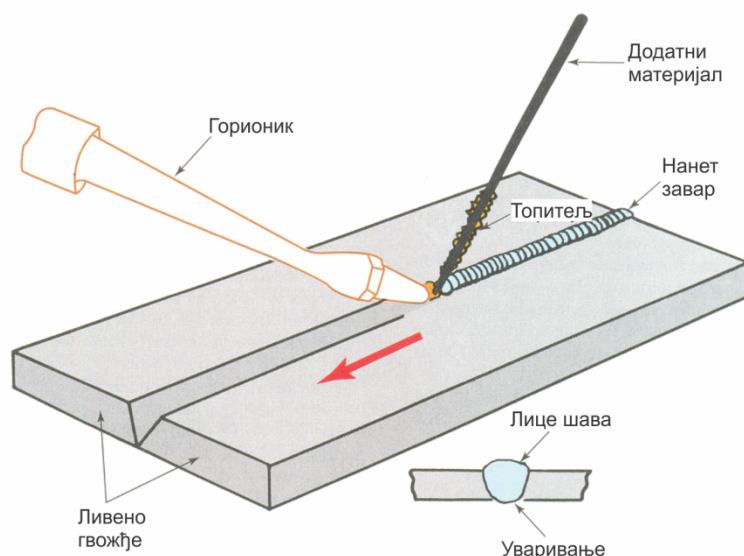
При РЕЛ- заваривању нодуларног и темпер лива препоручује се да температура предгревања и међуслојна температура до 315°C. Темперовано ливено гвожђе је слично сивом ливеном гвожђу, али се разликују по облику излученог графита. Код нодуларног лива графит има облик куглица које настају захаљујући магнезијуму који се додаје течном гвожђу. Нодуларни лив је могуће заварити никловом или челичном електродом. Поступак се мора изводити са најмањим уносом топлоте у метал јер магнезијум може испарити и дифундовати ван метала шава. Уколико се ово догоди угљеник ће у металу шава образовати графитне ламеле. Појава графитних ламела резултује нехомогеном структуром. Шав ће имати структуру сивог ливеног гвожђа, а основни материјал структуру нодуларног лива.

Радни предмети од ливеног гвожђа се припремају за заваривање слично као и делови од челика. Обе стране жлеба, као и њихову околину треба очистити од свих нечистоћа. Закошење страница жлеба ради се машинском обрадом, а за заваривачко лемљење потребно је одстранити графит са бокова жлеба да би спајање настало по целој површини. Спојеви ливених гвожђа могу се ојачати увртањем голих завртњева у странице жлеба. Завртњеви су направљени од меког челика, претапају се при заваривању и на крају улазе у састав метала шава. Препоручује се постављање подложне траке испод корена жлеба како би се спречило цурење растопа. Ово се пре свега односи на одливке од сивог лива, јер он има највећу течљивост од свих техничких легура гвожђа.

### ***Окси-ацетиленско заваривање ливеног гвожђа***

Величина пламеника за заваривање ливеног гвожђа бира се као и код челика идентичне дебљине. При заваривању треба користити неутрални пламен, а као додатни материјал ливену шипку одговарајућег хемијског састава, топитељ је неопходан. Када се гасно заварује ливено гвожђе користи се техника удесно јер се тако смањује брзина хлађења шава, а самим тим и унутрашњи напони. Горионик треба држати под углом 60° према радном предмету у смеру заваривања. Унутрашњи конус пламена не сме бити у контакту са металом. Топитељ се додаје у виду праха или пасте тако да увек прекрива врх додатне шипке. Топитељ се увек употребљава свеж и без влаге јер се тако успешније одстрањују оксиди и гасни мехурови из купке. Пожељно је купку мешати врхом додатне шипке што олакшава пречишћавање растопа. На слици 5.2 приказано је

окси-ацетиленско заваривање ливеног гвожђа. Шав мора да буде потпуно уварен за обе стране жлеба, у овом примеру заваривање се врши техником улево.



Слика 5.2 Гасно заваривање ливеног гвожђа

### 5.3.3. Заваривање површински заштићених челика

На спољашње површине предмета од угљеничних и нисколегираних челика који су изложени хемијској или електрохемијској корозији, често се наносе танки слојеви или превлаке неких корозионо отпорних метала (Al, Zn). Поступак површинске заштите алуминијумом назива се алитирање, а површинска заштита челичних лимова и цеви цинком зове се галванизација. Алитирани или поцинковани лимови отежавају заваривање. Површинска превлака се топи пре самог основног материјала па може загадити основни и додатни материјал у купки. Када се у металу шава нађе цинк може доћи до појаве прслина.

Методи заваривања који се уобичајено користе за челике без површинске заштите, могу се применити за површински заштићене челике. Пре самог поступка заваривања потребно је изабрати одговарајући додатни материјал са што нижим садржајем силицијума. Разлог употребе електроде са мањим садржајем силицијума је тај што шавови који садрже мање од 0.20% Si нису уопште склони ка прслинама које су изазване цинком. За РЕЛ заваривање употребљава се рутилна електрода Е6012 (AWS) или Е6013 (AWS) или Е433 R21. Нискосилицијумска жица препоручује се и кад се заварује галванизирани челик МИГ поступком. У даљем делу следе препоруке за заваривање алитираних и галванизованих челика:

- користити једнострано или двострано закошене жлебове,
- одржавати размак у корену жлеба од око 1.6 mm,
- одстранити заштитне превлаке помоћу окси-гасног горионика или пескарењем,
- спровести процедуре квалификационе пробе са електродом предвиђеном за заваривање.
- Ако заштитну превлаку није могуће лако одстранити, онда се предмет може заварити МИГ поступком али са смањеном брзином како би се превлаке цинка или алуминијума истопиле и испариле.
- Код РЕЛ-а се препоручује да се електрода води напред-назад, што доводи до топљења превлаке испред купке.

Суштински посматрано може се донети закључак да су готово сви метали и легуре заварљиви, али је ипак пре саме израде и репаратуре потребно проценити економску исплативост. Репаратурни радови препуштају се искусним заваривачима који су у пракси стекли искуство на различитим материјалима и свим методама спајања метала топљењем. Ако су заваривачи у стању да уоче разлику између појединих врста метала, онда ће бити у стању да одреде најпогоднију процедуру репаратуре. Због сложености процеса често је потребно сарађивати са произвођачем опреме у погледу методе заваривања и материјала подобних за одређену металну конструкцију. Неопходно је предвидети промене у ЗУТ-у, јер се корисне особине метала при заваривању погоршавају, па је потребно одговарајућом технологијом те промене буду сведене на минимум. Треба имати у виду да за многе оштећене машине, делове и уређаје није сачувана технолошка документација, па сам заваривач мора да одреди врсту основног материјала, затим методу и технологију наваривања. На основу предложене процедуре заваривања, треба извести пробна испитивања са и без разарања и проценити да ли је тај предлог прихватљив. Искуство представља кључ за успешно пројектовање и извођење репаратуре. Пошто се свако репаратурно заваривање разликује од случаја до случаја, то рад у служби одржавања чини један од најзанимљивијих и најтраженијих послова у погонима за прераду метала. Из тог разлога репаратурно заваривање је често један од најплаћенијих послова.

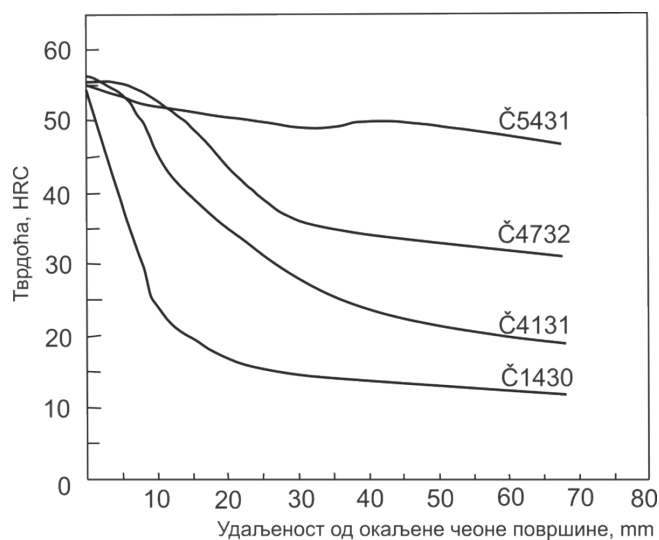
## 6. Примери процене прокаљивости и заварљивости неких угљеничних челика

### 6.1. Примери процене прокаљивости

Одређивање својства заварљивости и прокаљивости је од велике важности за праксу. На основу резултата који су добијени испитивањем могуће је одредити челик који је најподобнији као материјал за израду неког одговорног дела. У зависности од тога да ли се захтева да део буде заварен или да има велику тврдоћу у површинском слоју или по читавој запремини бира се материјал (челик) са одговарајућим својствима заварљивости и прокаљивости ( $Z=1/P$ ). Будући да се ови подаци приказују у одговарајућој форми битно је знати како дату форму (запис податка) растумачити. Код тумачења података о прокаљивости карактеристична су два записа у зависности од методе испитивања (Џомини проба, метода по Гросману)

#### 6.1.1. Тумачење и приказ резултата добијених практичним извођењем Џомини пробе

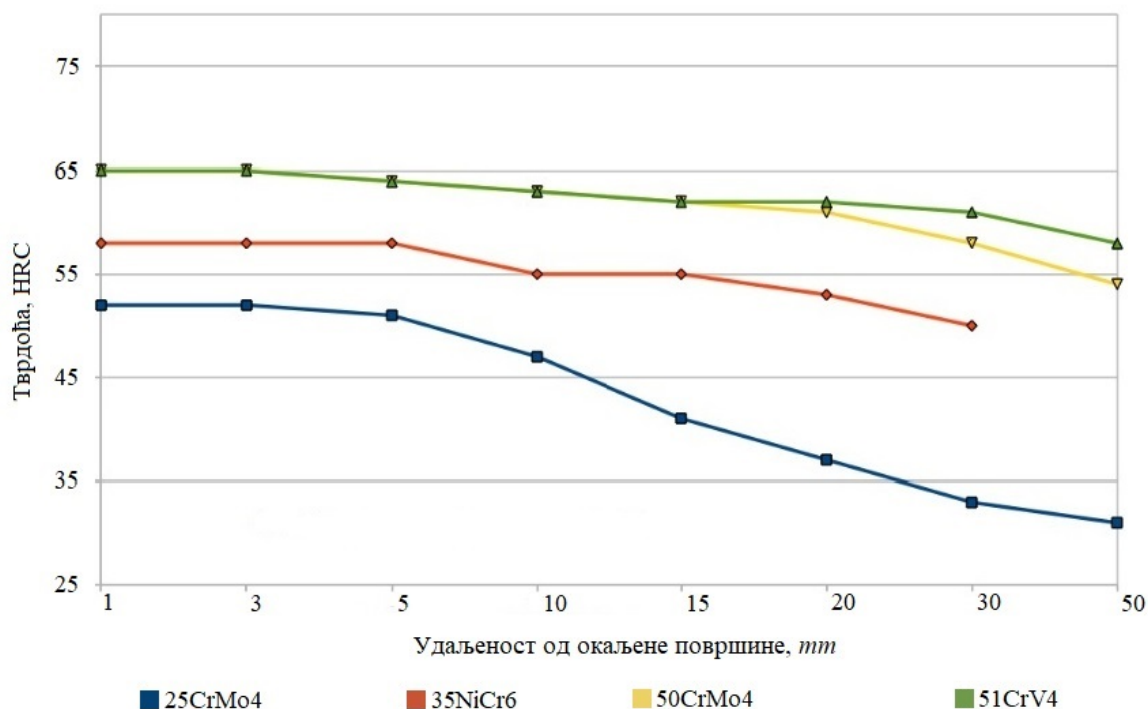
Резултати Џомини пробе се у великом броју случајева приказују у виду графика на чијој се апциси наноси одстојање мерне таче од окаљеног чела, а на ординати податак о измереној тврдоћи у датој тачки. На слици 6.1 дате су криве прокаљивости за четири челика (Č5431, Č4732, Č4131, Č1430). Анализирајући криве прокаљивости са графика јасно се уочава да челик Č1430 има највећи пад тврдоће на малом одстојању од окаљеног чела, што значи да овај челик може да створи слој веће тврдоће само на површини и слојевима који су на малој дубини. Челици Č4131 и Č4732 одликују се бољом прокаљивошћу од челика Č1430, док најбољу прокаљивост има челик Č5431. Овај челик одликује мали пад тврдоће на већим одстојањима од окаљене чеоне површине, те као такав може да образује слојеве одговарајуће тврдоће на већим одстојањима.



Слика 6.1 Приказ крива прокаљивости за више челика

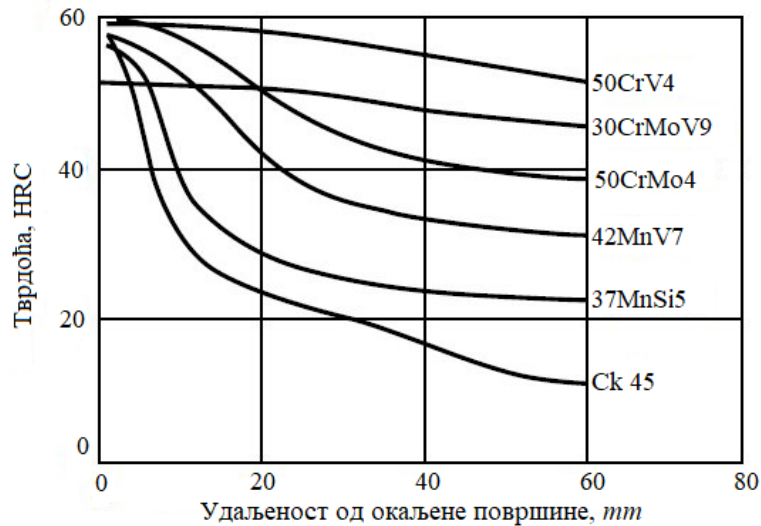
На слици 6.2 приказана је анализа прокаљивости за челике: 25CrMo4 (Č4730), 35NiCr6 (Č5433), 50CrMo4 (Č4733) и 51CrV4 (Č4830). Могуће је уочити да челик 51CrV4 има најбољу прокаљивост јер је пад тврдоће у односу на одстојање јако мали. Значајнији пад се дешава тек на 30 mm одстојања од окаљеног чела. Код других челика тај пад је већ уочљив на 5 mm. Такође је као и у претходном случају на основу овог

дијаграма могуће упоредити својства и за унапред дефинисане услове рада и обраду изабрати најбољи челик. Најлошију прокаљивост има челик 25CrMo4 који поред тога што релативно брзо показује пад тврдоће (већ на 5 mm), не показује ни могућност постизања високих вредности тврдоће на самој каљеној површини (око 50 HRC).



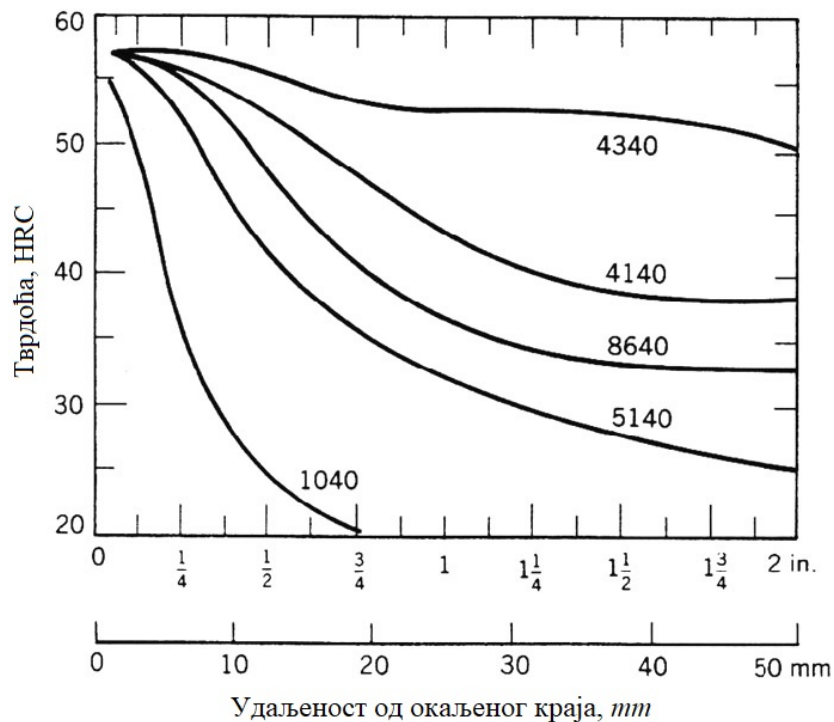
Слика 6.2 Криве прокаљивости за челике: 25CrMo4, 35NiCr6, 50CrMo4 и 51CrV4

На слици 6.3 дат је приказ дијаграма прокаљивости за више различитих челика. Са дијаграма се јасно уочава да најлошију прокаљивост има угљенични челик Ck45 (Š1531). Код овог челика долази до наглог пада тврдоће чак и при веома малим удаљеностима од окаљене површине. Крива прокаљивости за челик: 37MnSi5 (Š3230) има готово идентичан облик као крива за челик Ck45 (Š1531) с тим да је цела крива померена горе за одређену вредност тврдоће. Може се закључити да и овај челик попут претходног има нагли пад тврдоће при малим дубинама, те није погодан за делове од којих се захтева већа тврдоћа у унутрашњим слојевима. Криве прокаљивости за челике 42MnV7 (Š3830) и 50CrMo4 (Š4733) показују да ови челици могу да имају већу тврдоћу од претходних, такође, јасно се види да је пад тврдоће у односу на претходна два челика знатно блажи. Најбољу прокаљивост имају челици 30CrMoV9 (Š4734) и 50CrV4 (Š4830) што се и јасно уочава са дијаграма јер криве приказују веће вредности тврдоће на већим удаљеностима од окаљене површине у односу на остале челике са дијаграма.



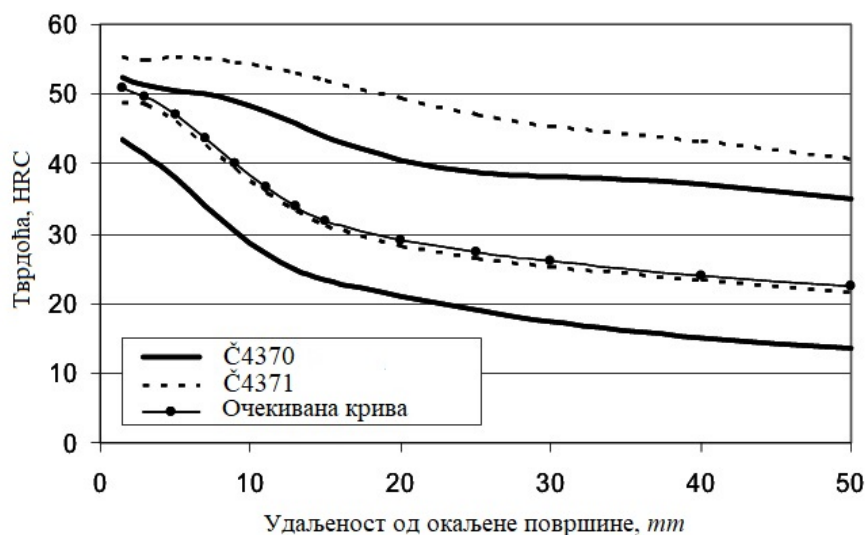
Слика 6.3 Дијаграм прокаљивости за више различитих челика

На слици 6.4 приказани су примери прокаљивости за челике по AISI стандарду. Реч је о челицима 1040 (Č1434), 5140 (Č4131), 8640 (40NiCrMo22), 4140 (Č4782) и 4340 (Č5430). Очекивано најлошију прокаљивост показује угљенични челик 1040 чији слојеви блиски површини показују велики пад тврдоће. Са порастом садржаја легирајућих елемената прокаљивост челика расте, што се са дијаграма јасно уочава. Челици 5140, 8640 и 4140 показују да у унутрашњим слојевима могу да остваре већу тврдоћу од челика 1040. Код ових челика тврдоћа унутрашњих слојева пада тек после 10-ак *mm* од окаљеног чепа. Најбољу прокаљивост показује челик 4340 који чак и на одстојањима од 50 *mm* од окаљене чеоне површине задржава тврдоћу изнад 50 HRC.



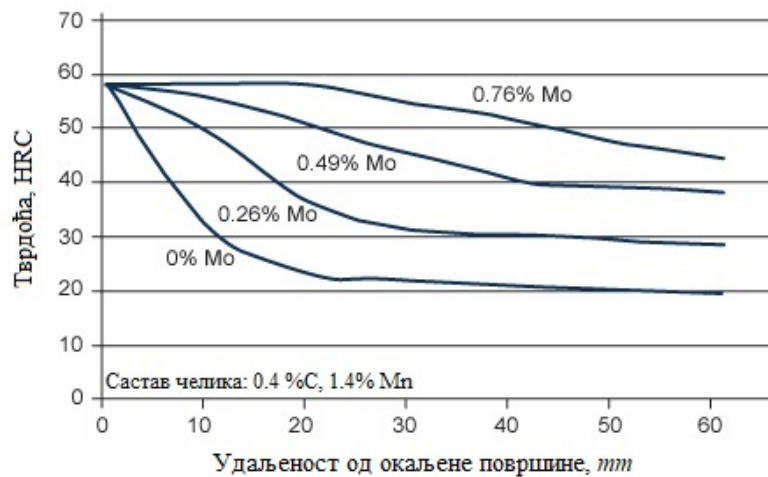
Слика 6.4 Приказ дијаграма прокаљивости за челике из AISI стандарда

На слици 6.5 приказани су резултати Џомини пробе у виду дијаграма са назначеним интервалом тврдоће у односу на удаљеност мерне тачке. Испитивање је извршено на два приближно иста челика, који се разликују само по садржају хемијских елемената. На дијаграму се јасно види да челик Č4371 има вишље постављену доњу границу интервала тврдоће у односу на исту границу за челик Č4370. Овим дијаграмом се потврђује чињеница да са порастом садржаја легирајућих елемената прокаливост челика расте јер челик Č4371 има већи удео лег. елемената у себи.



Слика 6.5 Дијаграм прокаливости за челике Č4370 и Č4371

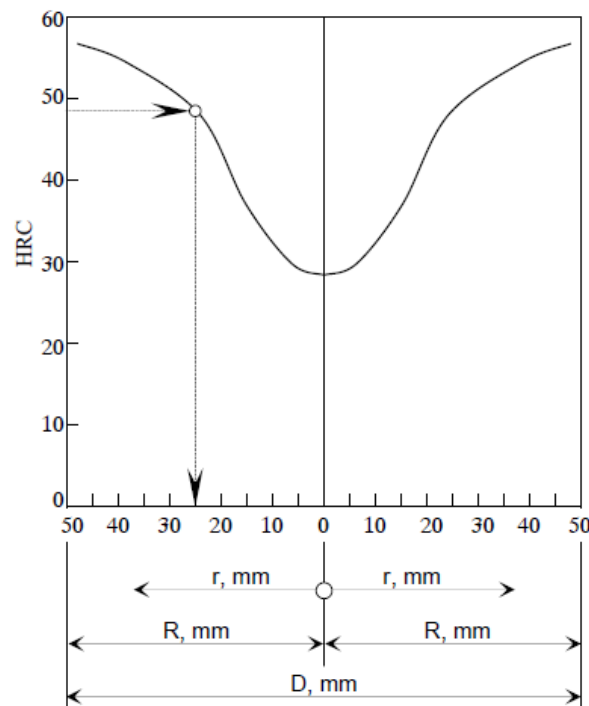
На слици 6.6 приказан је утицај молибдена на прокаливост С-Мн челика. Испитивање је рађено на узорку од челика са 0.4 %C и 1.4% Mn. Чист челик без додатка Мо има нагли пад тврдоће са 57- 58 HRC (прва мерна тачка) на приближно 25 HRC (мерна тачка на одстојању од око 10 mm), након овог наглог пада, крива која приказује пад тврдоће постаје блажа. На одстојању од око 60 mm вредност тврдоће износи нешто испод 20 HRC (најнижа крива на дијаграму). С-Мн челик са додатком Мо од 0.26% одликује се блажим падом тврдоће у односу на претходни случај и цела крива је померена на горе што показује могућност овог челика да на истим одстојањима од окаљеног чела може да индукује слојеве веће тврдоће. Повећавањем удела Мо у овом угљенично- манганском челику повећава се прокаливост челика. Криву која показује удео Мо од 0.49% одликује још блажи пад тврдоће са порастом удаљености од окаљеног чела, као и веће вредности тврдоће унутрашњих слојева (крива померена горе). За разматрање је најзанимљивија последња крива која показује удео Мо од чак 0.76%. Оно што је карактеристично било за претходне случајеве јесто то да је тврдоћа у првих 20 mm одстојња нагло падала, док у овом случају тврдоћа у том интервалу одстојања благо расте, па тек након тога креће тврдоћа благо да пада. Овај челик са уделом Мо од 0.76% задржава критеријум прокаливости до чак 40 mm одстојања где тврдоћа износи 50 HRC што и јесте уједно критеријум за распознавање полумартензитне структуре која се тражи при мерењу по Џомини методи.



Слика 6.6 Приказ утицаја садржаја Мо на прокаљивост

### 6.1.2. Тумачење и приказ резултата добијених практичним извођењем методе по Гросману

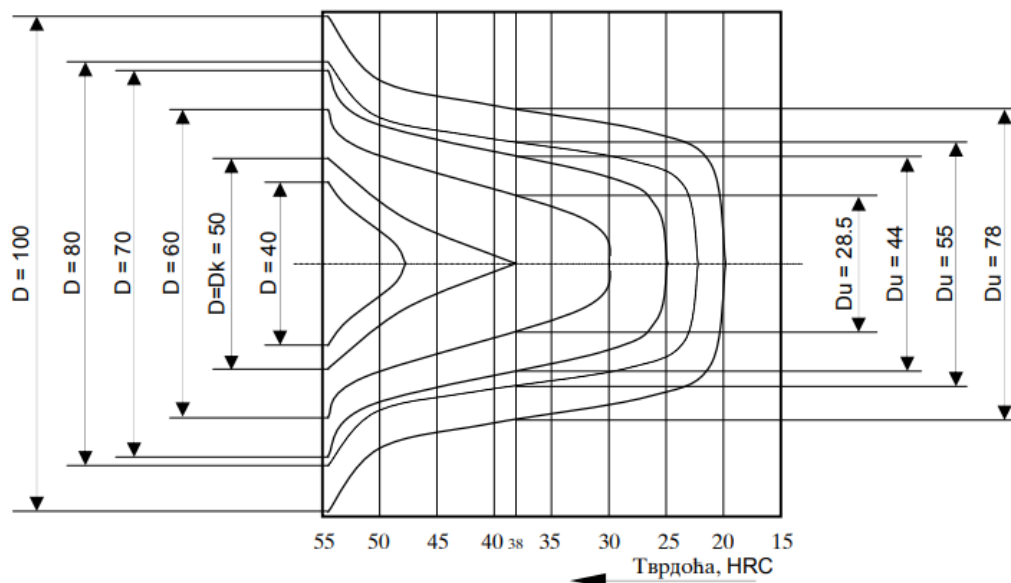
Резултати добијени спровођењем испитивања по овој методи се такође приказују на дијаграмима одговарајућег формата. Најчешће се показује вредност тврдоће у зависности од удаљености мерне таче од центра епрувете. Због карактеристичног изгледа криве прокаљивости (слика 6.7) која се добија овом методом ови дијаграми се другачије називају U - дијаграми.



Слика 6.7 Пример U-криве прокаљивости (Гросман метода)

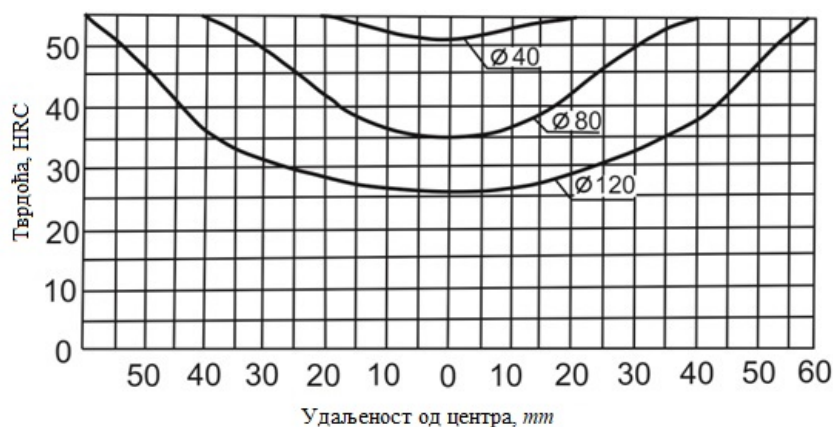
На слици 6.8 приказан је дијаграм прокаљивости за челик са 0.3% C и 3% Ni. На дијаграму је могуће уочити шест кривих, што значи да је испитивање изведено на шест епрувета различитих пречника од истог материјала. На дијаграму су такође приказани

критични пречници на којима тврдоћа одговара граничној микроструктури (50% М + 50% друге фазе).



Слика 6.8 U – дијаграм прокаљивости за челик са 0.3% C и 3% Ni

На слици 6.9 приказан је дијаграм прокаљивости по Гросману за челик Š4131. Челик је претходно нормализован на температури 870°C, а каљен у води са температуре 840°C.



Слика 6.9 Криве прокаљивости по Гросман методи за челик Š4131

## 6.2. Практични примери процене заварљивости неких челика

У овом поглављу укратко је разматрана процена заварљивости два челика и челичног лива. Критеријуми за оцену заварљивости засновани су на примени рачунских и експерименталних/металографских метода. Разматарани су заварени спојеви од нискоугљеничног челика, као и два наварена дела од средњедегираног алатног челика и челичног лива.

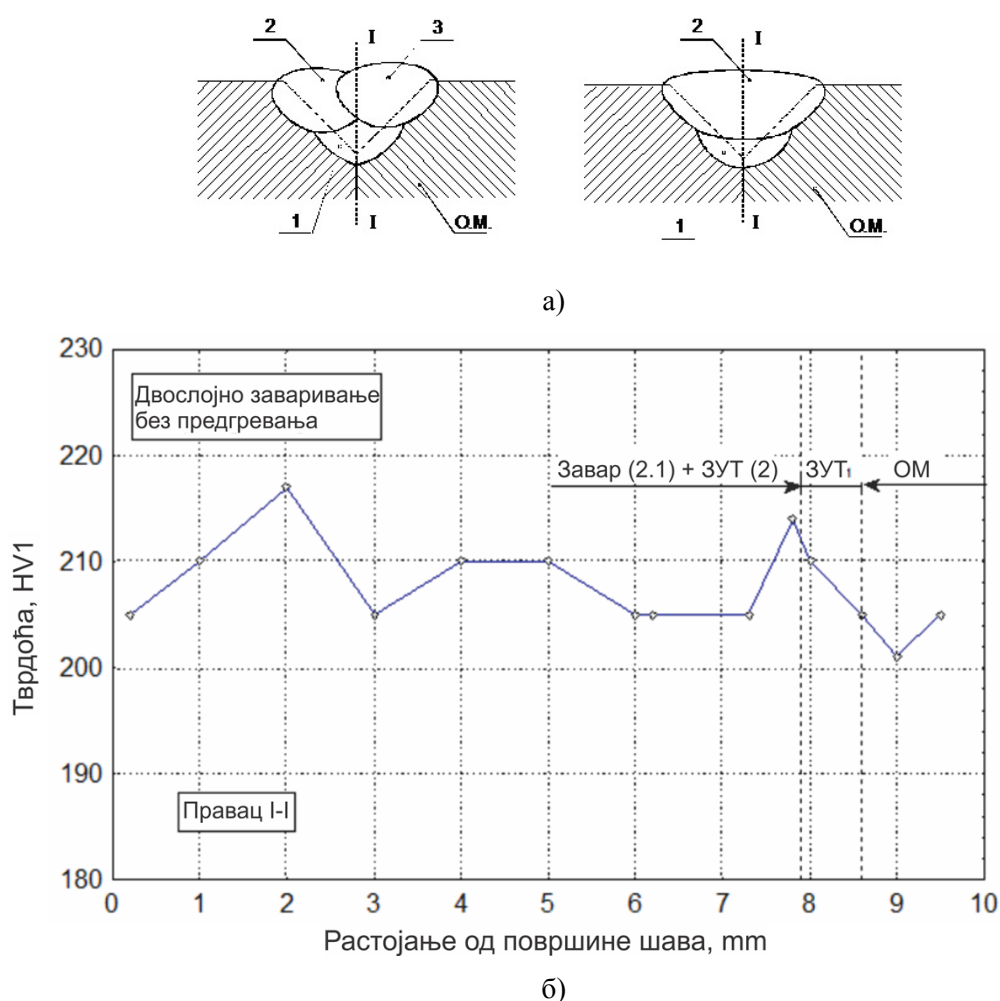
### 6.2.1. Оцена заварљивости конструкционог C-Mn челика са 0.17% C и 1.33% Mn

Израчунавањем еквивалентног садржаја угљеника-CE на основу хемијског садржаја челика (табела 6.1) и применом одговарајуће формуле добија се да је  $CE < 0.40\%$  ( $CE = 0.392\% < 0.40\%$ ). На основу рачунски добијене вредности CE можемо закључити да дати челик припада групи добро заварљивих челика тј. да се процес

спајања изводи без додатних мера (предгревања и/или накнадне термичке обраде). Овај теоријски закључак могуће је поткрепити практичним мерењима тврдоће на металографском избруску (шлифу) по правцу, I-I двопролазног и тропролазног завареног споја у металу шава, ЗУТ-у и основном материјалу (слика 6.10а) и снимањем микроструктура на посебно припремљеним металографским шлифовима (слика 6.11).

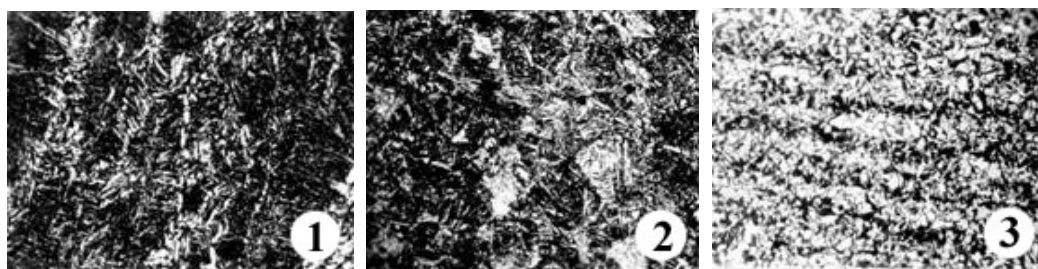
**Табела 6.1** Хемијски састав C-Mn челика

| Садржај појединих елемената, % |      |      |       |       |       |
|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| C                              | Si   | Mn   | P     | S     | Al    |
| 0.17                           | 0.45 | 1.33 | 0.008 | 0.009 | 0.028 |



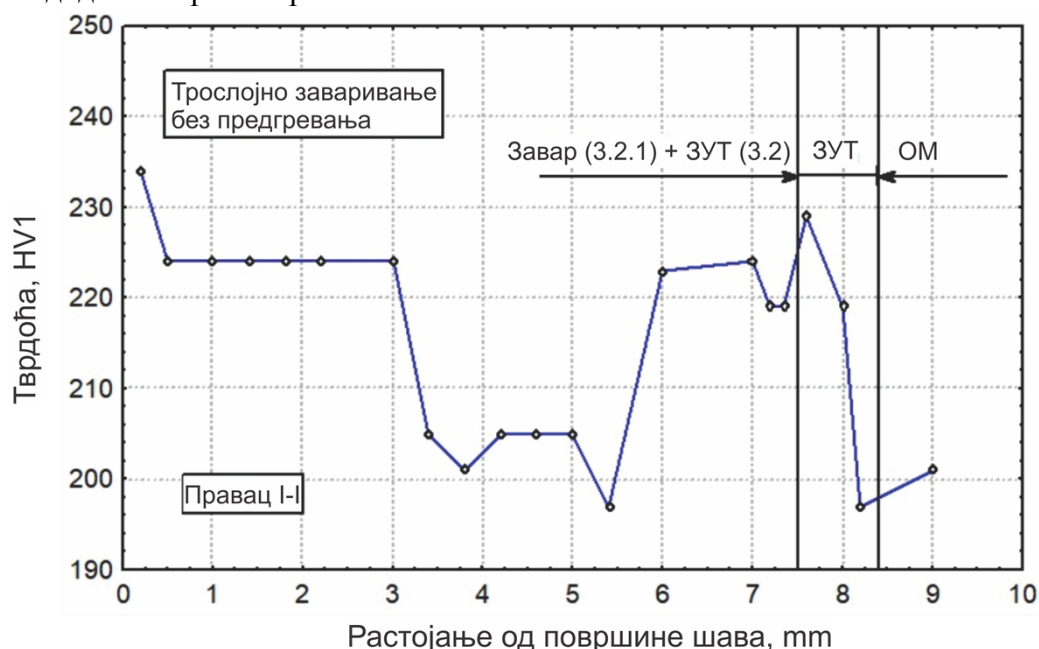
**Слика 6.10** Примери двопролазног и тропролазног заваривања (а) дијаграм расподеле тврдоће по правцу I-I после двопролазног заваривања C-Mn челика

Са дијаграма на слици 6.10 можемо закључити да се тврдоћа метала шава, ЗУТ-а и основног материјала налазе далеко испод 350 HV, те са сигурношћу можемо да тврдимо да није дошло до формирања мартензита или других кртих фаза код двопролазног заваривања овог челика. Ово такође поткрепљују и резултати добијени металографским испитивањем узорака (слика 6.11).

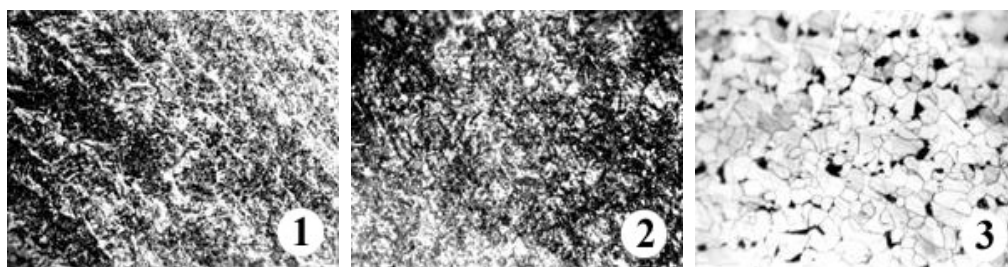


**Слика 6.11** Приказ структура после двопролазног заваривања С-Мн челика: уситњења Видманитетенова структура (1), међуфазна структура (2) и ламеларно перлитно-феритна структура (3)

На дијаграму расподеле тврдоће код тропролазног заваривања С-Мн челика (слика 6.12) тврдоћа мерена у металу шави, ЗУТ-у и основном материјалу благо расте у односу на вредности добијене у двопролазном заваривању али је још увек знатно мања од 350 HV, тј. није дошло до формирања мартензита у испитиваном шаву. Снимањем микроструктура метала шави, ЗУТ-а и основног материјала потврђује се да нема мартензитне структуре (слика 6.13). Пораст тврдоће у шаву настаје због уноса топлоте за време додатног трећег пролаза.



**Слика 6.12** Дијаграм расподеле тврдоће по правцу I-I после тропролазног заваривања С-Мн челика



**Слика 6.13** Приказ структура после тропролазног заваривања С-Мн челика: уситњења Видманитетенова структура (1), међуфазна структура (2) и ламеларно перлитно-феритна структура (3)

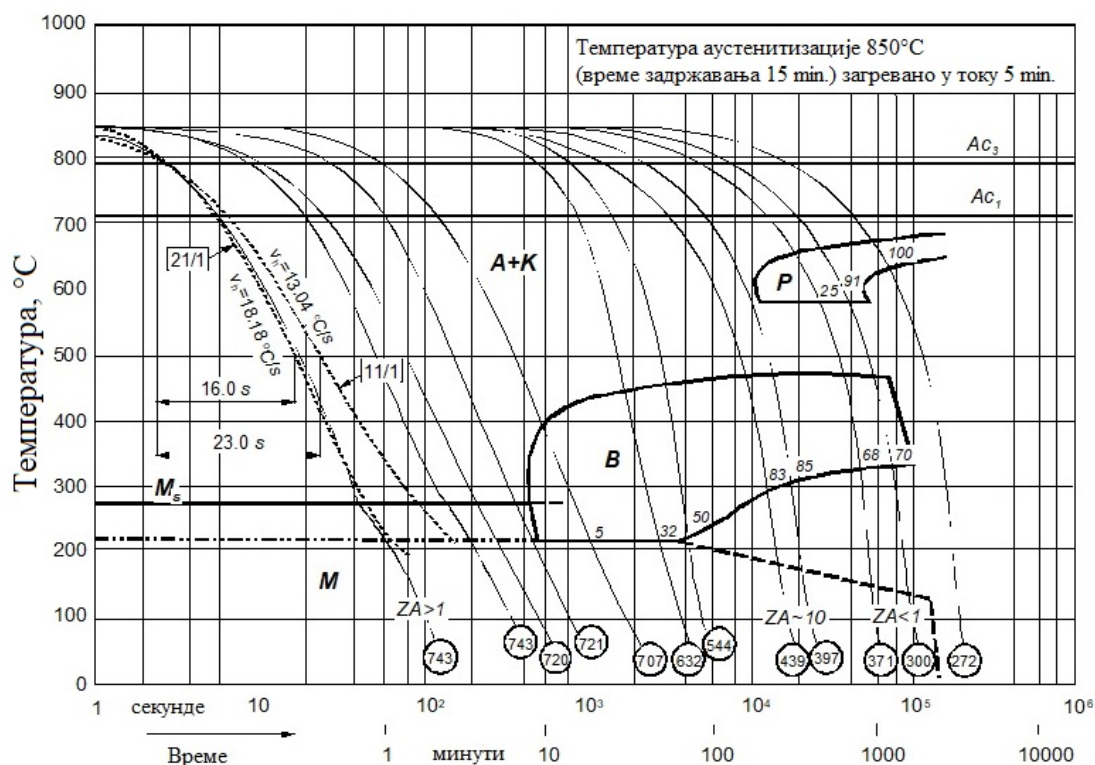
Закључује се да разматрани С-Мн челик хемијског састава дефинисаног у табели 6.1 има добру заварљивост, на шта је указивао рачунски садржај СЕ ( $CE < 0.40\%$ ), а практично потврдила металографска испитивања и мерење тврдоће.

### 6.2.2. Оцена заварљивости алатног челика Č5742 (УТОР 55)

Челик Č5742 припада групи нисколегираних алатних челика предвиђених за рад на топло (израда ковачких алата). Коришћењем података о хемијском сатаву из табеле 6.2 и формуле Сеферијана за прорачун температуре предгревања долази се до закључка да челик Č5742 припада групи условно заварљивих челика и да је пре наваривања неопходно предгрејати овај челик на одговарајућу температуру ( $T_p = 300^\circ\text{C}$ ). На условну заварљивост овог челика осим прорачуна СЕ и  $T_p$  указује и његов КН дијаграм (слика 6.14).

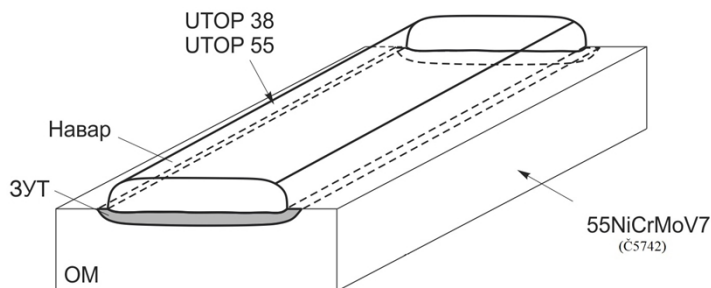
Табела 6.2 Хемијски састав челика Č5742

| Хемијски састав, % | C    | Si   | Mn   | P    | S    | Cr   | Mo   | Ni   | V    | W |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
|                    | 0.52 | 0.29 | 0.70 | 0.01 | 0.01 | 1.09 | 0.43 | 1.72 | 0.74 | - |



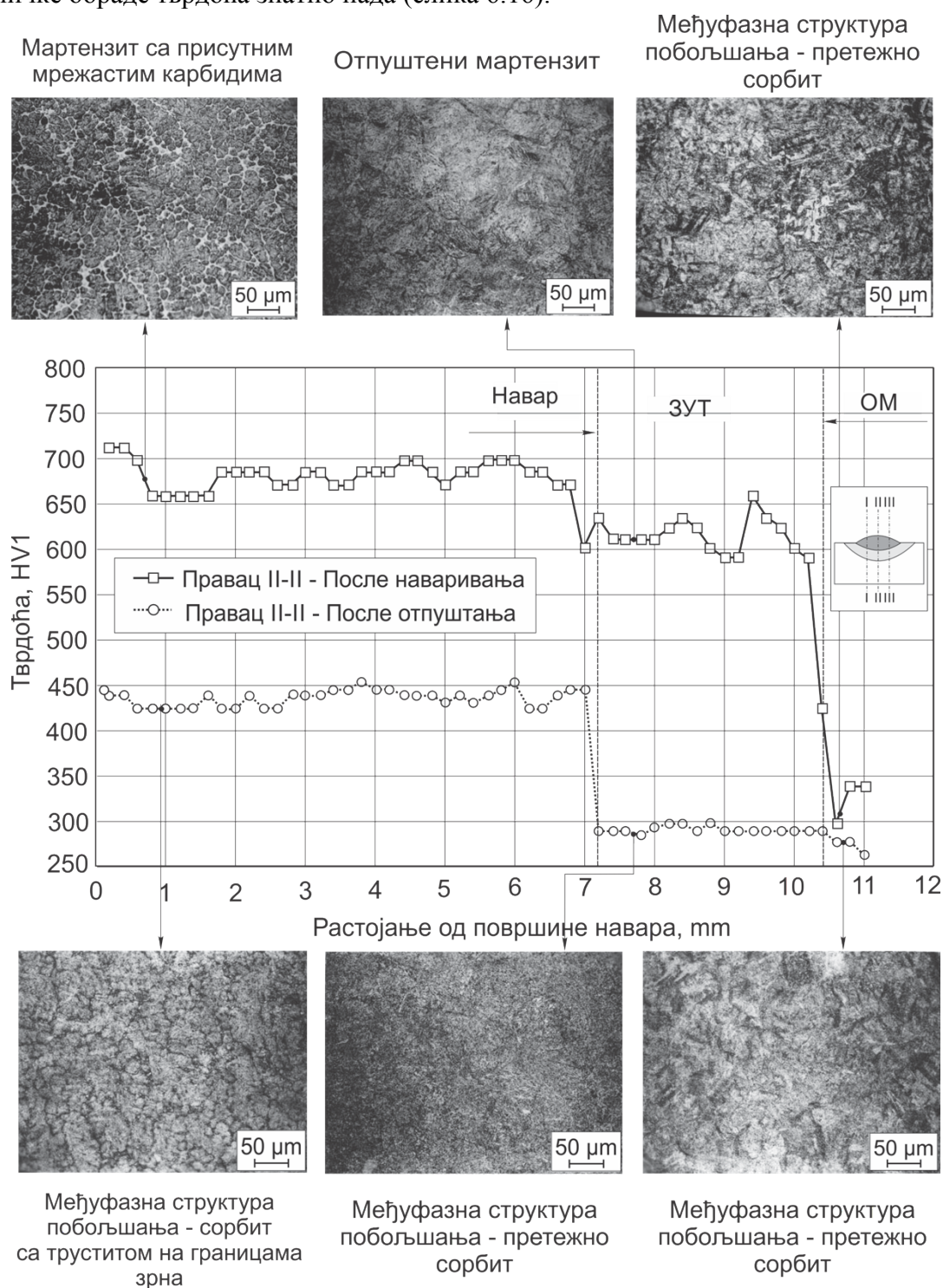
Слика 6.14 КН дијаграм челика Č5742

Мерењем тврдоће на практичном примеру наvara на предмету од Č5742 додатним материјалима УТОР 38 и УТОР 55 (слика 6.15) добијају се следећи резултати слика 6.16.



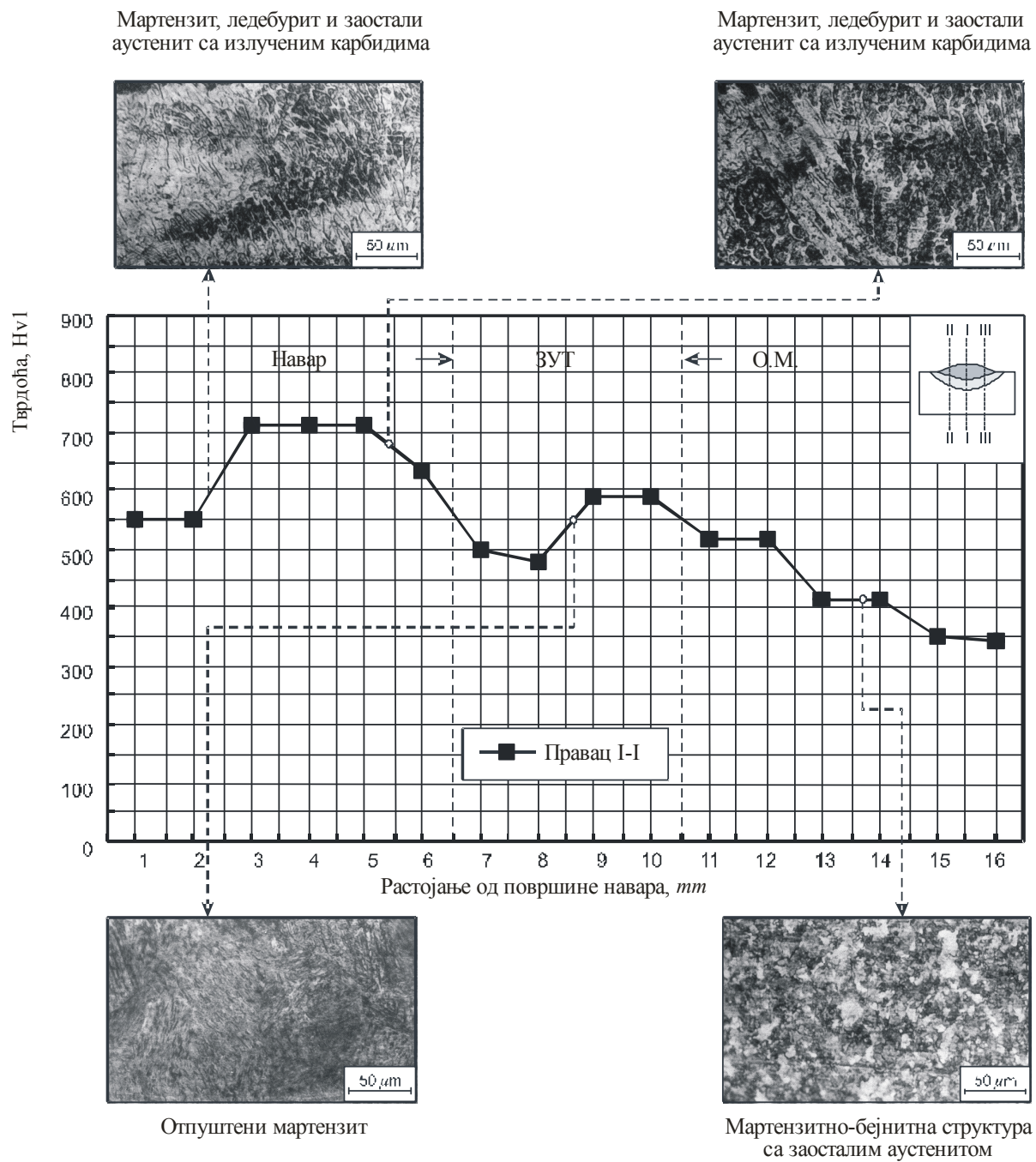
Слика 6.15 Приказ наваривања на челику Č5742 додатним материјалима УТОР 38 и УТОР 55

На слици 6.16 приказана је расподела тврдоће челика Č5742 после завршеног наваривања (применом додатног материјала UTOP 55). Резултати мерења тврдоће по попречном правцу после полагања навара знатно надмашују критичну вредност тврдоће (350HV) што значи да се у навару и ЗУТ-у појавио мартензит и карбиди. Уколико се не би спровео неки вид накнадне термичке одбране (отпуштање) готово је извесно да би се у експлоатацији овако наварених делова појавиле прслине. Управо из тог разлога неопходно је извршити после наваривања отпуштање у циљу смањења тврдоће тј. заосталих напона и добијања повољније микроструктуре. После извршене термичке обраде тврдоћа знатно пада (слика 6.16).



Слика 6.16 Приказ расподеле тврдоће у завареном споју после наваривања и отпуштања





**Слика 6.18** Расподела тврдоће у металу шави, ЗУТ-у и основном материјалу као и приказ микроструктура појединих зона навара

## 7. Закључак

Као што је у уводним напоменама указано велики број машинских делова се у процесу израде заварује/наварује или пак подвргава неком виду термичке обраде која за циљ има побољшање или измену његових механичких својстава (нормализација, каљење, отпуштање). При заваривању челика најважније својство јесте заварљивост. Заварљивост се дефинише као комплексно својство које се може изучавати са више аспеката, који се пре свега односе на металуршку, технолошку и конструкциону заварљивост, отпорност завареног споја на крти лом, прслине и тсл. Код машинских делова који се кале веома је битно направити разлику између појмова прокаљивости и каљивости. Први термин означава способност да се у материјалу на одређеној дубини добије слој одговарајуће тврдоће, док појам каљивост означава способност да се материјал окали по целој запремини, односно да се по целој запремини дела образују тврде фазе (мартензит или бејнит).

Спороводећи испитивања одговарајућим стандардизованим методама, рачунским или експерименталним, изводи се процена заварљивости или прокаљивости, на основу којих се утврђује да ли је испитивани челик подобан за унапред дефинисане услове или не. Важно је напоменути да су својства заварљивости и прокаљивости реципрочна. Повећањем заварљивости смањује се прокаљивост и обрнуто.

Из бројних рачунских израза за процену заварљивости могуће је закључити да хемијски састав има пресудан утицај. Са повећањем садржаја угљеника у челику заварљивост челика опада. Заварљивост челика такође опада и са повећањем садржаја вежине легирајућих елемената.

Будући да су својства заварљивости и прокаљивости реципрочна, падом заварљивости долази до пораста прокаљивости, што потврђују и примери дати у овом раду. Кад је реч о прокаљивости јасно се уочава да легирани челици имају блажи пад тврдоће у односу на угљеничне челике са порастом растојања од окаљеног чела. Стога се легирани и високолегирани челици препоручују за израду одговорних делова од којих се захтева висока површинска тврдоћа или висока тврдоћа на одређеној дубини (карактеристично за ковачке и ливачке алате/калупе).

Кад је реч о датим примерима три врсте заварених/наварених челика и челичног лива, мерењем тврдоће и снимањем микроструктуре појединих зона споја/навара јасно се уочавају битне разлике. Може се на основу микроструктура и тврдоће закључити да се нискоугљенични челик заварује без посебних мера, док друга два метала - челик и челични лив се заварују применом посебних мера, предгревањем, догревањем, отпуштањем и по потреби применом међуслојног/пуферног електродног материјала.

Заваривање нерђајућих челика, пре свега аустенитних и феритних, представља посебну тешкоћу због великог садржаја хрома и других елемената. Познато је да хром утиче на повећање прокаљивости, али погоршава заварљивост челика, те се при заваривању ових челика морају предузети посебне мере, посебно при избору додатног материјала и степена мешања, како би се остварила мироструктура која је отпорна на прслине али и на крти лом.

Како је у више наврата напоменуто, својства прокаљивости и заварљивости су суштински супротна, па тако није могуће произвести челик који истовремено има добру заварљивост и прокаљивост. Једном речју, треба нагласити да добро заварљиви челици имају лошу прокаљивост, док челици високе прокаљивости имају лошу заварљивост или како се то каже условно су заварљиви или чак незаварљиви.

## 8. Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић, *Наука о материјалима I*, основни универзитетски уџбеник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [2] М. Јовановић, В. Лазић, *Технологија ливења и заваривања*, основни универзитетски уџбеник, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [3] М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић, *Технологија заваривања – приручник*, помоћни универзитетски уџбеник, самостално ауторско издање, Крагујевац, 2011.
- [4] Д. Арсић, *Отпорност на појаву и ширење прслина у навареним слојевима термопостојаних челика*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2020.
- [5] В. Ђорђевић, М. Вукићевић, *Машински материјали – практикум за вежбе*, први део, Машински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 1998.
- [6] Y. Lu, Heat Transfer, *Hardenability and Steel Phase Transformations during Gas Quenching*, Degree of Doctor of Philosophy, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2016.
- [7] S. Rathore, V. Dabhade, *Hardenability of sinter-forged Fe<sub>2</sub>Cu-0.7C-xMo alloys*, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 664, pp. 133-140, 2016.
- [8] <https://www.wikiwand.com/sh/Kaljivost>, приступљено августа 2020.
- [9] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=105>, приступљено августа 2020.
- [10] <http://steeldata.info/hard/demo/help/grossman.html>, приступљено јула 2020.
- [11] EN 10020:2000 – Definition and classification of grades of steel, Comite Europeen de Normalisation (идентичан са CEN/TC 459/SC 12).