

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Мастер академске студије**

**Модул: Производно машинство**

**Предмет: Наука о заваривању**

**Број индекса: 383/2018**

**Марјан З. Илић**

**Теоријско-експериментална процена  
заварљивости угљеничних и легираних  
челика**

**мастер рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

1. Проф. др Вукић Лазих - ментор
2. \_\_\_\_\_
3. \_\_\_\_\_

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- Изврши преглед метода за испитивање заварљивости и опише појам заварљивости;
- Да укаже на заварљивост угљеничних и легираних челика, на проблеме заварљивости ових челика, као и да опише методе за оцену заварљивости;
- У експерименталном делу рада, студент треба да изврши наваривање два угљенична и два легирана челика и на тако навареним узорцима изврши испитивање тврдоће и микроструктуре и на основу добијених резултата процени заварљивост навариваних челика.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић М., Адамовић Д., Лазић В.: *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [2] Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [3] Јовановић М., Лазић В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.

Крагујевац, Април 2021. год.

Ментор:  
Др Вукић Лазић, ред. проф.

## Abstract

In this paper, the weldability of carbon and alloy steels is considered. The paper consists of a theoretical and an experimental part. In the theoretical part of the paper, the general concepts related to weldability are pointed out, the most important methods for the assessment of weldability are described, and the assessment of weldability of carbon and alloy steels is also considered. In the experimental part of the work, welding of two carbon and two alloy steels was performed, and hardness measurements and examination of the microstructure of characteristic weld zones were performed on such welded samples. The weldability of these steels was estimated on the basis of hardness and microstructure.

**Key words:** *weldability, carbon steel, alloy steel, hard-facing welding, hardness, microstructure*

## Резиме

У овом раду разматра се заварљивост угљеничних и легираних челика. Рад чине теоријски и експериментални део. У теоријском делу рада указано је на опште појмове везане за заварљивост, описане су најзначајније методе за оцену заварљивости, а такође је разматрана и оцена заварљивости угљеничних и легираних челика. У експерименталном делу рада извршено је наваривање два угљенична и два легирана челика и на тако навареним узорцима изведена су мерења тврдоће и испитивање микроструктуре карактеристичних зона навара. На основу тврдоће и микроструктуре процењена је заварљивост наведених челика.

**Кључне речи:** *заварљивост, угљенични челик, легирани челик, наваривање, тврдоћа, микроструктура.*

## Садржај:

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Увод .....</b>                                                 | <b>1</b>  |
| <b>2. Појам и дефиниција заварљивости .....</b>                      | <b>3</b>  |
| <b>2.1 Заварљивост угљеничних челика.....</b>                        | <b>4</b>  |
| 2.1.1. Утицај угљеника на својства угљеничних челика .....           | 5         |
| 2.1.2. Примесе у угљеничним челицима.....                            | 6         |
| <b>2.2 Заварљивост легираних челика.....</b>                         | <b>7</b>  |
| 2.2.1 Утицај легирајућих елемената.....                              | 8         |
| 2.2.2 Утицај аустенизатора на својства челика .....                  | 9         |
| 2.2.3 Утицај феритизатора на својства челика .....                   | 10        |
| <b>3. Методе за испитивање заварљивости .....</b>                    | <b>13</b> |
| <b>3.1 Рачунске методе .....</b>                                     | <b>13</b> |
| 3.1.1 Метода хемијски еквивалентног угљеника (СЕ) .....              | 13        |
| 3.1.2 Шефлеров дијаграм .....                                        | 15        |
| 3.1.3 Прорачун температуре предгревања.....                          | 17        |
| 3.1.3.1 Метод Сеферијана.....                                        | 17        |
| 3.1.3.2 Метод BWRA (British Welding Research Association).....       | 18        |
| 3.1.3.3 Оцена температуре предгревања према јапанским ауторима ..... | 18        |
| 3.1.4 Дијаграм континуалног хлађења .....                            | 19        |
| 3.1.4.1 Прорачун времена хлађења.....                                | 22        |
| 3.1.4.2 Одређивање брзине хлађења.....                               | 25        |
| <b>3.2 Експерименталне методе за оцену заварљивости челика .....</b> | <b>27</b> |
| 3.2.1 Методе за испитивање настанка хладних прслина.....             | 29        |
| 3.2.1.1 Implant метода .....                                         | 30        |
| 3.2.1.2 Tekken метода.....                                           | 32        |
| 3.2.1.3 CTS метода .....                                             | 34        |
| 3.2.1.4 Lehigh метода .....                                          | 34        |
| 3.2.2 Методе за испитивање настанка топлих прслина.....              | 35        |
| 3.2.2.1 Varestraint метод.....                                       | 36        |
| 3.2.2.2 Murex метода .....                                           | 37        |
| <b>3.3. Методе за испитивање механичких својства .....</b>           | <b>37</b> |
| 3.3.1 Испитивање тврдоће .....                                       | 37        |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2 Испитивање ударне жилавости .....                                      | 38        |
| 3.3.3 Испитивање затезањем .....                                             | 42        |
| <b>4. Оцена заварљивости угљеничних и легираних челика .....</b>             | <b>44</b> |
| 4.1 Оцена заварљивости угљеничних челика .....                               | 45        |
| 4.2 Оцена заварљивости легираних челика.....                                 | 46        |
| 4.2.1 Оцена заварљивости нисколегираних челика .....                         | 46        |
| 4.2.2 Оцена заварљивости високолегираних челика .....                        | 47        |
| 4.3 Оцена заварљивости челика повишене јачине.....                           | 48        |
| 4.3.1 Оцена заварљивости С-Мп челика .....                                   | 48        |
| 4.3.2 Оцена заварљивости микролегираних (финозрних-ТМ) челика.....           | 50        |
| 4.3.3 Оцена заварљивости нисколегираних челика повишене јачине .....         | 51        |
| 4.3.3.1 Бејнитни челици.....                                                 | 51        |
| 4.3.3.2 Нисколегирани побољшани челици.....                                  | 51        |
| 4.3.3.3 Сг–Мо челици.....                                                    | 52        |
| 4.4 Параметарске једначине за оцену склоности челика ка појави прелина 53    |           |
| 4.4.1 Параметарске једначине хладних прелина.....                            | 53        |
| 4.4.2 Параметарске једначине топлих прелина.....                             | 55        |
| 4.4.3 Параметарске једначине прслна жарења .....                             | 56        |
| 4.4.4 Параметарске једначине ламеларних прелина.....                         | 57        |
| <b>5. Експериментална испитивања.....</b>                                    | <b>58</b> |
| 5.1 Основни материјал и његова својства.....                                 | 59        |
| 5.2 Додатни материјал и његова својства .....                                | 61        |
| 5.3 Заварљивости основних материјала .....                                   | 62        |
| 5.4 Моделирање параметара наваривања и одређивање оптималне технологије..... | 63        |
| 5.5 Одређивање тврдоће карактеристичних зона навареног слоја.....            | 64        |
| 5.6 Одређивање микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја .        | 69        |
| 5.7 Коментари испитивања .....                                               | 80        |
| <b>6. Закључак .....</b>                                                     | <b>82</b> |
| <b>7. Литература .....</b>                                                   | <b>83</b> |

## 1. Увод

Примена заваривања као начин спајања метала има веома широку примену, јер више од 70% производа металопрерађивачке индустрије примењује технологију заваривања за израду конструкција. Знање о материјалима, њиховој производњи, обради, својствима и примени се углавном стицало експериментално. Случајност је играла веома важну улогу у откривању нових материјала и њиховом развоју. Тек почетком 19. века истраживања, најпре из области физике и хемије, довела су до утемељења интердисциплинарне науке о материјалима. Ова наука се проблематиком материјала бави на научној основи.

У данашње време доминантан метални материјал је челик, који представља најјефтинији и после дрвета најраспрострањенији конструкциони материјал. Највећи развој у производњи челика, као и у многим другим областима, урађен је за последњих тридесетак година, развојем нових технологија добијања и прераде челика, а такође и развојем технологије заваривања. Предност челика у односу на било који други материјал је у односу цена/квалитет. Развојем и освајањем нових знања из области металургије, као и развојем опреме за примарну производњу челика условило је стални развој нових врста челика.

Када је реч о челику као највише коришћеном материјалу у машинству, према подацима World Steel Association (Brussels, Belgium), светска производња примарно прерађеног челика у 1900. години (прва година статистичког праћења) износила је свега 28.3 милиона тона. За нешто више од једног века, 2004. године, продукција је достигла тада рекордних 1.005 милијарди тона, да би 2019. године достигла 1.87 милијарди тона. Од тога се у Кини производи 996.3 милион тона, што је 53.3% укупне светске производње.

Предмет овог рада је теоријско-експериментално процена заварљивости угљеничних и легираних челика. У оквиру овог рада истраживан је утицај REL и MAG технологије заваривања (наваривања), као и различитих додатних материјала на физичко-металуршке карактеристике нелегираних челика Š0363 (S235JR)<sup>1</sup> и Š0563 (S355J2), те нисколегираних челика Š1530 (C45) и Š4732 (42CrMo4). Промена физичко-металуршких карактеристика се огледа у промени тврдоће, жилавости и микроструктуре. До нових сазнања везаних за ову проблематику заваривања и наваривања може се доћи на основу теоријских анализа и бројних експерименталних истраживања.

Између осталог, циљ овог рада је да се изврши оцена заварљивости наваривања појединих угљеничних и легираних челика, да се процене последице наваривања на структурне и механичке карактеристике основног материјала и зоне утицаја топлоте (ЗУТ) и да се испита тврдоћа наварених слојева. На тај начин се могу остварити бројне уштеде (у материјалу, времену, роковима испоруке и др.) и продужити радни век навариваних делова.

Рад је подељен на три дела. Први, теоријски део описује појам заварљивости, као и методе за испитивање заварљивости. Други, експериментални део садржи податке о изради експерименталних узорака, заварених проби од челика квалитета S235JR, S355J2G3, C45 и 42CrMo4 применом REL и MAG поступка. Трећи део обухвата анализу добијених резултата.

---

<sup>1</sup> Некадашњи JUS C.B0.002 из 1986. године, данас се означава са SRPS/EN 10027-1.

Експериментална део рада обухвата: испитивање физичко-хемијских својстава основних материјала, оцену заварљивости различитих врста материјала, испитивање коришћених додатних материјала, пројектовање полазне технологије наваривања, израду физичких модела за лабораторијска испитивања, избор најповољније технологије наваривања на основу добијених резултата лабораторијских испитивања, наваривање радних делова оптималним параметрима и коначну одлуку о прихватању или одбацивању предложене технологије.

Такође извршена је анализа већег броја радова који се баве проблемима наваривања и проценом заварљивости, било да је реч о челицима који се овде истражују или о неким сличним. Анализа радова указује на то да је ова област веома актуелна и данас. Разлог за то је циљ истраживача и металурга да стално унапређују челике, алате и процесе како би се створили услови за побољшање у неким другим областима као што је нпр. екологија.

Поред неопходних теоријских основа, за разумевање изузетно сложеног процеса наваривања, у једном делу овог рада су приказани резултати сопствених експерименталних истраживања. Формирани модели пројектовања и извођења процеса наваривања радних делова од угљеничних и легираних челика представљени су тако да уз неопходне корекције могу корисно послужити као основа производног или репаратурног наваривања радних делова и других техничких система. Такође, добијени резултати могу корисно послужити као база података за даља истраживања из ове области.

## 2. Појам и дефиниција заварљивости

Појам заварљивости представља један сложен проблем, за који не постоји униформна и експлицитна дефиниција. Да би се дефинисала заварљивост, потребно је узети у обзир већи број фактора. Најважнији фактори које је потребно узети у обзир да би се дефинисала заварљивост су: основни и додатни материјал, заваривачки рад, напрезање у шавовима и концентраторе напона. Такође ови фактори се користе и приликом оцене квалитета заварљивости. Најраспрострањенија дефиниција заварљивости која се данас користи је дефиниција Међународне организације 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“.*

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и негативно понашање за време и после заваривања у топлотном и деформационом смислу. Мере за побољшање заварљивости омогућавају да се добију заварени спојеви захтеваних својстава и од условно заварљивих метала и легура. Заварљивост се процењује на основу утицаја заваривања, односно наваривања на заварени спој, и његово понашање у топлотном и напонско-деформационом смислу за време и после заваривања. Заварљивост челика обрнуто је пропорционална његовој закаљивости, па челици који имају мању закаљивост и добру ковност имају добру заварљивост. Из тога произлази да се заварљивост челика погоршава са порастом садржаја угљеника и легирајућих елемената.

Да би се олакшала процена и погодност материјала за заваривање извршена је подела заварљивости, и то на: *металуршку, конструкциону и технолошку заварљивост*.

**Металуршка заварљивост** материјала (метала) зависи од низа фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. На ову заварљивост утичу све металуршке промене у материјалу које настају под дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног снижења механичких и технолошких особина споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала лоше заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, односно могу се појавити тврде и крте структурне компоненте, прслине и тсл., све зависно од датог случаја. Утврђено је да су метали и легуре незаварљиви са металуршке тачке гледишта ако се њихови саставни хемијски елементи међусобно не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заварити, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

**Конструкциона заварљивост** показује утицај низа параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда шавова итд., које конструктор поставља пројектним захтевом за дату конструкцију у зависности од оптерећења и радних услова.

**Технолошка заварљивост** обухвата технолошке параметре који утичу на заварени спој, нпр. додатни материјал, метод и поступак заваривања, унос топлоте, брзину хлађења, итд. При томе се врши процена да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење у току и после заваривања, рад у специјалној атмосфери), а оцена се доноси на основу предузетих мера и добијеним резултатима. Са оперативног становишта које се односи на понашање неких 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 стапају у хомогену легуру, а при томе се топе без тешкоћа, без прштања и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака.

Својства метала и легура која се захтевају након заваривања представљају један од основних проблема заварљивости. Сложени процеси који настају у зонама заваривања утичу на коначна својства завариваног материјала. Основне зоне заваривања су:

- шав, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом,
- прелазна зона (зона стапања) и
- зона утицаја топлоте (ЗУТ), где се основни материјал мења услед загревања и хлађења у чврстом агрегатном стању.

Од завариваног материјала се тражи добра заварљивости и поузданост спојева, односно компактне и непрекидне заваре, довољно јаке и пластичне шавове и ЗУТ да издрже сва напрезања у процесу заваривања, тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстину и да се одупру свим непредвиђеним преоптерећењима у току рада тако што ће се локално пластично деформисати.

При разматрању заварљивости потребно је узети у обзир четири сродна фактора: врста материјала, врста структуре, тражене особине и поузданост.

## **2.1 Заварљивост угљеничних челика**

Угљенични<sup>2</sup> челик садржи најмање 6 хемијских елемената: Fe, C, Mn, Si, P и S. Највећи утицај на структуру челика, а тиме и на механичке и технолошке особине има угљеник. Угљеник се у челицима, у ограниченој количини, налази у интерстицијском раствору гвожђе-ферит, а већим делом у облику цементита. Према томе, механичка својства угљеничних челика директно зависе од садржаја угљеника.

Из овог разлога додавање угљеника челику је била прва метода за повећање јачине челика. Пораст јачине челика само преко садржаја угљеника је ограничен, због могућности настајања хладних прслина услед закаљивања у подручју ЗУТ-а. Према томе, сматра се да челици са садржајем  $C < 0.25\%$  нису склони закаљивању. Сумпор је штетна примеса и најмањи садржај сумпора доводи до образовања сулфида FeS. Између FeS и гвожђа образује се нискотопљиви еутектикум који се издваја на границама зрна, што може довести до лома. Фосфор је такође штетан јер са гвожђем гради фосфиде, који утичу на смањење способности деформације у хладном стању.

---

<sup>2</sup> Данас се често користи термин нелегирани уместо угљенични.

Угљенични челици су добро заварљиви челици и углавном своју примену налазе код конструкција са статичким оптерећењем и израђују се у облику лимова, шипки, профила и цеви. На угљеничне челике отпада 90% светске производње челика, па они представљају основни материјал у машинској индустрији.

Према намени, угљенични челици се деле на:

- конструкционе, до 0.6% С и
- алатне, преко 0.6% С.

Према садржају угљеника челици се деле на:

- нискоугљеничне челике са садржајем угљеника од 0.05 до 0.29%. Нискоугљенични челици имају релативно ниску вредност затезне чврстоће, али су ковни и јефтини,
- челике са средњим садржајем угљеника од 0.30 до 0.59%. Поседују добру жилавост<sup>3</sup> и чврстоћу па су јако отпорани на хабање,
- високоугљеничне челике са садржајем угљеника 0.60 до 0.99%. Врло су чврсти, користе се за опруге и жице високе чврстоће и
- ултра високоугљеничне челике са садржајем угљеника од 1.0 до 2.11%. Ови челици се топлотно обрађују до веома високе чврстоће.

Већина челика са преко 1.2% садржаја угљеника се праве методама прашкасте металургије и спадају у категорију високолегираних угљеничних челика. Угљенични челик се може топлотно обрађивати, што омогућава да се делови производе док су још у меком стању. Ако постоји довољно угљеника, легура може очврснути, те се тако повећава јачина, отпорност на хабање, као и отпорност на удар.

### **2.1.1. Утицај угљеника на својства угљеничних челика**

Са порастом садржаја угљеника, структура челика се мења од феритне, феритно-перлитне, перлитне, до перлитно-цементитне. Механичка својства угљеничних челика зависе од садржаја угљеника. Садржај од 0.1% С повећава затезну чврстоћу челика за око 90 МПа, а напон течења за око 45 МПа. Поређења ради, за сличан пораст затезне чврстоће потребно је 1% Мп, Si или Cr. На основу овога, може се закључити да угљеник утиче на особине гвожђа око десет пута јаче него наведени легирајући елементи.

Имајући у виду својства појединих структура челика, јасно је да са порастом садржаја угљеника код подеутектоидних челика значајно расте затезна чврстоћа ( $R_m$ ), у мањој мери напон течења ( $R_{eH}$ ) и тврдоћа, а смањује се издужење ( $A$ ) и сужење ( $Z$ ).

Код надеутектоидних челика са порастом садржаја угљеника и даље расту напон течења и тврдоћа. Затезна чврстоћа расте до приближно 1.2% С, када достиже максимум, а потом опада. Ово може да се објасни повећањем количине секундарног цементита који се издваја на границама перлитних зрна, при порасту садржаја угљеника. То доводи до смањења затезне чврстоће, а нема утицаја на тврдоћу и напон течења.

---

<sup>3</sup> Жилавост омогућава да се материјал истеже до неког степена, без кидања. Оне указују на могућност обликовања деформисањем, нпр. хладним ковањем, дубоким извлачењем, вучењем жице итд.

Повећање садржаја угљеника у челику има и добре и лоше стране. Добра страна је повећање затезне јачине челика. Насупрот томе, као лоше стране повећања садржаја угљеника, треба истаћи три негативна утицаја:

- повећање кртости челика,
- погоршање заварљивости и
- безначајан утицај на смањење тежине конструкције.

Са повећањем садржаја угљеника преко 0.8%, поред цемента садржаног у перлиту, издваја се и слободни цементит који формира карбидну мрежу у облику ламела веома оштрих ивица. Те ламеле делују као концентратори напона, чиме се значајно умањује жилавост челика.

### **2.1.2. Примесе у угљеничним челицима**

Осим угљеника, као компоненте, у састав челика улазе и други елементи који се сматрају пратећим или случајним примесама. Пратеће примесе (Si, Mn, Al, S и P) у челику последица су процеса добијања гвожђа и челика. Скривене примесе у челицима (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) потичу из ваздуха са којим растопљени челик долази у контакт у току изливања. Случајне примесе су сви остали елементи који не спадају у пратеће или скривене примесе, а има их у челику у садржају мањем од минимално прописаног. Садржај примеса у челицима треба да се сведе на најмању меру, с обзиром на то да они граде непожељна једињења као што су сулфиди, фосфиди и оксиди.

Угљеник је у челику неопходан јер даје гвожђу потребну тврдоћу и моћ каљења. Гвожђе које садржи испод 0.10% C нема ни једну од ових особина (оно је меко и не може се калити). Ово се односи и на угљеничне и на легиране челике.

Међународни институт за заваривање дао је препоруке са циљем да се дефинишу минимални захтеви, који ће обезбедити одговарајући квалитет заварених спојева конструкционих челика. Не узимајући у обзир начин производње, препоруке предвиђају три квалитета челика:

Квалитет В - нормалан квалитет који се користи за конструкције изложене нормалним напрезањима. Под напрезањем се подразумевају све силе којима је конструкција изложена, укључујући и заостале напоне заваривања.

Квалитет С - побољшан квалитет челика са смањеном осетљивошћу према зарезу. Овај квалитет се употребљава код конструкција или код делова конструкција код којих је опасност од кртих ломова значајна.

Квалитет D - представља високо квалитетни челик са повишеном отпорношћу према зарезу који се користи за конструкције или делове конструкција код којих је опасност од кртих ломова неуобичајно велика.

Недовољна заварљивост се огледа у појави прслина. Појава прслина се може избећи применом мера као што су:

- правилан избор електроде,
- начин заваривања и
- облагање жлебова (путеровање).

#### *Правилан избор електроде.*

Повећањем садржаја угљеника у ЗУТ-у се јавља тенденција према образовању метастабилних структура које доприносе појави локалних напона и стварању прслина. Електроде које ослобађају пуно водоника (целулозне, киселе и рутилне) могу бити узрок појаве прслина. Из овог разлога заваривање угљеничних и нисколегираних челика треба изводити електродама са малим садржајем водоника као што су базичне електроде. Како би се побољшала заварљивост при заваривању потребно је користити електроде већег пречника које омогућавају уношење веће количине топлотне енергије.

#### *Начин заваривања.*

Пошто су први и корени завар најосетљивији према појави прслина, услед мале запремине додатног материјала завареног са хладним основним материјалом. Како би се избегла појава прслина препорука је да се избегавају мали завари и заварити корен шав са електродом што већег пречника. При заваривању спојева у кореном пролазу V или U жлеба или у центру X жлеба, нарочито се препоручује примена „затупљивања“ што омогућава примену електрода већег пречника, а самим тим и већи интензитет струје.

#### *Облагање жлебова.*

Приликом заваривања тешко заварљивих челика може се применит искуствени метод – облагање жлебова. Поступак се састоји у томе да се странице прекрију мекшим челиком задовољавајуће заварљивости у дебљини која одговара ширини ЗУТ-а, а која у највећем броју случаја износи 5 до 10 mm. Применом ове методе ствара се један наварени слој од мекшег челика да би се избегла појава прслина, али се у завареном споју истовремено појављује и ослабљена зона.

## 2.2 Заварљивост легираних челика

Да би се хемијски елементи у челику самтрали легирајућим, потребно је да њихова вредност (%) буде најмање једнака датој вредности у табели 2.1. Легирајући елементи са једне стране побољшавају особине челика, док са друге стране погоршавају заварљивост челика.

**Табела 2.1** Минмалан садржај легирајући елемената у челицима

| Mo   | V    | Co   | Ti   | Al   | W    | Cr   | Ni   | Si   | Mn   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.08 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.30 | 0.30 | 0.60 | 0.80 |

Већина легирајућих елемената са гвожђем граде супституцијске<sup>4</sup> чврсте растворе који се интерстицијски растварају у гвожђу. Поред тога граде и карбиде, Mo, Ti, V, W

<sup>4</sup> Супституцијски чврсти раствор настаје када растворени атоми замене атоме основе (растварача).

граде сопствене карбиде, док комплексне карбиде граде Cr, Mn, Mo и W. Уколико се у челику налази мање од 5% легирајућих елемената ти челици се називају нисколегирани челици, а ако имају више од 5% називају се високолегирани челици.

Легирајући елементи у челицима могу образовати:

- чврсте растворе у гвожђу (Ni, Si, Mn, Cr, V, W, Ti, Nb, Al),
- сопствене карбиде ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , MoC, WC,  $\text{W}_2\text{C}$ , TiC, NbC),
- легиране карбиде  $((\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ ,  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ ) и
- распршене честице у елементарном стању (Cu, Pb).

### **2.2.1 Утицај легирајућих елемената**

Неке конструкције захтевају специфичне захтеве, које угљенични челик не може да испуни. Ти захтеви су високи напон течења и добра жилавости, динамичка издржљивост, граница пузања или одређене особине на ниским или високим температурама. Поред ових основних механичких особина поједини делови конструкција морају понекад имати и посебне особине, као корозиону отпорност, термостойаност и тсл., које се могу добити само додавањем других елемената, тј. легирањем. Конструкциони легирани челици увек су скупљи од угљеничних и зато их треба примењивати у побољшаном стању када имају највећи однос  $R_p/R_M$  као и максималну жилавост, па се тако најбоље користе додатни елементи.

Исти утицај као и у бинарним легурама Fe-M имају легирајући елементи и у челицима. Са порастом садржаја аустенитотворних елемената код челика опадаће температура прекристализације. Ако се температура прекристализације довољно снизи, може бити дифузиона промена потпуно потиснута и аустенит ће прекристалисати и при спором хлађењу механизмом клизања (тј. бездифузионо) у мартензит. Ако се повећа садржај аустенитотворних елемената изнад одређене границе, остаће задржана аустенитна структура и на собној температури. Додавањем легирајућих елемената тако добијамо челике који имају и при собној температури аустенитну структуру, тзв. аустенитне челике. Ови челици нису магнетични, имају ниску границу течења и малу тврдоћу, али високу истегљивост и жилавост.

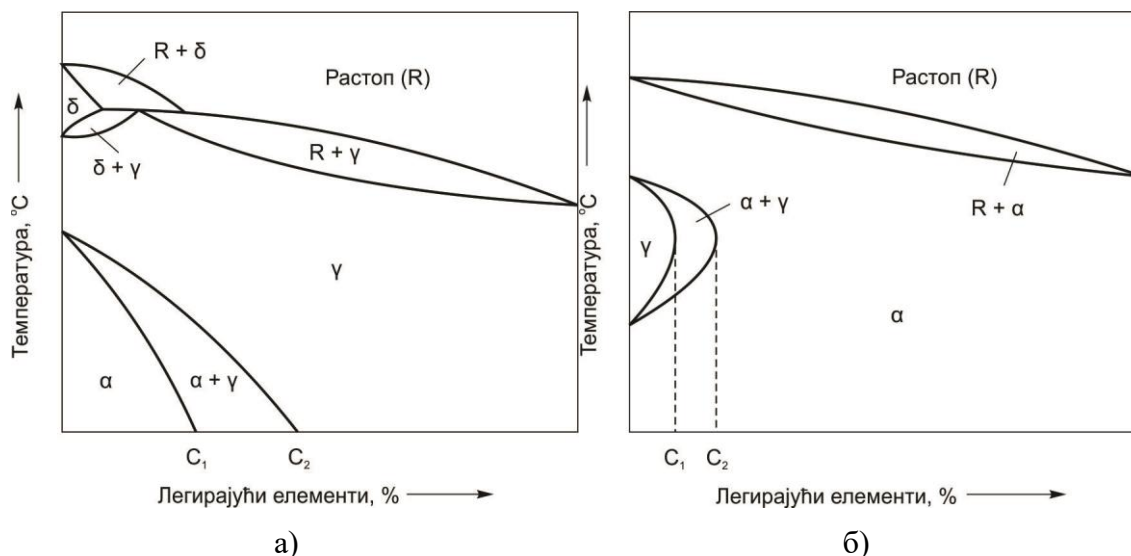
Са повећањем количине феритотворних елемената област гама ће се сужавати, тако да при одређеном садржају легирајућих елемената остаје задржан  $\delta$ -ферит и при собној температури. Челици ће имати феритну структуру према којој се називају феритни нерђајући челици са 12-30% Cr и веома ниским садржајем угљеника. Присуство карбида умањује корозиону отпорност.

Одређена класа челика садржи како  $\gamma$  - гене (Ni, Mn, Cu) тако и  $\alpha$  - гене елементе (Cr, Mo, Si, Nb, итд.), па је процена њихове структуре на собној температури била немогућа без металографских и других испитивања.

Сваки елемент којим се легира челик, мења његове особине зависно од тога у ком је облику присутан у структури, тј. да ли је потпуно или само делимично растворен у основној металној маси (у фериту или аустениту), да ли је везан са угљеником као карбид, са азотом као нитрид и тсл. Значајно је и повећање прокаљивости које се постиже легирањем, готово свим додатним елементима.

Сви легирајући елементи утичу у већој или мањој мери на промену температуре прекристализације челика, а тиме и на величине аустенитне или феритне области (гама или алфа). У том смислу легирајући елементи се могу поделити у четири групе: елементи који потпуно отварају област гама, елементи који проширују област гама, елементи који потпуно затварају област гама и елементи који сужавају област гама.

Ако се повећа садржај аустенитизатора у челику изостаће прекристализација и задржаће се аустенитна структура и на собној температури (сл. 2.1а). Овакви челици називају се аустенитним а одликују се малом тврдоћом, ниским напоном течења, високом дуктилношћу, отпорни према корозији и нису магнетични. Супротно томе, са повећањем садржаја феритизатора у челику, доћи ће до сужавања аустенитне и ширења феритне области, тако да може остати феритна структура и до температуре топљења (сл. 2.1б). Ови челици се називају феритним, магнетични су и имају низак садржај угљеника.



Слика 2.1 Равнотежни бинарни дијаграми: а) отворена област гама, б) затворена област гама

Легирајући елементи се према утицају на структуру челика деле на две основне групе: аустенитизаторе (Ni, Mn, Cu, C и N), и феритизаторе (Cr, Mo, W, Si, V, Ta, Al, Ti и Nb), или  $\gamma$  - гене и  $\alpha$  - гене елементе.

### 2.2.2 Утицај аустенизатора на својства челика

**Угљеник** највише утиче на структуру и особине челика. Повећава јачину, тврдоћу, отпорност на хабање, прокалаивост, а снижава својства пластичности<sup>5</sup> и жилавост, уз погоршање заварљивости. Угљенични и нисколегирани челици са  $C > (0.2-0.25)\%$  сматрају се условно заварљивим. У легираним челицима угљеник гради карбиде који се издвајају по границама зрна, што у аустенитним Cr-Ni челицима ствара услове за међукристалну корозију. У циљу спречавања те неповољне појаве, додају се нерђајућим Cr-Ni челицима хемијски елементи Ti и Nb који делују као стабилизатори. Односно, они везују угљеник градећи стабилне карбиде (нпр. TiC, NbC) и тиме спречавају формирање

<sup>5</sup> Код материјала добрих својства пластичности, велики локални напони поништавају се пластичним деформисањем, док се код кртих материјала појављују прслине које се даље шире и доводе до лома.

карбида хрома. Друго решење је производња Cr-Ni челика са веома ниским садржајем угљеника (испод 0.03%) али тиме се погоршава термостојаност. Установљено је да пораст садржаја C и N у челику доприноси одржавању својстава отпорности на високим температурама, тј. термостојаности.

Атоми угљеника су релативно мали ( $r = 0.071 \text{ nm}$ ) могу са гвожђем да образују интерстицијске чврсте растворе стварајући различите структуре:  $\alpha$ -ферит,  $\delta$ -ферит и аустенит ( $\gamma$ ). Све ове структуре имају различиту тврдоћу, релативно издужење, јачину, магнетичност и др.

**Никл** растворен у фериту повећава јачину и жилавост уз одржавање високе пластичности. Деловање никла као аустенитизатора зависи у великој мери од садржаја хрома у челику. Легирани челици типа Cr-Ni са садржајем Ni изнад 8% при односу  $\text{Cr/Ni} < 1.8/1$  имају чисто аустенитну структуру. Никл је елемент отпоран према оксидацији, а легуре које садрже 30–40% Ni оксидишу се приближно истом брзином као и чисти елементи. Никл у челику делује као графитизатор (разлаже цементит), па челици богати никлом треба да садрже што мање угљеника.

**Манган** се супституијски раствара у фериту доприносећи порасту својстава отпорности челика. У угљеничним и нисколегираним челицима повећава отпорност заварених спојева према прслинама на топло јер образује стабилан сулфид мангана ( $\text{MnS}$ ) високе температуре топљења ( $\approx 1620^\circ\text{C}$ ) и тиме смањује количину штетне нискотопљиве еутектике Fe-FeS. Повећањем садржаја мангана у горе наведеним челицима до 1.5% расту јачина и жилавост уз одржавање добре пластичности.

Практично се употребљавају само перлитни и аустенитни мангански челици, док су остале структуре непогодне за обраду деформисањем и машинску обраду. Најпознатији аустенитни мангански челик ( $\sim 13\% \text{ Mn}$ ,  $1\% \text{ C}$ ) склон је ка прегревању, тј. наглом порасту металних зрна на вишим температурама. Мала пластичност аустенитних ( $\text{Mn}$ ) челика може се повећати термичком обрадом, која се састоји из загревања до око  $1000^\circ\text{C}$ , прогревања и наглог хлађења у води. Овај поступак термичке обраде зове се гашење и изводи се само код аустенитних челика.

**Бакар**, у количинама које се обично срећу у челицима (око 0.5 V%), повећава напон течења и јачину, не погоршавајући битније особине пластичности и заварљивости. Такође повећава и отпорност према атмосферској корозији.

**Азот**, слично угљенику повећава јачину челика на собној и повишеним температурама. Предност му је што се хемијски не везује за хром, па код Cr-Ni челика не умањује корозиону отпорност. Неповољно је што смањује пластичност и тиме отежава хладну прераду. Навари са повећаним садржајем азота, и поред присуства титана као стабилизатора, могу бити подложни корозији, јер се део титана једини са азотом, па не може за себе везати сву издвојену количину угљеника из чврстог раствора на границама зрна. Азот утиче на смањење пластичности и побољшање обрадљивости навара.

### 2.2.3 Утицај феритизатора на својства челика

**Хром** се у нискоугљеничним челицима обично налази у количинама до 0.3%, у легираним челицима 0.7–3.5%, у хромовим челицима 12–18% и у хром-никловим челицима 9–35%. Повишен садржај хрома у угљеничним и нисколегираним челицима

погоршава њихову заварљивост на рачун побољшања прокаљивости. Повећава ватроотпорност аустенитних челика у оксидационим условима али делује мање ефикасно, него нпр. молибден или ванадијум. При садржају хрома изнад 12% челик је веома отпоран према корозији. Даљим повећањем садржаја хрома расте јачина и отпорност челика према корозији, али при  $\text{Cr} > 20\%$  видно опада пластичност. Хром образује веома стабилне карбиде  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  и  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , који се у челику могу налазити у слободном стању или повезани са  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Ако челик садржи више угљеника него што је потребно за образовање перлита, то настају услови повољни за појаву слободних карбида хрома, који се издвајају по границама зрна, што може изазвати међукристалну корозију. Критична температура издвајања карбида износи  $500\text{--}800^\circ\text{C}$ .

Хром изазива повећање критичне температуре  $A_{\text{C1}}$ , што доводи до тога да брзина растварања карбида у аустениту буде знатно мања од брзине растварања  $\text{Fe}_3\text{C}$  у угљеничним челицима. Због тога је при каљењу  $\text{Cr}$  челика потребна виша температура и дуже време прогревања. Легуре  $\text{Fe}\text{--}\text{Cr}\text{--}\text{C}$  по очвршћивању могу имати следеће структуре: подеутектоидну, надеутектоидну, ледебуритну и феритно-карбидну. Практичну примену имају легуре свих структура. Са порастом садржаја хрома смањује се термичка проводност што захтева предострожност при загревању челика, нпр. при преради на топло, термичкој обради или заваривању.

**Молибден** се у конструкционим челицима налази у границама од 0.2–0.5%. Изазива уситњавање зрна и доводи до повећана жилавости (при високим температурама) и прокаљивости. Са повећањем садржаја  $\text{Mo}$  расте и јачина и напон течења, док издужење и контракција опадају при  $\text{Mo} > 2.3\%$ .

**Волфрам** даје челику ситнозрнасту грађу на рачун образовања тешко растворљивих карбида. Прокљивост се повећава релативно мало, а заварљивост погоршава због велике кртости завареног споја, посебно код челика са већим садржајем угљеника. Волфрам донекле повећава општу корозиону отпорност као и отпорност према међукристалној корозији аустенитних челика. Доприноси формирању  $\sigma$  – фазе у хром-никл челицима. У аустенитним челицима који садрже мале количине угљеника (испод 0.15%) додатком волфрама до 3% не погоршава се заварљивост. Легуре  $\text{Fe}\text{--}\text{W}\text{--}\text{C}$  по очвршћивању и хлађењу имају структуре: подеутектоидну, надеутектоидну, ледебуритну и феритну. Практичну примену имају све структуре и убрајају се у челике. Са повећањем садржаја  $\text{W}$ , опада термичка проводност, повећава се густина (само до  $\text{W} = 7.6\%$ ) и електрични отпор.

**Силицијум**, који се супституијски раствара у фериту повећава његову јачину и нарочито границу еластичности, и са те тачке гледишта јесте пожељан легирајући елемент код челика за опруге. У високо легираним челицима силицијум спречава оксидацију хрома. Већина аустенитних челика садржи до 1%  $\text{Si}$ . У челицима типа  $18\text{Cr}8\text{Ni}$ , силицијум доприноси образовању ферита и доводи до ојачања и повећања отпорности према међукристалној корозији. Силицијум не подлеже сегрегацији и отежава сегрегацију неких састојака, као сумпора и фосфора. Легуре  $\text{Fe}\text{--}\text{Si}\text{--}\text{C}$  по очвршћавању имају следеће структуре: феритну, подеутектоидну, надеутектоидну и ледебуритну. Практичну примену налазе прве три структуре, а легура четврте структуре убраја се у ливена гвожђа. При већем садржају угљеника и силицијума ( $\text{C} > 0.8\%$  и  $\text{Si} > 0.8\%$ ) цементит под утицајем силицијума показује повећану склоност ка графитизацији. Ово искључује израду алатних челика са истовремено повећаним садржајем  $\text{C}$  и  $\text{Si}$ .

**Ванадијум** се у специјалним челицима налази у границама 0.2-0.85%, а у челицима за рад на топло 1-1.5%. Он отежава заваривање челика услед повећања прокаљивости. Смањује осетљивост челика ка прегревању (карбиди ванадијума коче пораст зрна).

**Тантал** је елемент са великом склоношћу ка образовању карбида и примењује се у аустенитним хром–никл челицима као стабилизатор који сузбија међукристалну корозију. Мора бити уведен у довољној количини, да веже сав угљеник и тако спречи образовање карбида хрома.

**Алуминијум** показује већу склоност ка образовању нитрида, смањујући на тај начин осетљивост челика на процес старења. Додатак алуминијума у количини 0.02 – 0.2% утиче на величину зрна првобитног аустенита захваљујући кочионом деловању нитрида алуминијума и  $Al_2O_3$ . У малим количинама алуминијум не само што кочи пораст зрна, већ такође смањује склоност ка закаљивању прелазне зоне. Челици са садржајем алуминијума изнад 1% су тешко заварљиви. Додатак алуминијума нерђајућим челицима повећава отпорност на оксидацију.

**Титан** је легирајући елемент највећег афинитета према угљенику, па се стога често примењује као стабилизатор у челицима отпорним према киселинама, у циљу везивања угљеника и спречавања да настане карбид хрома. Ако однос садржаја титана према угљенику у челику испуњава стандардне захтеве онда ће такав челик бити неосетљив према међукристалној корозији. образује се такође нитрид титана нерастворљив у чврстом стању, који делује као центар кристализације при фазним променама у чврстом стању. Титан повећава отпорност заваара према прслинама на топло.

**Ниобијум** показује велику склоност ка угљенику и образује карбид NbC. Често се примењује у микролегираним челицима у количини до 0.05%. Његов користан утицај на особине челика заснива се пре свега на кочењу процеса сегрегације. Такође, хромни феритни челици који садрже ниобијум мање су осетљиви према прслинама на топло. Сужава аустенитно подручје, смањује прокаљивост и побољшава заварљивост.

**Бор** је елемент који образује карбиде и веома повећава прокаљивост челика ако се дода у малим количинама. При већим садржајима бора прокаљивост челика опада и настаје крта грубозрнаста структура. Обично се додаје челицима у малим количинама (око 0.003%). Према литературним подацима бор проширује подручје  $\gamma$  гвожђа. У аустенитним хром-никл челицима микрододаци бора повећавају термопостојаност што је повезано са ојачањем граница зрна.

### 3. Методе за испитивање заварљивости

У пракси се не може добити идеална заварљивост, јер се ниједном заваривачком технологијом не може добити спој потпуно истих физичко-хемијских својстава материјала у завару, зони утицаја топлоте и основном материјалу.

Критеријум за оцену заварљивости у суштини представља процену потребних вредности усвојених показатеља заварљивости. Полази се од испитивања заварљивости основног материјала, затим избор додатог материјала и на крају њихова међусобна заварљивост. За оцену заварљивости различитих врста челика потребно је испитати склоност њихових заварених спојева ка појави најопаснијих грешака, а то су различите врсте прслина. За ове потребе користе се различите научно засноване методе: *рачунске методе, лабораторијске методе, практичне пробе, технолошке пробе и KHZ дијаграми*.

Због специфичних услова формирања завареног споја (брзих металуршких реакција, појаве напонско-деформационог стања и др.), неизбежних грешака у завару (навару) и зони утицаја топлоте, нема метала који поседује идеалну заварљивост. Најчешће грешке су: непровар, порозност, заједи, укључци троске и прслине.

#### 3.1 Рачунске методе

Уз помоћ рачунских метода за оцену заварљивости одређују се параметри на основу чијих вредности се процењује максимална очекивана тврдоћа у зони утицаја топлоте критична брзина хлађења, очекивана структура споја и др. На основу ових параметара доноси се одлука да ли се заваривање изводи без предгревања или са предгревањем, односно одређује се технологија извођења процеса.

Постоје више рачунских метода, а неке од њих су: *одређивање хемијски еквивалентног угљеника (CE), прорачун параметара предгревања по Сеферијану, BWRA метода, као и коришћење Шефлеровог дијаграма, КН-дијаграма и параметарских једначина*.

##### 3.1.1 Метода хемијски еквивалентног угљеника (CE)

Метода хемијски еквивалентног угљеника (CE), заснива се на хемијском саставу челика и дебљини радних предмета према формулама различитих аутора. Оцена заварљивости према хемијском саставу челика је метода која се заснива на израчунавању тзв. хемијског еквивалента угљеника (CE), који исказује познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост. При томе се утицај неког хемијског елемента садржаног у челику, на заварљивост, изражава коефицијентом еквивалентности у односу на угљеник.

Ова метода даје само грубу процену па се углавном користи за оцену заварљивости нелегираних (угљеничних челика) и нисколегираних (микролегираних) челика. Анализом добијених резултата одлучује се да ли ће се применити предгревање при извођењу процеса заваривања односно наваривања.

За закаљиве челике CE се израчунава помоћу израза:

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

За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легиране елементе ( $Cr < 0.30\%$ ,  $Mo < 0.08\%$ ), а при том повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

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

У пракси се најчешће примењује формула Међународног института за заваривање (МИЗ-а) познатија као PW-формула која служи за испитивање заварљивост угљеничних (нелегираних) челика и угљенично-манганских челика (C-Mn), али не и за нисколегиране челике повишене јачине или нисколегиране Cr-Mo челике:

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

Испитивањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

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

Ова веза важи у границама  $0.2\% < CE < 0.6\%$ , јер за веће вредности CE веза није више линеарна. Уз велика упрошћавања и занемаривањем низа утицајних фактора, може се сматрати да је челик заварљив ако тврдоћа у ЗУТ-у не пређе вредност од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности  $CE = 0.45\%$ , па се усваја да су челици са  $CE < 0.45\%$  заварљиви без примене посебних мера, док су челици са  $CE > 0.45\%$  заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење, посебни атмосферски услови и тсл.).

Садржај водоника, тврдоћа, дебљина и крутост имају знатан утицај на појаву хладних прелина, па се због међусобног дејства не може одредити максимална дозвољена тврдоћа ЗУТ-а без узимања у обзир дифундованог водоника. Према томе се вредност максималне тврдоће повезује са садржајем дифундованог водоника према табели 3.1.

**Табела 3.1** Зависност граничне тврдоће ЗУТ-а од садржаја заосталог водоника у шава

|                                         |     |         |        |       |
|-----------------------------------------|-----|---------|--------|-------|
| Садржај водоника у ml/100 g металу шава | 20  | 10 - 20 | 5 - 10 | 1 - 5 |
| Гранична тврдоћа ЗУТ-а у HV             | 350 | 375     | 400    | 450   |

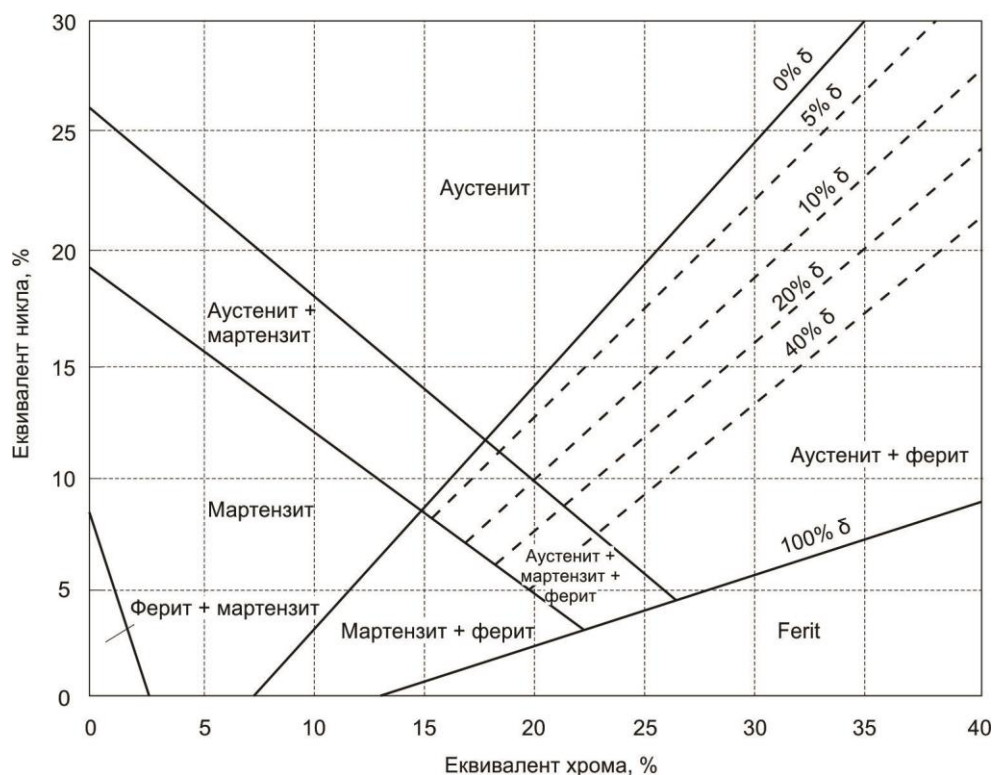
Количина дифундованог водоника у металу шава одређује се одговарајућим пробама, нпр. глицеринским тестом (SRPS C.НЗ.018). Грубо се може усвојити да се садржај дифундованог водоника, за разне поступке заваривања, налази у границама датим у табели 3.2.

Табела 3.2 Садржај водоника у металу шави

| Начин заваривања                                                                                                                                                  | Садржај водоника у ml/100 g           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| У смеси гасова, CO <sub>2</sub> или Ar<br>- чиста жица<br>- прљава жица                                                                                           | 2 - 7<br>6 - 12                       |
| Ручно електролучно<br>- базичне сушене електроде при 400-500°C<br>- базичне несушене електроде<br>- базичне електроде сушене при 100-150°C<br>- рутилне електроде | 3 - 7<br>12 - 20<br>6 - 12<br>20 - 35 |
| Заваривање под троском<br>- чиста жица и сушени прах<br>- прљава жица и несушени прах                                                                             | 5 - 10<br>10 - 25                     |

### 3.1.2 Шефлеров дијаграм

Шефлеров дијаграм (сл. 3.1) се користи за анализу међусобне заварљивости челика различитих физичко-хемијских својстава, као што су самозакаљиви нисколегирани челици, који се заварују аустенитним електродама, или при наваривању челика различитим врстама додатних материјала. Структура метала зава (нава) не зависи само од својстава основног и додатног материјала, већ и од степена њиховог мешања, јер су у питању хетерогени спојеви.



Слика 3.1 Шефлеров дијаграм

При заваривању, нисколегираних самозакаљивих челика аустенитним електродама појављује се неколико проблема: склоност аустенитног додатног материјала ка појави топлих прслина око солидус температуре; појава дифузије хемијских елемената, посебно угљеника, из основног материјала; образовање кртих карбида, зато што је садржај угљеника у основном материјалу знатно већи него у завару (навару). Склоност ка појави топлих прслина умањује се феритном структуром са 4-7%  $\delta$ -ферита. Већи садржај ферита није пожељан, јер утиче на смањење пластичности аустенитног завара (навара). Степен мешања рачунски се одређује из Шефлеровог дијаграма и бира аустенитна електрода која даје завар (навар) са максимално 5-10%  $\delta$ -ферита.

Иако је Шефлеров дијаграм намењен за избор додатних материјала да би се добили хетерогени спојеви, успешно се примењује и при добијању хомогених спојева легираних Cr-Mo и високолегираних Cr-Ni челика. За случај хомогених спојева не израчунава се степен мешања, јер он не утиче битније на хемијски састав метала завара (навара). Хром-молибденови челици се заварују (наварују) електродама истог типа и својстава као и основни материјал (хомоген спој), или аустенитним електродама (хетероген спој), а хром-никлови челици углавном се заварују (наварују) само електродама истог типа као и основни материјал (хомоген спој). При заваривању, односно наваривању аустенитних челика јављају се најмање три проблема: због мање термичке проводности и већег коефицијента линеарног термичког ширења, него код угљеничних челика, јавља се велико сопствено напонско-деформационо стање, па су склони ка појави топлих прслина у завару или навару и зони утицаја топлоте; склони су појави међукристалне корозије због излучивања карбида хрома ( $\text{Cr}_4\text{C}$ ) на границама металних зрна; склони су појави кртости на високим температурама због образовања  $\sigma$ -фазе (кртог једињења Cr-Fe). Једино решење је да се настанак ове фазе спречи, јесте израда навара са ниским садржајем  $\delta$ -ферита (2-4%), што омогућава поуздан рад навариваних спојева у области критичних температура.

За одређивање структуре најпре треба одредити еквиваленте (Ni) и (Cr) помоћу следећих израза:

$$(\text{Ni}) = \text{Ni} + 30\text{C} + 0.5\text{Mn}, \%$$

$$(\text{Cr}) = \text{Cr} + \text{Mo} + \text{Si} + 0.5\text{Nb}, \%$$

Затим се израчунава садржај  $\delta$ -ферита помоћу Сеферијанове формуле:

$$\delta = 3 \cdot [(\text{C}_r) - (\text{C}_r)_c], \%$$

$$(\text{C}_r)_c = 0.93\text{Ni} + 6.7, \%$$

и затим те вредности унети у Шефлеров дијаграм. Одатле се може прочитати структура: мартензитна (М), аустенитна (А), феритна (F) или њихове комбинације. Помоћу Шефлеровог дијаграма бира се додатни материјал одговарајућег хемијског састава који ће обезбедити добијање тражене структуре метала завара.

Шефлеров дијаграм, може се користити и при избору одговарајућих додатних материјала, како би се извело успешно заваривање и других врста нерђајућих челика: феритних, аустенитних, мартензитних и таложно ојачаних.

### 3.1.3 Прорачун температуре предгревања

Већина челика, а нарочито челици повишене јачине, склони су ка појави хладних прслина, па се предузимају мере да се оне спрече. То су углавном односи на примену таквих технологија заваривања које искључују трансформациону кртост. 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. Два последња фактора условљена су конструкционо технолошким решењима, те се на њих не може значајније утицати. Стога, остаје могућност да се избегну структуре каљења при трансформацији аустенита, што се углавном постиже повећањем уноса топлоте (линијске енергије заваривања) или предгревањем, у оба случаја смањује се брзина хлађења при температурној стабилности аустенита. За одређивање температуре предгревања, користе се метод Сеферијана и метод BWRA.

#### 3.1.3.1 Метод Сеферијана

На склоност челика ка појави прслина утиче и брзина хлађења, па се за оцену заварљивости мора узети у обзир и дебљина материјала спајаних елемената. При истим осталим условима, елементи веће дебљине брже се хладе, па су склонији ка појави прслина.

Метода Сеферијана, заснована је на увођењу укупног еквивалентног угљеника, где се поред хемијског састава челика узима у обзир дебљина завариваних елемената и брзина хлађења. За условно заварљиве челике Сеферијан је извео модификовану формулу по којој се израчунава температура предгревања. Ова метода се најчешће користи за оцену заварљивости нисколегираних челика

Брзина хлађења зависи од дебљине делова нпр., за исти основни материјал предгрејан до 200°C, брзина хлађења износи 5°C/s за дебљину од 12 mm и 28°C/s за дебљину од 25 mm. Израз по Сеферијану за укупан еквивалентан угљеник је:

$$[C] = [C]_h + [C]_s,$$

где су:

$$[C]_h = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90}, \%,$$

$[C]_h$ -хемијски еквивалентан угљеник,

$$[C]_s = 0.005 \cdot s \cdot [C]_h, \text{ mm},$$

$[C]_s$ - еквивалентни угљеник дебљине s у mm,

$$[C] = [C]_h + (1 + 0.005 \cdot s), \%,$$

За условно заварљиве челике прорачун температуре предгревања по Сеферијану:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0.25}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### 3.1.3.2 Метод BWRA (British Welding Research Association)

Одређивање температуре предгревања по методи BWRA је знатно сложеније од методе по Сеферијану. Ова метода полази од хемијског састава челика (CE), фактора облика споја (BTS) и параметара REL заваривања који се односе на заваривање рутилним или базичним електродама различитих пречника.

У табели 3.3 су дати показатељи заварљивости. У табели је такође приказана формула за израчунавање CE. Израчунатој вредности CE, зависно од типа облоге, додаје се показатељ заварљивости (A, B, C, D, E, F, G).

**Табела 3.3 Показатељи заварљивости**

| Еквивалентни угљеник $CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}, \%$ |                                | Показатељ заварљивости |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Заваривање рутилном електродом                                                             | Заваривање базичном електродом |                        |
| $\leq 0.20$                                                                                | $\leq 0.25$                    | A                      |
| $0.21 \div 0.23$                                                                           | $0.26 \div 0.30$               | B                      |
| $0.24 \div 0.27$                                                                           | $0.31 \div 0.35$               | C                      |
| $0.28 \div 0.32$                                                                           | $0.36 \div 0.40$               | D                      |
| $0.33 \div 0.38$                                                                           | $0.41 \div 0.45$               | E                      |
| $0.39 \div 0.45$                                                                           | $0.46 \div 0.50$               | F                      |
| $> 0.45$                                                                                   | $> 0.50$                       | G                      |

Утицај облика завареног споја и дебљине делова у споју на брзину одвођења топлоте, изражава се бројем термичке строности (BTS).

$$BTS = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{s_1}{6} + \frac{s_2}{6} + \dots + \frac{s_n}{6} \right) \cdot BTS_{2-4},$$

где су:  $BTS_{2-4}$  – број смерова одвођења топлоте ( $BTS_{2-4} = 2$  – за двосмерно,  $BTS_{2-4} = 3$  – за тросмерно и  $BTS_{2-4} = 4$  – за четворосмерно одвођење топлоте),

$s_1, s_2, \dots, s_n$  – дебљине лимова у завареном споју у mm (база  $s = 6$  mm),

$n$  – број делова у завареном споју.

**Напомена:** Израчунато BTS се заокружује на први већи цео број.

На основу BTS, показатеља (индекса) заварљивости и пречника електроде, одређује се температура предгревања из одговарајућих табела.

### 3.1.3.3 Оцена температуре предгревања према јапанским ауторима

По аналогiji са формулом еквивалентног угљеника, предложена је од стране јапанских аутора (Ito и Bessyo) показатељ склоности нисколегираних челика ка стварању хладних прелина при заваривању:

$$P_C = CE + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \%$$

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

где је:

CE – показатељ којим се узима у обзир утицај хемијског састава челика (основног материјала) и који се израчунава у зависности од процентуалног садржаја легирајућих елемената по формули:

$$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B, \%,$$

где је:

s – дебљина челика у mm,

H – количина дифундованог водоника у cm<sup>3</sup>/100 g метала шава измерен јапанском глицеринском методом (или методом живе).

Осим наведених параметарских једначина, у литератури се може наћи и следећа једначина:

$$P_{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0.0024 \cdot s, \%,$$

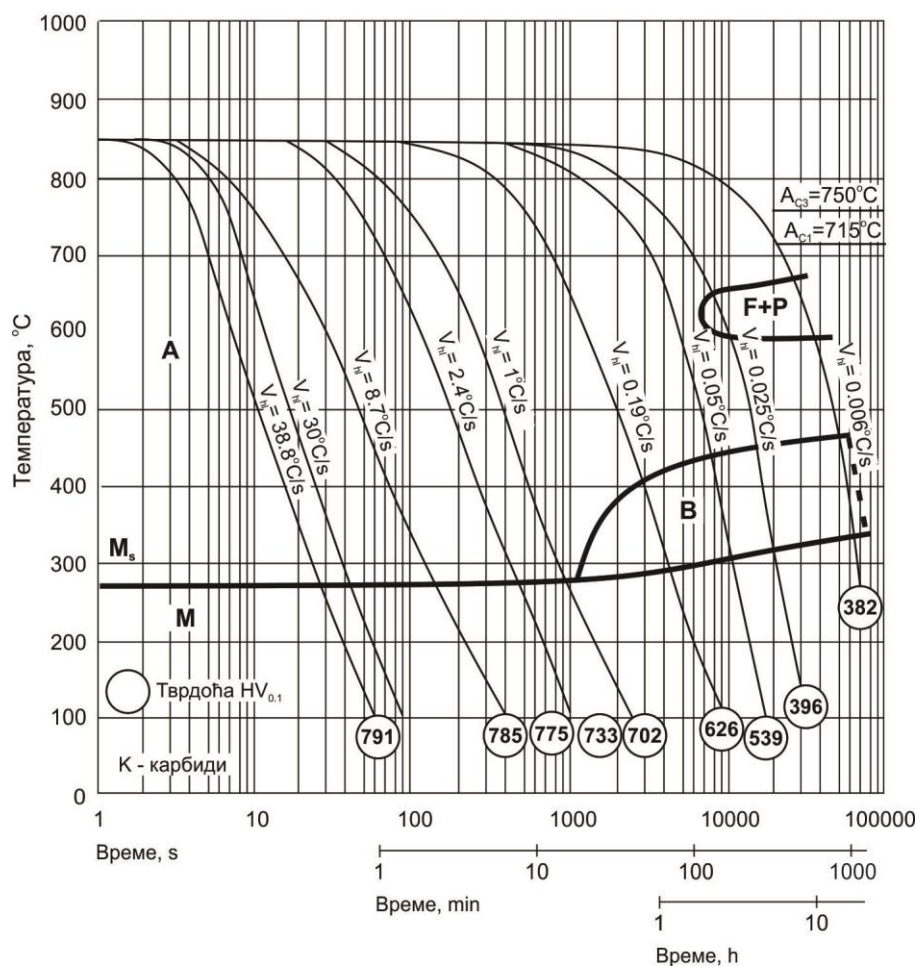
Предгревање, ради спречавања појаве хладних прслина, препоручује се ако су вредности израчунате према параметарским једначинама P<sub>C</sub>, P<sub>w</sub>, P<sub>CE</sub> веће од 0.3. Потребна температура предгревања би била:

$$T_p = 1440 \cdot P_C - 392, ^\circ C.$$

### 3.1.4 Дијаграми континуалног хлађења

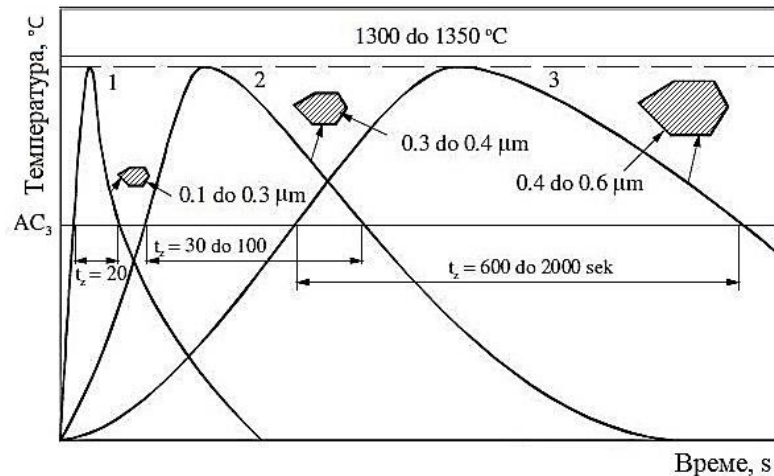
Дијаграми континуалног хлађења (КН-дијаграми), се користе при разматрању заварљивости различитих конструкционих челика код којих се морају узети у обзир утицаји температурских циклуса на структуру и тврдоћу у зони утицаја топлоте. Температурски циклус било које тачке ове зоне одређен је брзином загревања, максималном температуром, временом загревања изнад одређене температуре и брзином хлађења. Дијаграми континуалног хлађења добијају се у специјализованим металуршким лабораторијама. КН дијаграми приказују се у полулогаритамском координатном систему температура - време (логаритамска подела) или температура - време хлађења t<sub>8/5</sub>. Време t<sub>8/5</sub> је време хлађења од 800 до 500°C и у логаритамској подели се наноси на апсцисну осу. У самом дијаграму дају се линије које ограничавају поједине структурне фазе (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од времена t<sub>8/5</sub>.

Дијаграм (сл. 3.2) показује разлагање потхлађеног аустенита при различитим брзинама хлађења које одговарају различитим температурским циклусима.



Слика 3.2 Дијаграм континуалног хлађења челика X37CrMoV5-1

Параметри температурског циклуса могу се прорачунати применом одговарајућих математичких израза или читавањем са експериментално добијеног дијаграма температурског циклуса. Сви параметри температурског циклуса су важни за оцену заварљивости, а време задржавања је изузетно битно, јер показује утицај различитих температурских циклуса, односно примењеног начина и технологије заваривања или наваривања, на величину аустенитних зрна (сл. 3.3). Код неких врста челика повишене јачине време задржавања изнад одређене температуре ( $A_{C3}$ ) мора се ограничити да би се у зони утицаја топлоте спречила деградација корисних својстава материјала добијених сложеним поступцима термомеханичке обраде (нпр. ТМО-челици).



**Слика 3.3** Утицај различитих температурских циклуса и технологије заваривања на величину аустенитних зрна: 1 - електролично заваривање челика дебљине испод 10 mm; 2 – заваривање под прахом челика дебљине 15 до 20 mm; 3 – заваривање под троском челика дебљине 100 до 200 mm;  $t_z$  – време задржавање изнад  $A_{C3}$

При равнотежном хлађењу аустенита до перлитне температуре његова слободна енергија постаје једнака слободној енергији нискотемпературних фаза (ферит и цементит). Трансформација аустенита у реалним условима може настати само уз мање или веће потхлађивање (испод  $A_{C1}$ ), што га чини метастабилним и склоним да се брже промени у стабилнију перлитну структуру чије компоненте имају мању слободну енергију него аустенит.

Код дијаграма континуалног хлађења, најмања брзина хлађења даје феритно перлитну структуру код подеутектоидног челика, а код наеутектоидног челика феритно цементитну структуру. Уколико је брзина хлађења нешто већа добија се бејнитно мартензитна структура, док при брзинама већим од критичне структура ће бити чисто мартензитна.

Оцена заварљивости конструкционих челика, применом дијаграма континуалног хлађења, доноси се тако што се прво, израчуна време хлађења  $t_{8/5}$  на бази граничне дебљине лима, или на основу формуле јапанских аутора (Ito-Bessyo). Добијени резултат времена хлађења уноси се у дијаграм, уцртава крива брзине хлађења и читава очекивана структура и тврдоћа у најкритичнијој зони утицаја топлоте испод корена навара, где је највиша температура и највећа брзина хлађења. Формула јапанских аутора поред задовољавајуће тачности, далеко је једноставнија за примену, јер не садржи арбитрарне променљиве које се понекад бирају према личној процени, и не узима у обзир граничну дебљину основног материјала.

Поред процене заварљивости конструкционих челика, дијаграми континуалног хлађења још омогућавају: избор бољег основног материјала од више расположивих, према траженим својствима (тврдоћа, жилавост, отпорност на хабање и др.), преко граничног времена  $t_{8/5}$ , које одговара чисто мартензитној структури; прорачун режима заваривања различитих основних материјала ( $q$ ,  $T_p$ ) усвајањем времена хлађења  $t_{8/5}$  из дијаграма које даје тражену структуру; израчунавање погонске енергије и других параметара заваривања садржаних у једначини за израчунавање времена хлађења  $t_{8/5}$ .

### 3.1.4.1 Прорачун времена хлађења

Време хлађења може се одредити експериментално или се прорачунава за критичне тачке испод кореног завара (највиша температура, највећа брзина хлађења).

*Прорачун времена хлађења  $t_{8/5}$  на бази граничне дељине лима ( $t_{8/5} = f(s_{gr})$ )*

- за танке лимове, дебљине ( $s < s_{gr}$ )

$$t_{8/5} = \frac{q_1^2 \cdot N_2}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot s^2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \text{ и}$$

- за дебеле лимове ( $s > s_{gr}$ )

$$t_{8/5} = \frac{q_1 \cdot N_3}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right],$$

где су:

$\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  - термофизичке константе основног материјала;

$N_2$  и  $N_3$  - фактори облика споја.

**Табела 3.4** Коефицијент искоришћења топлоте

| Поступак заваривања | REL       | EPP | MAG  | MIG  | TIG  |
|---------------------|-----------|-----|------|------|------|
| $\eta$              | 0.9 и 0.8 | 1.0 | 0.85 | 0.75 | 0.65 |

Термофизичке константе материјала у горњим изразима треба узети за средњу вредност температурског интервала 800 до 500°C, тј. за 650°C, будући да се оне мењају са температуром. За угљеничне, нисколегиране и финозрне челике препоручују се следеће вредности:

$$\rho = 7.60-7.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

$$\lambda = 0.25-0.35 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

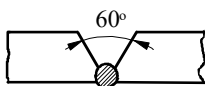
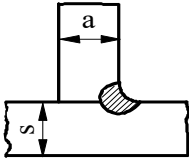
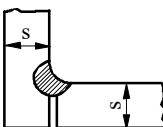
$$c = 0.75-0.90 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

За лакши избор ових константи, према затезној чврстоћи основног материјала ( $R_m$ ) и температуре, могу послужити подаци дати у табели 3.5.

**Табела 3.5** Вредности неких термофизичких константи

| Затезна чврстоћа челика $R_m$ , МПа                                                            |                                    | <500 | >500 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------|------|
| $\lambda$ , $\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$      | $\Delta T = 800-500^\circ\text{C}$ | 0.35 | 0.3  |
|                                                                                                | $T = 300^\circ\text{C}$            | 0.5  | 0.38 |
| $\rho \cdot c$ , $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ | $\Delta T = 800-500^\circ\text{C}$ | 6.0  | 5.0  |
|                                                                                                | $T = 300^\circ\text{C}$            | 4.0  | 4.0  |

Фактори облика споја се уводе како би се у обзир узела позната емпиријска чињеница да брзина хлађења завареног споја зависи како од дебљине завариваних делова тако и од типа завареног споја (сл. 3.4). Тако је на пример брзина хлађења угаоних шавова већа за 40% од сучеоних при једнаким осталим условима (исте дебљине, погонске енергије и др).

| Тип завареног споја                                                                 |     |      | N <sub>2</sub> | N <sub>3</sub> |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|----------------|----------------|
|    |     |      | 1.0            | 1.0            |
|    |     |      | 0.6            | 0.6            |
|    |     |      | 1.5            | 1.5            |
|    |     |      | 0.9            | 0.9            |
|    |     |      | 0.75           | 0.75           |
|   | a/s | 0.25 | 0.45÷0.67      | 0.97           |
|                                                                                     |     | 0.50 |                | 0.89           |
|                                                                                     |     | 0.75 |                | 0.78           |
|                                                                                     |     | 1.00 |                | 0.67           |
|  |     |      |                | 0.67           |

Слика 3.4 Фактори облика завареног споја

Гранична дебљина или прелазна дебљина између танких и дебелих лимова условљена је променом начина одвођења топлоте од два у три смера (двосмерно и тросмерно одвођење топлоте). Двосмерно одвођење топлоте односи се на танке лимове и усваја се да је температура константна по целој дебљини материјала ( $\partial T / \partial z = 0$ ). Супротно томе, код дебелих лимова, температура се мења и по дебљини ( $\partial T / \partial z \neq 0$ ). Гранична дебљина се одређује према изразу:

$$s_{gr} = \sqrt{\frac{q_1 \cdot N_3}{2 \cdot \rho \cdot c} \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)}.$$

Претходни израз показује да, за дати основни материјал, гранична дебљина зависи од погонске енергије заваривања ( $q_1$ ), типа завареног споја ( $N_3$ ) и почетне температуре завариваних делова ( $T_0$ ).

Прорачун времена хлађења  $t_{8/5}$  на основу формуле јапанских аутора.

$$t_{8/5} = \frac{k \cdot q_1^n}{\beta \cdot (T_{sr} - T_0)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left( \frac{s - s_0}{\alpha} \right) \right]}, s,$$

где су:

$q_1$  – погонска енергија заваривања у J/cm;

$T_0$  – почетна температура

Остали подаци неопходни за прорачун времена  $t_{8/5}$  дати су у табели 3.6. Једначине за прорачун времена хлађења може се користити и за:

- Одређивање структуре у најкритичнијој области ЗУТ-а, уношењем времена  $t_{8/5}$  у KHZ дијаграм. Исто тако се може изабрати основни материјал између више расположивих према нпр. траженој структури или пак максималној тврдоћи (ако се тражи отпорност на хабање).
- Прорачун режима заваривања ( $q_1$ ,  $T_p$ ) који омогућује добијање заварених спојева тражене структуре. У ствари, из KHZ дијаграма усваја се време  $t_{8/5}$  које одговара траженој структури (мартензитној, мартензитно-бејнитној, бејнитној), па се затим из једначине за  $t_{8/5}$  израчунава погонска енергија заваривања као једина непозната величина.

**Табела 3.6** Параметри неопходни за примену једначине за прорачун времена хлађења  $t_{8/5}$

| Метод заваривања      |             | k                        | n          | $s_0$ | $\alpha$ | $T_{sr}$ | $\beta$             |              |
|-----------------------|-------------|--------------------------|------------|-------|----------|----------|---------------------|--------------|
|                       |             | -                        | -          | mm    | -        | °C       | Сучеои спој и навар | Угаони завар |
| REL заваривање        |             | 1.35                     | 1.5        | 14.6  | 6        | 600      | 1                   | 2            |
| MAG поступак          |             | $\frac{1}{2.9}$          | 1.7        | 13    | 3.5      | 600      | 1                   | 1.7          |
| Заваривање под прахом | $s < 32$    | $\frac{9.5}{10^5 - 0.2}$ | 2.5-0.05·c | 12    | 3        | 600      | 1                   | -            |
|                       | $s \geq 32$ | 950                      | 0.95       | 12    | 3        | 600      | 1                   | -            |

Као помоћни критеријум за процену насталих структурних промена одређује се код микролегираних челика повишене јачине и брзина хлађења при 300°C и упоређује се са критичном брзином хлађења. Ако је стварна брзина хлађења већа од критичне добија се чисто мартензитна структура, а ако је мања онда се добија мартензитно-бејнитна или чисто бејнитна структура.

### 3.1.4.2 Одређивање брзине хлађења

Брзина хлађења у температурном интервалу 150-200°C везана је за „критичну брзину хлађења“ и пресудна је за појаву прслина.

Брзина хлађења за масивно тело, може се израчунати према изразу:

$$\vartheta_h = 2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot \frac{(T - T_0)^2}{q_l}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}.$$

При заваривању танке плоче, брзина хлађења се може израчунати према следећем изразу:

$$\vartheta_h = 2 \cdot \pi \cdot \gamma \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \cdot \frac{(T - T_0)^3}{q_l^2}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}.$$

При полагању завара на плочу веће дебљине или при наношењу појединх завара код вишеслојног заваривања, брзина хлађења се може одредити следећим изразом:

$$\vartheta_h = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{q_l}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{s}}.$$

Корисно је одредити брзину хлађења у подручју најмање стабилности аустенита, карактеристичне за сваки челик. У пракси се за одређивање брзине хлађења узима да  $T_k$  одговара аритметичкој средини горње и доње границе најмање стабилности аустенита, односно:

$$T_k = (800 + 500) = 650^\circ\text{C}.$$

Брзина хлађења се може одредити и графички када постоји синимљен температурски циклус заваривања. Брзина хлађења у овом случају се може одредити за сваку тачку и по потреби кориговати температурски циклус (променом енергетских параметара или предгревањем).

Како се процес заваривања одвија у неравнотежним условима загревања и хлађења, само математички прорачун брзине хлађења није довољан да би се успешно предвиделе структуре у одрођеним зонама. Односно, може се рећи да није довољно да се познаје хемијски састав основног материјала и његове структурне промене при загревању и хлађењу, да би се предвидела коначна структура ЗУТ-а. Зато се конструишу одговарајући КН дијаграми обављањем дуготрајним и скупоценим испитивањем појединих материјала.

Структуре каљења, мартензитне или бејнитне трансформације су неповољне структуре, потребно је да се предузму одређене мере како би се смањила брзина хлађења и на тај начи добила повољнија структура. Из претходних математичких израза може се видети да корекција брзине хлађења се може остварити повећањем почетне температуре тела (предгревање) и повећањем уноса топлоте. Ове мере спадају у технолошке мере, које се примењују у циљу добијања повољније структуре ЗУТ-а.

Прорачун стварне брзине хлађења при 300°C може се извести по обрасцу Котрела (Cottrel) или према изразима добијеним решавањем парцијалне диференцијалне једначине простирања топлоте.

По обрасцу Котрела најпре се израчунава фактор облика споја (N), а затим брзина хлађења при 300°C:

$$\vartheta_h = \left( \frac{122 \cdot q_l}{10^6 \cdot N} + 0.05 \right)^{-2}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1},$$

где је:

$q_l$  - погонска енергија заваривања,

$N = \frac{8 \cdot s}{25.4}$  - за сучеои (двотермални) спој,

$N = \frac{12 \cdot s}{25.4}$  - за угаони (тротермални) спој,

s - дебљина лима у mm.

Приликом прорачуна брзине хлађења на основу аналитичких изведених изрза полази се од параметара  $P_x$  којим се процењује да ли су лимови танки или дебели:

$$P_x = \rho \cdot c \cdot s^2 \cdot \frac{T_k - T_0}{q_l \cdot N_3}.$$

Вредност  $P_x > 0.90$  односе се на дебеле лимове за које је:

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Вредност  $P_x < 0.33$  односе се на танке лимове за које је:

$$\vartheta = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \cdot \frac{(T_k - T_0)^3}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}.$$

За лимове средње дебљине вредност  $R_h$  је између 0.33 и 0.90, а брзина хлађења је:

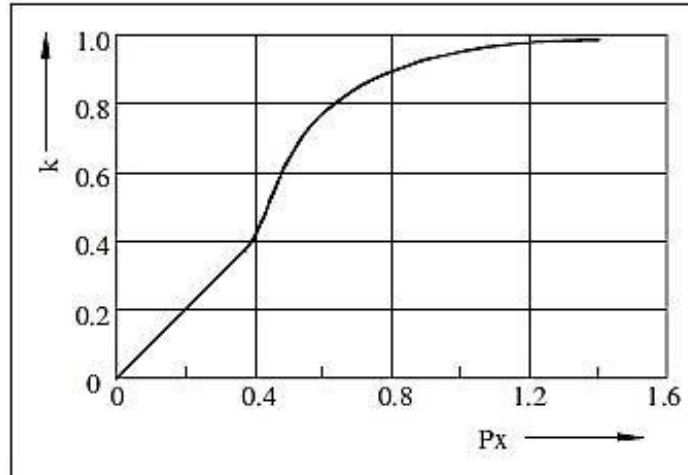
$$\vartheta = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1},$$

где је:

$N_2$  и  $N_3$  – фактори облика споја,

$T_k = 300^\circ\text{C}$  при процени дебљине лима или  $T_k$  = температура најмање стабилности аустенита ако се одређује критична брзина хлађења и

k – корекциони коефицијент.



**Слика 3.5** Дијаграм  $k = f(P_x)$  за прорачун брзине хлађења лимова средње дебљине

Највећа тврдоћа се добија при кратком времену хлађења, а са порастом тог времена тврдоћа опада, све док не постигне релативно константну вредност. Јасно је да тврдоћа у структурној области чистог мартензита ( $HV_{Ms}$ ) и чистог бејнита ( $HV_B$ ), не зависи од времена  $t_{8/5}$ , док у области мешовите мартензитно-бејнитне структуре тврдоћа скоро линеарно опада са порастом времена  $t_{8/5}$ . У чисто мартензитној области (100%  $M_s$ ) тврдоћа зависи само од садржаја угљеника у челику и одређује се следећом једначином:

$$HV_{Ms} = 802 \cdot C + 305.$$

Док у области чисто бејнитне структуре (100%  $B$ ), поред угљеника на тврдоћу утичу и други легирајући елементи:

$$HV_B = 350 \cdot CE + 101.$$

Тврдоћа области са мартензитно-бејнитном структуром ( $0\% < M_s < 100\%$ ) зависи не само од хемијског састава челика већ и од времена  $t_{8/5}$ :

$$HV_X = 2019 \cdot \left[ C \cdot \left( 1 - 0.5 \cdot \log_{\frac{t_8}{5}} \right) + 0.3 \cdot CE \right] + 66 \cdot \left( 1 - 0.8 \cdot \log_{\frac{t_8}{5}} \right).$$

Најчешће се при заваривању тежи да се у зони око шави добије мешовита мартензитно-бејнитна структура. Која ће структура, за усвојени режим заваривања и прорачунату температуру предгревања, стварно бити добијена може се проверити упоређивањем тврдоћа  $HV_{Ms}$ ,  $HV_B$  и  $HV_X$ .

Само ако је испуњен услов  $HV_B < HV_X < HV_{Ms}$  онда је добијена пожељна мешовита структура јер је у том случају  $t_{8/5} > t_{100}$ .

### 3.2 Експерименталне методе за оцену заварљивости челика

Одређивање заварљивости експерименталним (практичним) методама заснива се на прорачуну појаве прелина у завареном споју и то:

- у току процеса,
- непосредно после процеса и
- после одређеног времена ( $\sim 48$  сати).

Процена заварљивости применом практичних метода је проширена и на испитивање појава прслина услед накнадног загревања (термичке обраде), као и на одређивање напона при коме долази до појаве прслина. Напонско–деформационо стање је главни узрок настајања хладних прслина. Критеријуми за оцену заварљивости, односно способности материјала да се одупру настајању прслина могу бити различити, а заснивају се на одређивању критичне деформације у функцији температуре при заваривању.

Постоје велики број практичних метода за испитивање заварљивости и све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног узорка. Степен насталих промена утврђује се познатим методама испитивања (затезањем, савијањем, мерењем тврдоће, жилавости и тсл.), пре и после термичког дејства, а по потреби се металографски испитују шав и околина.

*Пробе склоности ка лому (топлом и хладном).*

Ове врсте проба имају велики значај и најзаступљеније су при освајању нових метода и поступака заваривања. Највећу примену имају пробе склоности ка појави хладних прслина, јер се при испитивању може узети у обзир и утицај параметара заваривања тј. уноса топлоте. Пробе хладног лома, тј. пробе склоности ка хладним прслинама, деле се на две групе:

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

У групи 2 разликују се:

- Пробе са самоукљештењем које се изводе погодном монтажом елемената пробног споја тако да долази до самоукљештења шави или споја и
- Пробе са насилним укљештењем помоћу посебних алата и уређаја којима се елементи споја фиксирају. При томе, код неких проба постоји могућност промене степена укрућења или брзине хлађења односно термичке строгости.

*Пробе са диригованим напрезањем.*

Пробе са диригованим напрезањем примењују се за оцену склоности ка хладном лому после заваривања, тако што се епрувете одмах након заваривања излажу дејству спољашњих оптерећења. Предност ових проба је свакако могућност избора врсте и величине оптерећења, које највише утичу на хладни лом.

*Пробе симулирањем термичких циклуса.*

Ова врста проби се изводе на симулаторима и по методи BWRA. У симулаторима се пробни незаварени узорци излажу загревању и хлађењу, према циклусима који копирају заваривачке температурске циклусе у појединим тачкама различито удаљеним од осе шави.

Испитивање по методи BWRA користи технику која се заснива на загревању узорка у пећима до 950°C и затим хлађењу, након чега се врши испитивање узорка затезањем и/или ударним затезањем. Неке од практичних метода за испитивање дате су у табели 3.7.

Табела 3.7 Преглед практичних проби за оцену заварљивости челика

| Критеријум            |                   | Врста пробе                        | Назив пробе                                                             | Оцена                                 |
|-----------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Склоност ка прслинама | Хладним           | Самоукурђене                       | CTS, крстаста, Fisco, Tekken, кружна                                    | Прслине се појављују или не појављују |
|                       |                   | Са регулисаним напоном             | TRC, RRC, IMPLANT, LTP                                                  |                                       |
|                       |                   | Са симулираним техничким циклусима | - BWRA и имитација загревања:<br>- електричним отпором,<br>- индукцијом |                                       |
|                       | Топлим            | Укрућена                           | Tekken, Fisco, кружна                                                   |                                       |
|                       |                   | Са регулисаним напоном             | Varestraint, Bauman                                                     |                                       |
|                       | Ламеларним        | - металографска<br>- механичка     | Испитивање затезањем у правцу дебљине лима                              |                                       |
|                       | Жарења            | Изотермичка краткотрајног течења   | -                                                                       |                                       |
| Механичка својства    | Тврдоћа           | Мерење тврдоће                     | Метод Викерс                                                            | $HV < HV_{max}$                       |
|                       | Својства чврстоће | Испитивање затезањем               | Затезање                                                                | $R_m^{OM} \approx R_m^S$              |
|                       | Ударна жилавост   | Испитивање жилавости               | Метод Шарпи                                                             | Прелазна температура                  |

На основу резултата аналитичке процене заварљивости и њене провере применом практичних проба, може се донети оцена о заварљивости и могу се предложити мере да се она побољша. То јест, критичне величине усвојеног показатеља заварљивости (тврдоћа, жилавост, прслине и тсл.) могу се остварити заваривањем:

- Без посебних мера, када је материјал добро заварљив,
- Са применом посебних мера, када је материјал условно заварљив и
- Са применом таквих мера које су неоправдане са техно-економске тачке гледишта за случај да је материјал тешко заварљив.

### 3.2.1 Методе за испитивање настанка хладних прслина

Методе испитивања склоности челика према настанку хладних прслина при заваривању можемо поделити на директне и индиректне. Директне су оне методе које се спроводе на узорцима заварених спојева и/или завареним спојевима на завареној конструкцији, док се индиректне методе испитују на различитим експериментално добивеним једначинама за процену утицаја разних фактора на појаву прслина.

Директна испитивања могу се поделити у три групе:

- испитивање са стварним заваривањем уз сопствену крутост (Tekken, Lehigh, CTS, пробе с кружним зарезом RD) и пробе са спољашњим додатним оптерећењем (нпр. TPC, RRC и др.),

- испитивање са реалним циклусом или уложеним узорком (уметак или имплант) и
- испитивање симулирањем циклуса заваривања.

Критеријум оцене склоности хладним прслинама може бити:

- квалитативан, након истраживања заварљивости доноси се закључак да је материјал „склон“ или „није склон“ појави хладних прслина и
- квантитативан, ако се може нумерички исказати нека од релевантних величина (нпр. максимална напрезања при којима не долази до настајања хладних прслина)

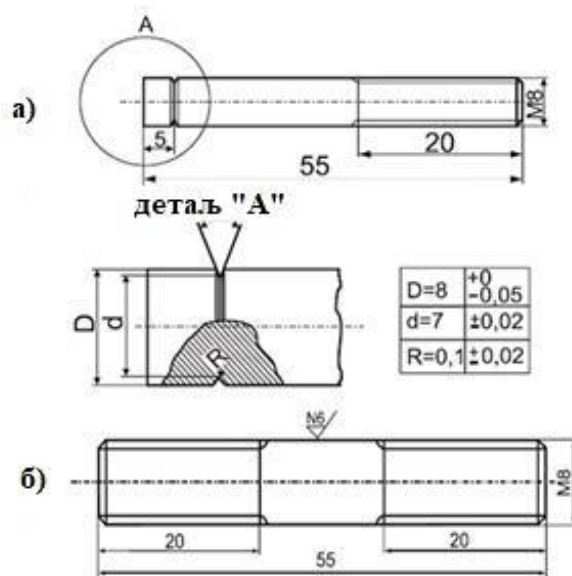
### 3.2.1.1 Implant метода

Испитивање настанка хладних прслина Implant методом се одликује:

- једноставност извођења експеримента,
- узорак пролази кроз све топлотне циклусе као и основни материјал,
- поступак предгревања и накнадне термичке обраде исти је као и код заваривања у реалним условима и
- из малог узорка могуће је скупити велику количину података (критично напрезање, изглед зоне зава са зоном утицаја топлоте и металом зава, микроанализу узорка итд.).

Испитивање заварљивости овом методом заснива се на промени утицајних фактора, као што су: додатни материјал, термички циклус, температура предгревања, удео дифундованог водоника, напрезање и тсл., као и сагледавање њиховог утицаја на настанак хладних прслина.

При овом испитивању употребљава се обрађени цилиндрични уметак од челика који треба испитивати (сл. 3.6). Такав уметак се позиционира у калибрисану рупу избушену у потпорној плочи, тако да је зарезани крај у равни са површином плоче.



Слика 3.6 Димензије и облик испитне епрувете (импланта) за испитивање а) изглед зареза б) стварни изглед узорка

Implant узорак има нарезан навој са обе стране (сл. 3.7), па се као такав полаже у отвор на основној плочи где навој има функцију многоструких зареза који делују као концентратори напрезања.



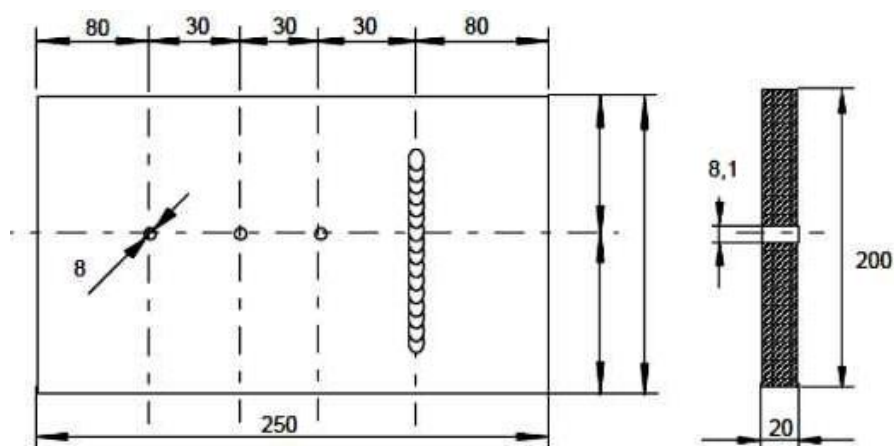
**Слика 3.7** *Implant узорак са обостраним навојем*

Навој на другом крају епрувете користи се за причвршћивање на уређај за испитивање. Након позиционирања радног комада и пиштоља за заваривање са контролисаном удаљеношћу млазнице од раног комада у износу од 15 mm, полаже се завар на испитној плочи. Завар иде преко плоче и прелази преко узорка заварујући га тако на положену плочу. Затим је потребно оптеретити узорак са одређеном силом, која се одређује према граници развлачења и затезној чврстоћи основног материјала.

На слици 3.8 приказан је навар на плочи, помоћу којег ће се испитивати разлог настанка хладних прелина у завареном споју, док слика 3.9 приказује шему плоче за испитивање хладних прелина.



**Слика 3.8** *Приказ навара на плочи*

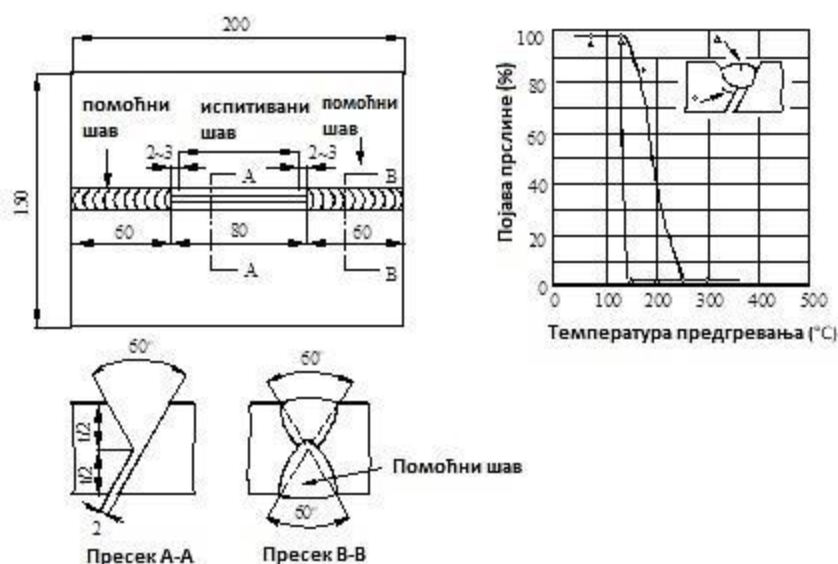


Слика 3.9 Изглед испитне плоче по Implant методи

Урези на завару настали због напрезања, имају облик спирале, које настаје у ЗУТ-у. Испитивање прслине преко Implant методе, најповољније је код испитивања HSLA<sup>6</sup> челика.

### 3.2.1.2 Tekken метода

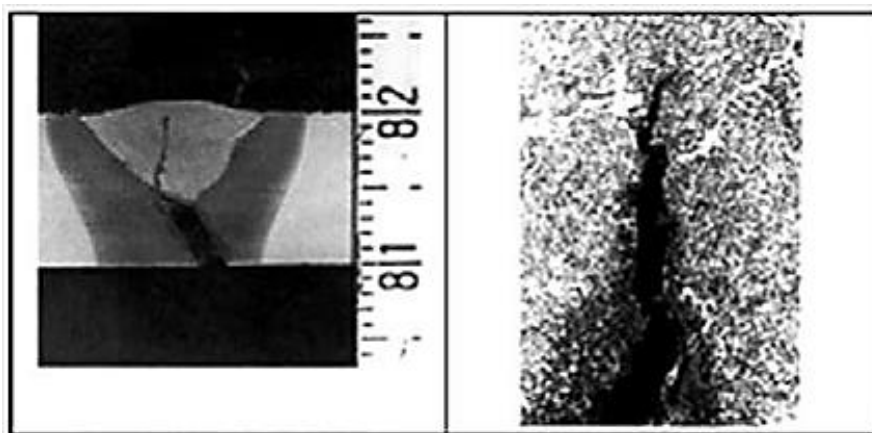
Ова метода испитивања може се користити као технолошко испитивање при поступку електролучног заваривања и заваривања под прашком. Испитивањем добијамо квантитативне показатеље, тј. има или нема прслина уз одређену технологију и услове заваривања. Испитивање се најчешће користи при избору параметара заваривања коренског пролаза сучеоних спојева. Облик, припрема и димензије узорка за испитивање по Tekken методи, приказани су на слици 3.10.



Слика 3.10 Tekken метода

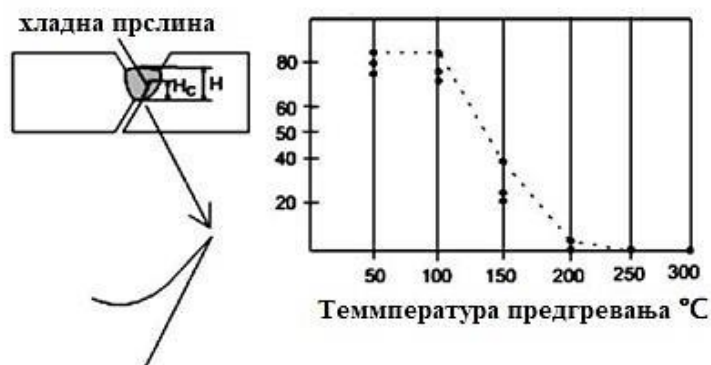
<sup>6</sup> HSLA (eng. High-strength low-alloy steel), микрелегирани челик или ситнозрни микрелегирани челик повишене јачине.

Прслине се најчешће јављају у подручју линије стапања метала завара. Узорак се најчешће припрема од две међусобно заварене плоче, при чему зазор споја треба бити 2 mm. При овом испитивању јављају се три типа прслина. То су прслине које настају на прелазној зони доњег дела коренског споја, на страни Х припреме испитног споја. То су типичне хладне прслине, чији је главни узрок настанка водоник (сл. 3.11), па се шире до ЗУТ-а и могу се вратити натраг до метала завара.



Слика 3.11 Хладна прслина узрокована водоником - Теккен метода

Следећа фаза спровођења Теккен методе је анализа параметра прслине, односно величине прслине и висине завара. Испитивање се оцењује анализом пет узорака, од којих су два из почетног и завршног кратера. Из ових анализа се одређује учесталост појаве прслина по дужини узорка у зависности од параметара заваривања (нпр. температура предгревања). На слици 3.12 је приказана је Теккен метода испитивања.



Слика 3.12 Испитивања склоности хладним прслинама по Теккен методи

Да би се прихватио параметар заваривања попут температуре предгревања потребно је успешно заварити без настанка прслина три узорка. Утицајни параметри за избегавање прслина су: садржај водоника у металу завара, температура предгревања и унос топлоте.

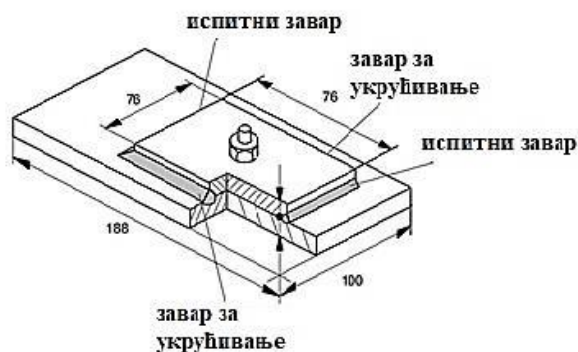
Процедура извођења Теккен методе је следећа:

- прво се заваре помоћни завари, а тек онда испитни завар - помоћним заварима плоча је укрупњена (нема стезања нити растезања),
- епрувету је потребно оставити 48 сати и након тога се испитује,

- испитивање се прво врши визуалним прегледом, затим пенетрантским течностима, а затим се завар сече на три места, раде се избруски и посматрају се микроскопом и
- у зависности о дубине и висини прслина доноси се закључак о склоности према хладним прслинама.

### 3.2.1.3 CTS метода

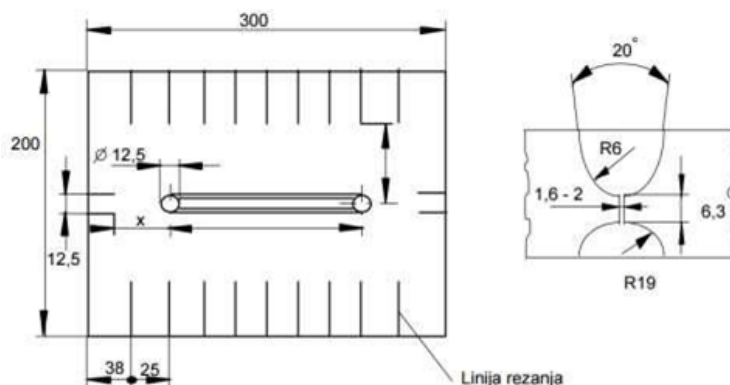
CTS метода (*енгл.* Control Thermal Severitu) је метода која је практична за погонска испитивања склоности угаоних заварених спојева према хладним прслинама. Ова метода симулира различите моделе вођења топлоте. Између плоча (сл. 3.13) се постави нпр. подложна плочица, па се осетљивост методе на хладне прслине значајно повећава. Прво се изводе завари за укрупњење, који су нешто дебљи од испитних. Након заваривања и потпуног хлађења, врши се одговарајуће исецање узорака и микроскопска анализа заварених спојева.



Слика 3.13 Пример испитивања заварљивости помоћу CTS методе

### 3.2.1.4 Lehigh метода

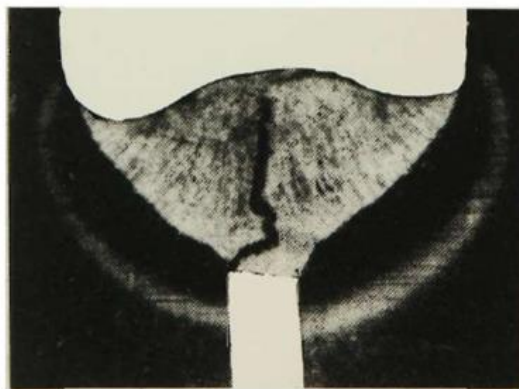
Lehigh метода је још једна од метода помоћу које се добија квалитативна оцена заварљивости. Шема Lehigh методе је приказана на слици 3.14.



Слика 3.14 Шема испитивања заваара помоћу Lehigh методе

Испитивање челика високе чврстоће, може се радити преко свих метода, али код примене Lehigh методе, може се из насталих прслина у попречном пресеку закључити да

је Lehigh метода испитивана пожељнија метода него Tekken, из разлога што су у завару шава боља својства након испитивања, што се тиче челичне испитне плоче. Овај закључак, темељи се на посматрању да се код Lehigh методе прслина догодила готово у самом шаву завара (сл. 3.15).



Слика 3.15 Приказ пресека прслине у завару код Lehigh методе испитивања

Lehigh метода се користи за одређивање следећих фактора који могу узроковати настанка хладних прслина:

- садржај водоника у електроди,
- хемијски састав код загревања у металу завара и
- унос топлоте (микроструктура).

### 3.2.2 Методе за испитивање настанка топлих прслина

Топле прслине, су интеркристалног типа и настају за време хлађења у температурском подручју непосредно испод солидус температуре (за челик 800–900°C). Ако се ове прслине појаве у металу шава - зову се *кристализационе*, а ако се појаве у ЗУТ-у - зову се *ликвационе*.

Настају због присуства лакотопљивих укључака као што су нпр. сулфид гвожђа, или чврсти укључци који имају мало или нимало пластичности на високим температурама. Прслине се јављају у деловима завара који се последњи хладе. Појави прслина највише доприноси присуство сумпора у завару, док неки други елементи као што су нпр. силицијум, фосфор, угљеник, бакар, никл и др., имају много мањи утицај. Манган, са друге стране има веома повољан утицај на спречавање топлих прслина јер показује много већи афинитет према сумпору од гвожђа. Сулфиди мангана, имају много вишу температуру топљења него челик, а такође формирају и глобуларне укључке за разлику од сулфида гвожђа који се у челику јавља у облику танког филма на границама металних зрна. Уколико је садржај мангана у челику већи од садржаја сумпора за 60 и више пута, вероватноћа појаве топлих прслина је минимална. Други начини за спречавање топлих прслина су: предгревање, контрола међупролазне (енг. interpass) температуре и што слабије укљештење завариваних делова, посебно ако им је дебљина већа од 16 mm.

Иначе, сваки заварени спој у фази израде мора проћи кроз температурску област склоности ка топлим прслинама. Зато се мора узети у обзир могућност појаве ових прслина, без обзира да ли се заварују нискоугљенични, аустенитни или челици повишене

јачине. Посебно се о овоме мора водити рачуна при заваривању челика повишене јачине, јер се у подручју високотемпературске кртости понашају као нискоугљенични челици, а одговарајућу јачину шав добија тек после фазне трансформације  $\gamma \rightarrow \alpha$ .

### 3.2.2.1 Varestraint метод

Метод Varestraint, развијен је 1960 године на Политехничком институту „Rensselaer“ (RPI). Замишљен је као једноставан, тест напрезања који би изоловао металуршке факторе који изазивају топле прслинне. Од увођења ове методе дошло је до бројних модификација, а широм света се користе бројне варијанте ове методе. Сама метода никада није у потпуности стандардизована, а постоје разне технике испитивања у употреби данас.

Ова метода користи се за испитивање склоности према попречним топлим прслинама. За испитивање овом методом потребан је плоча димензија  $220 \times 50 \times 10 \text{ mm}$ . једна страна плоче се чврсто стеже на ослонац, затим се наноси завар на средини плоче TIG поступком. Након прекида електричног лука укључује се механизам за савијање.

Укупна дужина прслине се рачуна у зависности од максималне деформације ( $\epsilon$ ) и дата је једначином:

$$\epsilon = d / 2R ,$$

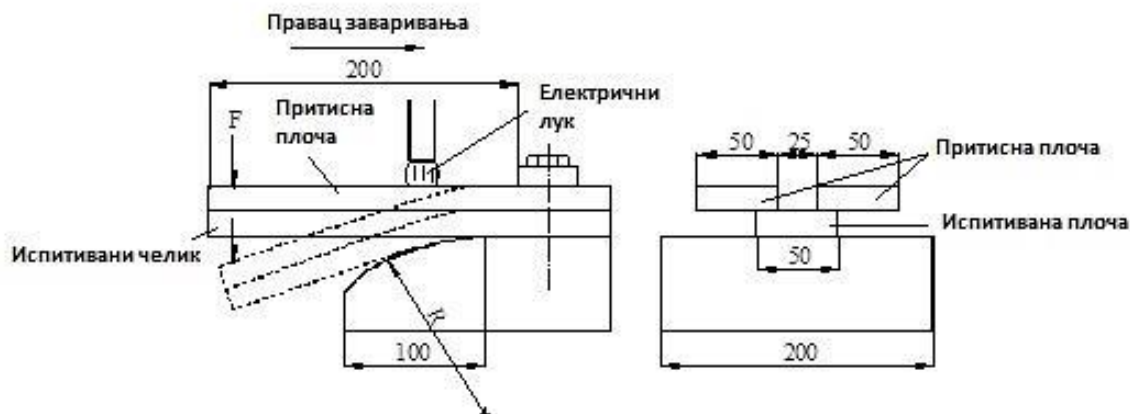
где је:

$\epsilon$  – укупна деформација,

$d$  – дебљина узорка и

$R$  – радијус закривљеног испитиваног блока.

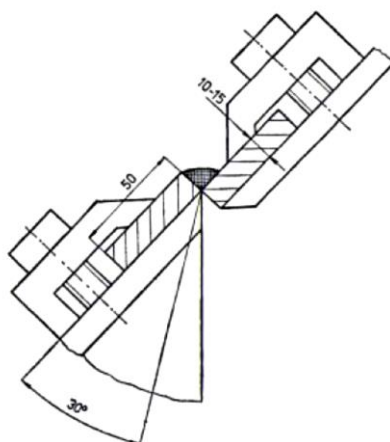
Ова метода испитивања користи једноставне уређаје, тако да је цена испитивања релативно ниска. На слици 3.16 је дата шема Varestraint методе.



Слика 3.16 Шематски приказ Varestraint методе

### 3.2.2.2 Murex метода

Завар који се испитује наноси се као угаони завар између две испитиване плоче дебљине од 10 до 15 mm димензија 50 × 75 mm. Принцип испитивања је да се између два челична штапа малих димензија, који су чврсто стегнути у стеге, полаже завар (сл. 3.17). Пет минута након успостављања електричног лука починње ротација једног штапа око корена завара и наставља се константном брзином док се не пређе угао од 30°. За време окретања настају значајне подужне прслине. Критеријум испитивања је укупна дужина прслине, у коју није урачуната дужина прслине у кратеру на крају завара.



Слика 3.17 Шематски приказ испитивања топлих прслина методом Murex

## 3.3. Методе за испитивање механичких својства

### 3.3.1 Испитивање тврдоће

Под појмом тврдоће метала и легура подразумева се отпор који тај материјал пружа продирању неког тврђег тела у њега. Усвојена ознака за тврдоћу је Н (енг. Hardness). Постоје статичке и динамичке методе за испитивање тврдоће. Статичке методе су: Бринелова (НВ), Викерсова (НV) и Роквелова (НR), а динамичке методе су: метода Полдијевог чекића (НР) или метода упоређивања, склероскопска метода (HSh) и дуроскопска метода (НD).

Код статичких метода, тврдоћа се изражава односом силе по јединици површине отиска или мерењем дубине отиска који направи утискивач у материјалу изражен у одговарајућим јединицама за тврдоћу.

Испитивање тврдоће оштећује површину, након испитивања остаје отисак. Отисак није велики и њиме се не уништава производ, али остаје видљив отисак. Због тога испитивање тврдоће можемо гледати као разорно-неразорне методе.

Тврдоћа заварених спојева мери се методом Викерс, силом утискивања нпр. од 10 daN, (НV) уз тежњу да сила утискивања буде што мања.

$$HV = 1.854 \cdot \frac{F}{d^2},$$

где је:

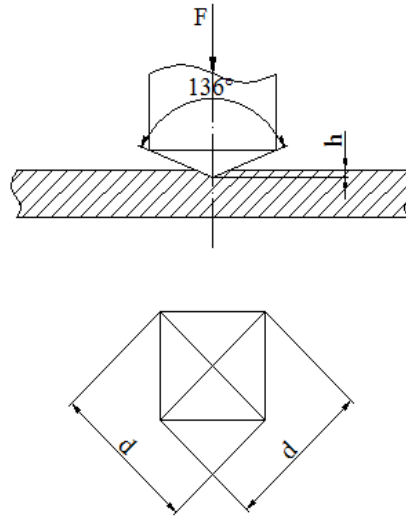
HV – тврдоћа по Викерсу,

F – сила утискивања и

d – средња дужина дијагонале отиска.

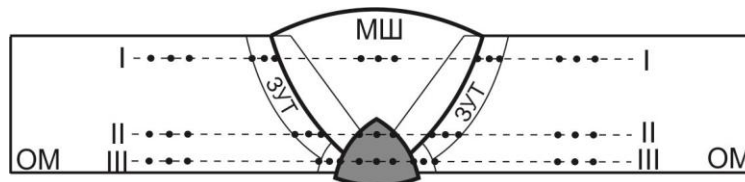
Испитивање тврдоће према Викерсу спроводи се на унапред припремљеном узорку. Припрема узорка се најчешће изводи брушењем и полирањем. После испитивања макроструктуре исти узорак се користи за испитивање тврдоће. На постављени узорак делује се силом преко утискивача у облику пирамиде.

Викерсова тврдоћа рачуна се из односа силе притиска F (N) и површине отиска омотача пирамиде A (mm<sup>2</sup>), који се одређује мерењем дијагонала d<sub>1</sub> и d<sub>2</sub> (mm) (сл. 3.18).



Слика 3.18 Викерсова метода – утискивача и отисак

Тврдоћа се мери на више места по пресеку узорка тако да се обухвати основни материјал леве плоче, зона утицаја топлоте, метал шави и основни материјал десне плоче у правцу једне линије (сл. 3.19).



Слика 3.19 Правци мерења тврдоће за вишепролазни суочени спој

У зависности од дебљине материјала мерење се изводи у различитом броју линија. Тврдоћа је један од веома значајних фактора за оцену заварљивости.

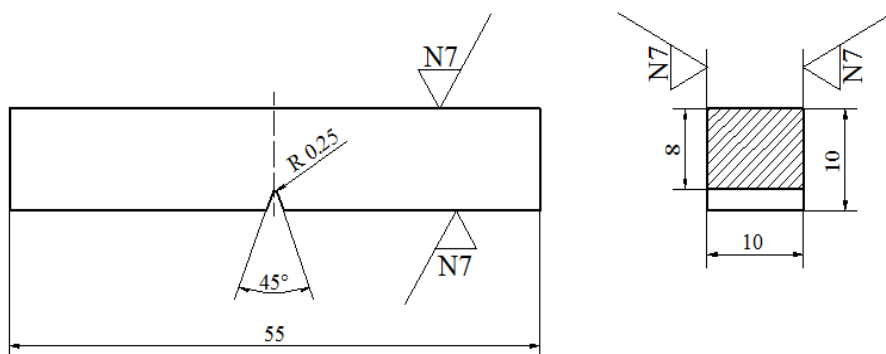
### 3.3.2 Испитивање ударне жилавости

Опште је познато да се исти материјал не понаша исто у условима статичких и ударних оптерећења. Испитивања ударом представљају групу механичких испитивања која за циљ имају одређивање понашања материјала у условима брзих ударних

оптерећења. Притом се прате параметри као што је енергија лома тј. ударна жилавост материјала. Овај тест је данас готово незаобилазан при пројектовању и изради већине одговорних машинских конструкција. Тест се изводи на такозваном Шарпијевом клатну према стандардној процедури.

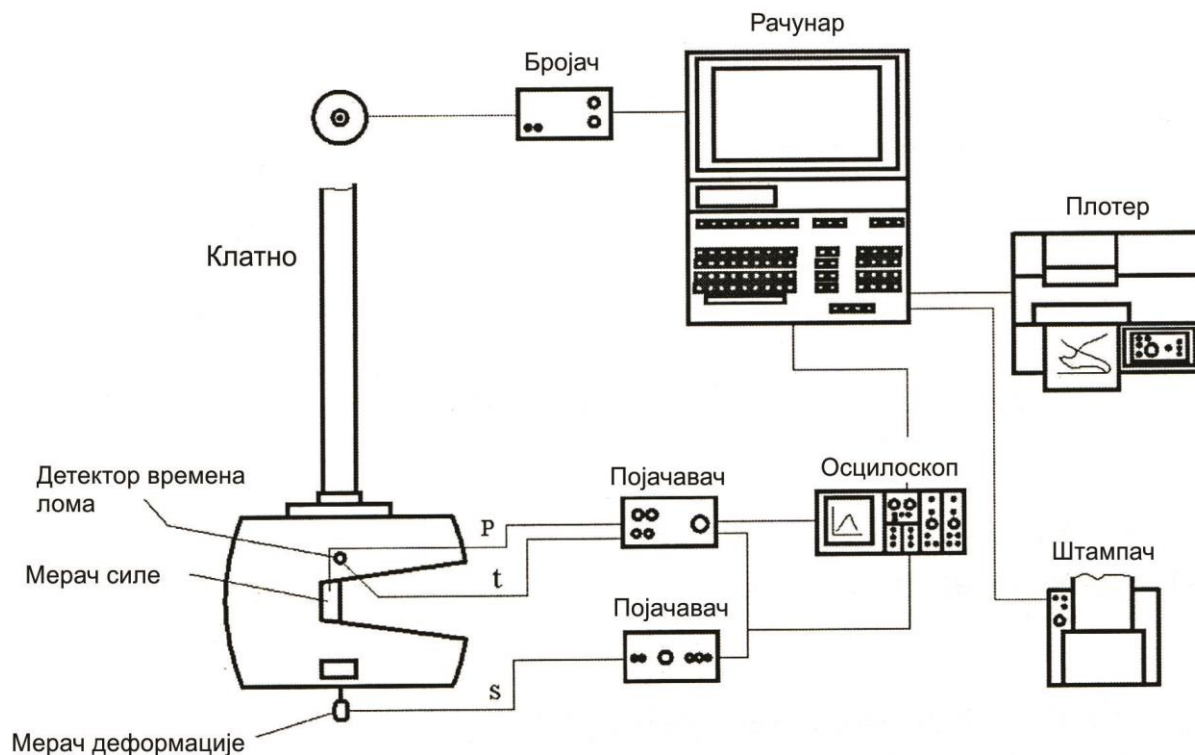
Енергија утрошена за лом епрувете (изражена у џулима, J) је мера жилавости материјала, а захтева се и код развоја нових материјала, код провере готових материјала и код анализе лома услед разних дефеката у пракси. Зарез на епрувети може да буде у облику слова U, V, итд.

Епрувете са V-зарезом (сл. 3.20) обавезно се користе за одређивање ударне жилавости општих конструкционих челика, а епрувете са U-зарезом код испитивања својстава квалитетнијих челика. Ударна жилавост металних материјала се испитује на стандардизованим епруветама квадратног или правоугаоног попречног пресека са зарезом у облику слова U (ознака KU) или слова V (ознака KV).



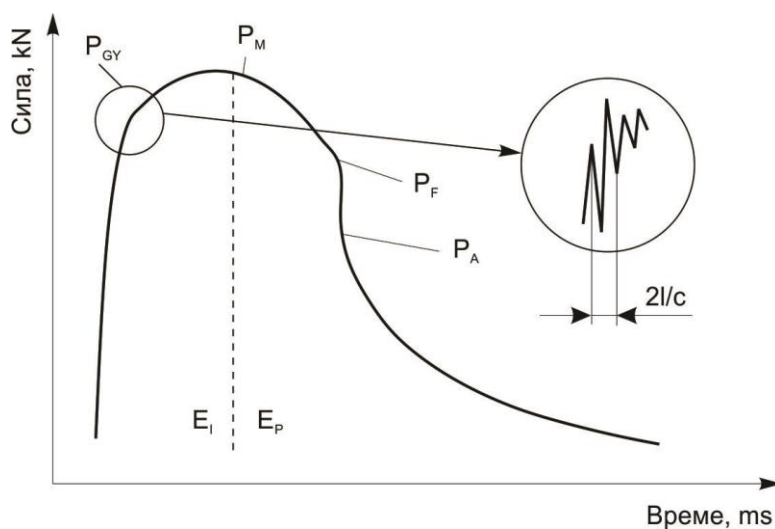
Слика 3.20 Епрувета за испитивање жилавости са V-зарезом

При испитивању ударним оптерећењем, енергија лома представља интегралну величину, тј. не даје могућност раздвајања добијене енергије на енергију потребну за стварање и енергију потребну за ширење прслине. Да би то било могуће неопходно је континуирано записивати вредности силе и времена лома, а то је могуће додатним опремањем клатна (сл. 3.21)



Слика 3.21 Шематски приказ савременог инструментираног клатна

Као резултат испитивања ударом на инструментираном клатну добија се дијаграм сила - време (сл. 3.22).



Слика 3.22 Карактеристичан дијаграм сила - време за веома пластичан материјал

Испитивање се често изводи при сниженим температурама, због тога што снижене температуре код већине материјала значајно утичу на износ ударног рада лома. Приказ једног савременог Шарпијевог клатна дат је на слици 3.23.



Слика 3.23 Шарпијево клатно

За утврђивање жилавости материјала испитују се по три исте епрувете на прописаној температури, при чему не сме бити веће расипање добијених вредности од 30% у односу на минималну прописану вредност (само једна од њих може имати нижу вредност). У стандардима за пријем и испоруку металних материјала прописане су минималне средње вредности ударне жилавости. На слици 3.24 је приказан крти и жилав лом.



Слика 3.24 Крти и жилави лом под електронским микроскопом 1000×

На жилавост материјала утиче низ фактора као што су:

- Температура испитивања има највећи утицај на жилавост. Жилавост материјала опада са снижавањем температуре испитивања, јер са снижавањем температуре снижава и пластичност, односно деформабилност материјала,
- Микроструктура има велики утицај на жилавост материјала. Нарочито повољно утиче на жилавост смањивање величине зрна,
- Облик и димензије зареза знатно утичу на жилавост. Зареzi изазивају концентрацију тродимензионалних напрезања, нормална напрезања при томе, делују на затезање, док тангенцијална изазивају клизање,
- Димензије епрувете различито утичу на жилавост материјала. Најмање утиче дужина епрувете, док ширина и дебљина утичу слично на смањивање жилавости,

- Брзина удара Шарпијевог клатна нема значајнијег утицаја на жилавост материјала ако је у распону 3 до 7 m/s, док знатно веће брзине 20-50 m/s смањују жилавост због смањеног удела пластичне деформације и
- Енергија удара је важно механичко својство материјала, које најбоље дефинише његову отпорност према нестабилном расту прслине у њему под прецизно одређеним условима. Другим речима, енергија удара је критична вредност концентрације напона на врху прслине при којој наступа њен нестабилни раст у условима раванске деформације.

### 3.3.3 Испитивање затезањем

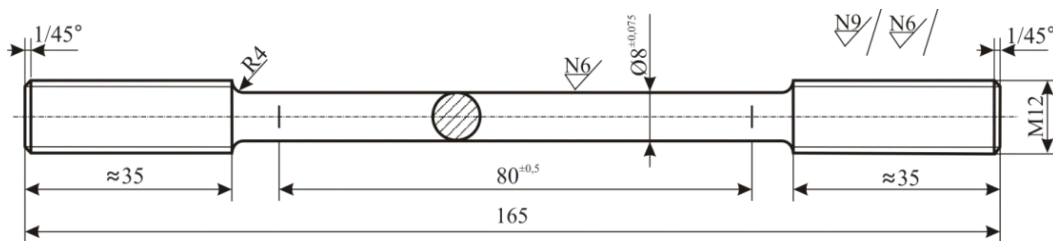
Испитивање затезањем је најзначајнији начин испитивања материјала у циљу одређивања његових механичких својстава: напона течења ( $R_{p0,2}$ ) и затезне јачине ( $R_m$ ). Истовремено, са испитивањем својстава јачине могу се добити и подаци о способности деформације материјала:

- издужење ( $A$ ) и
- сужење ( $Z$ ).

Испитивање затезањем се заснива на спором затезању узорка стандардног облика и димензија. Универзална машина за испитивање (кидалица) је опремљена динамометром за мерење силе и писачем који у сваком моменту записује зависност издужења од силе. Помоћу података добијених при испитивању и измерених на прекинутом узорку одређују се:

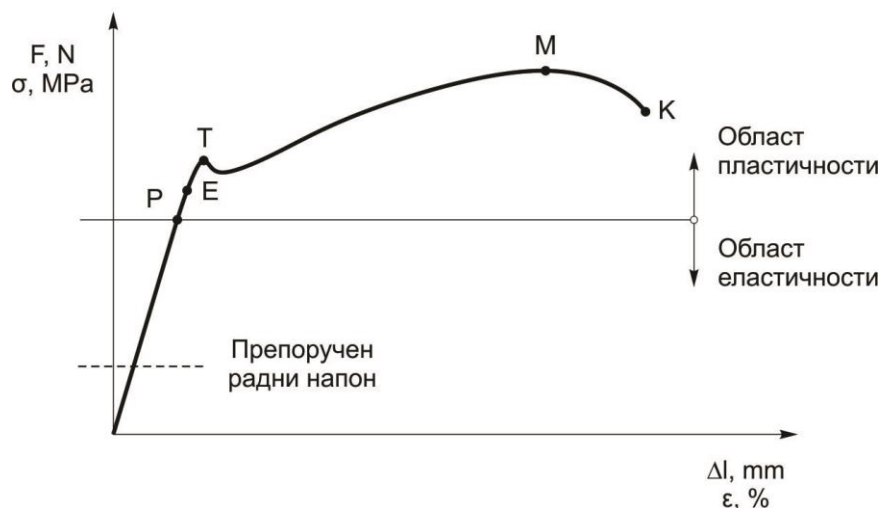
- затезна јачина,  $R_m$ , МПа,
- напон течења,  $R_{p0,2}$ , МПа (горња граница течења,  $R_{eH}$ ),
- издужење  $A_{5,65}$ ,  $A_{11,3}$ , % (индекси се односе на мерну дужину),
- сужење  $Z$ , % (контракција) и
- модул еластичности  $E$ , МПа.

Епрувете за испитивање затезањем основног материјала (сл. 3.25) и завареног споја се по облику и геометрији не разликују. Једина разлика је у томе што код епрувете за испитивање завареног споја у средини постоји заварен спој.



Слика 3.25 Изглед епрувете за испитивање затезањем

Приликом испитивања на кидалици добија се и дијаграм затезања, приказан на слици 3.26.



Слика 3.26 Дијаграм затезања

У првом делу дијаграма, зависност силе и издужења је линеаран и то је све до достизања силе развлачења. Након достизања силе развлачења, епрувета наставља да се истеже уз мали пад силе. За даље истезање материјала потребно је повећање силе. У том делу више не постоји линеарна зависност између прираста силе и скраћења. Оптерећење се повећава до достигнућа максималне силе, након које се епрувета наставља истезати уз смањење површине попречног пресека. Код вредности коначне силе долази до лома епрувете.

На дијаграму затезања тачка Р као граница пропорционалности, представља границу до које је веза између напона ( $\sigma$ ) и деформација ( $\epsilon$ ) линеарна, тј. до које важи Хуков<sup>7</sup> закон:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \text{ МПа.}$$

Граница еластичности је представљена тачком Е, што значи да се материјал по престанку дејства оптерећења враћа у првобитно стање, међутим веза између напона и деформације више није потпуно линеарна већ почињу да се уочавају мања одступања. После тачке Е долази до појаве пластичне деформације материјала што значи да после престанка дејства силе настале деформације неће нестати, тј. настала деформација је трајне природе.

<sup>7</sup> Robert Hooke (1635-1703) је био енглески физичар и секретар Краљевског друштва у Лондону који је 1678. године дефинисао закон који гласи: "Напон је пропорционалан деформацији".

## 4. Оцена заварљивости угљеничних и легираних челика

Заварљивост материјала је део науке о материјалима у којој се проучава најважније својство при пројектовању и извођењу заваривачких и њима сродних технологија. При заваривању долази до различитих, изузетно сложених појава у материјалу, чије је познавање неопходно да би се процес успешно извео. Захваљујући многобројним методама заваривања данас је могуће успешно међусобно спојити у чврсту нераскидиву целину различите врсте материјала (метале, неметале, метале са неметалима).

Спајање материјала заваривањем одвија се на нивоу атомских кристалних решетки дејством међуатомских кохезионих или адхезионих сила, и представља обрнут процес од његовог раздвајања услед појаве лома. Да би дошло до спајања два метала дејством привлачних међуатомских сила, неопходно је да се савлада енергетска баријера, односно да наступи активација валентних електрона и формирање заједничког електронског облака (метална веза). Два метала ће се спојити ако се доведу на растојање реда величине параметара кристалних решетки, а то се може постићи: *довођењем или ослобађањем потребне топлоте за локално топљење метала, деловањем довољно високог притиска на контактним површинама спајаних метала и комбинованим дејством притиска и топлоте.*

Заварљивост је комплексно својство метала што је разлог да постоје више дефиниција заварљивости, али нема униформне и експлицитне дефиниције овог за праксу изузетно важног технолошког својства метала. Заварљивост одређује релативну способност неког метала да применом одговарајућег поступка и технологије може да формира спојеве захтеваног квалитета. Приликом заваривања одређени метали могу имати: *добру заварљивост, условну заварљивост и лошу заварљивост.*

Оцена заварљивости различитих метала има велики значај, како при избору додатних материјала и метода за израду заварених конструкција, тако и при избору додатних материјала и метода репаратуре оштећених радних делова. Оцена заварљивости на основу само једне методе је непоуздана па је развијено више технолошких проба. Савремен приступ оцени заварљивости подразумева: коришћење рачунских метода које узимају у обзир граничне услове; пробе са симулирањем температурских циклуса заваривања (наваривања); пробе на моделима са стварним параметрима заваривања (наваривања). Одређивање структуре, хемијског састава, тврдоће, жилавости основног и додатног материјала, и завареног споја као целине је припрема за дефинисање технологије заваривања. За одређивање оптималне технологије неопходна је провера понашања наварених радних елемената у експлоатационим условима.

Заварени спојеви настају у специфичним условима (металурушке реакције, деловање сопствених напона и деформација), што узрокује могућност настанка различитих грешки у завареном споју. Те грешке су: прслине, порозност, укључци троске, непроваривање и заједи. Утицај наведених грешака се не процењује на основу смањења ефективног попречног пресека, већ према концентрацији напона. Тако да се грешке као што су гасни мехурови и укључак троске могу допустити, док се никако не смеју допустити грешке као што су прслине, непровари и други концентратори напона.

#### 4.1 Оцена заварљивости угљеничних челика

Угљенични челик садржи најмање шест хемијских елемената: Fe, C, Mn, Si, P и S. Највећи утицај на структуру челика, а тиме и на механичке и технолошке особине има угљеник. Угљенични челици су добро заварљиви челици и будући да су ови челици намењени углавном за заварене конструкције које су оптерећене статичким оптерећењима, сматра се да су добро заварљиви ако јачина споја одговара јачини основног материјала, и када нема прслина у зони споја, као ни великог пада пластичности у прелазној зони.

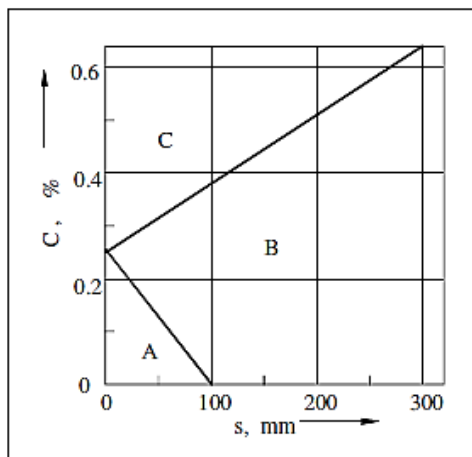
Код угљеничних челика са садржајем: C од 0.25%, Mn од 0.4% и Si од 0.3% заварљивост се процењује на основу еквивалентног угљеника, којим се изражава позната чињеница да са порастом угљеника и легирајућих елемената расте закаљивост, а сами тим опада заварљивост (склонији су хладним прслинама).

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

За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легиране елементе (Cr < 0.30%, Mo < 0.08%), а при том повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

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

Поред еквивалентног угљеника на склоност делова ка хладним прслинама утиче и брзина хлађења, па се приликом разматрања заварљивости мора узети у обзир и дебљина завариваних делова. Делови већих дебљина су склонији прслинам, при истим осталим условима, јер се брже хладе. Добро су заварљиви угљенични челици ако им је  $CE < 0.45\%$  и дебљина  $s \leq 25 \text{ mm}$ , односно  $CE < 0.41\%$  за  $s > 25 \text{ mm}$ . Делови који се не уклапају у ове границе сматрају се условно заварљивим, односно потребно је предгревање (100-150°C). Како оцена заварљивости помоћу CE не узима у обзир начин производње челика, поступак, технологију заваривања и тсл., ова метода се сматра грубом проценом заварљивости. За оцену заварљивости нелегираних челика може се користити и дијаграм приказан на слици 4.1 у зависности од дебљине и садржаја угљеника.



Слика 4.1 Дијаграм за оцену заварљивости нелегираних челика

Помоћу овог дијаграма могуће је разврстати челике на:

- заварљиве (А),
- заварљиве са предгревањем (В) и
- заварљиве са предгревањем и накнадном термичком обрадом (С).

Предгревањем се смањује брзина хлађења, а тиме и тврдоћа у ЗУТ-у. Сама по себи, висока тврдоћа није штетна, али у комбинацији са дифуздованим водоником у ЗУТ-у и његовим преображајем у молекуларни облик, доводи до појаве хладних прслина. Угљенични челици који садрже  $C \leq 0.25\%$ ,  $Mn \leq 0.4\%$ ,  $Si \leq 0.3\%$ , и  $P$  и  $S < 0.05\%$ , сматрају се добро заварљивим.

## 4.2 Оцена заварљивости легираних челика

### 4.2.1 Оцена заварљивости нисколегираних челика

Код ових челика садржај угљеника не прелази 0.25%, док проценат легирајућих елемената није виши од 5%. Структуре и особине нисколегираних челика сличне су нелегираним челицима. Међутим, треба напоменути да пад својства отпорности и жилавости на повишеним температурама (до 600°C) је мањи код нисколегираних челика него код нелегираних, што даје одређену предност нисколегираним челицима на вишим температурама.

Еквивалентни угљеник нисколегираних челика се рачуна према следећим формулама:

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

$$CE = \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{15}, \%$$

$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{10}, \%$$

Веће вредности СЕ утичу на закаљивост у ЗУТ-у, а разлог томе је деловање температурских циклуса заваривања. Садржај дифундованог водоника утиче на тврдоћу заваза и уколико тврдоћа пређе одређену границу изазва ће појаву прслина.

Испитивањем утицаја СЕ на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

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

$$HV_{min} = 1200 \cdot CE - 200.$$

Ова веза важи у границама  $0.2\% < CE < 0.6\%$ , јер за веће вредности СЕ веза није више линеарна. Уз велика упрошћавања и занемаривањем низа утицајних фактора, може се сматрати да је челик заварљив ако тврдоћа у ЗУТ-у не пређе вредност од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности  $CE = 0.45\%$ , па се усваја да су челици са  $CE < 0.45\%$  заварљиви без примене посебних мера, док су челици са  $CE > 0.45\%$  заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење, посебни атмосферски услови и тсл.).

#### 4.2.2 Оцена заварљивости високолегираних челика

Високолегирани челици садрже висок проценат легирајућих елемената. Нерђајући челик је високолегирани челик који садржи 12% Cr. Нерђајући челици се према распореду C и Fe у кристалној решетки деле на *феритне, аустенитне, мартензитне и таложно ојачане*.

**Феритни челици** садрже веома мало C, а Cr > 12.5% што је услов за корозиону отпорност. Не отврдњавају термичком обрадом (низак % C), већ ојачавају прерадом на хладно као нпр. ваљањем, дубоким извлачењем и тсл. Ови се челици најчешће испоручују у облику цеви, профилисаних цеви, дебелих лимова, трака, профилних носача, жица и тсл.

**Аустенитни нерђајући челици** имају површински центрирану кубну решетку за разлику од просторне код феритних челика. Као група, аустенитни челици се често називају 18-8 јер садрже око 18% Cr, 8% Ni и веома мали % C. Стога не отврдњавају термичком обрадом, већ у великој мери ојачавају прерадом на хладно. За ту прераду су веома погодни јер имају велику резерву пластичности дефинисану разликом између техничке границе течења и јачине на кидање. Аустенитни челици могу да садрже и мање Ni али са додатком Mn што их чини јефтинијим. Са гледишта заваривања значајно је да при хлађењу са веома високих температура уместо да се закале, аустенитни челици постају меки и веома пластични. Одликују се изузетно великом способношћу обликовања деформисањем (велика истегљивост) па се често сложени облици израђују дубоким извлачењем.

**Мартензитни нерђајући челици** садрже 12–17% Cr и 0.15 до 1% C што омогућује постизање мартензитне структуре чак и при спором хлађењу из аустенитног фазног подручја. То значи да се при термичкој обради ови челици понашају слично угљеничним и нисколегираним челицима. После термичке обраде неки мартензитни нерђајући челици достижу техничку границу течења од 1380 МПа и јачину на кидање 1930 МПа, али им отпорност према корозији, и способност пластичног обликовања далеко заостаје иза феритних и аустенитних челика. Примењују се за разне машинске делове (осовине за пумпе, вентиле, куглице за лежишта), ножеве за љуштење дрвета, ловачке ножеве, хирушки прибор, скупочени прибор за јело.

**Таложно ојачани нерђајући челици** су такође легуре Cr–Ni намењене углавном за зупчанике, ексцентре, те делове за авионе, турбине и нарочито космичку технику.

Аустенитни челици, па и метал шава који се добија помоћу аустенитне електроде, имају мању термичку проводност и већи коефицијент линеарног термичког ширења него угљенични челици, што ствара велике сопствене напоне и деформације. Делом и због тога склони су ка топлим прслинама у шаву и ЗУТ-у, затим међукристалној корозији због излучивања карбида хрома на границама металних зрна, као и кртости на високим температурама због образовања  $\delta$ -фазе (кртог једињења CrFe).

Склоност ка појави прслина око солидус температуре може се тумачити издвајањем танке силикатне опне мале кохезионе јачине по границама металних зрна. Ове се прслине спречавају стварањем друге фазе, на пример феритне, по границама аустенитних зрна. Садржај  $\delta$ -ферита се ограничава на мање од 10%, јер он смањује пластичност метала шава.

### 4.3 Оцена заварљивости челика повишене јачине

Сви челици са границом течења већом од 360 МПа сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми њихове заварљивости морају се за сваку групу челика посебно разматрати. Циљ почетка развоја челика повишене јачине је да се смањи тежина конструкција (моства, дизалица, цистерни и тсл.). Развојем технологије микролегирања, омогуће је развој и производња челика повишене јачине, који су у суштини угљенични, са минималним додацима легирајућих елемената. Легирајући елементи код ових челика не прелази границу од 0.50% али омогућавају повећање напона течења, јачину на кидање и тврдоћу. Садржај угљеника у челицима повишене јачине је испод 0.20% и ови челици могу бити:

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

Постоје различите поделе, зависно од степена развоја и примене ових челика у појединим земљама. Тако се нпр. према пољским стандардима они деле на: C-Mn<sup>8</sup> челике, микролегиране челике и нисколегиране челике повишене јачине. Према чешким стандардима разликују се микролегирани феритно-перлитни челици, бејнитни нисколегирани нормализовани и отпуштени челици као и нисколегирани побољшани челици. У Немачким стандардима ови челици су обухваћени стандардима DIN 17100 и DIN 17200.

У стандарду SRPS/EN 10027-1 даје се преглед општих конструкционих C-Mn челика, као и преглед микролегираних финозрних челика повишене јачине. Подаци који се дају у стандардима нису довољни за избор оптималне технологије, јер се ту само наводи потреба о евентуалном предгревању, а то се не повезује са технолошким параметрима заваривања и траженим радним особинама конструкција.

#### 4.3.1 Оцена заварљивости C-Mn челика

Ова врста челика има перлитно-феритну структуру, а ојачање својства отпорности настаје због пораста удела перлита у структури, ојачања ферита манганом (који образује чврст раствор у  $\alpha$ -гвожђу и уситњавања металних зрна).

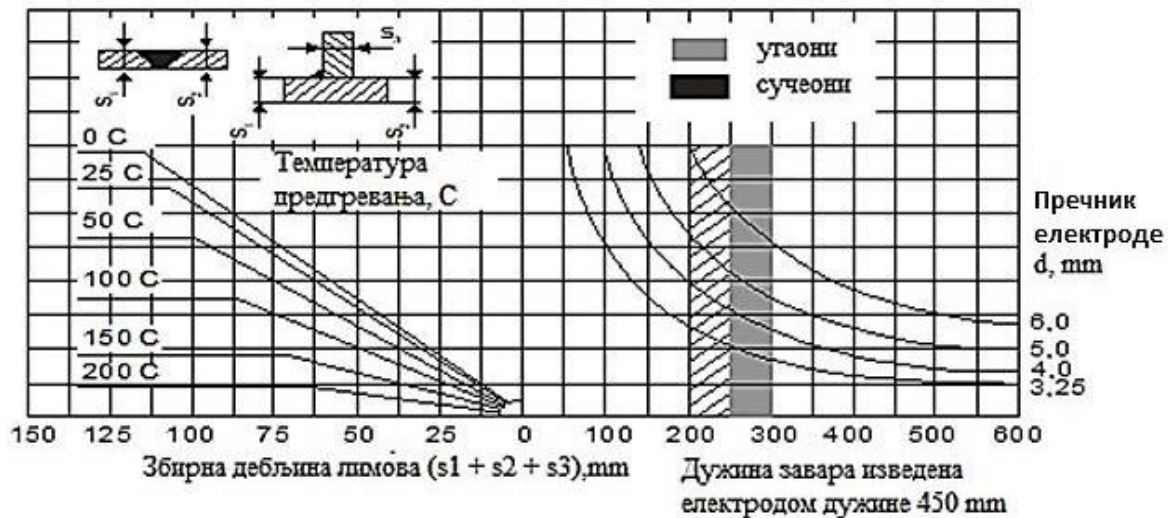
Примењују се за мостogradњу, хидроградњу, грађевинарство, резервоаре и тсл., а испоручују се као шипке, профили и лимови. Челици са дебљином лимова  $s < 25 \text{ mm}$  и хемијски еквивалентни угљеник  $CE < 0.45\%$ , могу се добро заваривати и без предгревања. За веће дебљине, као и при заваривању на сниженим температурама, неопходно је предгревање или заваривање кратким заварима. Еквивалентни угљеник се за C-Mn челике израчунава на основу израза:

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

---

<sup>8</sup> C-Mn челици имају боља својства отпорности од угљеничних, због пораста удела перлита на рачун ферита и ојачања преосталог ферита манганом који се раствара у  $\alpha$  – решетки гвожђа и уситњава метална зрна.

При заваривању С-Мп челика, јавља се проблем појаве хладних прелина. Разлог овог проблема је перлит, који се на температурама вишим од Ас1 трансформише у аустенит, а при брзом хлађењу у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у) може се трансформисати у мартензит. Да би се у овом случају спречила појава хладних прелина, врши се потпуно или локално предгревање, а заваривање се изводи са што већом погонском енергијом. Присуство велике количине дифундованог водоника може довести до појаве хладних прелина. Из овог разлога заваривање се врши искључиво поступцима и технологијама које се одликују ниским садржајем водоника, што код REL поступка одговара коришћењу базичних сушених електрода. За одређивање температуре предгревања може се применити формула Сеферијана или дијаграм на слици 4.3.



Слика 4.3 Дијаграм за избор температуре предгревања С-Мп челика, REL поступком, базичним електродама

Примена дијаграма, заснива се на одређивању типа споја, дебљине лима (плоче), као и пречника базичне електроде. Такође је потребно усвојити, или израчунати, дужину завара  $l$ , на основу технолошких параметара заваривања. Препоруке за дужину завара су:

- $l = 200-250$  mm код сучеоних спојева и
- $l = 250-300$  mm код угаоних спојева.

Тачније се та дужина одређује по формули:

$$l = 0.04 \cdot \frac{N^2 \cdot k_2 \cdot q^2}{s^2 \cdot v_z \cdot (T_w - T_0)}, \text{ cm},$$

где је:

$k_2$  - коефицијент непрекидности лука, (за REL,  $k_2 = 0.6-0.8$ ),

$T_w = M_s + 50 \div 100$  - допуштена температура хлађења завара у °C,

$N_3$  - фактор облика споја (за сучеоне спојеве  $N_3 = 1.5$ , за угаоне спојеве  $N_3 = 0.9$ , за угаони шав у Т-споју  $N_3 = 0.8$ ),

$q = U \cdot I \cdot \eta$  - ефективна снага (моћ) лука у J/s,

$s$  - дебелина лима у mm,

$v_z$  - брзина заваривања у cm/s и

$T_0$  - почетна температура у °C.

Да би се верификовали усвојени технолошки параметри заваривања, потребно је израчунати време хлађења између 800 и 500°C ( $t_{8/5}$ ) и унети га у KHZ дијаграм. Из KHZ дијаграма се тада читава да ли се добија тражена структура са одговарајућим излазним механичким особинама (оптимална жилавост и одговарајућа тврдоћа).

#### 4.3.2 Оцена заварљивости микролегираних (финозрних-ТМ) челика

Карактеристика микролегираних челика јесте да је садржај угљеника мањи од 0.2%, при чему се додају мале количине микролегирајућих елемената (Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr) чији збирни садржај не прелази 0.2%. Микролегирањем се стварају фина зрна, чиме се повећава јачина челика, али не на рачун пораста садржаја угљеника (јер би то погоршало заварљивост), већ путем уситњавања металних зрна, односно стварањем нитрида, карбида и карбонитрида микролегирајућих елемената који се издвајају на границама металних зрна и спречавају њихов раст у аустенитном подручју. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем полуфабриката.

Микролегирани челици повишене јачине су посебно склони ка појави хладних прслина, што зависи од величине еквивалентног угљеника, дебелине и типа споја. У циљу спречавања настанка ових прслина примењује се предгревање које утиче не само на образовање тражене структуре ЗУТ-а већ и на снижење заосталих напона и количине дифундованог водоника из шаву у ЗУТ-у.

Заварљивости финозрних микролегираних челика може се одредити на основу следеће формуле за еквивалентни угљеник, при чему је садржај C (0.1-0.18%), Mn (1.0-1.6%) и Nb (0.025-0.095%):

$$CE = C + \frac{Mo}{10} + 3 \cdot Nb, \%$$

Ако финозрни челик има и додатке ванадијума и азота, израз би гласио:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{V}{3} + 3 \cdot N, \%$$

Уколико се прорачуна да је  $CE < 0.35\%$  челици се могу заваривати без посебних мера, а ако се прорачуна да је  $CE = 0.35-0.45\%$  потребно је предузети посебне мере при заваривању под прахом и у заштити  $CO_2$ . Посебне мере се пре свега односе на повезивање температуре предгревања са погонском енергијом и међупролазном температуром заваривања.

### 4.3.3 Оцена заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

#### 4.3.3.1 Бејнитни челици

Даљи развој челика повишене јачине у односу на микролегиране условио је појаву бејнитних челика. Производња овог челика почела је у Енглеској, под називом „Fortyweld“, где је и заштићен британским патентом бр. 611.598. Сadržај угљеника није већи од 0.18%, при томе су нешто повећани садржаји Mn и Si, док су легирајући елементи присутни у количинама Mo (0.5%) и B ( $\approx 0.003\%$ ). Легирајући елементи у наведеним количинама и при малим брзинама хлађења (чак и хлађењем на ваздуху) омогућавају стварање бејнитне структуре. Додацима мангана и хрома снижава се температура бејнитне трансформације на 600-300°C, чиме се постиже уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбида, што за последицу има повећање јачине. Даље се, после нормализације може добити напон течења  $R_{eH} = 460-600$  МПа. Овако висок напон течења, омогућава примену бејнитних челика за најразличитије конструкције. Неки од примера примене су: дизалице, железничке платформе, транспортне цистерне, грађевинске машине и тсл.

Бејнитни челици спадају у групу челика повишене јачине, па код њих основни проблем при заваривању представља појава хладних прслина у металу шави и ЗУТ-у, као и пад жилавости у ЗУТ-у. Решавање проблема се постиже смањењем брзине хлађења после заваривања, а смањење брзине се практично постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

#### 4.3.3.2 Нисколегирани побољшани челици

Ови челици, иако су нискоугљенични ( $C < 0.2\%$ ), склони су закаљивању, чак и при релативно спором хлађењу. Највеће вредности својстава отпорности могу се добити каљењем на мартензитну структуру при чему напон течења достиже вредност од 400-800 МПа. Посебно је значајан утицај бора, јер он доводи до уситњавања примарних зрна, дезоксидације и денитрирања металног купатила, као и до великог повећања прокаљивости.

Каљење и отпуштање челика подразумевају обраду у специјалној и скупој технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде са температуре од око 900°C до температуре око 300°C директно после топлог ваљања, или се лимови после ваљања хладе до температуре околине и накнадно загревају ради каљења. После тога изводи се операција отпуштања у проточним пећима на температурама 500-700°C, са задржавањем од једног пута, а затим се лимови хладе на ваздуху. На температури отпуштања од 500°C, добија се тврдоћа од 350 HV,  $R_{eH} = 490$  МПа и жилавост од 3.5 J, док се при температури отпуштања од 700°C постиже 230 HV,  $R_{eH} = 320$  МПа и жилавост 11 J. Ови челици су финозрни, јер се кале са температуре при којој су настала ситна аустенитна зрна. Тако се добијају челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости.

При прописивању технологије заваривања, треба имати у виду да су особине нисколегираних побољшаних челика добијене оптималном термичком обрадом, па ће се због дејства температурских циклуса заваривања оне променити на месту споја. Значи, поред хемијског састава челика, при избору режима заваривања, треба рачунати са чињеницом да су корисне особине челика добијене термичком обрадом побољшања.

Из овог разлога за сваки челик из ове класе мора се дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ЗУТ-а изнад  $A_{C3}$  температуре. Доња гранична вредност погонске енергије треба да је довољна да се спречи појава хладних прслина. Горња вредност погонске енергије, као и време задржавања изнад  $A_{C3}$  температуре, одређује се из услова да се пад јачине у ЗУТ-у сведе на најмању могућу меру.

За разлику од других конструкционих челика, код ових челика је боље примењивати технологије које дају ниже погонске енергије, као што су REL и заваривање у заштити гасова. Нарочито за ове челике важи препорука да се технологија заваривања прописује повезано са траженим излазним карактеристикама завареног споја. Препоруке су: да за REL заваривање  $q_1$  треба да буде у границама 8–12 kJ/cm, а за EPP поступак од 13–30 kJ/cm.

#### **4.3.3.3 Cr–Mo челици**

Челици Cr–Mo садрже 0.10–0.20% C; 0.30–0.60% Mn; 0.10–0.50% Si; 0.70–1.0% Cr; 0.45–1.1% Mo и највише до 0.03% S и P. Оцена заварљивости се посебно разматра за челике типа: 0.5% Cr – 0.5% Mo; 1.25% Cr – 0.5% Mo; 2.25% Cr – 1.0% и нисколегирани челици Cr–Mo који се користе у авионској индустрији.

Челик типа 0.5% Cr – 0.5% Mo заварује се свим конвенционалним поступцима заваривања, а за овај материјал дебљине до 2 mm, а најбоље је применити GPZ. За веће дебљине материјала боље је применити REL, TIG или MIG методе. Тањи делови се предгревају на 100°C, а дебљи на 150–200°C. Понекад се после заваривања (наваривања) спој отпушта на 650°C у току од 2 h, и то у случају када спој треба омекшати. Додатни материјал за GPZ мора да буде истог састава као и основни, а да би се спречила оксидација Cr и Mo потребно је користити топитеље. При гасном заваривању користи се строго неутралан пламен, јер чак и мали вишак кисеоника подстиче стварање оксида хрома, гасних мехурова и порозних места. Код REL-а углавном се користе базичне електроде, чије језгро по хемијском саставу одговара основном материјалу.

Челици типа 2.25% Cr – 1.0% Mo су намењени за израду делова опреме термоелектрана који раде на температурама вишим од 540°C. Америчко друштво за заваривање (American Welding Society) препоручује предгревање на 150°C за материјале дебљине од 10 mm, затим накнадно загревање на 730°C и отпуштање на 650°C у току пола сата непосредно после заваривања, без принудног хлађења до собне температуре.

Челици типа (4–6)% Cr и до 0.5% Mo се доста примењују за израду опреме у индустрији прераде нафте. Заварују (наварују) се електродама истог типа као и основни материјал (хомоген спој), или аустенитним електродама (хетероген спој). У оба случаја је потребно предгревање на 300°C или тачније до температуре одређене по Сеферијановој формули на основу укупног еквивалентног угљеника. Код хомогених спојева, само предгревање није довољно за изједначавање механичких својстава у овим зонама споја, па је потребна накнадна термичка обрада отпуштања на 730°C. Код хетерогених спојева, изведеним аустенитним електродама, користи се Шефлеров дијаграм и устаљена процедура за избор одговарајуће аустенитне електроде и одређивање степена мешања да би се добио проценат  $\delta$ -ферита у прописаним границама, најбоље око 5%.

#### 4.4 Параметарске једначине за оцену склоности челика ка појави прслина

Параметарске једначине су развијене за оцену заварљивости, првенствено челика повишене јачине и то склоности према појави: *хладних прслина*, *топлих прслина*, *прслина жарења* и *ламеларних прслина*. Код различитих врста челика могу се јавити разне врсте прслина, које се могу предвидети применом параметарских једначина.

##### 4.4.1 Параметарске једначине хладних прслина

Хладне прслине, водоником индуковане или закаснеле прслине су грешке које настају после завршетка процеса заваривања или наваривања, или после полагања појединих слојева при нижој температури од 300°C. Ове прслине су посебно опасне, јер могу настати у формираном споју и после дужег времена од завршетка процеса. Могу бити уздужне и попречне, појављују се како у металу заваара или наваара тако и у зони утицаја топлоте.

Главни узрочник настанка прслина је присуство дифундованог водоника и не јављају се само на површини, па се теже могу открити. Поред присуства дифундованог водоника код челика повишене јачине, настанак ових прслина је условљена мартензитном или доњебејнитном структуром и дејством притискујућих напона, при преласку атомног водоника у молекуларни. Најчешће настају код С-Мп челика, нисколегираних и микролегираних челика са напоном течења 272-870 МПа. Настајању хладних прслина су склони челици који имају добру прокаљивост јер се мартензитна структура ствара не само у површинским слојевима, већ дубоко по дебљини материјала.

У току заваривања или наваривања водоник из метала заваара или наваара дифундује у ЗУТ, нарочито за време фазне трансформације аустенита у ферит, када је у делу метала наваара ова трансформација већ завршена, а у ЗУТ -у је још аустенитна структура. Тада нагло опада растворљивост водоника у металу наваара и он дифундује у ЗУТ. При високим температурама водоник је у дисоцираном стању, а хлађењем испод 200°C у маси метала на слободним местима (микропрслинама) издваја се водоник у молекуларном облику. Процес преображаја водоника праћен је високим температурама и великим притискујућим напонима.

Хладне прслине могу се спречити избором оптималне технологије заваривања, која може да обезбеди најповољнији температурски циклус и контролисани унос топлоте. Такође, неопходно је сушење електрода, предгревање и накнадна термичка обрада.

За оцену склоности ка хладним прслинама С-Мп челика, нисколегираних и нелегираних челика са границом течења од 272 до 870 МПа примењују се једначине које узимају у обзир хемијски састав основног материјала, садржај дифундованог водоника и критичну дебљину завреног споја.

Према чешким изворима дају се следеће једначине:

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0.015 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \text{ за } K \leq 1300,$$

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0.075 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \text{ за } K > 1300,$$

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

где је:

$K = 70 \cdot s$  – фактор крутости сучеоних спојева,

$s$  – дебљина завареног материјала, mm и

$H$  – садржај дифундованог водоника у металу шава,  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ .

За заварени спој за који се добије  $P_{hp} \leq 0.24$  сматра се отпорним према хладним прслинама, док је за вредност  $P_{hp} > 0.24$  потребно предгревање на температури:

$$T_p = 1600 \cdot P_{hp} - 308, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Један од основних задатака при електролучном заваривању јесте спречавање настанка хладних прслина у завареном споју и добијање заварених спојева са траженим механичким особинама. За решавање овог проблема потребна је примена температурских циклуса заваривања који обезбеђују одређену брзину хлађења споја у температурској области преображаја аустенита и за то време не доводе до предугог задржавања изнад  $A_{c3}$  температуре. Максимална брзина хлађења зависи од хемијског састава и дебљине завареног челика и такође од садржаја водоника у растопљеном металу.

По аналогiji са формулом еквивалентног угљеника, од стране јапанских аутора, предложен је израз за процену склоности нисколегираних челика ка појави хладних прслина:

$$P_C = P_{CM} + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \text{ } \%,$$

где је:

$s$  - дебљина завариваног материјала, mm;

$H$  - количина дифундованог водоника,  $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ ;

$P_{CM}$  - показатељ који узима у обзир хемијски састав основног материјала, %.

Показатељ који узима у обзир утицај хемијског састава основног материјала израчунава се из израза:

$$P_{CM} = C + \frac{V}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60}, \text{ } \%.$$

Уколико је  $0.25 < P_C < 0.40$  при средњој погонској енергији,  $q_1 = 13.9 \text{ kJ/cm}$ , онда је потребно предгревање до температуре:

$$T_p = 1440 \cdot P_C - 392, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### 4.4.2 Параметарске једначине топлих прслина

Топле прслине код челика настају за време хлађења у температурском подручју око солидус линије између 900 и 800°C. Оне се могу појавити у металу завара или навара, када се називају кристалizacione прслине, и зони утицаја топлоте, када се називају ликвационе прслине. Главни узрочник настајања топлих прслина је мала способност деформације метала у двофазном чврстом и течном стању на границама кристалита. При хлађењу формираног споја настају затежући напони као последица ливачког скупљања метала и еластично-пластичних деформација. При константном односу чврсте и течне фазе метала добија се температурски интервал крстости, који представља везу између температуре и деформације када настају прслине.

При заваривању, односно наваривању, сваки слој метала пролази кроз температурску област врућих прслина, без обзира да ли је реч о нискоугљеничним, аустенитним или челицима повишене јачине. Нарочито се мора водити рачуна о челицима повишене јачине, јер се у високотемпературском подручју понашају као нискоугљенични челици, а одговарајућу јачину добијају тек после фазне трансформације аустенита у  $\alpha$ -ферит. Код формираног споја на склоност ка топлим прслинама, поред хемијског састава, утиче начин примарне кристализације, односно примењена технологија. Зато је потребно одредити оптималну заваривачку технологију, односно правилно изабрати и одржавати енергетске параметаре (радни напон, јачину струје, брзину, пречник електроде и др.).

Препоручују се поступци који омогућавају формирање споја са мањим уносом топлоте, и одговарајуће мере за смањење брзине деформације и снижење нивоа сопствених напона. Практичним испитивањима дошло се до закључка да је појава топлих прслина врло вероватна ако у споју постоји већи садржај хемијских елемената (S, C, Si, Ni), јер су они склони ка стварању нискотопљивих еутектика по границама металних зрна, па затежући напони лако раздвајају метална зрна те настаје међукристални лом.

Према руским изворима, склоност нискоугљеничних челика према појави топлих прслина може се оценити помоћу модификованог еквивалентног угљеника:

$$CE_m = C + 2 \cdot S + \frac{P}{3} + \frac{Si - 0.4}{10} + \frac{Mn - 0.8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0.8}{15}, \%$$

па су челици који имају  $CE_m > 0.45\%$  склони ка појави топлих прслина.

Јапански аутори су извели израз за оцену склоности челика према појави топлих прслина H.C.S. (енг. *Hot Crack Sensitivity*):

$$H.C.S. = \frac{C \cdot \left( S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}.$$

Тако су угљенични и нисколегирани челици склони ка појави топлих прслина ако је  $H.C.S. > 4$ . Код челика повишене јачине, чија је затезна јачина већа од 700 МПа, ова граница је оштрија, па је критеријум за танке материјале  $H.C.S. > 2$ , а за дебеле материјале  $H.C.S. > 1.6$ .

#### 4.4.3 Параметарске једначине прслина жарења

Прслине жарења могу да настану и да се шире при термичкој обради, најчешће жарењу ради смањења сопствених напона. Ове прслине се теже откривају, јер се контрола споја најчешће изводи пре накнадне термичке обраде, тако да многи елементи уђу у процес експлоатације са већ створеним прслинама жарења. Настанак прслина жарења могу да иницирају и зачеци топлих или хладних прслина у виду локалних оштећења граница примарних зрна и умањења њихове кохезионе јачине. При загревању до температуре жарења (најчешће нешто испод  $A_{c1}$  температуре), оне се могу проширити и до критичних величина. При формирању споја настају неравнотежне структуре (мартензитна, мартензитно-бејнитна или бејнитна) и пресићени чврсти раствори, па се структурни напони сабирају са термичким напонима, тако да на појединим местима споја долази до превазилажења јачине метала и појаве прслина жарења.

При жарењу могу настати нискотемпературске прслине, настају у области 200-300°C, још приликом загревања до температуре жарења и високотемпературске прслине, настају при температури жарења.

Појава настајања и ширења нискотемпературских прслина жарења може се спречити на два начина. Први начин је изузетно ефикасан и састоји се из спорог загревања до температуре око 300°C, посебно код спојева велике дебљине и масе, због концентратора напона као што су нпр. површински слојеви наваара. Други начин је да се одмах после формирања споја и хлађења до тзв. прелазне температуре, која је око 150-350°C, настави са загревањем до температуре жарења.

У литератури се даје више параметарских једначина за оцену склоности челика ка појави прслина жарења, или за међусобно поређење различитих врста челика према тој склоности. Тако се нпр. за челик који садржи  $C \leq 0.18\%$  и  $Cr \leq 1.5\%$  препоручује параметарска једначина:

$$\Delta G = Cr + 3.3 \cdot Mo + 8.1 \cdot V - 2.$$

Челици са  $\Delta G \geq 0$  склони су ка појави високо температурских прслина жарења. Исти критеријум, уз одређене резерве, може се прихватити и за оцену појаве нискотемпературских прслина жарења. Челици са  $\Delta G = 0-1$  склони су ка појави прслина испод наваара услед спонтаног загревања претходних слојева при вишеслојном наваривању, слично као при термичкој обради жарењем.

Челици хемијског састава 0.1-0.25% C; до 1. % Cr; до 20% Mo; 0.1% Cu и до 0.15% V, Ni и Ti склони су појави прслина жарења обе врсте ако је параметар  $P_{\check{z}} > 0$ :

$$P_{\check{z}} = Cr + Cu + 2 \cdot Mo + 10 \cdot V + 7 \cdot Nb + 5 \cdot Ti - 2.$$

За међусобно поређење склоности различитих врста челика према појаве различитих прслинама жарења примењује се параметарска једначина:

$$SP = 0.4 \cdot Mn + Cu + 5 \cdot Al - 3(Ti + Sn).$$

Основни материјал са већом вредношћу  $S_p$  осетљивији је на појаву прслина жарења од материјала са мањом вредношћу овог показатеља. За коначну оцену склоности челика ка прслинама жарења треба извести технолошке пробе нпр. кружну пробу заварљивости или BWRA методу.

#### 4.4.4 Параметарске једначине ламеларних прслина

Ламеларне прслине могу се појавити ако у зони утицаја топлоте дејствују затежући напони у правцу дебљине основног материјала. Ове прслине су по свом облику најчешће степенасте, и настају при заваривању (наваривању) елемената веће дебљине и то на крају зоне утицаја топлоте или у основном материјалу.

На појаву ламеларних прслина утичу својства пластичности по дебљини основног материјала, технологија формирања споја, дебљина споја итд. Појава ових прслина повезана је углавном са садржајем неметалних укључака у основном материјалу, ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MnO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$  и графит), који се при преради челика топлим ваљањем растапају и стварају тракасте или нагомилане (лоптасте) структуре које ремете целовитост метала.

Без обзира што се знају узроци настајања ламеларних прслина није једноставно спречити њихову појаву. Препоручује се контрола својства пластичности по дебљини основног материјала, предгревање и накнадна термичка обрада. Ипак је најефикаснији начин правилан избор основног материјала, чија су својства пластичности у правцу дебљине материјала задовољавајућа.

Јапански истраживачи су, полазећи од чињеница да ламеларно цепање код дебелих челичних лимова настаје због тракастих сулфидних укључака и дејства нормалних затежућих напона, извели параметарску једначину за оцену појаве ламеларних прслина:

$$P_L = C + \frac{\text{Si}}{60} + \frac{\text{Mn} + \text{Cu} + \text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo} + \text{V}}{15} + 5 \cdot \text{B} + \frac{\text{H}}{60} + 6 \cdot \text{S}.$$

Челици код којих је показатељ  $P_L \leq 0.40$  отпорни су на ламеларне прслине. На основу овог показатеља могу се класификовати челици према склоности ка појави ламеларних прслина. Поред тога, у литератури се могу наћи и препоруке о процени отпорности челика према ламеларним прслинама на основу релативног издужења при испитивању на затезање микроепрувета исечених по дебљини основног материјала.

## 5. Експериментална испитивања

Како би се добила што јаснија слика о угљеничним и легираним челицима, који су предмет у овом мастер раду спроведена су одређена експериментална испитивања. Основни циљ овог експеримента је, да се применом одговарајућег поступка, избором погодних додатних материјала и пројектовањем оптималне технологије наваривања, изведе успешно репаратурно или производно наваривање различитих врста челика.

Правилан приступ решавању проблематике процеса наваривања подразумева експериментална истраживања на физичким моделима у лабораторијским условима, како би се добили релевантни резултати. Анализом добијених резултата може се проценити погодност полазне технологије наваривања. Да би се дошло до оптималне технологије наваривања неопходно је израдити наварене физичке моделе и на њима извести неопходне пробе уз варирање параметара наваривања.

За успешно наваривање неопходан је стручни приступ решавању бројних проблема везаних за заваривање (наваривање). Први корак је одређивање својстава основног материјала. Увек је потребно одредити хемијски састав и нека механичка својства основног материјала, јер се под утицајем различитих фактора, током израде и експлоатације, у мањој или већој мери, мењају ова својства. Даљи ток пројектовања и извођења процеса наваривања зависи од својстава основног материјала и захтеваних својстава навара.

Металографска и механичка испитивања на моделима омогућавају да се одреде микроструктура, тврдоћа и друга механичка својства карактеристичних зона навареног слоја (основног материјала, ЗУТ-а и навара) у лабораторијским условима, а добијени резултати служе за оцену квалитета навара и полазне технологије наваривања.

Потребан основни и додатни материјал, као и материјалне и људске ресурсе неопходне за наваривање обезбедила је фирма „Alfa Technics“ из Свилајнца, у чијим погонима је наваривање и непосредно извршено. За потребе експеримента коришћен је додатни и основни материјал, као и поступци заваривања који су доступни самој фирми. После наваривања приступило се изради узорка за испитивање тврдоће и микроструктуре.

Експерименти су изведени на узорцима (моделима) добијеним наваривањем шипки од изабраних угљеничних и легираних челика.

Експериментална истраживања обухватила су:

1. Наваривање челичних узорка
2. Припрема наварених узорка за испитивање
4. Одређивање тврдоће и микроструктуре
5. Коментар добијених резултата

## 5.1 Основни материјал и његова својства

За експериментална истраживања су коришћена четири челика. То су: S235JR, S355J2G3, C45 и 42CrMo4. Ознаке наведених челика према другим (националним и међународним) стандардима дате су у табели 5.1

**Табела 5.1** Упоредне ознаке различитих међународних стандарда за челике

| Упоредне ознаке |          |          |
|-----------------|----------|----------|
| JUS             | DIN      | EN       |
| Č0363           | ST37-2   | S235JR   |
| Č0563           | St 52-3N | S355J2G3 |
| Č1530           | C45      | C45      |
| Č4732           | 42CrMo4  | 42CrMo4  |

Челици S235JR и S355J2G3 припадају групи општих конструкционих специјално умирених челика и примењују се за израду одговорних делова заварених конструкција, отковака и других јако напрегнутих делова у машиноградњи (осовине, вратила, вретена, зупчасти и пужни преносници и др.), односно конструкција код којих би услед појаве кртог лома дошло до хаваријског оштећења, и угрожености целе конструкције. Ови челици служе за израду различитих конструкција: одбојних ограда, носача и др.

Хемијски састав и намена челика S235JR дата су у табели 5.2, а механичка својства и микроструктура у табели 5.3.

**Табела 5.2** Хемијски састав и намена S235JR

| Основни материјал | Хемијски састав, % |      |      |       | Намена                                                                                                                                                                     |
|-------------------|--------------------|------|------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | C                  | P    | S    | N     |                                                                                                                                                                            |
| S235JR            | 0.17               | 0.05 | 0.05 | 0.007 | S235JR – за израду одговорних делова заварених конструкција, отковака и других јако напрегнутих елемената конструкција код којих не постоји опасност од појаве кртог лома. |

**Табела 5.3** Механичка својства и микроструктура челика S235JR

| Механичка својства   |                       |                    |       |             | Микроструктура                     |
|----------------------|-----------------------|--------------------|-------|-------------|------------------------------------|
| R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>eH</sub> , МПа | A <sub>5</sub> , % | KV, J | Тврдоћа, НВ | S235JR- међуфазна феритно-перлитна |
| 370-450              | 220-240               | 18-25              | 27    | 130-145     |                                    |

Хемијски састав и намена челика S355J2G3 дата су у табели 5.4, а механичка својства и микроструктура у табели 5.5.

**Табела 5.4** Хемијски састав и намена S355J2G3

| Основни материјал | Хемијски састав, % |      |      |       |       |      | Намена                                                                                                                                                                       |
|-------------------|--------------------|------|------|-------|-------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | C                  | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   |                                                                                                                                                                              |
| S355J2G3          | 0.23               | 0.60 | 1.70 | 0.035 | 0.035 | 0.60 | S355J2G3 – за израду одговорних делова заварених конструкција, отковака и других јако напрегнутих елемената конструкција код којих не постоји опасност од појаве кртог лома. |

**Табела 5.5** Механичка својства и микроструктура S355J2G3

| Механичка својства   |                       |                    |       |             | Микроструктура                      |
|----------------------|-----------------------|--------------------|-------|-------------|-------------------------------------|
| R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>eH</sub> , МПа | A <sub>5</sub> , % | KV, J | Тврдоћа, НВ | S355J2G3-међуфазна феритно-перлитна |
| 370-450              | 220-240               | 18-25              | 27    | 130-145     |                                     |

Челик С45 припада групи угљеничних челика за побољшање и има широку примену при изради различитих делова техничких система. Испоручује се у различитим облицима као што су шипке различитих попречних пресека и лимови средњих и већих дебљина. Код грађевинских машина од овог челика најчешће се израђују ножеви плугова за чишћење снега, ножеви грејдера и булдозера, саставни делови плугова, делови утоварних машина, делови посипача, као и за завртњеве и навртке и др.

Хемијски састав и намена челика С45 дата су у табели 5.6, а механичка својства и микроструктура у табели 5.7.

**Табела 5.6** Хемијски састав и намена челика С45

| Основни материјал | Хемијски састав, % |      |           |       |       | Намена                                                   |
|-------------------|--------------------|------|-----------|-------|-------|----------------------------------------------------------|
|                   | C                  | Si   | Mn        | P     | S     | С45 – за израду конструкционих делова техничких система. |
| С45               | 0.42-0.50          | 0.04 | 0.50-0.80 | 0.045 | 0.045 |                                                          |

**Табела 5.7** Механичка својства и микроструктура С45

| Механичка својства   |                       |                    |      |       |             | Микроструктура                                          |
|----------------------|-----------------------|--------------------|------|-------|-------------|---------------------------------------------------------|
| R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>eH</sub> , МПа | A <sub>5</sub> , % | Z, % | KV, J | Тврдоћа, НВ | С45 – међуфазна структура побољшања, претежно труститна |
| 700-850              | 500                   | 14                 | 30   | 32    | 334-340     |                                                         |

Челик 42CrMo4 најчешће се примењује за израду високо оптерећених делова техничких система као што су полуосовине возила и машина, цилиндри мотора, кардански преносници и др. Код грађевинске механизације, поред претходно наведеног примењује се и за израду ножева косилица за кошење траве и ножева уређаја за чишћење растиња, зупчаника, обртних назубљених венаца, зупчастих летви и др. Делови који се израђују од овог челика добијају се пластичном деформацијом на топло ковањем или ваљањем

Хемијски састав и намена овог челика дата је у табели 5.8, а механичка својства и микроструктура у табели 5.9.

**Табела 5.8** Хемијски састав и намена 42CrMo4

| Основни материјал | Хемијски састав, % |              |              |              |              |       |        | Намена                                                                                                                 |
|-------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | C                  | Si           | Mn           | Cr           | Mo           | P     | S      | 42CrMo4-за израду високо оптерећених делова возила и машина који се израђују поступком пластичне деформације на топло. |
| 42CrMo4           | 0.38 до 0.45       | 0.15 до 0.40 | 0.50 до 0.80 | 0.90 до 1.20 | 0.15 до 0.30 | 0.035 | 0.0035 |                                                                                                                        |

**Табела 5.9** Механичка својства и микроструктура 42CrMo4

| Механичка својства   |                       |                    |      |       |             | Микроструктура                                                                     |
|----------------------|-----------------------|--------------------|------|-------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>еН</sub> , МПа | A <sub>5</sub> , % | Z, % | KV, J | Тврдоћа, НВ | 42CrMo4-међуфазна структура побољшања, сорбит са учешћем ферита по границама зрна. |
| 110 до 1300          | 900                   | 10                 | 40   | 34    | 298-305     |                                                                                    |

## 5.2 Додатни материјал и његова својства

За сва наваривања при овим истраживањима коришћени су додатни материјали произвођача „SŽ-Elektrode Jesenice“.

Пре израде физичких модела изведене су пробе наваривања различитим додатним материјалима на разне радне предмете. Варирањем параметара наваривања (јачине струје, радног напона, брзине, пречника додатног материјала, дебљине радних предмета и др.), дошло се до технолошких параметара наваривања којима се добијају наварени слојеви задовољавајућег квалитета.

Хемијски састав испитиваних додатних материјала дати су у табели 5.10, а механичка својства чистог метала навара добијене овим испитиваним додатним материјалима дати су у табели 5.11.

**Табела 5.10** Хемијски састав и упоредне ознаке испитиваних додатних материјала

| Хемијски састав, %      |      |      |      |      |    |   |      |
|-------------------------|------|------|------|------|----|---|------|
| SŽ - Elektrode Jesenice | C    | Si   | Mn   | Cr   | Ni | W | Mo   |
| EVB 50                  | 0.08 | 0.60 | 1.0  | -    | -  | - | -    |
| E DUR 600               | 0.50 | -    | -    | 7.50 | -  | - | -    |
| FILTUB DUR 16           | 0.45 | 0.60 | 1.60 | 5.50 | -  | - | 0.80 |
| VAC 60                  | 0.08 | 0.90 | 1.50 | -    | -  | - | -    |

**Табела 5.11** Механичка својства чистог метала навара испитиваних додатних материјала

| Ознаке Д.М.             | Механичка својства   |                       |                    |       |              |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------|--------------|
| SŽ – Elektrode Jesenice | R <sub>m</sub> , МПа | R <sub>еН</sub> , МПа | A <sub>5</sub> , % | KV, J | Тврдоћа, HRC |
| EVB 50                  | 510-610              | >440                  | >24                | >47   | -            |
| E DUR 600               | -                    | -                     | -                  | -     | 57-62 HRC    |
| FILTUB DUR 16           | -                    | -                     | -                  | -     | 57-62 HRC    |
| VAC 60                  | 510-590              | >410                  | >22                | >47   | -            |

Електрода EVB 50 је базична електрода за заваривање нелегираних и нисколегираних челика и челичних лимова до 610 МПа и за заваривање ситнозрних челика повишене чврстоће. Завари су жилави и при ниским температурама и отпорни су на настајање прслина. Садржај водоника, у металу шава, нижи је од 5 ml/100g метала шава. Електрода има одличне заваривачке, технолошке особине и стабилан лук. Настала треска при заваривању се лако уклања.

Електрода E DUR 600 је базична електрода легирана хромом погодна за наношење тврдих навара на челичне делове од којих се захтева врло висока отпорност на хабање.

Примењује се за наваривање делова дробилица, делова багера, раоника плугова, пнеуматских алата, ножева за маказе, алата за пресовање, пробијање и ковање, као и других алата за рад у хладном и топлом стању. Навари су жилави и отпорни на ударна оптерећења. Овом електроодом се могу наваривати челици и челични ливови.

Жица VAC 60 је жица за заваривање у заштитном гасу MAG поступком. Погодна је за заваривање нелегираних и нисколегираних челика чврстоће до 530 МПа. Такође користи се за заваривање котловских лимова, цеви, челика за бродоградњу, микролегираних челика и челичних лимова.

Жица FILTUB DUR 16 је базична средњелегирана пуњена жица, погодна за наваривање тврдих навара на делове који су изложени процесима хабања високог интензитета. Навари су без пора и прслина због чега су отпорни на променљива динамичка и ударна оптерећења. Примењује се за наваривање лопатица и облога мешалица, зуба и других делова грађевинске механизације, делова дробилица као што су конусни уводници, чељусти, ударне греде, облоге и др.

### 5.3 Заварљивости основних материјала

Повећан садржај угљеника и легирајућих елемената погоршава заварљивост челика. Садржај угљеника у челику изнад 0.25% сврстава материјал у групу условно заварљивих челика. Заварљивост додатно погоршавају и легирајући елементи који иначе побољшавају нека друга својства челика. Поред угљеника и легирајућих елемената на погоршање заварљивости челика утичу и нечистоће (P и S), као и низ других фактора. Постоји више рачунских метода за оцену заварљивости различитих врста челика, а овде је коришћена метода Сеферијана. Прорачун температуре предгревања за поједине врсте основног материјала је изведен за пречник  $d = 10 \text{ mm}$ ,  $d = 20 \text{ mm}$  и  $d = 50 \text{ mm}$ . За основне материјале S235JR, није рачуната температура предгревања, јер је реч о материјалу добре заварљивости, па нема потребе за предгревањем.

Температура предгревања рачуната је према следећим једначинама:

$$CE = CE_h + CE_s = CE_h(1 + 0,005 \cdot s), \%$$

$$CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{17}, \%$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,025}, ^\circ\text{C}.$$

Прорачунате и усвојене температуре предгревања за различите основне материјале дате су у табели 5.12.

**Табела 5.12** Температуре предгревања испитиваних материјала

| Врста основног материјала | Начин одређивања температуре предгревања | Температура предгревања $T_p, ^\circ\text{C}$ |          |
|---------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------|
|                           |                                          | Рачунска                                      | Усвојена |
| S355J2G3                  | Метод Сеферијана                         | ~ 107                                         | 110      |
| C45                       | Метод Сеферијана                         | ~ 218                                         | 220      |
| 42CrMo4                   | Метод Сеферијана                         | ~ 269                                         | 270      |

## 5.4 Моделирање параметара наваривања и одређивање оптималне технологије

Припрема основних материјала за израду физичких модела састоји се из сечења материјала на одговарајуће димензије и његовог одмашћивања. Сечење материјала је изведено уз интензивно хлађење да би се спречила промена структуре услед загревања. Припрема додатног материјала за израду физичких модела односи се на сушење електрода на температури 350-400°C у трајању од 2h. Сви модели израђени су у истим лабораторијским условима, а наваривање је изведено у хоризонталном положају. Температура предгревања контролисана је помоћу дигиталног термометра. Основни критеријум за оцену квалитета наварених слојева јесте да навар буде хомоген без пора, укључака и прслина, како у металу навара тако и металу основног материјала (зони утицаја топлоте). Избор оптималних параметара наваривања није био једноставан, јер је било потребан велики број проби са различитим параметрима наваривања. Без обзира на то, оптималне параметре наваривања неопходно је одредити, јер само они могу дати наварене слојеве захтеваног квалитета. Након проби различитих параметара наваривања, усвојени су оптимални параметри наваривања који су примењени при изради физичких модела. Ови модели су послужили за испитивања наварених слојева у лабораторијским условима. Процесни параметри наваривања при изради физичких модела REL-ом и обложених електрода дати су у табели 5.13, а процесни параметри при изради физичких модела MAG-ом дати су у табели 5.14.

**Табела 5.13** Процесни параметри наваривања применом REL наваривања

| Ознака електроде<br>SŽ – Elektrode<br>Jesenice | Пречник<br>електродне<br>жице $d_e$ , mm | Струја<br>наваривања<br>$I$ , A | Радни<br>напон<br>$U$ , V | Брзина<br>наваривања<br>$v_z$ , cm/s | Погонска енергија<br>наваривања $q_l$ , J/cm |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| EVB 50                                         | 3.25                                     | 100-150                         | 20-23                     | 0.119-0.220                          | 20168-25455                                  |
| E DUR 600                                      | 3.25                                     | 100-150                         | 20-23                     | 0.119-0.220                          | 20168-25455                                  |

**Табела 5.14** Процесни параметри наваривања применом MAG наваривања

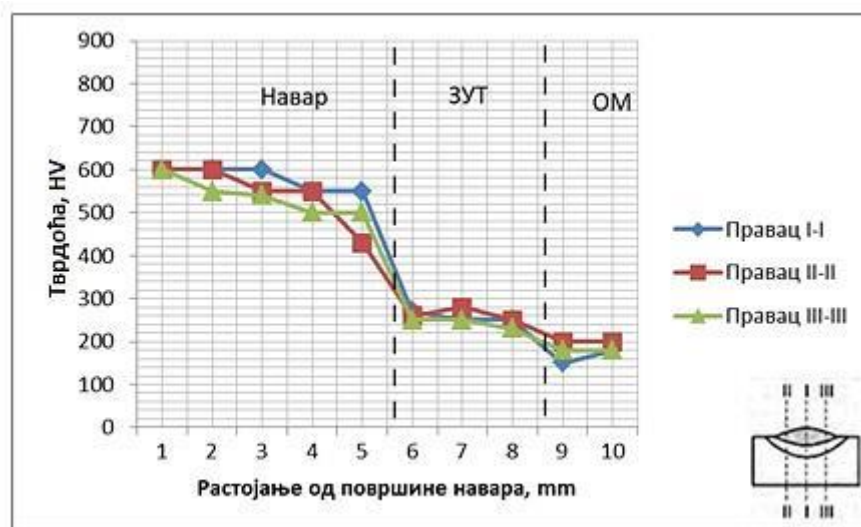
| Ознака<br>електроде SŽ –<br>Elektrode<br>Jesenice | Проток<br>заштитног<br>гаса l/min | Пречник<br>електродне<br>жице $d_e$ , mm | Струја<br>наваривања<br>$I$ , A | Радни<br>напон<br>$U$ , V | Брзина<br>наваривања<br>$v_z$ , cm/s | Погонска енергија<br>наваривања $q_l$ , J/cm |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| FILTUB DUR16                                      | 16-20                             | 1.2                                      | 130-150                         | 23-28                     | 3.5-8.0                              | 31875-13330                                  |
| VAC 60                                            | 16-20                             | 1.2                                      | 130-150                         | 23-28                     | 3.5-8.0                              | 31875-13330                                  |

## 5.5 Одређивање тврдоће карактеристичних зона навареног слоја

Мерење тврдоће се може извести различитим експерименталним методама. Код заварених и наварених спојева, тврдоћа се мери по Викерс методи због низа предности, а као главна се издваја то што ова метода нема ограничења по питању вредности измерене тврдоће. Мерење тврдоће за потребе овог рада су изведена у акредитованој лабораторији<sup>9</sup>, методом Викерс (сила утискивања  $F \approx 100 \text{ N}$ ) и према одговарајућем стандарду<sup>10</sup>. Добијени резултати су приказани у виду дијаграма расподеле тврдоће по висини навара на сликама од 5.1 до 5.13.

Тврдоћа карактеристичних зона навара мери се најчешће у три међусобно паралелна правца. Правци мерења тврдоће приказани су на следећим сликама за сваки конкретан случај, и обележени са I-I, II-II, III-III.

На слици 5.1 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на S235JR. Наваривање је изведено наношењем навара електродом E DUR 600. Наваривање је изведено без предгревања.

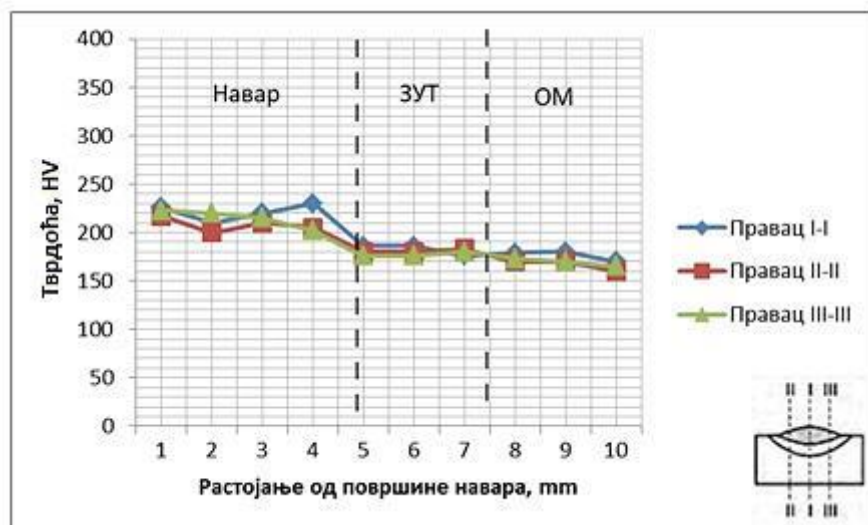


Слика 5.1 Расподела тврдоће по пресеку навара: а) О.М.-S235JR; Д.М. навара - E DUR 600

На слици 5.2 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на S235JR. Наваривање је изведено наношењем навара електродом EVB 50. Наваривање је изведено без предгревања.

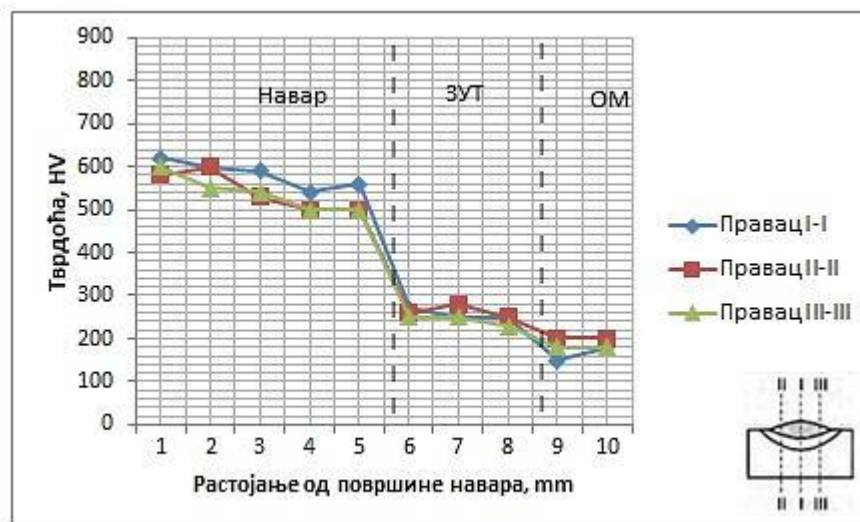
<sup>9</sup> Лабораторија фирме „RD Diagnostika“ из Београда.

<sup>10</sup> SRPS EN ISO 6507-1:2018: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method



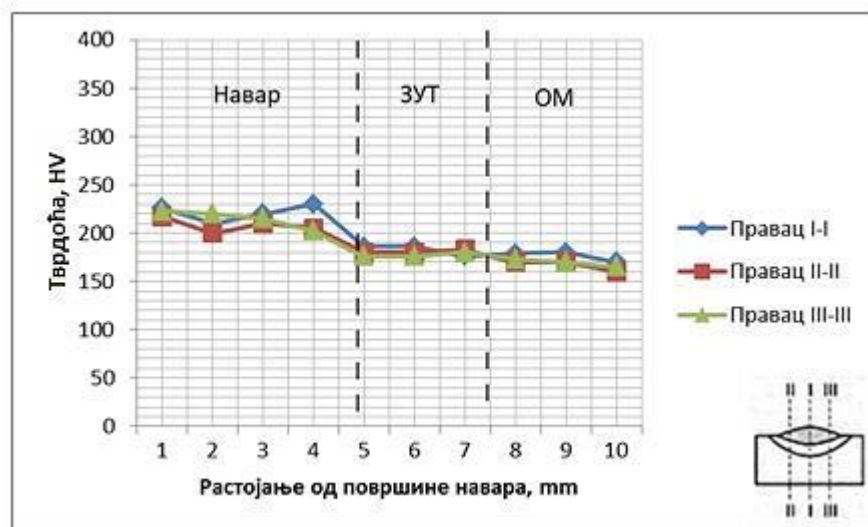
Слика 5.2 Расподела тврдоће по пресеку наvara: а) О.М.-S235JR; Д.М. наvara – EVB 50

На слици 5.3 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем наvara електродом E DUR 600. Наваривање је изведено са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .



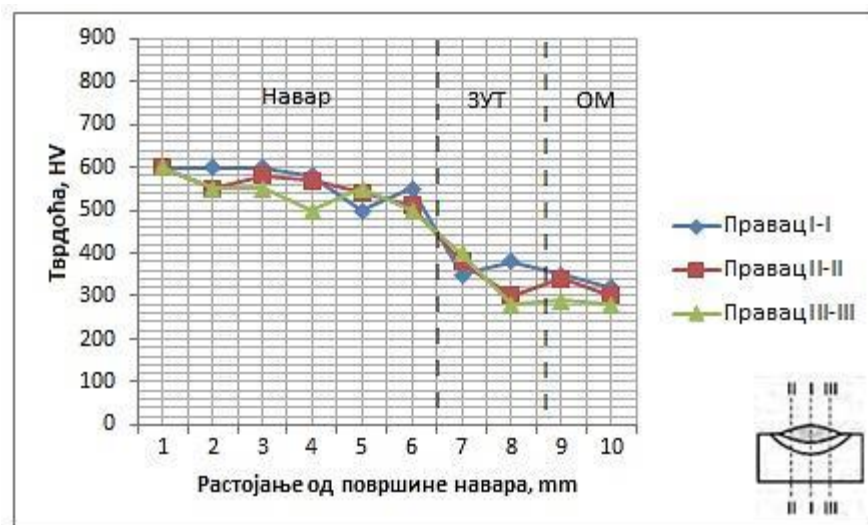
Слика 5.3 Расподела тврдоће по пресеку наvara: а) О.М.-S355J2G3; Д.М. наvara - E DUR 600

На слици 5.4 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем наvara електродом EVB 50. Наваривање је изведено са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .



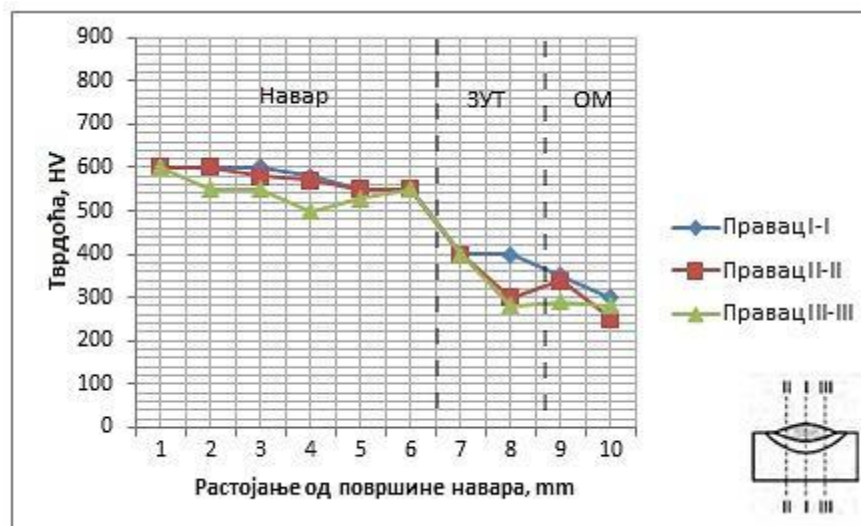
Слика 5.4 Расподела тврдоће, по пресеку наvara: а) О.М.- S355J2G3; Д.М. наvara – EVB 50

На слици 5.5 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом, електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на C45. Наваривање је изведено после предгревања на  $220^\circ\text{C}$ , и наношењем наvara електродом E DUR 600.



Слика 5.5 Расподела тврдоће по пресеку наvara: а) О.М. – C45; Д.М. наvara – E DUR 600

На слици 5.6 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на 42CrMo4. Наваривање је изведено после предгревања на  $280^\circ\text{C}$ , и наношењем наvara електродом E DUR 600.



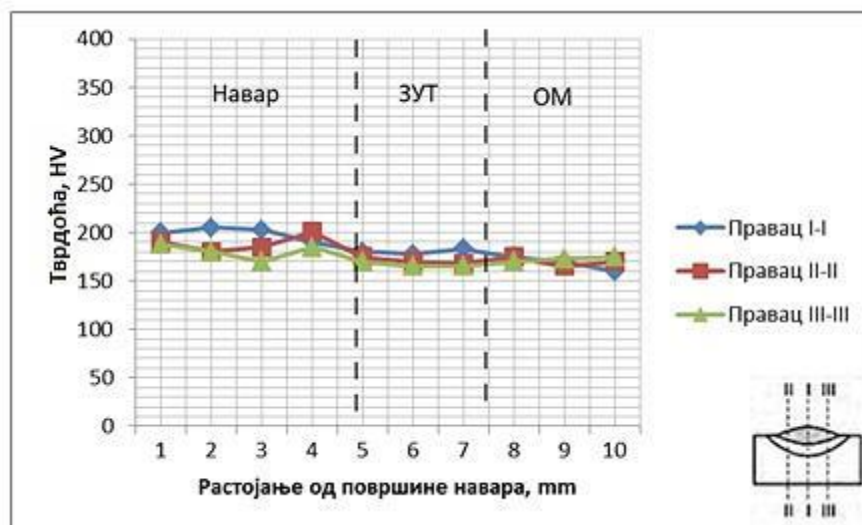
Слика 5.6 Расподела тврдоће по пресеку наvara: а) О.М. – 42CrMo4; Д.М. наvara – E DUR 600

На слици 5.7 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника  $d_z = 1.2$  mm на S235JR. Наваривање је изведено наношењем наvara пуњеном жицом FILTUB DUR 16. Наваривање је извршено без предгревања.



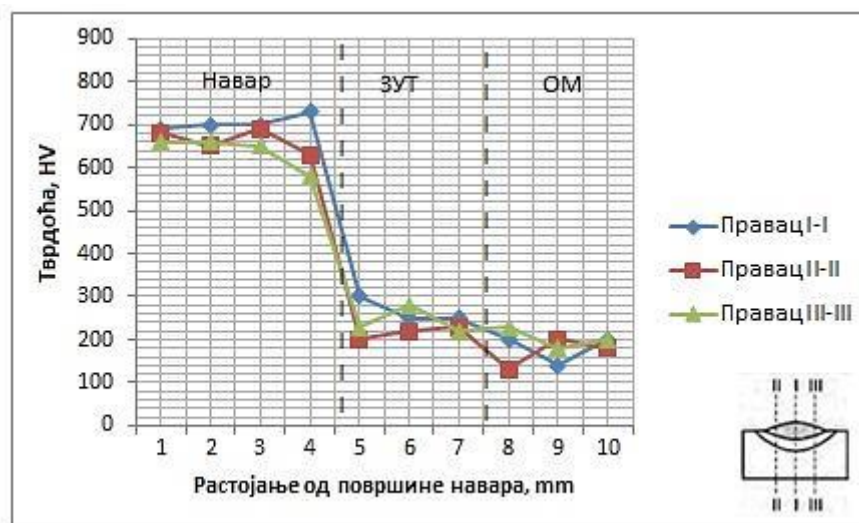
Слика 5.8 Расподела тврдоће по пресеку двослојног наvara: а) О.М.-S235JR, Д.М. наvara - FILTUB DUR 16

На слици 5.9 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника  $d_z = 1.2$  mm на S235JR. Наваривање је изведено наношењем наvara пуњеном жицом VAC 60. Наваривање је изведено без предгревања.



Слика 5.10 Расподела тврдоће по пресеку двослојног навара: а) О.М.-S235JR, Д.М. навара – VAC60

На слици 5.11 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника  $d_z = 1.2 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16. Наваривање је изведено са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .



Слика 5.11 Расподела тврдоће по пресеку двослојног навара: а) О.М.-S355J2G3, Д.М. навара - FILTUB DUR 16

На слици 5.12 приказане су измерене тврдоће по зонама навареног слоја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника  $d_z = 1.2 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем навара жицом VAC 60. Наваривање је изведено са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .



Слика 5.13 Расподела тврдоће по пресеку двослојног навара: а) О.М.-S355J2G3, Д.М. навара – VAC60

## 5.6 Одређивање микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја

Одређивање микроструктуре појединих зона навара састоји се у снимању и препознавању појединих структурних фаза материјала на микроскопу и индиректне процене својстава тих зона. При формирању навареног слоја, новонастале структуре веома се разликују од структуре основног материјала.

Микроструктурна испитивања изводе се у циљу утврђивања: структуре навара, ЗУТ-а и ОМ; ширине ЗУТ-а и појединих структура ЗУТ-а, дубине уваривања; висине разблажене зоне навара; присутних грешака (укључака троске, прслинам, гасних мехурова, оксида, нитрида, наугљенисаних или разугљенисаних зона, закаљених зона и тсл.). Испитивање микроструктуре појединих зона навара сврстава се у металографска испитивања. У зависности од степена увећања, металографска испитивања се деле на *макроскопска* и *микроскопска*.

Макроскопска испитивања се изводе посматрањем голим оком или са увећањем до 20 пута. Уколико се на макроснимку уоче неке недозвољене неправилности спој се најчешће одбацује без даљег испитивања. Уколико је спој добар на макроснимку онда се приступа даљем микроскопском испитивању.

Микроскопска испитивања се изводе применом оптичких или електронских микроскопа са увећањима од неколико хиљада пута код оптичких до неколико стотина хиљада пута код електронских микроскопа.

Металографска испитивања изводе се на специјалним металографским узорцима који се називају шлифови или избруски. Добијају се исецањем и брушењем из припремљених модела али тако да се не промене својства материјала у зони исецања. Металографски шлифови се секу тако да обухвате све зоне навара (метал навара, ЗУТ и ОМ). При сечењу узорака неопходна је велика обазривост, јер применом метода термичког сечења може доћи до оштећења површине узорка, тј. до фазних промена, па

структура откривена на тој површини неће бити меродавна. Због тога сечење узорака треба извести уз примену интензивног хлађења или користити методе сечења воденим млазом (water jet) где нема загревања.

После сечења, брушења и полирања, следи нагризање испитиваних површина. Нагризањем се омогућава снимање појединих микроструктура. Коришћено средство за нагризање приликом испитивања микроструктуре је 4% нитал<sup>11</sup> који се углавном користи за нагризање површина угљеничних челика. Испитивање је изведено према стандарду SRPS EN ISO 17639:2020.

У оквиру спроведеног експеримента наварене су шипке од различитих квалитета челика (S235JR, S355J2G3, C45 и 42CrMo4) са два различита додатна материјала (EDUR 600 и FILTUB DUR 16). Металографски избруски исечених из наварених шипки су приказани на слици 5.14.



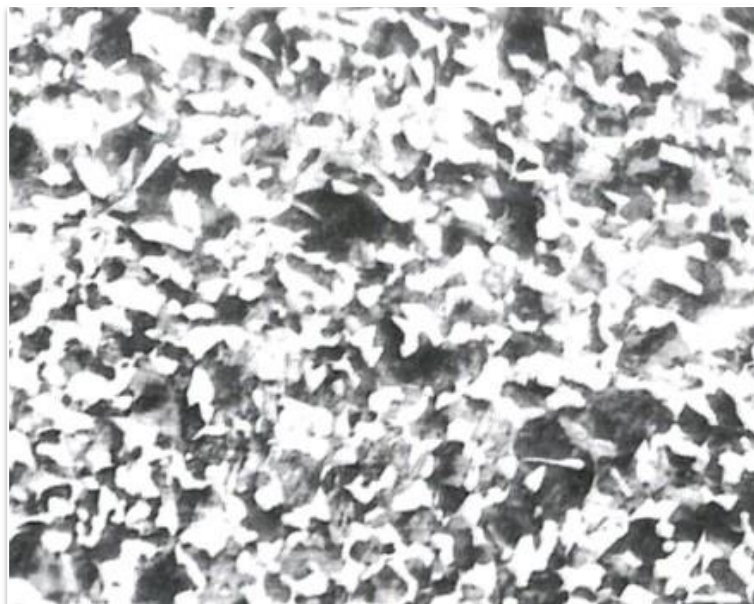
**Слика 5.14** Изглед неких припремљених металографских избрусака

Затим је на металографском микроскопу "MCXM500", увећањем до 1000 пута, извршено снимање микроструктуре свих карактеристичних зона навара (ОМ, МШ и ЗУТ). Добијени резултати су приказани на сликама 5.15-5.33.

На сликама 5.15 до 5.18 приказане су микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја, формираног REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем навара електродом E DUR 600 са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .

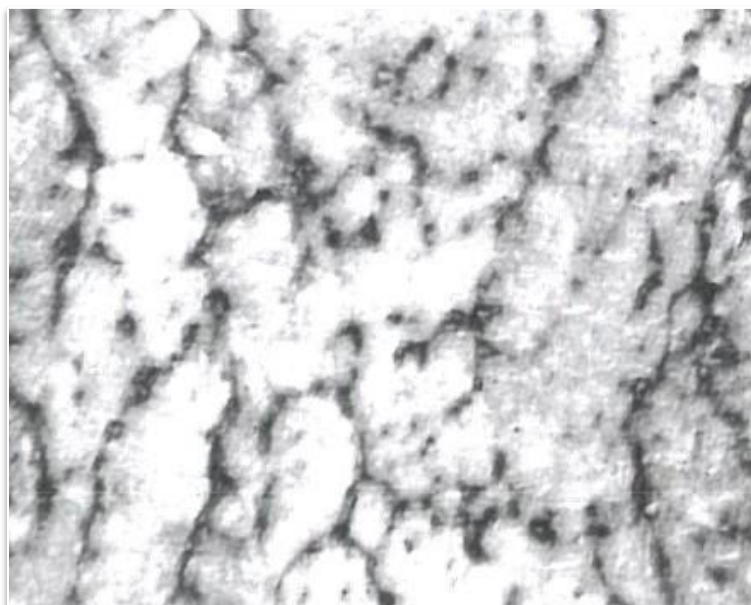
---

<sup>11</sup> Нископроцентни раствор азотне киселине у денатурисаном алкохолу.



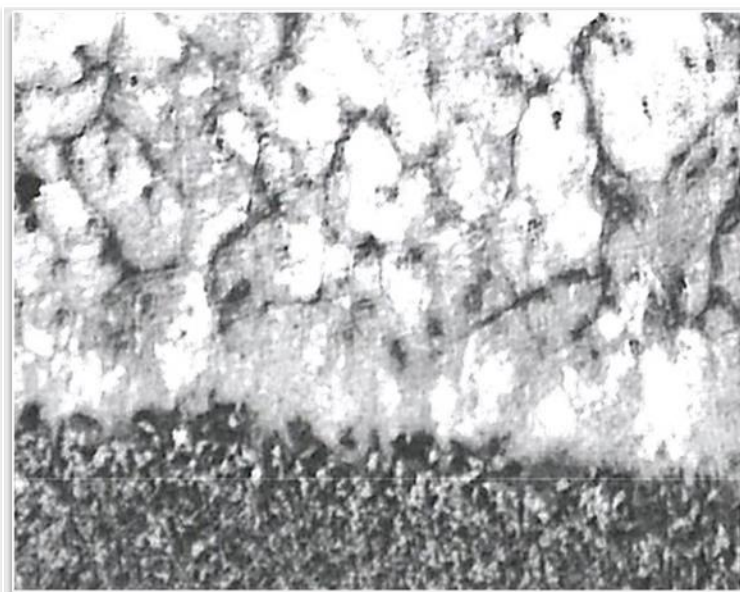
Феритно-перлитна структура, увећање 200×

**Слика 5.15** *Микроструктура основног материјала*



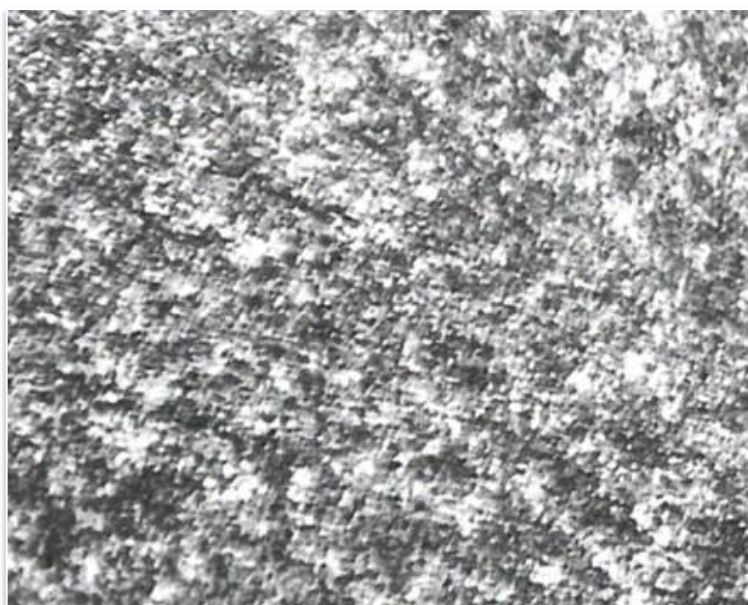
Нехомогена аустенитна структура, увећање 200×

**Слика 5.16** *Микроструктура навара*



Перлитно-феритна структура, увећање 200×

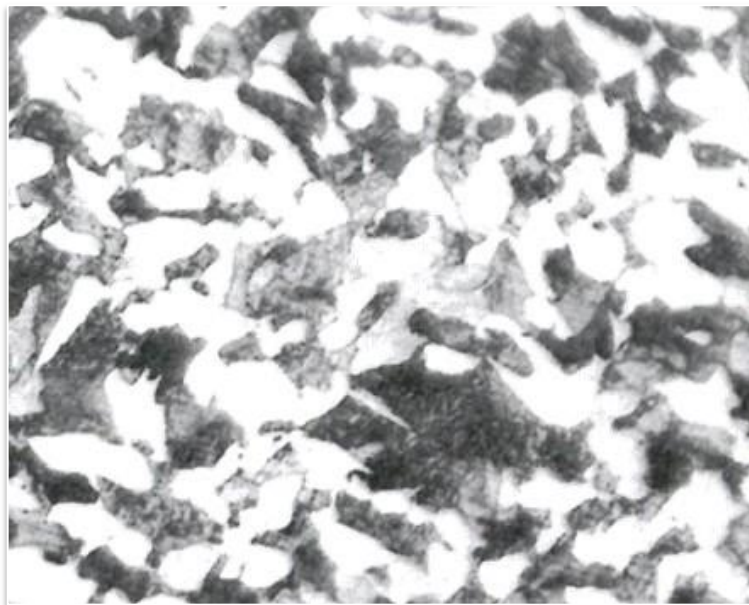
**Слика 5.18** *Микроструктура ЗУТ-а*



Перлитно-феритна структура, увећање 200×

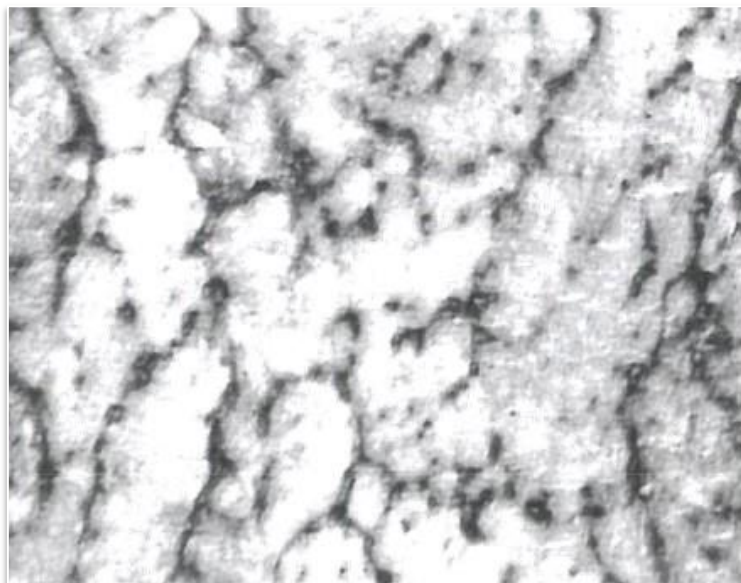
**Слика 5.18** *Микроструктура ЗУТ-а*

На сликама 5.19 до 5.22 приказане су микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја, формираног REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25$  mm на S235JR. Наваривање је изведено наношењем навара електродом E DUR 600 без предгревања.



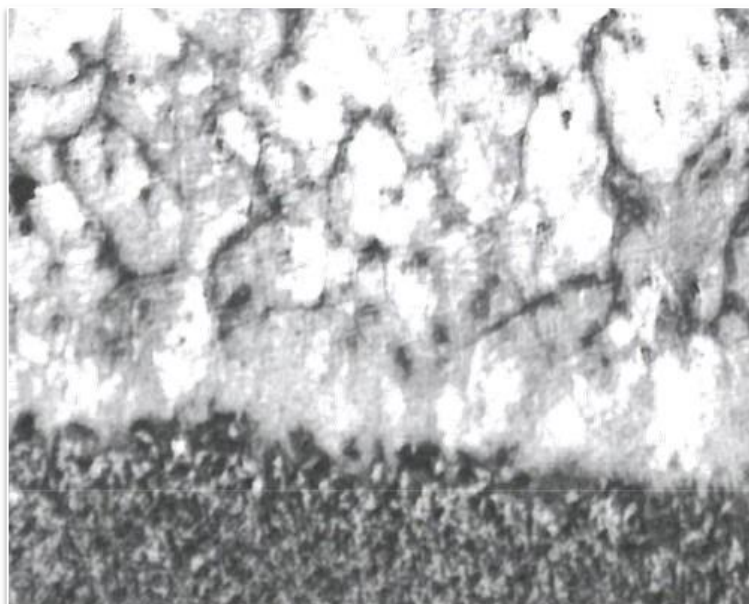
Феритно-перлитна структура, увећање 200×

Слика 5.19 Микроструктура основног материјала



Нехомогена аустенитна структура, увећање 200×

Слика 5.20 Микроструктура навара



Нехомогена аустенитна структура, увећање 200×

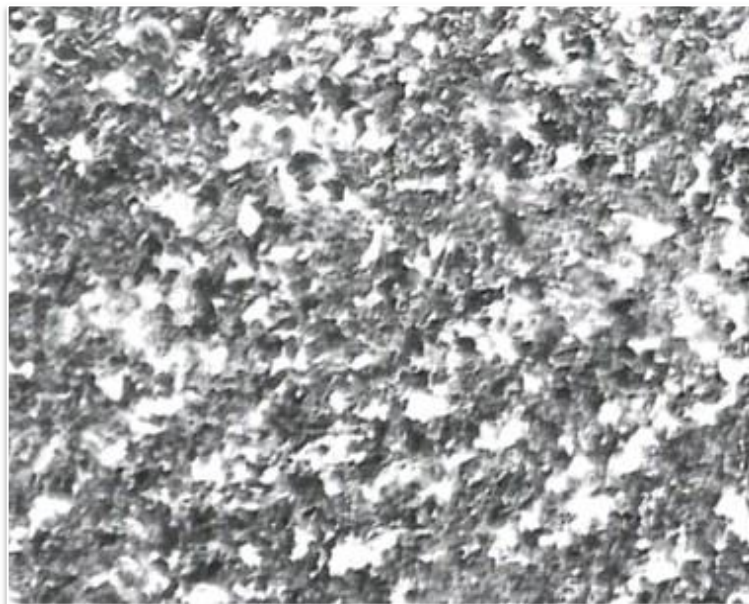
**Слика 5.21** Микроструктура међуслоја (између навара и ЗУТ-а)



Перлитно-феритна структура, увећање 200×

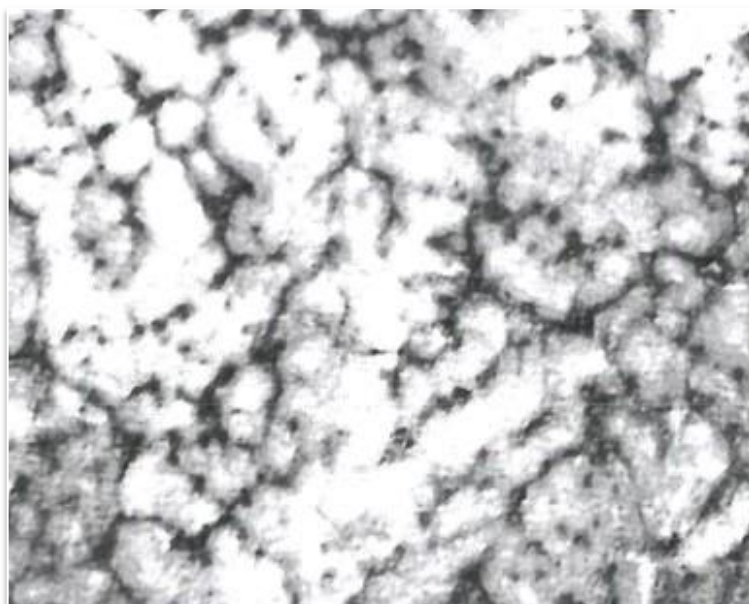
**Слика 5.22** Микроструктура ЗУТ-а

На сликама 5.23 до 5.26 приказане су микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја, формираног REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на 42CrMo4. Наваривање је изведено наношењем навара електродом E DUR 600 са предгревањем на  $270^\circ\text{C}$ .



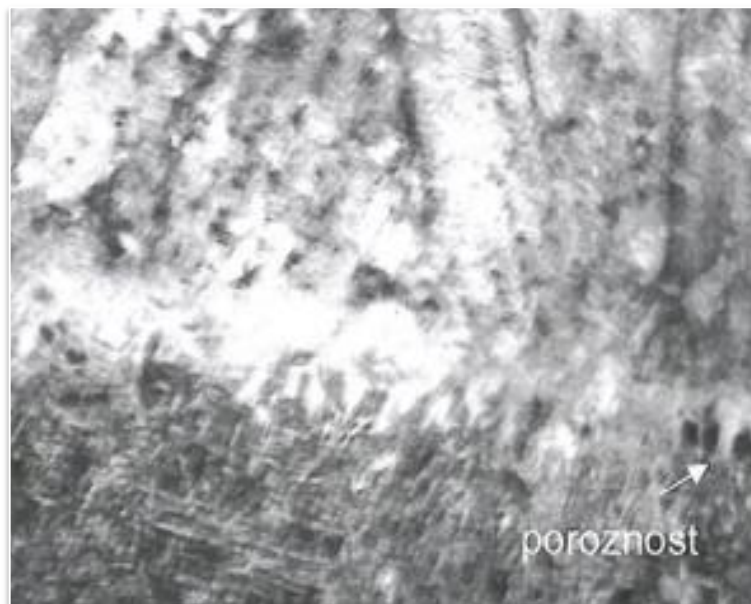
Мартензитно-бејнитна структура, увећање 200×

**Слика 5.23** *Микроструктура основног материјала*



Нехомогена аустенитна структура, увећање 200×

**Слика 5.24** *Микроструктура навара*



Нехомогена аустенитна структура, увећање 200×

**Слика 5.25** Микроструктура међуслоја (између навара и ЗУТ-а)

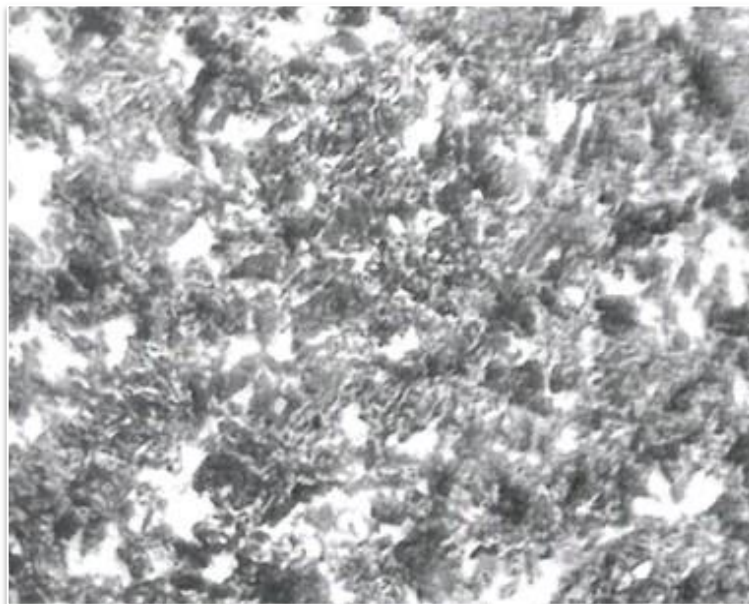
Напомена: микроструктурна испитивања су показала да се у међуслоју јавила порозност.



Структура игличастог мартензита, увећање 200×

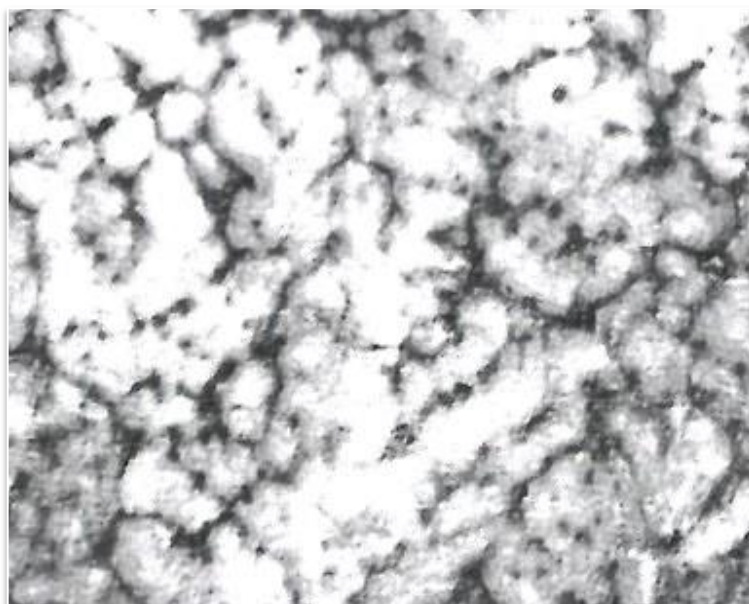
**Слика 5.26** Микроструктура ЗУТ-а

На сликама 5.27 до 5.30 приказане су микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја, формираног REL-ом електродом пречника  $d_e = 3.25 \text{ mm}$  на С45. Наваривање је изведено наношењем навара електродом Е DUR 600 са предгревањем на  $220^\circ\text{C}$ .



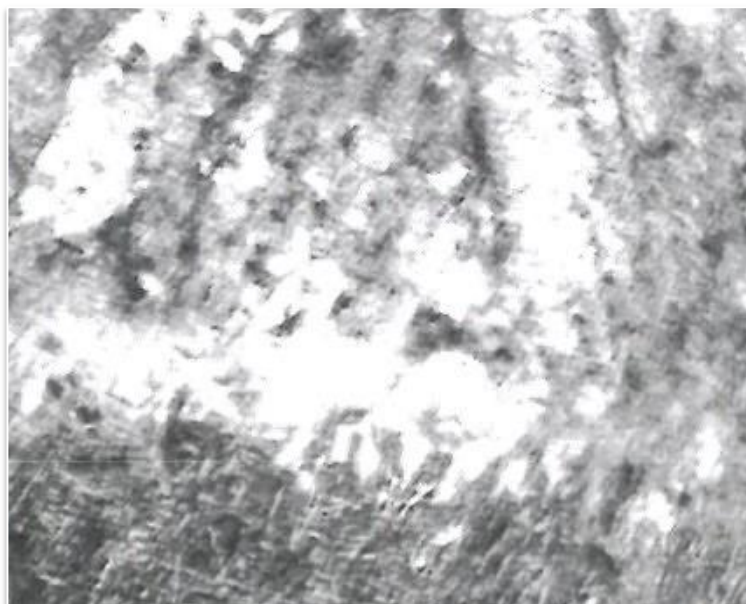
Мартензитно-бејнитна структура, увећање 200×

**Слика 5.27** Микроструктура основног материјала



Нехомогена дендритна структура, увећање 200×

**Слика 5.28** Микроструктура навара



Нехомогена дендритна структура, увећање 200×

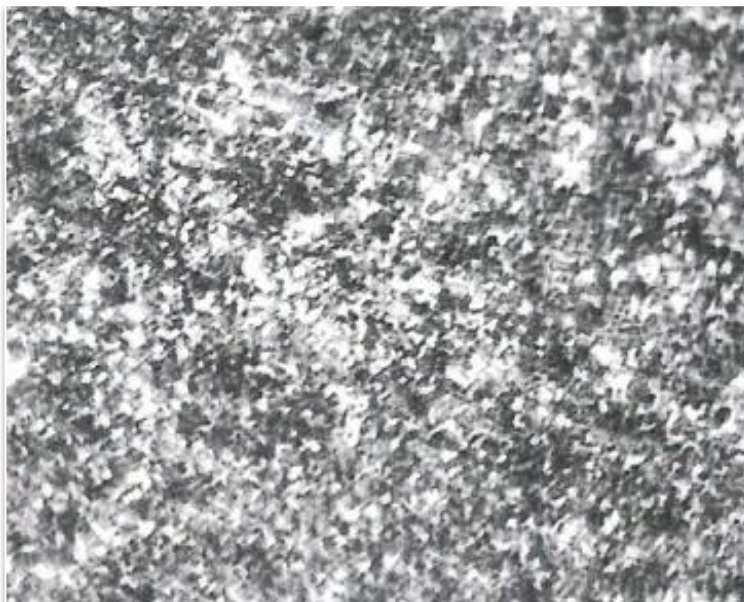
**Слика 5.29** Микроструктура међуслоја (између навара и ЗУТ-а)



Структура игличастог мартензита, увећање 200×

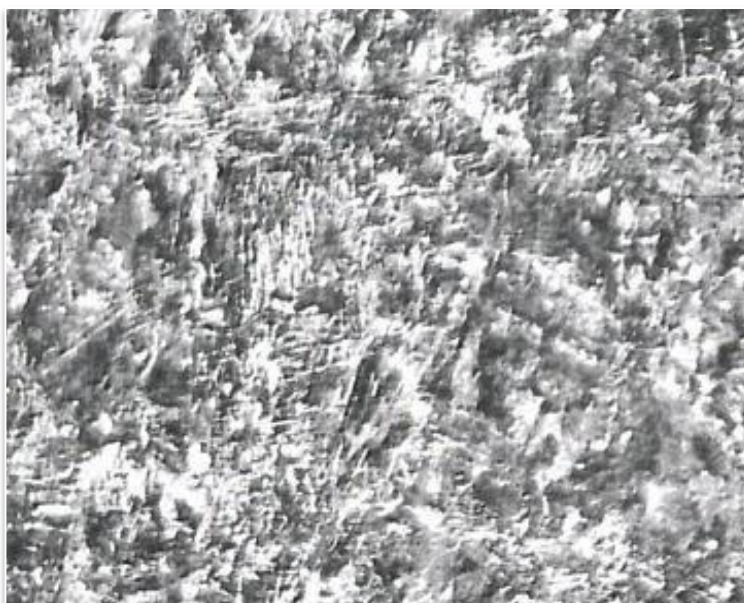
**Слика 5.30** Микроструктура ЗУТ-а

На сликама 5.31 до 5.33 приказане су микроструктуре карактеристичних зона навареног слоја, формираног МАG-ом жицом пречника  $d_e = 1.2 \text{ mm}$  на S355J2G3. Наваривање је изведено наношењем навара жицом FILTUB DUR 16 са предгревањем на  $110^\circ\text{C}$ .



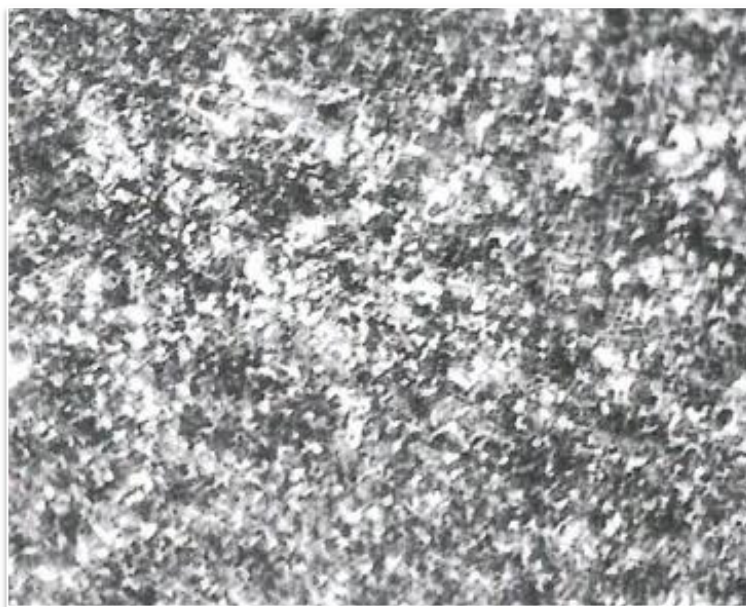
Перлитно-феритна структура, увећање 200×

**Слика 5.31** *Микроструктура основног материјала*



Мартензитно-бејнитна структура, увећање 200×

**Слика 5.32** *Микроструктура навара*



Перлитно-феритна структура, увећање 200×

Слика 5.33 Микроструктура ЗУТ-а

## 5.7 Коментари испитивања

Експериментални део, изведен је на физичким моделима, у лабораторијским условима. Мерење тврдоће појединих зона навара и читавање микроструктуре изведено је на припремљеним металографским избрусцима. Тврдоћа је одређивана применом Викерс методе за мерење тврдоће, а механичка својства и хемијски састав за испитиване материјале узимани су из каталога произвођача.

Наваривања су изведена наношењем слоја навара од испитиваних додатних материјала на различите основне материјале. Од додатног материјала коришћене су електроде, трговачког назива E DUR 600, EVB 50, као и жице FILTUB DUR 16, VAC 60. Од поступака заваривања коришћени су REL и MAG поступци.

Тврдоћа навареног слоја мерене су по попречном пресеку навара у три правца, при чему је мерење извођено од слоја навара према основном материјалу. Добијени резултати приказани су у виду дијаграма. Читавање микроструктуре појединих зона навара изведено је по попречном пресеку навара дуж средишне осе. Том приликом су читане и снимљене микроструктуре појединих зона навара (навара, зоне утицаја топлоте и основни материјал) које су настале при формирању навареног слоја.

При наваривању челика S235JR са садржајем угљеника до 0.25% није било потребе за додатним мерама (предгревање) како би се добио наварени слој захтеваног квалитета, јер је основни материјал добро заварљив.

Насупрот томе, при наваривању угљеничних челика са садржајем изнад 0.25% C и легираних челика који у свом саставу имају и карбидотворне легирајуће елементе, неопходна је примена додатних мера како би се побољшала њихова заварљивост, јер они се сврставају у групу условно заварљивих челика. При наваривању ових челика у ЗУТ-у се

добиају продукти каљења и тврдоћа која је најчешће изнад дозвољених граница. Процес наваривања мора се извести под посебним условима уз примену предгревања, а често је неопходно извести и неку накнадну термичку обраду (отпуштање, жарење, побољшање и др). Применом претходне или неке накнадне термичке обраде добијају се повољније структуре мање тврдоће, веће жилавости, довољно високе јачине и напона течења, што је праћено смањењем нивоа сопственог напонско-деформационог стања у материјалу. Због додатних трошкова при заваривању и наваривању накнадну термичку обраду, кад год је то могуће, треба избегавати.

Микроструктурна испитивања су показала повољне структуре за наварене узорке, без прлина, порозности, налепљења и других неправилности. Осим у случају навареног узорка челика 42CrMo4, где се у међуслоју јавила минимална порозност. Појава порозности или појава укључака између наварених слојева може бити последица неправилног заваривања и одступања од прописане технологије (грешка заваривача).

Овим експерименталним истраживањем је показано да су конструкциони челици, квалитета S235JR и S355J2G3, добро заварљиви и да за наваривање ових челика нису потребне додатне мере како би се добио захтевани квалитет навареног слоја. Насупрот томе, челици за побољшање, квалитета C45 и 42CrMo4, показују лошију заварљивост и захтевају додатне мере, као што је предгревање пре наваривања, а у неким случајевима и накнадну термичку обраду.

Експериментом је показано и да додатни материјал, E DUR 600 и FILTUB DUR 16, имају већу тврдоћу навареног слоја (~ 600 HV) и да су погоднији за наваривање у односу на додатне материјале, EVB 50 и VAC 60, чија је тврдоћа била приближно ~250 HV.

Такође, вишеслојно наваривање доводи до отпуштања материјала претходног слоја, што доводи до смањења његове тврдоће и образовања повољније структуре. Последњи нанети слој навара има највећу тврдоћу, па се када је то неопходно, површински део материјала последњег слоја навара одстрањује брушењем или неком другом машинском обрадом, што зависи од његове тврдоће. На квалитет једног навареног споја утиче више различитих фактора. После ових експерименталних испитивања механичких и металографских својстава наварених слојева, може се закључити да на квалитет навареног слоја највише утиче примењена технологија наваривања. Односно, правилним моделирањем процеса наваривања стварају се услови за добијање наварених слојева захтеваног квалитета.

Теоријска и експериментална истраживања, и провере квалитета нанетих навара, указују да се наваривање ових челика могу изводити само у погонима који располажу адекватном опремом и одговарајућим стручним кадром.

## 6. Закључак

Теоријским и експерименталним истраживањима, приказаним у овом раду, уз одређене корекције, могу се успешно применити за моделирање репаратурног или производног наваривања радних површина делова техничких система. Како би се дошло до нових сазнања неопходних за решавање изузетно сложених техничко-технолошких проблема при заваривању и наваривању захтева се извођење бројних сложених теоријских и експерименталних истраживања из више различитих научних области. Оваква истраживања треба урадити како би се на основу добијених резултата усвојила оптимална технологија, која ће омогућити добијање захтеваног квалитета приликом заваривања или наваривања.

Експериментална истраживања у овом раду су за циљ имала да утврде утицај REL и MAG поступка, применом различитих додатних материјала, на физичко-металуршке особине челика S235JR, S355J2G3, C45 и 42CrMo4. У ту сврху, испитивана је тврдоћа и микроструктура наварених узорака. Док је теоријски део овог рада обухвата општа објашњења појединих појава које прате процес заваривања и наваривања.

У теоријском делу овог рада дат је општи преглед сазнања из више научних области неопходних за разумевање ове проблематике. Објашњен је сложен појам заварљивости различитих врста челика, начин одређивања заварљивости и оцене заварљивости за различите врсте челика, појаве разних врста прелина и мере за њихово спречавање. Такође указано је на значај фазних промена и њихов утицај на заварљивост. Дате су рачунске, а поред њих и експерименталне и практичне пробе за оцену заварљивости, од којих су поједине методе коришћене за експериментално истраживање у овом раду.

На основу теоријских и експерименталних истраживања дошло се до закључка да је за пројектовање оптималне технологије, тј. моделирање процеса, неопходна су комплексна и дуготрајна истраживања, због различитих сложених физичко-хемијских појава, које настају при топљењу и кристализацији легура у заваривачкој купки. Ова истраживања су неопходна како би се добио захтевани квалитет при заваривању или наваривању.

При пројектовању технологије полази се од својстава основног материјала, а затим следи избор одговарајућег поступка и избор погодног додатног материјала у зависности од захтеваних својстава. Потом се бирају оптимални параметри заваривања (наваривања) као и претходна, текућа и накнадна термичка обрада. Најзад се прописује техника наношења завара (навара) и методе процесне и завршне контроле. Када је то неопходно предвиђа се и завршна машинска обрада.

После експерименталних истраживања процеса наваривања на моделима може се закључити, да се дошло до резултата која се могу применити на техничким системима при репаратурном наваривању. Међутим, да би репаратурно наваривање оштећених делова техничких система било успешно, мора се прописати и поштовати прецизна процедура, јер само тада се могу очекивати позитивни резултати. Да би се то постигло неопходно је да се овом проблематиком баве стручна лица техничке струке. Такође, неопходне су и специјализоване радионице са заваривачким уређајима, квалитетним материјалима и пратећом опремом. Сваки други приступ овој проблематици, неће довести до жељених резултата, већ може само створити додатне проблеме и непотребне трошкове.

## 7. Литература

- [1] Јовановић М., Лазих В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [2] Сеферијан Д.: *Металургија заваривања*, Грађевинска књига, Београд, 1969.
- [3] Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [4] Милановић В.: *Експериментално испитивање завара и одабир оптималне технологије заваривања челика повишене јачине S690QL*, мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [5] Прокић Цветковић Р., Поповић О.: *Металургија заваривања*, Универзитет у Београду, Београд, 2019.
- [6] Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., Ратковић Н.: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- [7] Лазих В.: *Оптимизација процеса наваривања са аспекта триболошких карактеристика навара и заосталих напона*, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2001.
- [8] Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.: *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [9] Мутавцић М.: *Репаратурно наваривање делова машина и уређаја грађевинске механизације*, магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.
- [10] Арсић Д.: *Оцена заварљивости и избор најповољније технологије заваривања челика повишене јачине класе S690QL*, мастер рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2013.
- [11] Дунђер М., Салопек Г., Хорват М., Кондић В., Марковић М.: *Приступ одређивању заварљивости челика*, Технички гласник, Vol. 9, No. 3, 2015, pp. 291-297.
- [12] Илић М.: *Преглед челика повишене јачине и оцена њихове заварљивости*, завршни рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2018.
- [13] Ђорђевић В., Брекић М.: *Материјали у машинству*, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1992.
- [14] Електроде Јесенице, *каталог произвођача додатног материјала*.
- [15] Мутавцић М.: *Моделирање репаратурног и производног наваривања радних делова грађевинске механизације*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [16] Арсић Д.: *Отпорност на појаву и ширење прлина у навареним слојевима термопостојаних челика*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука у Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2020.