

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: 444/2018

Слађана Р. Микић

**Топлотни биланс при заваривању плочастих
узорака**

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:

1. Опише уводне напомене о топлотном билансу,
2. Опише простирање топлоте и температурско поље,
3. Наведе и објасни начине одређивања температурског поља и температурских циклуса,
4. Да примени експериментално добијене температурске циклусе и
5. Примени трансформационе дијаграме и процени структуре и механичке особине на основу експериментално одређеног времена хлађења.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. В. Лазић: *Оптимизација процеса наваривања са аспекта триболошких карактеристика навара и заосталих напона*, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2000.
3. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић: *Технологија заваривања - приручник*, друго издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
4. М. Јовановић, В. Лазић: *Наука о заваривању - рукописи предавања*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, школска 2017-2018.
5. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

У Крагујевцу, 2021. године

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Резиме: У овом мастер раду детаљно се разматра топлотни биланс при заваривању/наваривању плочастих узорака занемарљиве дебљине у односу на ширину и дужину. Циљ је да се укаже на све промене које настају у карактеристичним зонама споја (ЗУТ-у, металу шава и зони стапања) при заваривању/наваривању тањих и дебљих плоча REL поступком заваривања. Најпре је објашњен појам простирања топлоте и температурско поље, као и начини одређивања температурског поља и температурских циклуса – аналитичким методима, нумеричким методама, експериментално и коначно посредно емпиријским методима. Са добијених температурских циклуса узимају се неке посебно значајне величине (брзина хлађења, карактеристично време хлађења и др.) које се затим међусобно упоређују и уносе у расположиве КН или КНЗ дијаграме ради процене микроструктуре, тврдоће и жилавости ЗУТ-а. Заправо циљ је да се скупа експериментална метода мерења температурских циклуса замени оним методима које дају најприближније резултате са експерименталним. Сва испитивања су углавном извођена на термопостојаним челицима.

Кључне речи: температурско поље, температурски циклус, време хлађења ($t_{8/5}$), брзина хлађења, трансформациони дијаграми, наваривање, челици за рад на топло.

Summary: In this masterwork, the heat balance during welding/surfacing of plate samples of negligible thickness in relation to width and length is considered in detail. The aim is to point out all the changes that occur in the characteristic joint zones (ZUT, weld metal, and fusion zone) during the welding/surfacing of tinner and thicker plates by the REL welding process. First, the concept of heat propagation and temperature field is explained, as well as the ways of determining the temperature field and temperature cycles – analytical methods, numerical methods, experimental and finally indirectly empirical methods. Some particularly significant values are taken from the obtained temperature cycles (cooling rate, characteristic cooling time, etc.) which are then compared and entered into the available KH or KHZ diagrams to assess the microstructure, hardness, and toughness of ZUT. In fact, the goal is to replace the expensive experimental method of measuring temperature cycles with those methods that give the closest results to the experimental ones. All tests were mainly performed on heat-resistant steels.

Key words: temperature field, temperature cycle, cooling time ($t_{8/5}$), cooling rate, transformation diagrams, surfacing, hot-working steels.

Садржај

1. Увод.....	6
2. Простирање топлоте и температурско поље	7
2.1 Простирање топлоте	7
2.2 Температурско поље	10
2.2.1 Температурско поље при заваривању танке плоче	13
2.2.2 Температурско поље при заваривању полубесконачног (масивног) тела.....	15
2.2.3 Почетни и гранични услови - општи случај.....	15
3. Начини одређивања температурског поља и температурских циклуса	18
3.1 Аналитичке методе	18
3.1.1 Расподела температура у случају покретног извора топлоте.....	22
3.1.2 Расподела температура у случају тренутног извора топлоте	23
3.2 Аналогне методе	24
3.3 Нумеричке методе.....	24
3.3.1 Метода коначних разлика (МКР)	25
3.3.2 Метода коначних елемената (МКЕ).....	26
3.4 Експерименталне методе.....	26
4. Експериментално одређивање температурских циклуса	27
4.1 Прорачун елемената температурског циклуса при заваривању	29
4.1.1 Максимална температура	29
4.1.2 Брзина хлађења	30
4.1.3 Брзина задржавања	30
4.1.4 Време хлађења $t_{8/5}$	31
5. Примена трансформационих дијаграма и процена структуре и механичких особина на основу експериментално одређеног времена хлађења.....	35
5.1 Трансформациони дијаграми	35
5.1.1 Дијаграми изотермалног разлагања аустенита (IRA, TTT)	35
5.1.2 IRA – дијаграми подеутектоидног и наеутектоидног челика.....	37
5.1.3 IRA – дијаграми легираних челика	37
5.1.4 Дијаграми континуалног разлагања аустенита (ARA, KH)	39
5.1.5 Примена трансформационих дијаграма у технологији заваривања	40
5.2 Регенерација алата за рад на топло	41
5.2.1 Избор додатног материјала и технологије заваривања плоча	44
5.2.2 Одређивање температурског циклуса.....	45

5.2.3 Оцена заварљивости основног материјала	48
5.3 Избор најповољније формуле за прорачун времена хлађења ($t_{8/5}$)	49
5.3.1 Одређивање температурских циклуса експерименталном методом помоћу термопарова	49
5.3.2 Експериментални резултати који се односе на температурске циклусе при заваривању челика за рад на топло - Č5742	51
5.3.3 Оцена тачности аналитичких израза за прорачун времена хлађења	56
5.3.4 Анализа добијених резултата	57
5.3.5 Веза између улазних параметара заваривања и излазних особина вара на основу КН – дијаграма при заваривању челика - Č5742.....	57
6. Закључак	63
7. Литература.....	65

1. Увод

Расподела и пренос топлоте при заваривању је веома сложен процес, који се може проценити помоћу основних закона физике и термодинамике. Основни задатак је да се ти процеси проуче и прате, да би се на њих могло утицати, у циљу добијања оптималних излазних резултата. Из тих разлога неопходно је познавати и промене температура у појединим карактеристичним тачкама око вара, као и познавање карактера тих промена у току процеса заваривања. Правилно одређене карактеристичне величине температурског циклуса и на основу тога правилно изабрани параметри заваривања омогућавају да се остваре оптималне особине заварених слојева и сведу на најмању меру неповољне промене у ЗУТ-у. Процес заваривања метала топљењем одвија се у условима брзих температурних промена у веома широком дијапазону. Температура основног материјала при заваривању се креће од -30°C до 3000°C . У овом температурском интервалу долази до следећих процеса:

- загревање основног и додатног материјала,
- топљење основног и додатног материјала,
- металуршке реакције у купки и
- структурне промене у основном и додатном материјалу.

Како би се контролисали и регулисали ови процеси, потребно је знати утицај свих параметара заваривања као и утицај извора топлоте који проузрокују температурске промене у металу.

Топлотни основи заваривања су научна дисциплина која проучава изворе топлоте, загревање и хлађење метала и њихов утицај на наведене процесе.

Извори топлоте који се примењују код заваривања топљењем карактеришу се високом концентрацијом топлоте, која је потребна за брзо загревање и топљење метала. Основни задатак је да истопи крајеве метала и додатни материјал и да на тај начин створи купку растопљеног метала чијим хлађењем се добија чврст хомоген спој по могућности приближне структуре као и основни материјал.

Процес загревања метала зависи од:

- топлоте коју унесе извор,
- од распрострањања топлоте у купки растопљеног метала,
- од распрострањања топлоте у маси нерастопљеног метала,
- од губитка топлоте кроз површину метала у околину услед зрачења и конвекције и
- услед додира са тврдим телима (путем провођења).

Примењујући теорију концентрисаних извора топлоте код заваривања, пружа се могућност да се проуче многе појаве које се одвијају у области ниских температура, као и да се установи пут за њихову регулацију. На овај начин се могу пратити структурне промене код хлађења у слојевима који су удаљенији од лука али који се налазе у ЗУТ-у, или чак температурске промене које доводе до настанка унутрашњих напона и образовања прелина. Код заваривања пренос топлоте се изводи помоћу три основна механизма преноса топлоте, а то су: кондукција, конвекција и зрачење.

2. Простирање топлоте и температурско поље

2.1 Простирање топлоте

Топлота при заваривању топљењем настаје као резултат претварања кинетичке енергије електрона и јона у електричном луку. За њу је карактеристично да се простира из места више температуре ка месту са nižом температуром, док се та места топлотно/температурски не изједначе. Топлота се не преноси са једног тела на друго, ако су тела у топлотној равнотежи, односно ако тела имају исту температуру. Топлота се мери јединицама за енергију, односно џулима (J). Код заваривања топљењем особине материјала у ЗУТ-у се мање или више погоршавају, у степену који за дати основни материјал највише зависе од достигнуте температуре и брзине њене промене у појединим тачкама ЗУТ-а.

Постоје три начина простирања топлоте:

- Провођење (*кондуkција*),
- Струјање (*конвекција*) и
- Зрачење (*радијација*).

Кондуkција (провођење) – настаје у чврстим поликристалним материјалима – атоми који образују кристалне решетке осцилују око својих равнотежних положаја и тиме преносе енергију коју су примили од неког топлотног извора. Сваки чврст материјал се одликује одређеном вредношћу коефицијента термичке проводности (λ). Метали имају највећу термичку проводност у односу на чврста тела, код метала се провођење топлоте одвија углавном слободним кретањем електрона, а у мањој мери осцилацијама атома око чворова кристалне решетке.

Овај процес у суштини представља размену кинетичке енергије и може се одвијати на два начина:

- са атома на атом, осциловањем око равнотежног положаја и
- преко слободних електрона, који се сударају са атомима и јонима и предају им своју топлотну енергију.

Конвекција (струјање) – настаје природним струјањем флуида. Начин преношења се остварује кретањем молекула, при чему молекули предају своју топлотну енергију другим молекулима. У процесу заваривања пренос топлоте се може запазити у купки растопљеног метала. Путем конвекције предаје се знатан део топлоте из основног материјала у околину.

Простирање топлоте конвекцијом и кондуkцијом могуће је само кроз материјалне средине.

Зрачење (радијација) – представља специфични вид простирања топлоте. Топлотна енергија се претвара у енергију зрачења – енергију електромагнетних таласа, који се простиру кроз простор и када наиђу на другу материју поново се претварају у топлотну енергију.

Зрачењем се простира топлота и у вакууму (нпр. зрачење електромагнетних таласа са сунца). Топлотни зраци се крећу кроз прозрачне средине брзином светлости и ако на свом путу наиђу на нека непрозрачна тела, апсорбују се у њима у виду топлоте.

На тај начин се између извора топлоте и тела које прима ту топлоту успоставља пренос топлоте зрачењем који је повезан са двоструким преображајем.

Прво се топлотна енергија претвара у енергију зрачења, а затим обрнуто.

Провођење топлоте у чврстим телима се изражава на основу Фуријеовог закона, при чему је количина проведене топлоте (dQ) за време (dt) кроз елемент изотермичке површине (A) сразмерна градијенту температуре:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial n} \cdot \vec{n}_0.$$

Фуријев закон у математичком облику:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dA \cdot dt, J,$$

или после увођења појма топлотног протока (флукса):

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}, \frac{J}{s},$$

и специфичног топлотног флукса (векторска величина):

$$q = \frac{d\dot{Q}}{dA}, \frac{J}{m^2s},$$

добија се:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n}$$

односно у векторском облику Фуријеов закон се своди на:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot \vec{n}_0 = -\lambda \text{ grad}T,$$

где је:

λ – термичка проводност или коефицијент топлотне проводљивости у $W/m \cdot K$,

T – температура у K ,

n – нормала на изотермичку површину,

$\vec{n}_0$ – јединични вектор у правцу нормале.

Локално топљење основног метала при заваривању може се остварити само помоћу снажних извора топлоте.

При заваривању топљењем, топлота игра битну улогу, како у погледу омогућавања спајања, тако и у погледу производности процеса и квалитета споја. Процеси се одвијају веома брзо, у великом температурском интервалу. У веома кратком временском интервалу наступају: топљење основног и додатног материјала, металуршке реакције у растопу, кристализација растопљеног метала, структурне и запреминске промене у додатном и основном материјалу, као термичке деформације и сопствени напони.

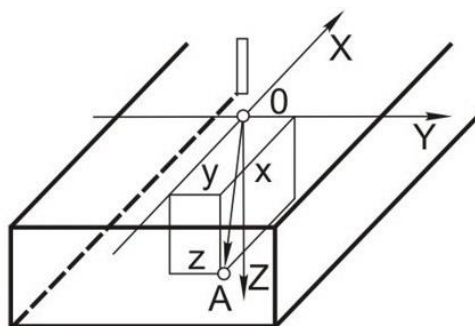
Да би се остварило неопходно топљење метала при заваривању потребно је да извор топлоте има такву снагу која ће бити довољна за загревање и топљење метала, као и за покривање топлотних губитака.

Код заваривања топљењем постоје следеће физичке појаве:

- локално топљење и очвршћавање,
- хемијско – физичке реакције,
- структурне промене у шаву и ЗУТ-у и
- термичке деформације и сопствени напони услед неравномерног загревања и хлађења.

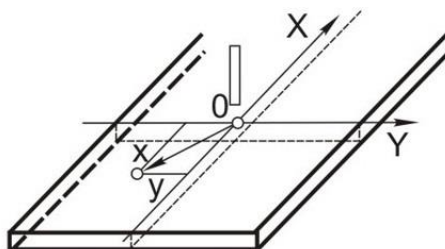
Ширина зоне утицаја топлоте зависи од начина и степена локалног загревања, расподеле температуре, брзине промене температуре и крутости завариваних делова. Извори топлоте могу бити:

- тачкасти извори топлоте – се односе на тродимензионално провођење топлоте (сл. 2.1),



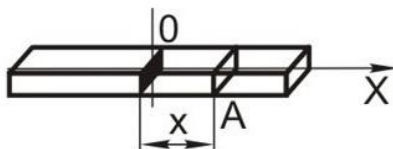
Слика 2.1 Тачкасти извор топлоте

- линијски извори топлоте – су дводимензионално провођење топлоте (сл. 2.2) и



Слика 2.2 Линијски извор топлоте

- површински извори топлоте – се односе на једнодимензионално провођење топлоте (сл. 2.3).



Слика 2.3 Површински извор топлоте

Топлота се простира кроз тело све док се температуре не изједначе по целој запремини. У зависности од времена дејства и кинетичког стања, топлотни извори могу бити:

- *тренутини и континуални,*
односно,
- *покретни и непокретни.*

При заваривању топљењем топлота се локализује на узак појас око линије спајања. Могу наступити два случаја у зависности од количине доведене топлоте и величине и облика тела:

- ако је тело масивно – може се сматрати да се количина доведене топлоте простира провођењем у масу тела и
- ако је тело у облику танке плоче – један део доведене топлоте простира се кроз плочу провођењем, а други део се губи зрачењем и струјањем у околну средину преко граничних површина плоче.

2.2 Температурско поље

Температурско поље – представља расподелу температура у радном предмету у датом тренутку времена. Температурско поље може бити : *стационарно* и *нестационарно*. Јасно је, да је температура функција координата појединих тачака (x , y , z), а врло често је уз то и функција времена (t). У вези са тим, може да се дефинише:

Просторно температурско поље:

- стационарно $T=T(x, y, z)$,
- нестационарно $T=T(x, y, z, t)$.

Површинско температурско поље:

- стационарно $T=T(x, y)$,
- нестационарно $T=T(x, y, t)$.

Линијско температурско поље:

- стационарно $T=T(x)$,
- нестационарно $T=T(x, t)$.

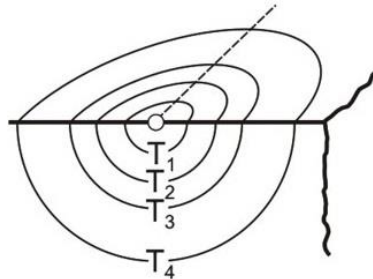
На формирање температурског поља утичу следећи параметри:

- облик и стање извора топлоте,
- термофизичке особине основног материјала и
- габаритне мере радног предмета.

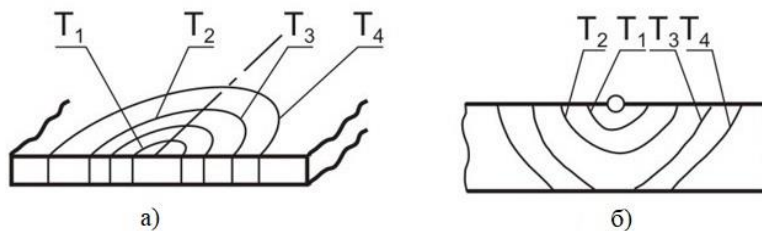
Код попречних пресека радног предмета, температурско поље се приказује *изотермичким површинама* или *изотермичким линијама*, које повезују геометријско место тачака једнаких температура. Изотермичке површине могу бити у облику:

- концентричних полулопти – где се изотермичке површине које се формирају после одређеног времена загревања масивног тела непокретним тачкастим извором топлоте (сл. 2.4).
- танке плоче – где су при загревању изотермичке површине у облику дискова заједничке осе чија висина одговара дебљини плоче (сл. 2.5а). Ако се под истим условима загрева челична плоча дебљине $s > 5 \text{ mm}$ изотерме температурског поља се деформишу (сл. 2.5б) због промене топлотног флукса на доњој граничној површини.

Свака елементарна запремина, тј. свака тачка тела, се под утицајем топлотних таласа загрева до одређене максималне температуре, а затим долази до процеса – хлађења.



Слика 2.4 Расподела температура при загревању непокретним топлотним извором концентричних полулопти



Слика 2.5 Расподела температура при загревању непокретним топлотним извором плоче

Промена температуре у функцији времена било које тачке тела која се налази било где у температурском пољу, назива се *температурским циклусом*, који је одређен изразом:

$$T = T(x_0, y_0, z_0, t).$$

где су:

x_0, y_0, z_0 – координате разматране тачке, а t – време.

Постоје бројне методе за решавање проблема расподеле температура у појединим тачкама завариваног тела, али све у основи полазе од основног израза за температурско поље у случају познатог запреминског извора топлоте, који је развио Фурије:

$$W = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(-\lambda \cdot \text{grad} T).$$

Једначина представља основни израз за температурско поље, помоћу којег се одређују температуре и температурски циклуси при заваривању и наваривању различитим поступцима.

После прекида довођења топлоте (прекидом успостављеног лука тј. прекидом довођења електричне струје и тсл.), члан с леве стране постаје једнак нули па температурско поље (при хлађењу) описују преостала два члана.

За практично решавање проблема неопходно је увести следеће претпоставке: да λ не зависи од правца (за поликристалне - изотропне материјале $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$) и да термичка проводност незнатно зависи од температуре, па се λ се може извући испред оператора. Добија се:

$$W = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \cdot \nabla^2 T,$$

што после сређивања даје:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{W(x, y, z)}{c \cdot \rho},$$

или:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W(x, y, z)}{c \cdot \rho},$$

где су:

$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ - (∇) Лапласов оператор у случају Декартовог правоуглог система,

$a = \lambda / c\rho$ - коефицијент температурске проводности или температурска дифузија,

T – температура, t – време, c - специфична топлота, λ - термичка проводност, ρ - запреминска маса и W - издашност топлотног извора.

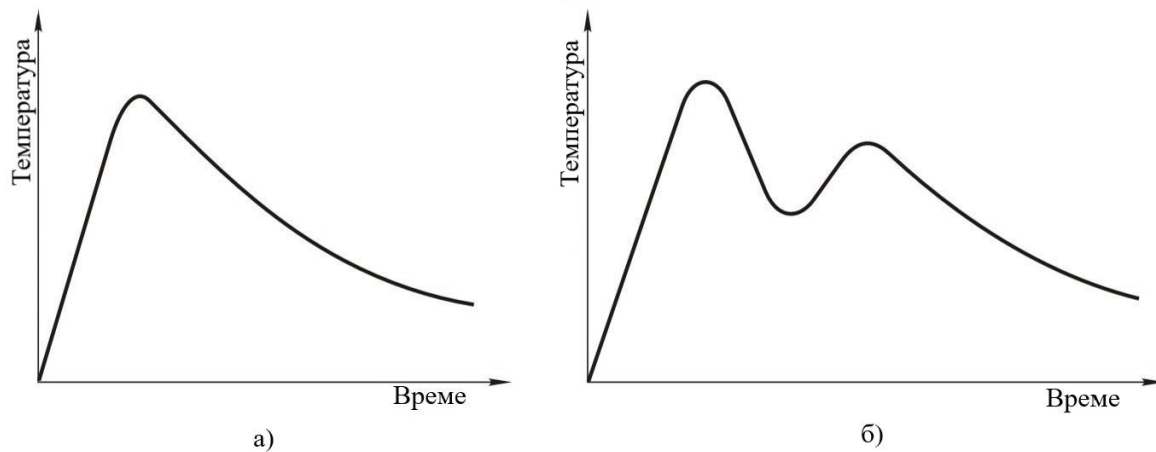
При одређивању температурских поља при заваривању, диференцијална једначина се трансформише и прилагођава датим условима. То се односи на различите дебљине плоча (танке или дебеле) и врсте извора топлоте (покретан или непокретан).

Облик температурских циклуса заваривања, условљен је деловањем следећих чинилаца:

- поступком заваривања,
- параметрима заваривања,
- почетном температуром елемената и
- термофизичким карактеристикама завариваних материјала.

Постоје две врсте температурских циклуса, то су:

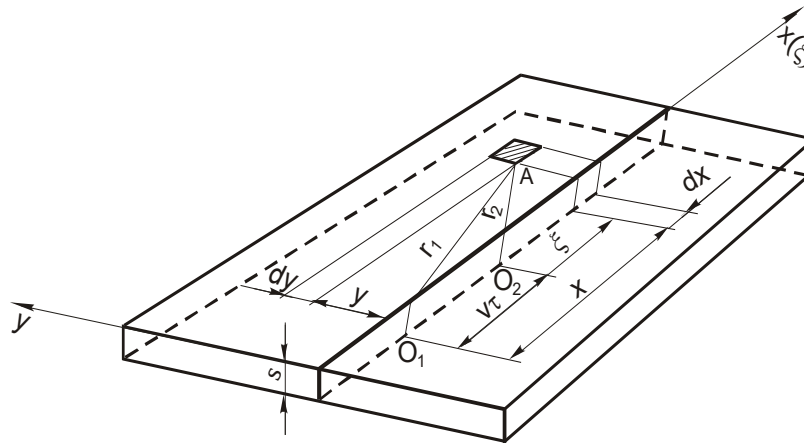
- *прост* температурски циклус, односи се на једнопролазно заваривање (сл. 2.6а) и
- *сложен* температурски циклус, односи се на вишепролазно заваривање (сл. 2.6б).



Слика 2.6 Температурски циклуси: а) прост, б) сложен

2.2.1 Температурско поље при заваривању танке плоче

При анализи температурског поља при заваривању, уводи се претпоставка да је температура константна по дебљини материјала " s ", и да се топлотни извор равномерно креће дуж осе x . Да би се разумело температурско поље при заваривању, потребно је анализирати одређени случај (сл. 2.7).



Слика 2.7 Заваривање танке плоче

Почетни положај извора топлоте је у тачки O_1 , после времена t он је доспео у тачку O_2 .

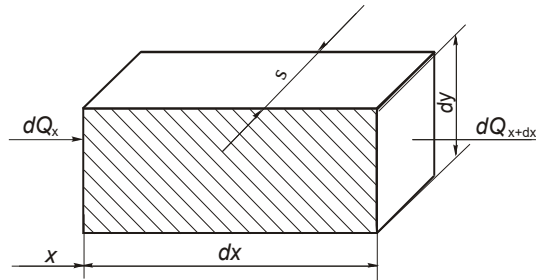
У сваком тренутку се око извора ствара температурско поље, а сабирањем тренутних поља добија се температурско поље створено кретањем извора. При анализирању уведе се претпоставке да су термофизичке константе (λ , ρ и c) непроменљиве, што у реалним условима није случај.

Због температурског градијента $\partial T / \partial x$ у елементарну запремину (сл. 2.8) улази извесна количина топлоте:

$$dQ_x = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot s \cdot dt,$$

а због нестационарног температурског поља извесна количина топлоте излази из ње:

$$dQ_{x+dx} = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \cdot dx \cdot dy \cdot s \cdot dt.$$



Слика 2.8 Топлотни биланс елемента прузрокован променом температурског градијента

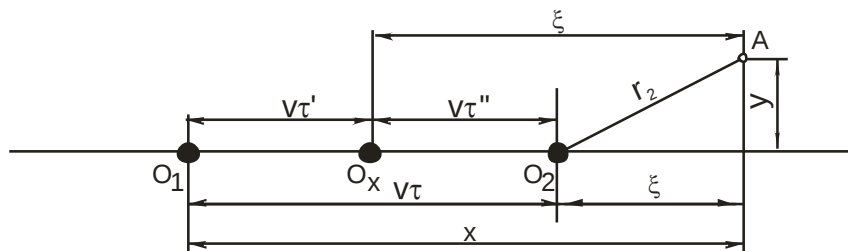
Разлика је:

$$\Delta dQ_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx \cdot dy \cdot s \cdot dt.$$

Аналогно правцу x , важи и за правац y :

$$\Delta dQ_y = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy \cdot s \cdot dt.$$

Од великог значаја је познавање температура на одређеним растојањима од топлотног извора. Из тих разлога повољније је увођење покретног координатног система са средиштем у извору топлоте. Посматра се кретање по оси x , док се по оси y устаљено стање даље не мења (сл. 2.9).



Слика 2.9 Покретни координатни систем везан за извор топлоте

Увођењем покретне координате ξ уместо x добија се у сваком тренутку температура на одређеном растојању од покретног извора топлоте. Овај приступ је оправдан јер се после кратког времена око извора топлоте ствара температурско поље, које се у односу на извор не мења.

Ово поље је нестационарно у односу на непокретни координатни систем, те се назива *квазистационарно*. У току процеса заваривања, осим у самом почетку, око извора топлоте се образују исте изотерме.

За покретни координатни систем важи диференцијална једначина:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} \right) + v \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right) - m^2 \cdot a \cdot \Theta.$$

За квазистационарно температурско поље ($\partial \Theta / \partial t = 0$) диференцијална једначина има облик:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{v}{a} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} - m^2 \cdot \Theta = 0.$$

2.2.2 Температурско поље при заваривању полубесконачног (масивног) тела

По аналогном поступку, као и за танку плочу, добија се диференцијална једначина:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + v \cdot \left(\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} \right),$$

која за квазистационарно поље ($\partial \Theta / \partial t = 0$) има облик:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + \frac{v}{a} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = 0,$$

где су:

x, y, z - Декартове координате,

ξ - удаљеност од топлотног извора у правцу осе x у покретном координатном систему,

v - брзина кретања извора топлоте и

s - дебљина плоче.

2.2.3 Почетни и гранични услови - општи случај

При заваривању делова сложене геометрије, јављају се компликовани гранични услови температурског поља, тако да је математичко решење диференцијалне једначине провођења топлоте немогуће или захтева велика упрошћења.

Да би једначине и имале јединствено решење, морају бити задати и гранични (контурни) услови. Пошто се топлотни флуks и температура током времена мењају, реч је о нестационарном провођењу топлоте.

За почетни услов, узима се температурско поље у тренутку $t = 0$, познато као *функција положаја* :

$$T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z).$$

Гранични услови у општем случају могу бити:

- задате температуре T_s , на површини S_1 :

$$T = T(x, y, z),$$

- задати флукс q_s , на делу површине S_2 :

$$\lambda_n \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = q_s(x, y, z, t),$$

где су:

n - правац нормале на површини тела у тачки (x, y, z) и

λ_n - термичка проводност у правцу нормале n ;

- задата конвекција - прелаз топлоте, на делу површине S_3 :

$$\lambda_n \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = q_\alpha = \alpha \cdot (T_0 - T_s),$$

где су:

α - коефицијент прелаза топлоте,

T_0 - температура околине и

T_s - температура површине тела;

- задато зрачење, на површини тела S_4 :

$$\lambda_n \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = q_r = h_r \cdot (T_r - T_s),$$

где су:

T_r - температура извора зрачења,

h_r - коефицијент зрачења, који дефинишемо као:

$$h_r = \varepsilon \cdot (T_r^2 + T_s^2) \cdot (T_r + T_s).$$

Коефицијент ε је:

$$\varepsilon = \sigma \cdot V_f \cdot \left(\left(\frac{1}{\varepsilon_r} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_s} \right) - 1 \right),$$

где су:

σ - Штефан - Болцманова константа,

ε_r - емисивност извора зрачења,

ε_s - емисивност површине тела и

V_f - фактор геометријског облика.

Када је на делу површине задато више граничних услова истовремено, њихови флуксеви се алгебарски сабирају. Ако су термофизичке карактеристике уавариваног материјала (термичка проводност, специфична топлота, коефицијент прелаза топлоте, запреминска маса и др.) функција температуре или ако постоји зрачење као гранични услов, тада је реч о *нелинеарном* провођењу топлоте. У обрнутом случају, проблем је *линеаран*.

3. Начини одређивања температурског поља и температурских циклуса

За решавање температурског поља постоји више метода које се примењују. Фуријеова једначина провођења топлоте у чврстом телу може се решити на следеће начине:

- Аналитичким методама,
- Аналогним методама,
- Нумеричким методама и
- Експерименталним методама.

Код сложенијих облика завариваних површина, проблем температурског поља се најефикасније решава нумеричким методама, чијом применом је могуће узети у обзир и унутрашње изворе топлоте, зависност термофизичких особина завариваног материјала од температуре и положаја, као и нелинеарност граничних услова.

3.1 Аналитичке методе

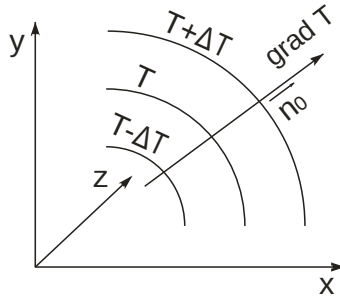
Овим методама се могу решити само једноставнији проблеми провођења топлоте код правилних геометријских тела, као што су бесконачна плоча, бесконачни цилиндар, лопта и др. За ова тела, уз једноставне граничне услове, може се решити парцијална диференцијална једначина провођења топлоте, док за сложеније реалне конфигурације то није могуће. Аналитичке методе се састоје у избору једначине процеса која задовољава диференцијалну једначину провођења и граничне услове.

Код аналитичких метода могућност решавања постоји само за оне процесе који се описују линеарним диференцијалним једначинама и имају линеарне граничне услове.

Коришћењем основних закона термодинамике, могуће је у математичком облику дефинисати температурско поље, при чему се *аналитички прорачун температурског поља* заснива на следећим претпоставкама:

- а) снага топлотног извора (тачкастог, линијског и површинског) – је константна за време заваривања, а сам извор је непокретан или се равномерно креће брзином v_z ;
- б) топлота се кроз тело простире по Фуријеовом закону;
- в) код полубесконачног тела, гранична површина се сматра адијабтском ($q_A = 0$, $\partial T / \partial n = 0$), што у ствари значи да је топлотни флуks на граничним површинама једнак нули и да на њима важи $T = \text{const}$, тј. нема топлотних губитака;
- г) усваја се да се фазне промене у металима одвијају без издвајања и трошења топлоте и
- д) уводи се претпоставка о познатом распореду температура у проучаваној области у тренутку отпочињања рачунања времена, тј. $t = 0$.

Већ је раније поменуто да *математичка формулација температурског поља* гласи $T = T(x, y, z, t)$; као и да све тачке у температурском пољу, које имају исту температуру, формирају површине једнаких температура и њих називамо *изотермичким површинама* (сл. 3.1).



Слика 3.1 Изотермичке површине и градијент температуре

Промена температуре дефинисана је градијентом температуре у правцу нормале на изотермичку површину:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial n} \cdot \vec{n}_0,$$

где је:

$\vec{n}_0$ - јединични вектор нормале на изотермичку површину.

Градијент температуре у Декартовом координатном систему (x, y, z) има следећи облик:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \vec{n}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \vec{n}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \vec{n}_z,$$

где је:

$\vec{n}$ - јединични вектор, чији индекси одређују правце оса Декартовог координатног система.

У поларно – цилиндричном координатном систему (r, θ, z) израз за градијент температуре има облик:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \vec{n}_r + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \cdot \vec{n}_\theta + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \vec{n}_z,$$

где су:

r - радијус,

θ - поларни угао и

z - апликата.

Количина доведене или одведене топлоте у процесу провођења износи:

$$Q = \varphi \cdot A \cdot t,$$

где су:

φ - густина топлотног флуksа, A – површина и t - време.

Топлотим протоком (флуksом) дефинисана је количина топлоте која се у јединицу времена проведе кроз материју:

$$\dot{Q} = \varphi \cdot A.$$

Фуријеов закон: $q = -\lambda \cdot \text{grad}T$ може се написати и у скаларном облику преко компонената вектора:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x}i + \frac{\partial T}{\partial y}j + \frac{\partial T}{\partial z}k,$$

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x},$$

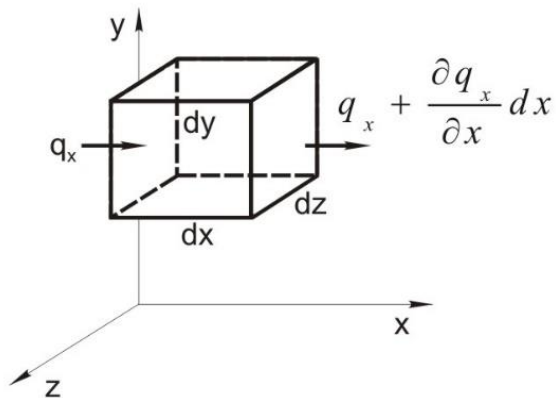
$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y},$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z},$$

где је у општем случају:

$$T = T(x, y, z, t).$$

На основу промене специфичног топлотног флуksа кроз елементарни паралелопипед ЗУТ-а, при деловању унутрашњег извора топлоте q_i (сл. 3.2), може се извести парцијална диференцијална једначина простирања топлоте.



Слика 3.2 Промена топлотног флуksа кроз запремину dV

Парцијална диференцијална једначина простирања топлоте:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_i = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t},$$

где је:

q_i – издашност извора топлоте у $\frac{W}{m^3}$ и

$\frac{\partial T}{\partial x}$ – брзина промене температуре у $\frac{^\circ C}{s}$.

У практичним условима често се срећу радни предмети компликованих облика, тако да није могуће наћи аналитичко решење Фуријеове једначине или се једначина добија уз велика упрошћења. Зато су најефикасније нумеричке методе, чија је предност то што се

могу лако узети у обзир унутрашњи извори топлоте, зависност термофизичких особина материјала од температуре (координата) као и нелинеарност граничних услова.

Изражу се само резултати аналитичког решења диференцијалне једначине провођења топлоте, која се после упрошћења $\lambda = \text{const}$ своди на линеаран облик па се λ може извући испред знака за парцијално диференцирање по координатама x, y, z :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_i}{c \cdot \rho}.$$

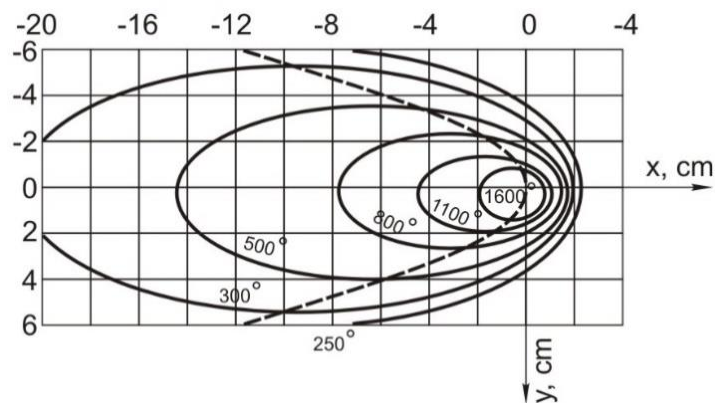
Када се уведе оператор Лапласа:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

и коефицијент $a = \frac{\lambda}{c \rho}$ добија се:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_i}{c \cdot \rho}.$$

Сасвим је јасно, да температурско поље које настаје у материјалу због заваривања покретним извором топлоте, који се равномерно креће дуж шави (правац осе x), није стационарно у односу на непокретни координатни систем (x, y, z). Али ако за покретни извор топлоте вежемо покретни координатни систем, добија се тзв. *квазистационарно температурско поље* (сл. 3.3).



Слика 3.3 Изотерме темп. поља (челична плоча, $s = 10 \text{ mm}$, $q = 4.2 \text{ kW}$, $v_z = 1 \text{ cm/s}$)

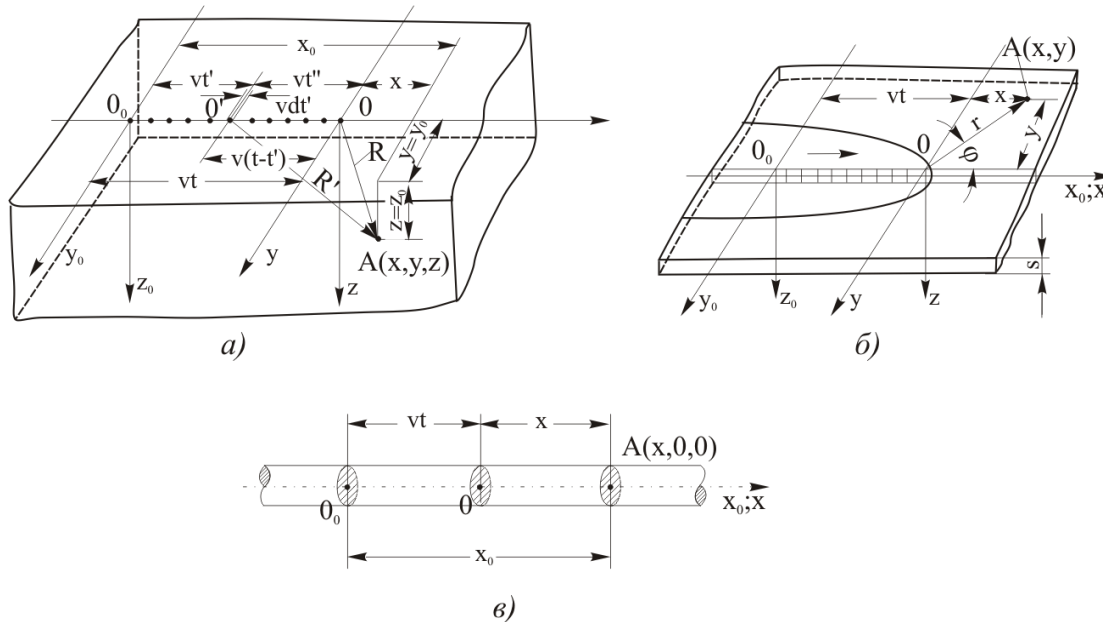
У том случају температурско поље нема унутрашњи извор топлоте ($q_i = 0$), па се диференцијална једначина простирања топлоте своди на:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T.$$

На основу претходних претпоставки аутори су разрадили методе прорачуна расподеле температура за различите рачунске шеме у случају непокретног (тренутног) и покретног извора топлоте.

3.1.1 Расподела температура у случају покретног извора топлоте

У овом случају уместо статичког извора топлоте, посматра се концентрисан извор топлоте који се креће брзином v (сл. 3.4).



Слика 3.4 Основни облици шема у случају покретног извора топлоте

а) Полубесконечно (масивно) тело

За тачкасти покретни извор топлоте који се креће по површини полубесконечног тела константном брзином, изведен је израз за расподелу температура:

$$T_{(r,x)} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot r} \cdot e^{\left(\frac{v \cdot x}{2 \cdot a} - \frac{v \cdot r}{2 \cdot a} \right)},$$

где је:

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} - \text{радијус вектор.}$$

У случају извора који се креће великом брзином v , дуж координате $x = v \cdot t$, израз се трансформише у следећи облик:

$$T_{(y,z,t)} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}},$$

где је:

$$r^2 = y^2 + z^2 - \text{радијус вектор.}$$

б) Танка плоча

За случај покретног линијског извора топлоте, расподела температура се прорачунава према изразу:

$$T_{(y,t)} = \frac{q}{v \cdot s \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot t}} \cdot e^{\left(\frac{y^2}{4 \cdot a \cdot t} - b \cdot t \right)},$$

где је:

$r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ – радијус вектор и

$b = 2 \cdot \alpha / c \cdot s \cdot \rho$ – константа којом се дефинише одвођење топлоте у околину.

За случај заваривања под прахом (ЕРР) степен искоришћења топлоте је највећи (губици се могу занемарити). У том случају расподела температура у различитим тачкама тела (плоче) се прорачунава према следећем изразу:

$$T_{(y,t)} = \frac{q}{v \cdot s \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot t}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4 \cdot a \cdot t}}.$$

Детаљном анализом претходних израза може се установити и доказати да облик температурског поља зависи од: *врсте извора*, *брзине* којом се он креће, *врсте шеме* (дебљине радног предмета), *топлотне моћи* лука и тсл.

3.1.2 Расподела температура у случају тренутног извора топлоте

а) Полубесконачно (масивно) тело

Температурско поље у случају полубесконачног тела и деловању тачкастог извора топлоте може се описати изотермама полупречника r (сл. 3.5.а). Расподела температура се описује изразом [2]:

$$T_{(r,t)} = \frac{q}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a \cdot t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}},$$

где су:

$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ - удаљење посматране тачке $A(x,y,z)$,

q - ефективна топлотна моћ лука ($q = U \cdot I \cdot \eta$ - снага лука) и

η - степен искоришћења топлоте.

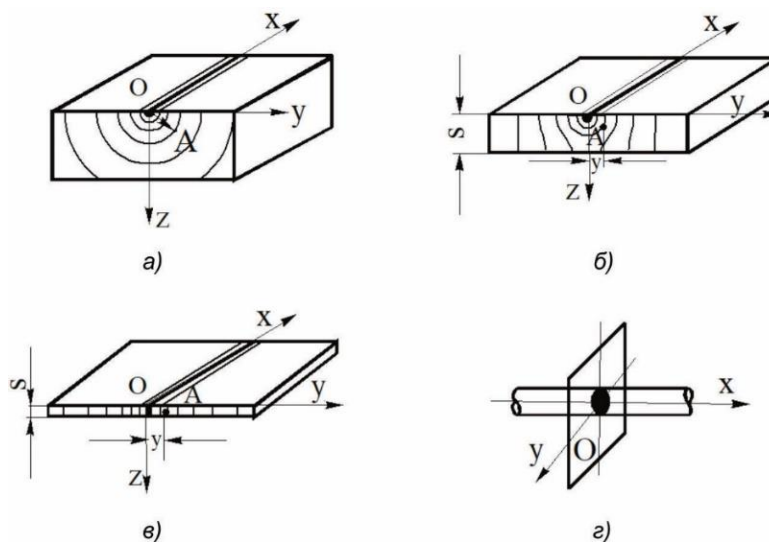
б) Танка плоча

У овом случају, када је тело мале дебљине (сл. 3.5), а неограничено у остала два правца, извор се може сматрати линијским. У том случају температурско поље, тј. изотерме се представљају цилиндрима паралелним оси z , а расподела температуре дата је изразом:

$$T_{(r,t)} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot a \cdot t \cdot c \cdot \rho \cdot s} \cdot e^{-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}},$$

где је:

$r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ - радијус одговарајуће тачке $A(x,y)$.



Слика 3.5 Основни облици шема провођења топлоте

в) Штап

Штап тј. цилиндар представља тело са малим попречним пресеком, а неограниченом дужином (сл. 3.5). У овом случају се сматра да је топлота сконцентрисана у малој запремини у координатном почетку. Расподела температура се описује изразом:

$$T_{(x,t)} = \frac{q}{c \cdot \rho \cdot (4 \cdot \pi \cdot a \cdot t)^{1/2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot t}}.$$

Осим приказаних шема (сл. 3.5а, в и г) често се анализира и шема за средње дебеле лимове (сл. 3.5б), која представља међурешење између шема а) и в).

3.2 Аналогне методе

Процес простирања топлоте описује се диференцијалним једначинама аналогног типа као и код провођења електричне струје. Из ове значајне чињенице следи да се може успоставити корелација између топлотних и електричних величина. На тај начин може се уместо анализе процеса простирања топлоте, посматрати протицање електричне струје у аналогном струјном колу.

Као и код аналитичких метода за решавање једначине провођења топлоте, и у случају аналогних метода, решења се могу добити само за тела правилног геометријског облика са идеализованим граничним условима. Ова метода је нашла посебну примену при анализи електроотпорског тачкастог заваривања.

3.3 Нумеричке методе

Од великог броја нумеричких метода за прорачун температурских поља, напона и деформација, најширу примену при заваривању имају тзв. *итеративне* методе:

- Метода коначних разлика (МКР),
- Метода коначних елемената (МКЕ),

- Метода граничних елемената (МГЕ) и
- Метода елементарних биланса (МЕВ).

Предности ових метода огледају се у следећем:

- често је и једина могућност добијања било каквих резултата,
- могућност израде универзалних програма,
- повећање тачности коришћењем и експерименталних резултата и формирањем тзв. идеалног модела и тсл.

Основни недостаци интеративних нумеричких метода су:

- дуга припрема програма и уноса података,
- тешкоће да се постигне стабилност решења,
- дуго време прорачуна, захтеви за што већом радном меморијом рачунара, као и
- неопходност верификације резултата.

3.3.1 Метода коначних разлика (МКР)

Метода коначних разлика апроксимира коначним разликама диференцијалне једначине за поједине елементе дискретизације. Решење проблема се заснива на решењу система већег броја алгебарских једначина.

Област у којој се прорачунавају температуре најпре се дели на мрежу просторних (раванских) координата на елементарне запреминске (површинске) елементе коначних димензија који одговарају изабраном кораку дискретизације. Затим се одговарајући чланови диференцијалне једначине који описују разматрану физичку појаву, замењују приближењем које се изражава помоћу коначних разлика. Ту се уместо парцијалних извода разматране функције по независним променљивима појављују њихови количници.

Слично се уводе почетни и гранични услови. За свако средиште ћелије мреже може се написати једна једначина коначних разлика која повезује вредност његове температуре са температурама у суседним чворовима мреже. Уместо разматране једне диференцијалне једначине по одговарајућим изводима, решава се систем већег броја сагласних алгебарских једначина које садрже коначне разлике. За случај Фуријеове парцијалне диференцијалне једначине провођења топлоте применом коначних разлика, поједини чланови изгледају:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{x,y,t} = \frac{T(x,y,t+\Delta t) - T(x,y,t)}{\Delta t},$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{x,y,t} = \frac{T(x+\Delta x,y,t) - 2T(x,y,t) + T(x-\Delta x,y,t)}{\Delta x^2},$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{x,y,t} = \frac{T(x,y+\Delta y,t) - 2T(x,y,t) + T(x,y-\Delta y,t)}{\Delta y^2}.$$

Сменом ових веза (чланова) у одговарајуће диференцијалне једначине и усвајањем корака мреже нпр. $\Delta x = \Delta y = \Delta H$, добија се одговарајући систем алгебарских једначина помоћу којих се одређују температуре у тренутку $k+1$, ако су познате температуре у тренутку k . Број алгебарских једначина се повећава са смањивањем корака дискретизације ΔH .

3.3.2 Метода коначних елемената (МКЕ)

Метода коначних елемената је нумеричка варијациона метода. При разматрању проблема провођења топлоте варијационим методама, одређује се расподела температуре уз услов минималног интензитета производње ентропије у стационарном стању. Ова метода се заснива на приближној минимизацији функционала, у облику интеграла непознате функције за целу запремину разматраног поља.

3.4 Експерименталне методе

Експерименталном методом се одређује вредност температура у појединим областима или карактеристичним тачкама тела. За одређивање расподеле температура у зони утицаја топлоте користе се мерни уређаји од којих су једни погодни за мерење релативно ниских температура а други високих температура. Поједини термометри мере вредност температура у тачкама постављања, док други оптички, одређују зоне једнаких температура на основу зрачења. Типични пример је оптичка камера која се примењује за мерење температуре на бази инфрацрвеног зрачења које емитује свако тело и које се осећа као топлота. Због сложености и високе цене опреме, овај метод се код нас још увек мало примењује. Према принципу рада термометри могу бити: гасни, отпорни, термопарови, оптичко - радијациони пирометри и експанзиони термометри.

Најчешће се употребљавају термопарови, због низа предности. Везивањем за писач, осцилоскоп, одговарајући вишеканални осетљиви уређај и рачунар, могу се регистровати и меморисати континуалне промене температура у току времена. За случај експерименталног одређивања температура у појединим тачкама испод завареног споја (ЗУТ), буше се отвори у које се постављају термопарови и њима снимају температурски циклуси.

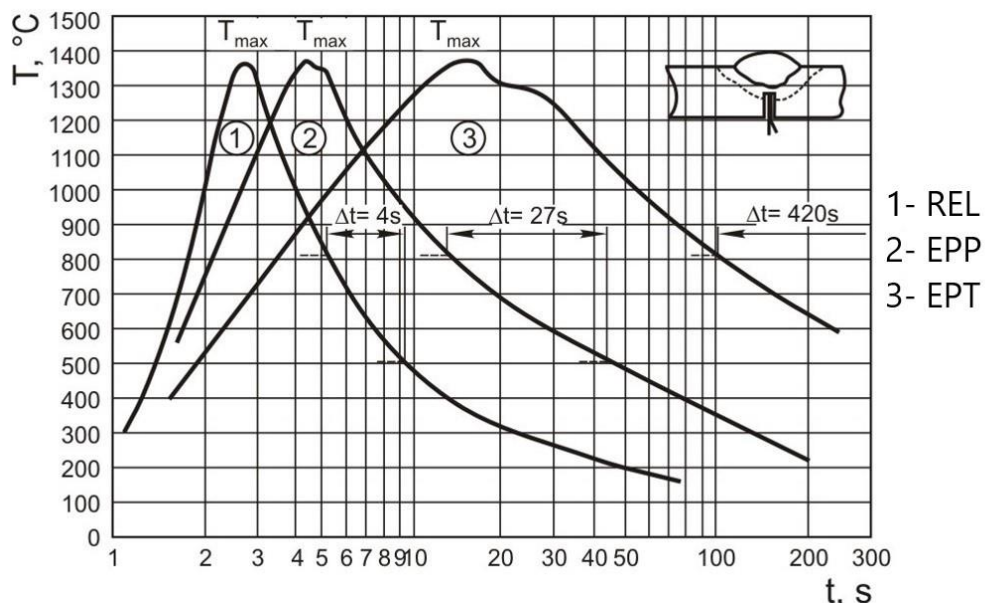
4. Експериментално одређивање температурских циклуса

Праћење термичких појава при заваривању је омогућено применом врло софистицираних метода за мерење температуре, као и за утврђивање динамике њене промене. Данас се користе следеће методе:

- директно – помоћу термопарова и x -у писача,
- оптичким камерама и
- термокредама.

❖ Директно мерење температуре термопаровима

Ово мерење подразумева уградњу термопарова на одређеним местима у односу на осу шава. Термопарови који су постављени повезују се са писачем или са одговарајућим излазним уређајем, како би се добила крива температура – време. Примери облика температурских циклуса који су добијени уградњом термопарова испод завареног споја за REL, EPP и EPT методе заваривања приказани су на слици 4.1. Експериментално одређени циклуси исторемено показују да је загревање линеарна, а хлађење експоненцијална функција времена.

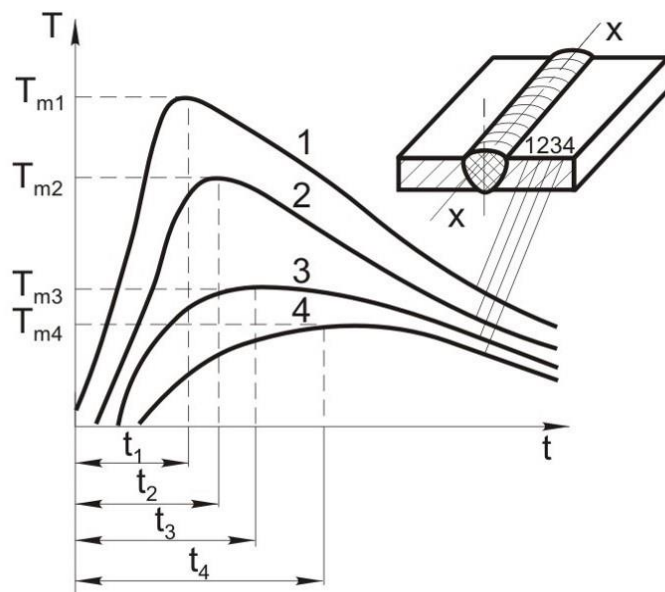


Слика 4.1 Температурски циклуси зоне испод завареног споја изведених REL-ом, EPP-ом и EPT-ом
Основне карактеристичне величине температурског циклуса су:

- брзина загревања,
- максимална температура и
- брзина хлађења.

Када се поставе термопарови на местима (1, 2, 3, 4) различито удаљеним од подужне осе шава, по којој се равномерно креће извор топлоте, добијају се циклуси који су приказани на слици 4.2. Јасно је да су брзине хлађења и загревања највеће за тачке испод завареног споја, па зато оне трпе и највеће промене при заваривању.

Тачке у ЗУТ-у (на попречном правцу) имају различите температурске циклусе загревања, па зато и постоје разлике у структурама у тој области.



Слика 4.2 Температурски циклуси за тачке ЗУТ-а (1, 2, 3, 4)

Део температурског циклуса од максималне температуре до собне назива се *ток хлађења*. Грана хлађења (ток хлађења) је за већину заварљивих конструкционих челика од изузетног значаја, а посебно део између температура 800 и 500°C, јер се у том интервалу најинтензивније одвијају фазне трансформације аустенита. За заварљиве челике повишене јачине, овај интервал је проширен на границе од 800 до 300°C.

Времена које тачка ЗУТ-а проведе у поменути температурским интервалима означавају се са $t_{8/5}$, односно $t_{8/3}$ и врло су значајна за дефинисање излазних структура, а тиме и особина ЗУТ-а (тврдоћа, жилавост).

Такође за праксу је значајна и брзина хлађења при 300°C, јер она битно утиче на оцену структурних промена и прописивање технологије заваривања одређеним поступком. Посебно се анализира део гране хлађења од 800 ÷ 500°C, као и време изложености ЗУТ-а температурама већим од A_{c3} .

❖ Оптичка камера

Оптичка камера се примењује за мерење температуре на бази инфрацрвеног зрачења које емитује свако тело и које се осећа као топлота. Камера има термоосетљив детектор, у коме се топлотна енергија претвара у електричне импулсе. Такође добијени сигнали се појачавају и шаљу на осцилоскопски екран, где се добија крива – термограм.

Лоша страна ове методе је то што она захтева скупу опрему, а и баждарење температурске скале може да представља знатан проблем.

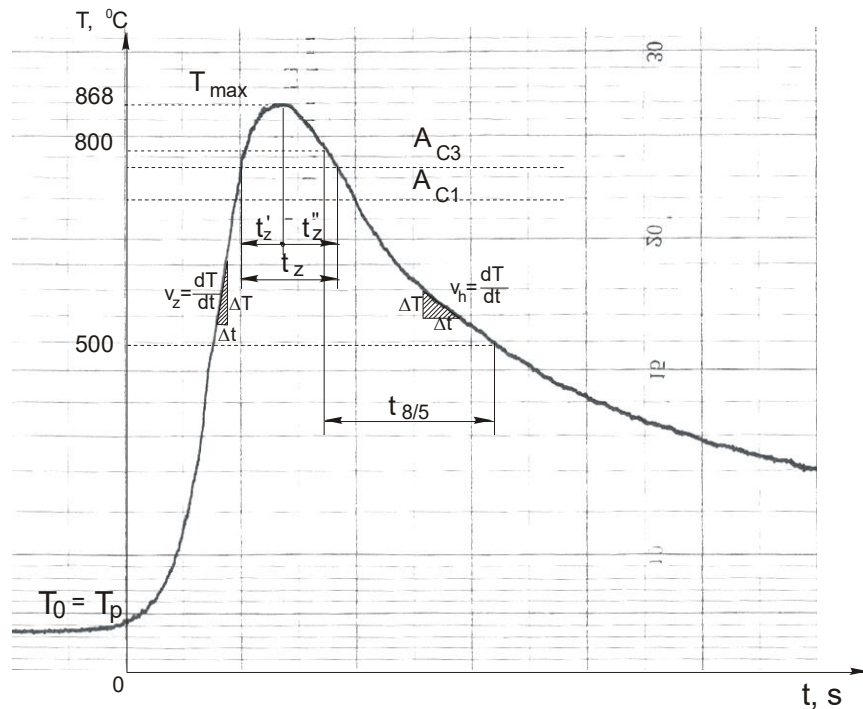
❖ Термокреде

Термокреде се користе за регистровање максимално достигнуте температуре на различитим удаљењима од линије заваривања. Користи се сет креда, где је на свакој креди написано на којој температури она мења боју.

4.1 Прорачун елемената температурског циклуса при заваривању

Познавањем температурског поља изабране области завариваног тела у различитим временским интервалима или мерењем температура помоћу термопарова, може се одредити и температурски циклус било које тачке ЗУТ-а око завареног споја. Главне карактеристике температурског циклуса (сл. 4.3) било које тачке ЗУТ-а јесу:

- брзина загревања,
- максимална температура,
- брзина хлађења при температури најмање стабилности аустенита (време хлађења у области температура 800 до 500°C - $t_{8/5}$) и
- време задржавања (пребивања) изнад A_{C3} ($A_{C3}+100^\circ\text{C}$) температуре.



Слика 4.3 Елементи температурског циклуса

Структура метала у ЗУТ-у зависи од максимално достигнуте температуре, те од брзине загревања и хлађења, тј. она ће при истом температурском циклусу зависити од хемијског састава метала, услова претходне термичке обраде, прераде на хладно и тсл.

4.1.1 Максимална температура

Познавањем аналитичког израза за расподелу температура око завареног споја, може се одредити максимална температура у ЗУТ-у уз услов $\partial T / \partial z = 0$ у испитиваној тачки:

- за полубесконачно тело (масиван део):

$$T_{\max(r,t)} = \frac{0.234 \cdot q_l}{c \cdot \rho \cdot r^2},$$

$$t_{\max} = \frac{r^2}{4 \cdot a},$$

где је:

$q_l = (U \cdot I \cdot \eta) / v_z$ - погонска енергија заваривања и

$r = (y^2 + z^2)^{1/2}$ - удаљење посматране тачке А од осе Ох,

- за танку плочу:

$$T_{\max(y)} = \frac{0.242 \cdot q_l}{c \cdot \rho \cdot s \cdot y} \left(1 - \frac{b \cdot y^2}{2 \cdot a} \right),$$

где је:

у - растојање од осе шава (члан у загради обухвата утицај одавања топлоте у околну средину).

4.1.2 Брзина хлађења

Може се израчунати помоћу израза:

- за полубесконачно тело (масиван део):

$$v_h = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_k - T_0)^2}{q_l \cdot N_3},$$

- за танку плочу:

$$v_h = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \cdot \frac{(T_k - T_0)^3}{q_l^2 \cdot N_2},$$

где су:

N_2 и N_3 - фактори облика споја (за случај заваривања $N_2 = N_3 = 1$),

$T = T_k$ - температура најмање стабилности аустенита.

4.1.3 Брзина задржавања

Одређује се према следећим изразима:

- за полубесконачно тело:

$$t_z = f_3 \cdot \frac{q_l}{\lambda \cdot (T_{\max} - T_0)},$$

- за танку плочу:

$$t_z = f_2 \cdot \frac{q_l}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \cdot (T_{\max} - T_0)^2}.$$

Коефицијенти f_2 и f_3 се одређују помоћу одговарајућих номограма или дијаграма које је дао Рикалин у зависности од величине θ :

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0}.$$

4.1.4 Време хлађења $t_{8/5}$

Будући да је брзина хлађења променљива величина и да опада са смањивањем температуре, те се као параметар који најбоље карактерише услове хлађења ЗУТ-а, с обзиром на најмању стабилност аустенита већине челика, узима време хлађења од 800 до 500°C ($t_{8/5}$). Врсте структурних промена и особине ЗУТ-а у највећој мери зависе од постигнуте максималне температуре ($T_{\max}$) у појединим зонама ЗУТ-а и времена $t_{8/5}$.

Са порастом $T_{\max}$ повећава се степен прегревања аустенита, раст његовог зрна, као и количина растворених укључака у аустениту, што омета промену $\gamma \rightarrow \alpha$ за време хлађења и помера је у област нижих температура на којима настаје бездифузиона (мартензитна) промена. У том смислу укључци имају сличан ефекат као и потхлађивање. Слој ЗУТ-а који се налази у непосредној близини завареног споја достиже највишу температуру, има највећу брзину хлађења, што условљава највећу тврдоћу и склоност ка хладним прелинама, а најмању жилавост. Зато се најнеповољније особине ЗУТ-а одређују узимајући у обзир температурски циклус испод навара.

❖ Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$

Време хлађења ($t_{8/5}$) може се најтачније одредити експериментално са криве температурског циклуса, или са мањом или већом тачношћу на основу прорачуна појединих делова температурског циклуса.

❖ Прорачун времена $t_{8/5}$ на бази граничне дебљине лима ($t_{8/5} = f(s_{gr})$)

- за танке лимове/плоче ($s \leq s_{gr}$)

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

- за дебеле плоче ($s > s_{gr}$)

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

где су:

N_2 и N_3 - фактори облика споја,

η - коефицијент искоришћења топлоте и

T_0 - почетна или температура предгревања (T_p).

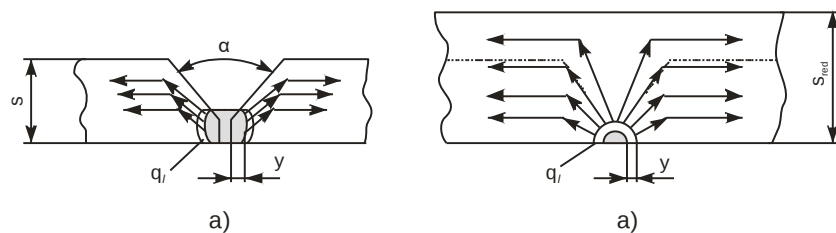
Термофизичке константе зависе од врсте материјала и мењају се са променом температуре. Оне се могу са довољном тачношћу усвојити за средњу вредност температурског интервала 800 до 500°C, тј. за 650°C. Фактори облика споја служе за корекцију при чему се узима у обзир позната емпиријска чињеница да брзина хлађења завареног споја зависи како од дебљине завариваних (навариваних) делова, тако и од типа завареног споја. У случају заваривања усваја се да су ови фактори једнаки јединици ($N_2 = N_3 = 1$).

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

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

Претходни израз показује да, за дати основни материјал, гранична дебљина зависи од погонске енергије, типа завареног споја и почетне температуре завариваних делова.

Фактор облика споја $N_2 = 180 / (180 - \alpha)$ за сучеоне спојеве у V-жлебу, важи само за тачке близу извора топлоте. На већем удаљењу, топлотни флуks се изравнава, те да би се и овде рачунска шема приближила стварној, треба дебљину опет редуковати на N_2 пута (сл. 4.4) па је $s_{red} = N_2 \cdot s = 1.5 \cdot s$ (за $\alpha = 60^\circ$). Ова шема показује добре резултате све док је дебљина првог слоја $a \leq 0.15 \cdot s$. У табели 4.1 су приказане вредности термофизичких константи, а у табели 4.2 су приказани фактори облика завареног споја.

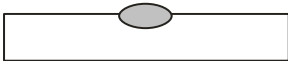
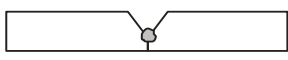
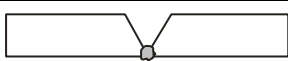
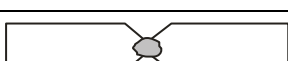
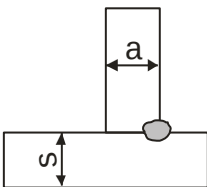
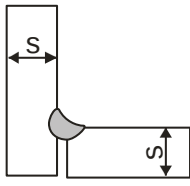


Слика 4.4 Стварна и редукована дебљина

Табела 4.1 Вредности неких термофизичких константи

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

Табела 4.2 Фактор облика завареног споја

Тип завареног споја			N ₂	N ₃
			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
			0.9-0.67*	0.67

* Вредност N_2 се разликује од N_3 утолико више уколико је већа разлика између s и s_{gr}

❖ Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ на основу формуле јапанских аутора (формула Ito-Bessyo)

Према наведеним ауторима користи се формула:

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

где су:

q_l - погонска енергија у J/cm ,

T_0 - почетна температура у $^{\circ}C$.

Неки параметри из једначина највише се користе за:

- одређивање структуре у најкритичнијој области ЗУТ-а шава, тако што се време $t_{8/5}$ уноси у KHZ дијаграм. Гранично време $t_{8/5}$ које одговара чисто мартензитној

структури означава се са t_{100} , а гранично време $t_{8/5}$ које одговара чисто бејнитној структури t_v ,

- *прорачун режима* заваривања (q_l , T_p) који омогућује добијање заварених слојева тражене структуре. У ствари, из KNZ дијаграма усваја се време $t_{8/5}$ које одговара траженој структури (мартензитној, мартензитно-бејнитној, бејнитној и др.), па се затим из формула за $t_{8/5}$ израчунава погонска енергија заваривања.

5. Примена трансформационих дијаграма и процена структуре и механичких особина на основу експериментално одређеног времена хлађења

5.1 Трансформациони дијаграми

Ови дијаграми приказују ток промене потхлађеног аустенита и дају утицај температуре и времена на те промене па се називају трансформациони дијаграми. Важе за челик (ливено гвожђе) одређеног хемијског састава и за одређене услове аустенитизације. Садрже податке о почетку и крају излучивања проеутектоидних фаза, односно перлитне, бејнитне и мартензитне промене аустенита. Конструирају се различитим методама: дилатометријском (заснива се на разлици специфичних запремина аустенита и његових продуката), магнетометријском (аустенит је немагнетичан, продукти распада магнетични), резистометријском (различити електрични отпори појединих фаза), металографском (микроскопска процена о делу трансформисаног аустенита при датој температури и делу аустенита који је остао нетрансформисан) и дају само просечне брзине промена. На њима се обично уносе процентуални удели продукта одређене промене, вредности тврдоћа и жилавости, излазне структуре и сл.

Трансформациони дијаграми се најчешће дају у два облика:

- *изотермални (изотермички)* - дају продукте промене аустенита при одређеним константним температурама и
- *анизотермални (анизотермички)* - који приказују продукте добијене различитим брзинама хлађења.

Изотермички дијаграми приказују разлагање при одређеној температури, што значи да на челичном узорку преображај аустенита почиње и завршава се на истој температури. Зато се и зову IRA, са значењем - изотермичко разлагање аустенита. Углавном служе да се дефинишу услови термичке обраде (температура, време држања на тој температури) да би се извело бејнитно каљење или изотермичко жарење. IRA-дијаграми дају врло мало података о структурама насталим у условима брзог и континуалног хлађења што је углавном случај код заваривања топљењем.

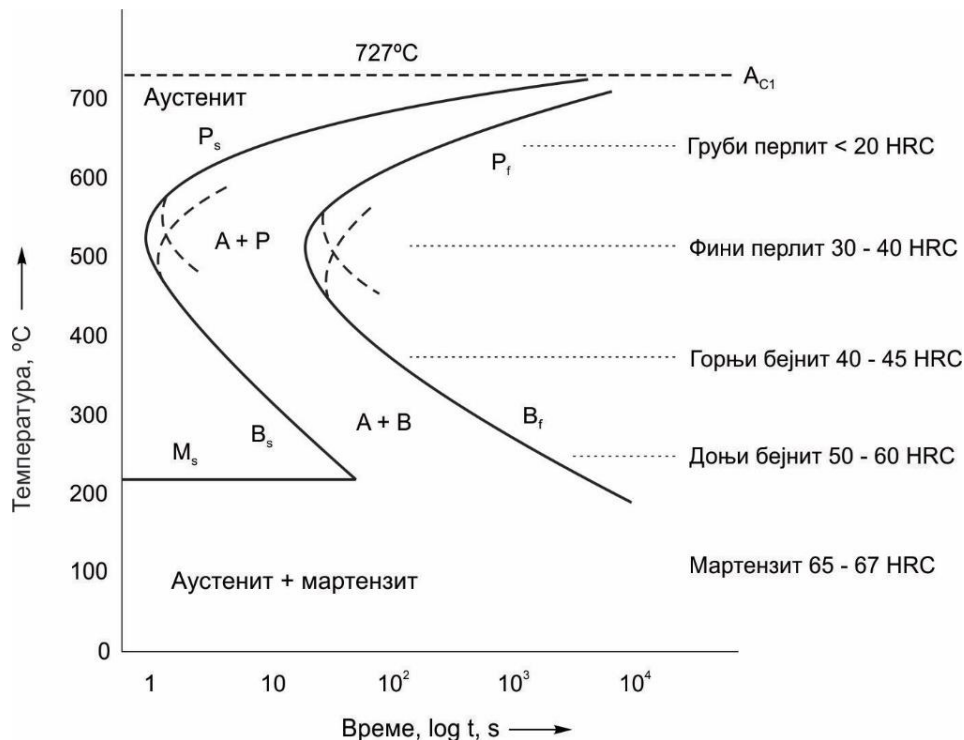
Анизотермички дијаграми приказују промену аустенита при различитим брзинама хлађења (ARA-дијаграми) и налазе примену у пракси термичке обраде, као и при оцени новонасталих структура ЗУТ-а у случају заваривања, наваривања и сл. Како IRA тако и ARA дијаграми дају се у правоугаоном координатном систему у коме се на координату наноси температура ($^{\circ}\text{C}$) а на апсцису време у логаритамској подели ($\log t$).

5.1.1 Дијаграми изотермалног разлагања аустенита (IRA, TTT)

На основу претходних разматрања долази до тога да је перлитна трансформација у еутектоидним челицима дифузионе природе, јер се одвија нуклеацијом клиса и њиховим растом. Брзину трансформације чине брзина образовања клиса и брзина њиховог раста. Из претходних разматрања произлази да се перлитна трансформација у еутектоидним челицима; одвија се нуклеацијом клица и њиховим растом. Укупна брзина трансформације одређена је брзином образовања клица и брзином њиховог раста.

При малом потхлађењу аустенита испод температуре A_{C1} (сл. 5.1) кинетички параметри промене су готово занемарљиви па је брзина трансформације веома мала; прва зрна перлита (P_s) се појављују тек после веома дугог времена задржавања на трансформационој температури (дуго време инкубације), што значи да је укупно време трансформације знатно.

При већем потхлађењу, до око 550°C , за нуклеацију је потребна мања енергија, то значи да се повећава брзина нуклеације и брзина пораста, а тиме и укупна брзина промене. Даљим снижавањем трансформационе температуре опада брзина дифузије гвожђа па и укупна брзина промене. Криве почетка и краја преображаја аустенита називају се IRA дијаграми, а чешће S или TTT-дијаграми. IRA дијаграм за еутектоидни угљенични челик дат је на слици 5.1. На дијаграму се може уочити да је почетак и крај трансформације приказан једном пуном линијом али да се у зони од $500\text{--}600^\circ\text{C}$ преклапају линије почетка и завршетка перлитне и бејнитне трансформације. Та температурска зона припада најкраћој инкубацији када та трансформација најбрже наступа.



Слика 5.1 Дијаграм изотермалног разлагања аустенита (IRA) еутектоидног челика

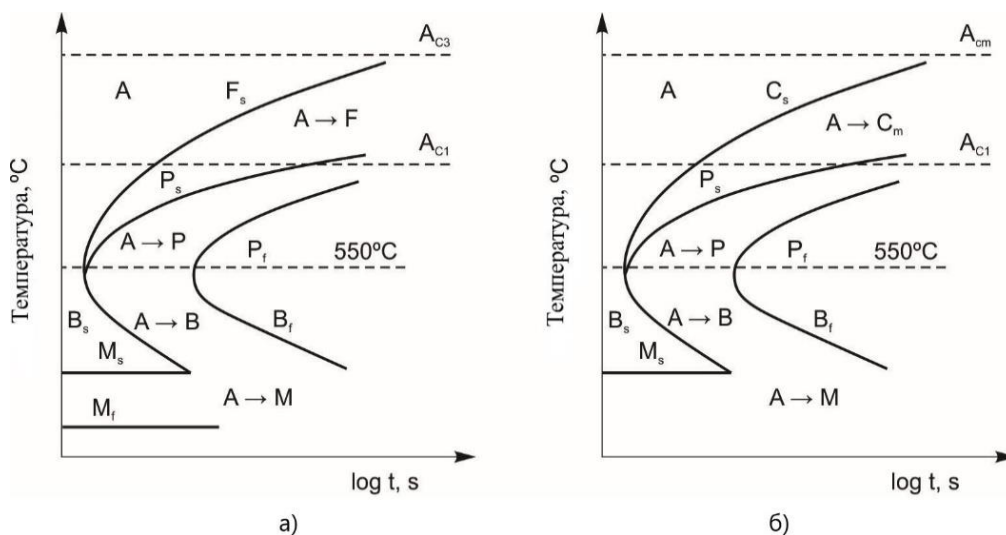
Ознаке почетка (индекс "s" за старт) и краја (индекс "f" за финиш) показују почетак и крај трансформације одређене структуре. Лево од криве почетка трансформације постоји само аустенит, између две криве смеша аустенита и одређене фазе, а десно од криве краја трансформације приказане су само коначне структуре.

Објашњене промене важе све до температуре M_s после чега промене више нису дифузионе већ бездифузионе. Испод ове температуре одвија се бездифузиона мартензитна трансформација, која се зове *атермичка*, што значи да количина насталог мартензита зависи од температуре до које је челик потхлађен. Мартензит се ствара готово тренутно управо по достизању те критичне температуре, а даљим задржавањем на њој структура се не мења.

Количина мартензита се стога може повећати само даљим снижавањем температуре, тј. изотермичким третманом на још нижој температури.

5.1.2 IRA – дијаграми подеутектоидног и надеутектоидног челика

Дијаграми изотермалног разлагања за челике другачијег састава од еутектоидног, разликују се по томе што садрже не само продукте преображаја аустенита на 727°C, већ и на нешто вишим температурама. IRA- дијаграми подеутектоидног и надеутектоидног челика приказани су на слици 5.2. Види се да најпре почиње излучивање проеутектоидних фаза: ферита - F_s (сл. 5.2а) код подеутектоидног челика и цементита - C_s (сл. 5.2б) код надеутектоидног челика.



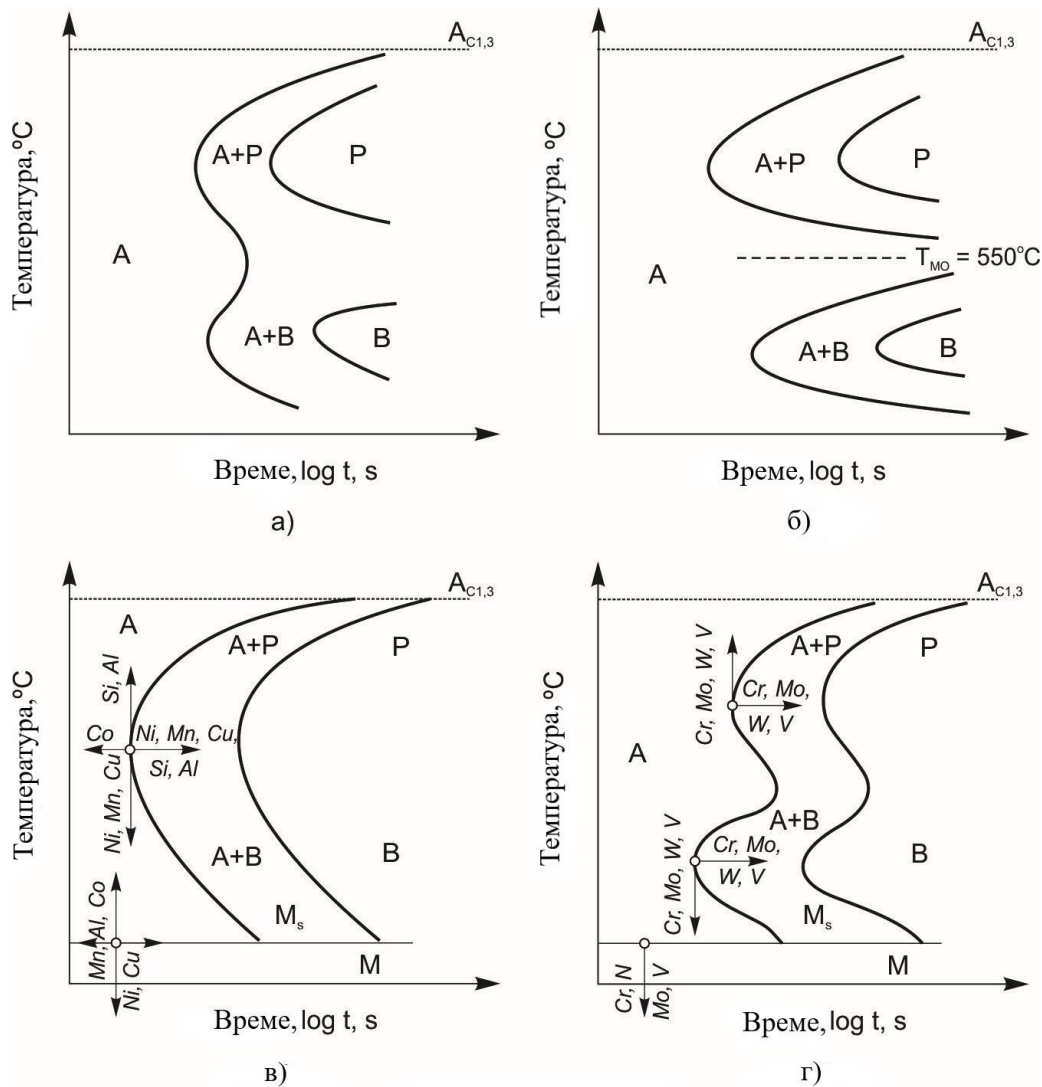
Слика 5.2 а) Дијаграм IRA – подеутектоидног челика и б) надеутектоидног челика

IRA – дијаграми се конструишу експериментално, тако што се региструју различите физичке особине аустенита и продукта његовог преображаја. Томе служи на пример:

- *дилатометријска метода* (користи разлику специфичне запремине аустенита и новонасталих продуката),
- *резистометријска метода* (различити електрични отпори) и
- *магнетометријска метода* (аустенит је немагнетичан, нови продукти магнетични).

5.1.3 IRA – дијаграми легираних челика

На облик и положај кривих IRA дијаграма утичу многи чиниоци. Сви легирајући елементи померају ове криве удесно. Карбидотворни елементи (Cr, Mo, V, W), изразито мењају и облик дијаграма, продужују време инкубације, али и потпуно раздвајају температурску област перлитне и бејнитне трансформације аустенита. Поред утицаја хемијског састава челика, на облик дијаграма, такође утичу и услови аустенитизације. Већа хомогеност и веће зрно аустенита, због дужег времена аустенитизације, доводе до померања криве почетка и краја разлагања аустенита удесно (сл. 5.3а,б), док ситна зрна аустенита, нехомогеност аустенита и стране честице у аустениту (карбиди, примесе) повезују S-криве и померају их улево (сл. 5.3в,г).



Слика 5.3 Шема утицаја карбидотворних елемената на облик IRA – дијаграма; а) низак садржај легирајућих елемената, б) висок садржај легирајућих елемената ($T_{MO} \rightarrow 500^\circ\text{C}$), в) елементи који померају колено и M_s – температуру, г) елементи који удављавају перлитну и бејнитну област

Легирајући елементи и услови аустенитизације (температура, време) такође утичу на положај температурског интервала у коме се одвија мартензитна промена ($M_s - M_f$).

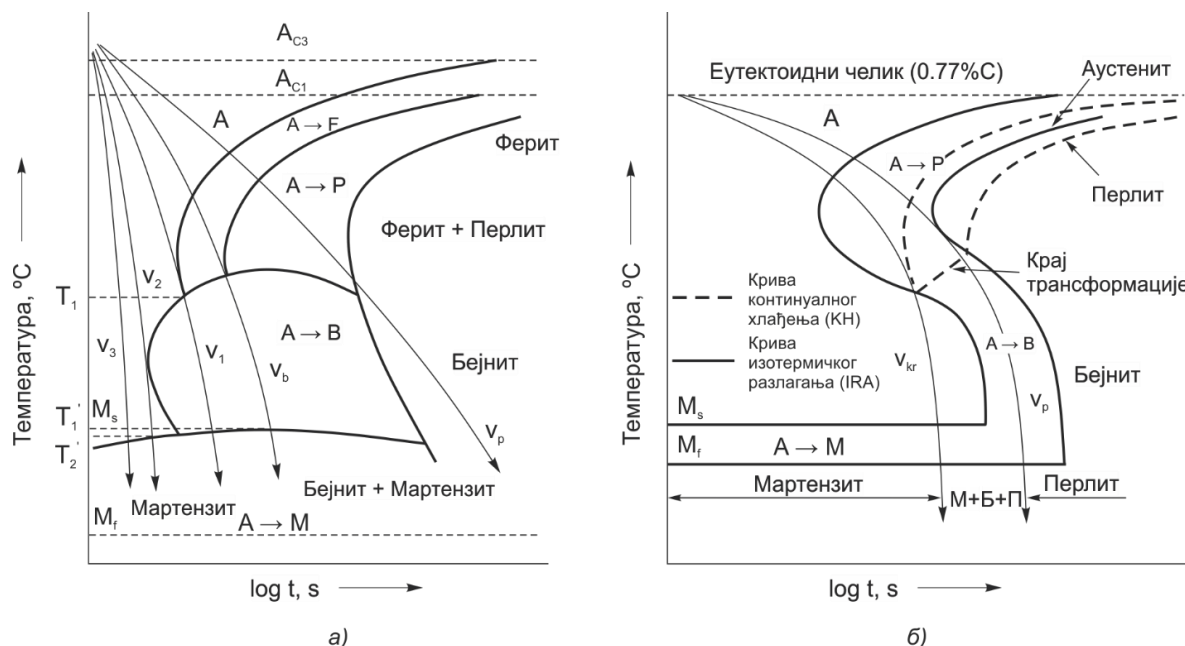
Сви елементи растворени у аустениту, снижавају M_s температуру, осим Co и Al који је повећавају. Угљеник нарочито снижава M_s температуру.

Треба посебно нагласити да на температуру M_s не утиче укупан садржај угљеника и легирајућих елемената у челику, већ само део тих састојака растворених у аустениту. По сличном закону се мења и тачка M_f , која може достићи и температуре испод 0°C . Прецизно одређивање температуре M_f је отежано, јер се мартензитна промена на одређеној температури зауставља, и у структури остаје нетрансформисани (заостали) аустенит.

5.1.4 Дијаграми континуалног разлагања аустенита (ARA, КН)

За разлику од дијаграма изотермалног распада аустенита, где се трансформације у материјалу одвијају при константној температури, металурзи су конструисали и дијаграме који приказују структурне промене за време континуалног хлађења одређеном брзином. Ти дијаграми се такође добијају експериментално на специјалним узорцима који се загревају до температуре аустенитизације, а затим хладе различитим брзинама тј. у различитим средствима (нпр. на мирном ваздуху, при принудном струјању ваздуха).

Ови дијаграми су познати као дијаграми континуалног хлађења или скраћено КН дијаграми (сл. 5.4). Слично као и код изотермалног разлагања аустенита, најмање брзине непрекидног хлађења дају феритно-перлитну структуру (F+P) код подеутектоидног челика, односно феритно-цементитну (F+C_m) код наеутектоидног челика. При већим брзинама хлађења добија се бејнитно-мартензитна (B+M), а при највећим брзинама хлађења чисто мартензитна структура (M).



Слика 5.4 КН дијаграм угљеничног подеутектоидног челика (а),
IRA (—) и КН (---) дијаграм угљеничног еутектоидног челика (б)

Укратко, разлика између IRA и КН дијаграма се може свести на следеће:

- код IRA дијаграма почетак и крај промене аустенита прате се по изотерми ($T = \text{const.}$), а код КН дијаграма промена аустенита се прати по одговарајућим кривама хлађења ($v_1, v_2, v_3, \dots$),
- чисто бејнитна структура не може се добити континуалним хлађењем, већ само у изотермалним условима хлађења и
- криве континуалног хлађења (КН) померене су удесно и надолу у односу на IRA дијаграм, што значи да при непрекидном хлађењу касни почетак разлагања које се одвија на нижим температурама.

Минимална брзина хлађења, којом се одлаже промена аустенита све до M_s температуре, одговара тангенти на колено криве КН и назива се *критична брзина хлађења* (v_2 , сл. 5.4а). За нискоугљеничне челике потребна је веома велика критична брзина хлађења (која се креће од $200-600^\circ\text{C/s}$); нешто мања одговара нисколегираним челицима, а најмања v_{kr} одговара еутектоидном челику.

Када је реч о легираним челицима, криве су додатно померене па се њиховим каљењем релативно лако добија мартензит (довољна је мала брзина хлађења јер имају велику прокаљивост). На то утичу сви додати легирајући елементи (осим Co и Al).

Овде треба истаћи и то да за разлику од угљеничних, код легираних челика често долази до формирања сложених једињења која настају као мешавина ферита, перлита, бејнита, мартензита и заосталог аустенита па се краће називају међуфазним или прелазним структурама.

5.1.5 Примена трансформационих дијаграма у технологији заваривања

За многе конструкционе челике и ливена гвожђа конструисани су дијаграми континуалног хлађења у условима заваривања (КНЗ). Приказују продукте разлагања потхлађеног аустенита при различитим брзинама хлађења појединих зона ЗУТ-а. Ови дијаграми се дају било у полулогаритамском координатном систему температура - време (логаритамска подела) или у систему температура - време хлађења ($t_{8/5}$).

У самом дијаграму дају се линије које ограничавају поједине структуре (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од укупног времена хлађења или од времена од 800 до 500°C ($t_{8/5}$). Иако се ови дијаграми конструишу на основу бројних опита на челику из исте шарже, они се могу употребити за приближну процену промене аустенита. Било је покушаја да се КНЗ дијаграми конструишу аналитичким методама, односно да се карактеристична температура и време промене појединих фаза прорачуна према хемијском саставу челика.

Тестирањем поменутих израза на већем броју челика познатог хемијског састава и одговарајућих КНЗ дијаграма, утврђено је да се они не могу сасвим прихватити, јер прорачунате вредности садрже велике грешке. Зато се одустало од аналитичких метода за прорачун карактеристичних температура и времена фазних промена.

Из чињенице да постоји нелинеарна зависност између хемијског састава и времена хлађења ($t_{8/5}$) с једне стране и почетка фазних промена с друге стране, група аутора је развила рачунско-експерименталну методу за одређивање карактеристичних температура и времена промена појединих фаза, чиме је знатно смањен број експеримената при конструкцији КНЗ дијаграма. На основу анализе тих резултата проистекли су следећи закључци:

- могуће је конструисање КНЗ дијаграма са довољном тачношћу и другим методама, а не само дилатометријском;
- омогућен је прорачун температура фазних промена на основу аналитичких израза за дату групу челика;
аналитичке методе нису довољно тачне при одређивању времена фазних промена, па се времена почетка и завршетка трансформације аустенита морају одређивати помоћу симулатора температурских циклуса;

- за групе челика који се разликују по технологији израде или садржају појединих елемената, треба разрадити одговарајућу методу за корекцију КНЗ дијаграма.

Помоћу дијаграма континуалног хлађења у условима заваривања (КНЗ) могу се довести у везу излазне особине навара (тврдоћа и жилавост) са примењеном технологијом, и проценити новонастале структуре у ЗУТ-у. Из примењене технологије, тј. уноса топлоте, произлази време хлађења $t_{8/5}$. Уношењем тог времена хлађења ($t_{8/5}$) у КНЗ дијаграм, процењује се новонастала структура и тврдоћа ЗУТ-а око шави. Али тек после одређивања механичких карактеристика и металографских испитивања вара изведеног са различитим уносом топлоте, може се донети коначна оцена о поузданости примене КНЗ дијаграма.

Као и у другим случајевима, и овде се на основу експерименталних резултата мора потврдити или одабрати предложена технологија заваривања. Наравно, испитивања са разарањем на геометријски сличним моделима, изводе се у случајевима када се уводе нови материјали и разрађују нове технологије заваривања за серијску производњу.

5.2 Регенерација алата за рад на топло

Челици који су намењени за израду алата за обраду метала деформисањем у топлотном стању, морају да имају добра механичка својства (чврстоћу и жилавост), као и да буду термостойани на повишеним температурама. Од њих се тражи велика отпорност на хабање, добра прокаливост, добра топлотна проводљивост, постојаност према разугљенисавању и оксидацији, мали коефицијент линеарног ширења, као и отпорност према површинским преслимама при наизменичном загревању и хлађењу. За рад на топло, алатни средње угљенични челици (0.30-0.60% C), који су легирани са Cr, W, V и Mo, могу се поделити на основу хемијског састава и услова термичке обраде у две групе:

1. У прву групу спадају челици за израду матрица за пресе, делове преса за истискивање нежелезних метала и за кокиле за ливење под притиском нежелезних метала. Челици прве групе садрже W, као и Cr и Mo и око 0.30% C.
2. У другу групу спадају челици који су намењени за ковачке калупе (матрице). Алати су изложени ударним оптерећењима, због чега су веома кратко време у контакту са загрејаним металом. У односу на прву групу улови рада захтевају већу тврдоћу као и боља својства пластичности. Ове захтеве који су наведени испуњавају челици који садрже: Cr, Ni, Mo, као и око 0.40% C. Типичан представник ове групе челика јесте Š5742, који је намењен за ковачке матрице.

Код израде ковачких алата (калупа, матрица) намењених за ковање и пресовање највећи проблем представља њихова термичка обрада. Термичка обрада може изазвати површинско разугљенисавање што доводи до пада тврдоће и других корисних особина алата. Она се изводи код неких алата после механичке обраде, а код других пре ње. Када су у питању мали и средњи алати (калупи, матрице), термичка обрада следи механичку, а у случају великих алата њој претходи.

Загревање ковачких алата при каљењу мора бити споро или поступно. Код већих алата препоручује се нешто већа температура аустенитизације. Каљење алата (калупа, матрица) малих димензија и сложене гравуре изводи се најчешће степенасто у соним купатилима (250 до 450°C), средњих са прекидом у загрејаном уљу (40 до 70°C) до око 200-150°C, а затим на ваздуху, и најзад највећих у струји компримованог ваздуха или воденој пари.

Отпуштање се треба извести одмах након каљења. С обзиром да температура отпуштања зависи од величине ковачког алата (матрице), препоручује се да буде нешто већа од радне температуре. С тачке гледишта, основне експлоатационе препоруке за повећање века ковачких алата своде се углавном на:

- споро и равномерно загревање алата до око 250-350°C пре почетка рада
- периодично жарење после откованих 2000-3000 делова при температури 450-550°C и
- ритмички рад.

У овом раду истраживана је могућност заваривања два типична нисколегирана челика за рад на топло, који су намењени за радне услове при температурама изнад 300°C:

- Č5742 (JUS) - 56NiCrMoV7 (DIN) – намењеног за ковачке матрице свих врста и
- Č4751 (JUS) - X38CrMoV51 (DIN) – намењеног првенственог за ливачке калупе нежелезних метала.

Ознаке наведених челика према другим (националним и међународним) стандардима дате су у табели 5.1.

Табела 5.1 Ознаке коришћених челика у различитим стандардима

EN (Међународни)	DIN (Немачка)	ASTM (САД)	GOST (Русија)	GB (Кина)	JIS (Јапан)	IS (Индија)	JUS (Србија)
X37CrMoV5-1	X38CrMoV5-1	H11	4Ch5MFS	4Cr5MoSiV	SKD 6	XT35Cr5Mo1V3	Č4751
55NiCrMoV7	56NiCrMoV7	L6	4ChMNFS	5CrNiMo	SKT 4	T55Ni7Cr4Mo5V1	Č5742

Хемијски састав, термофизичке карактеристике, механичке особине и микроструктура ових челика приказани су у табелама 5.2 до 5.5.

Табела 5.2 Хемијски састав и упоредне ознаке Č5742 и Č4751

Ред бр.	Ознака по JUS-у	Хемијски састав, %										Веза са другим стандардима	
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V		DIN	UNI
1.	Č5742	0.55	0.3	0.7	0.035	0.035	1.1	1.7	0.5	0.12		56NiCrMoV7	U52NiCrMo6KU
2.	Č4751	0.40	1.0	0.4	0.025	0.025	5.0	-	1.3	0.4		X38CrMoV5	UX35CrMo05KU

Табела 5.3 Зависност термичке проводности од температуре $\lambda = \lambda(T)$, W/cm°C

Челик (DIN - JUS)	Температура, °C		
	20	350	700
56NiCrMoV7 - Č5742	0.360	0.380	0.35
X38CrMoV5 - Č4751	0.253	0.272	0.305

Табела 5.4 Зависност коефицијента линеарног ширења од температуре $\alpha = \alpha(T)$, m/m°C

Челик (DIN - JUS)	Температура, °C						
	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700
56NiCrMoV7 - Č5742	12.2	13.0	13.3	13.7	14.2	14.4	-
X38CrMoV5 - Č4751	11.8	12.4	12.6	12.7	12.8	12.9	12.9

Табела 5.5 Механичке особине и микроструктура Č5742 и Č4751

Ред. бр.	Ознака по JUS-у	Меко жарење			Отпуштање			Температура предгревања (формула Сеферијана)	Микроструктура О.М.
		t, °C	HV _{max}	R _m , МПа	t, °C	HRC	R _m , МПа		
1.	Č5742	670-700	250	850	400-700	50-30	1700-1100	≈ 300	М + В (међуфазна)
2.	Č4751	800-830	250	850	550-700	50-30	1700-1100	≈ 300	М + В (међуфазна)

Челик Č5742 (56NiCrMoV7) има веома добру отпорност на термичке шокове и појаву прслина, добре механичке особине на собним и повишеним температурама, релативно високу жилавост на собним сниженим температурама и др.

Намењен је за израду свих врста ковачких калупа и алата за рад на топло, калупова за гравитационо ливење метала и пластике, алата за рад на толо, калупова за гравитационо ливење метала и пластике, алата за истискивање и др.

Челик Č4751 (X38CrMoV51), њега одликује веома добра отпорност на термичке „шокове” и појаву прслина, изузетне механичке особине на собним и повишеним температурама, добра жилавост и тврдоћа. Намењен је за израду пресерских ковачких алата, алата за ливење алуминијума тврдоће 46-50 HRC, алата за ливење бакра тврдоће 41-46 HRC, калупова за гравитационо ливење метала и пластике, алата за екструдирање и др.

На основу литература, режим каљења ових челика и резултати каљења треба да одговарају подацима које су дате у табелама 5.6 и 5.7.

Табела 5.6 Препоручен режим каљења и резултати каљења Č5742

Челик (DIN - JUS)	Температура при каљењу, °C	Начин каљења	Тврдоћа, HRC	Затезна јачина, R _m , МПа
56NiCrMoV7 - Č5742	830-870	Уље	58	2200
	860-900	вода	56	2050

Табела 5.7 Препоручен режим каљења и резултати каљења за Č4751

Челик (DIN - JUS)	Температура при каљењу, °C	Начин хлађења, °C уље/вода	Тврдоћа, HRC	Затезна јачина, R _m , МПа
X38CrMoV5 - Č4751	1000-1030	500-550	54	1910

Како би се што више приближили експлоатационим условима сви узорци-модели су подвргнути термичкој обради. После термичке обраде на узорцима-моделима мерила се тврдоћа и она се кретала од 40-42 HRC за Č5742 и од 41-49 HRC за Č4751.

За експерименталне сврхе заваривани су узорци различитих дебљина ($s = 7.4-40 \text{ mm}$) који су претходно предгрејани због склоности ка закаљивању ($C > 0.35\%$). Температура предгревања која је одређена према формули Сеферијана кретала се од $T_p = 286^\circ\text{C}$ за $s = 7.4 \text{ mm}$ до $T_p = 315^\circ\text{C}$ за $s = 40 \text{ mm}$. Према томе усвојили смо да је температура предгревања: $T_p \approx 300^\circ\text{C}$.

5.2.1 Избор додатног материјала и технологије заваривања плоча

Заваривање алата за рад на топло има за циљ да се надокнади губитак метала који је настао због трења и хабања (термомеханичког замора). У пракси се може срести и случај израде нових алата од конструкционих угљеничних челика са радном површином завареном алатним челиком, али је то још увек на нивоу идеје.

Заваривање изабраних узорака је извођено ручним електролучним поступком у некадашњој Централној лабораторији Застава аутомобила. Заваривање је извођено из два и три пролаза како би се умањило мешање-разблаживање, односно да би се у трећем слоју добиле декларисане особине споја које даје произвођач електрода. При сваком пролазу мерена је брзина заваривања, као и пре наношења сваког наредног пролаза, односно слоја, проверавана је температура предгревања, односно међупролазна температура (interpass). За мерење је употребљен дигитални мерни уређај Tastotherm D1200 (са термопаром NiCr-NiAl мерног опсега од -50 до 1200°C).

Додатни материјали који су коришћени су високолегиране базичне електроде UTOP 38 (E3-UM-40T Ø3.25 mm - DIN 8555) и UTOP 55 (E6-UM-60T Ø5.00 mm - DIN 8555). Ове електроде су намењене за заваривање алата, као што су: утопи, челични калупи, матрице, трнови за пресовање. Варови/шавови ових електрода су жиливи, отпорни према хабању и ударима.

Тврдоћа вара је према испитивањима, постојана до температуре од $T_p \sim 570^\circ\text{C}$, а према препорукама произвођача електрода до 600°C . Пре употребе електроде су сушене по режиму: загревање у пећи до температуре $350\text{--}400^\circ\text{C}$, држање 2 h на температури сушења и хлађење у пећи у току 1h, при чему температура није пала испод 150°C . Тако загрејане електроде су употребљиване за заваривање предгрејаних узорака, чиме је снижен ниво дифундованог водоника и умањена могућност појаве хладних прслина.

Параметри заваривања су дати у табелама 5.7 и 5.9, као и особине додатног материјала.

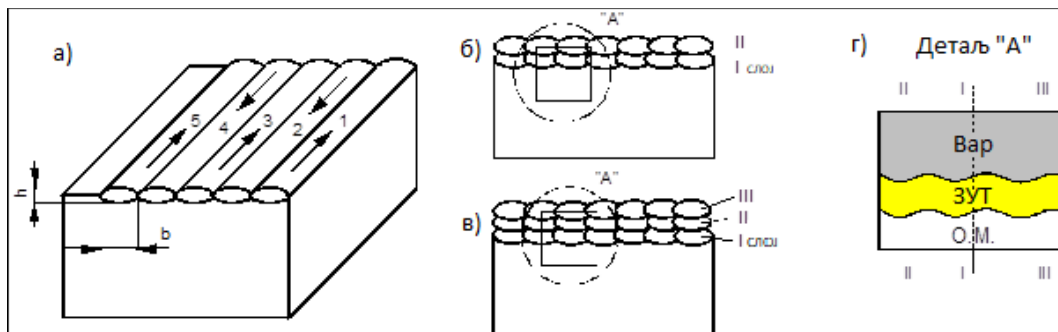
Табела 5.8 Параметри заваривања REL поступком

Ред. бр.	Ознака електроде		Пречник језгра, d_e , mm	Струја заваривања, I, A	Напон, U, V	Брзина заваривања, v_z , cm/s	Погонска енергија, q_l , J/cm
	Железарна Јасенице	DIN 8555					
1.	UTOP 38	E3-UM-40T	3.25	115	26	≈ 0.28	8543
2.	UTOP 55	E6-UM-60T	5.00	190	29	≈ 0.25	17632

Табела 5.9 Особине додатног материјала

Ред. бр.	Ознака електроде		Хемијски састав*, %					Врста струје	Тврдоћа шавова, HRC	Намена
	Железарна Јасенице	DIN 8555	C	Cr	Mo	V	W			
1.	UTOP 38	E3-UM-40T	0.13	5.0	4.0	0.20	+	= (+)	36-42	Наваривање алата за рад у топлом и хладном стању
2.	UTOP 55	E6-UM-60T	0.50	5.0	5.0	0.60	+	= (+)	55-60	- II -

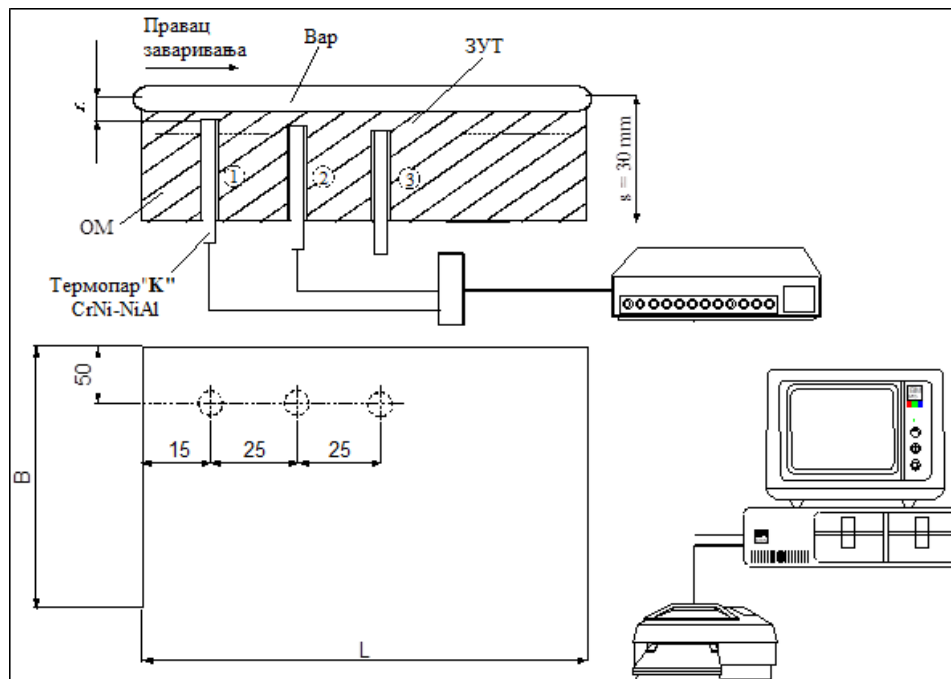
На слици 5.5 је приказан редослед заварених спојева, с тим што је пре сваког наредног пролаза одстрањивана троска помоћу челичне четке. Према овој шеми наносени су такође и остали слојеви (други слој (сл. 7.56) и трећи (сл. 5.5в)). Ширина пролаза завареног електродом пречника $\varnothing 3.25 \text{ mm}$ била је $b \approx 10\text{--}12 \text{ mm}$, висина навара $h \approx 1.5 \text{ mm}$, а електродом $\varnothing 5.0 \text{ mm}$ $b \approx 16\text{--}18 \text{ mm}$ и $h \approx 2.1 \text{ mm}$.



Слика 5.5 Редослед полагања навара: а – 1 слој, б - други слој, в – 3 слој, г – металографски избрусак

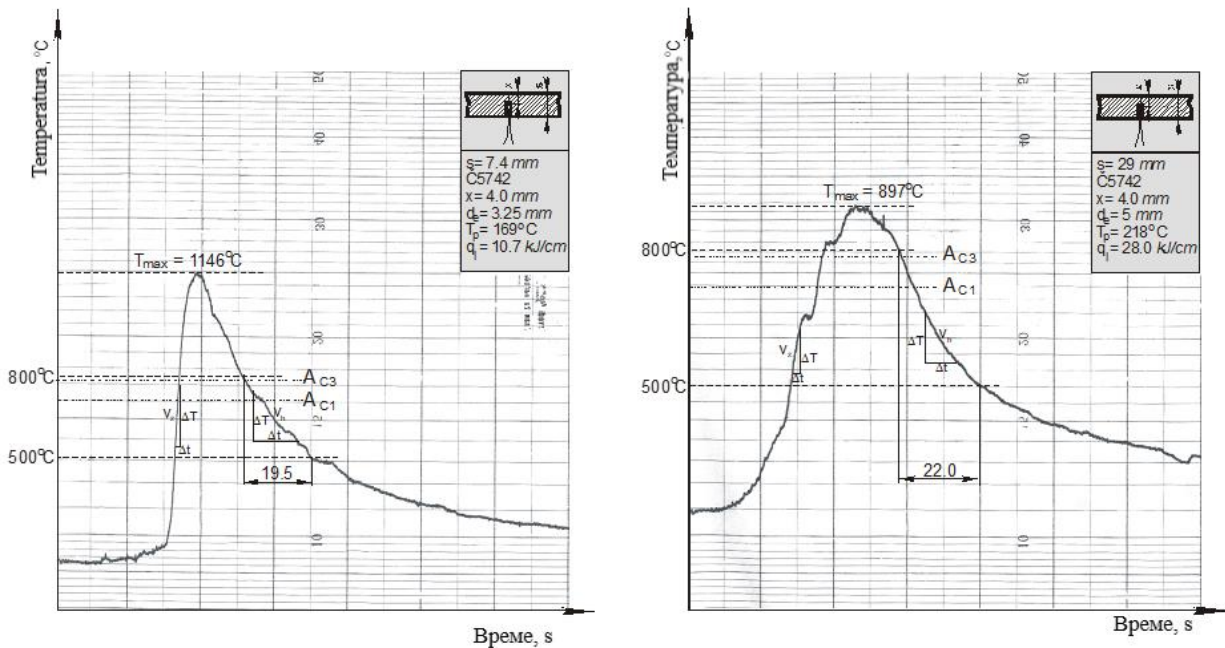
5.2.2 Одређивање температурског циклуса

У овој тачки поред аналитичких и рачунских метода који су споменути у тачки 3, дат је и приказ сопствених експеримената који су изведени ради одређивања температура у карактеристичним тачкама око завареног споја. Начин припреме завариваних делова, као и шема мерења температура помоћу термопарова, приказани су на слици 5.6, где су мерене температуре у неким тачкама испод шави. Примењивани су како оклопљени термопарови – тип "К", пречника 1.5 mm (Chromel-Alumel, NiCr-NiAl) произвођача Philips, тако и термопарови (из класе типа "К") пречника $\varnothing 0.25$ и $\varnothing 0.40 \text{ mm}$.



Слика 5.6 Шема мерења температура у завариваним плочама

На слици 5.7 могу се видети приказани температурски циклуси који су добијени мерењем у одговарајућим мерним тачкама ЗУТ-а навара за танку и дебелу плочу.



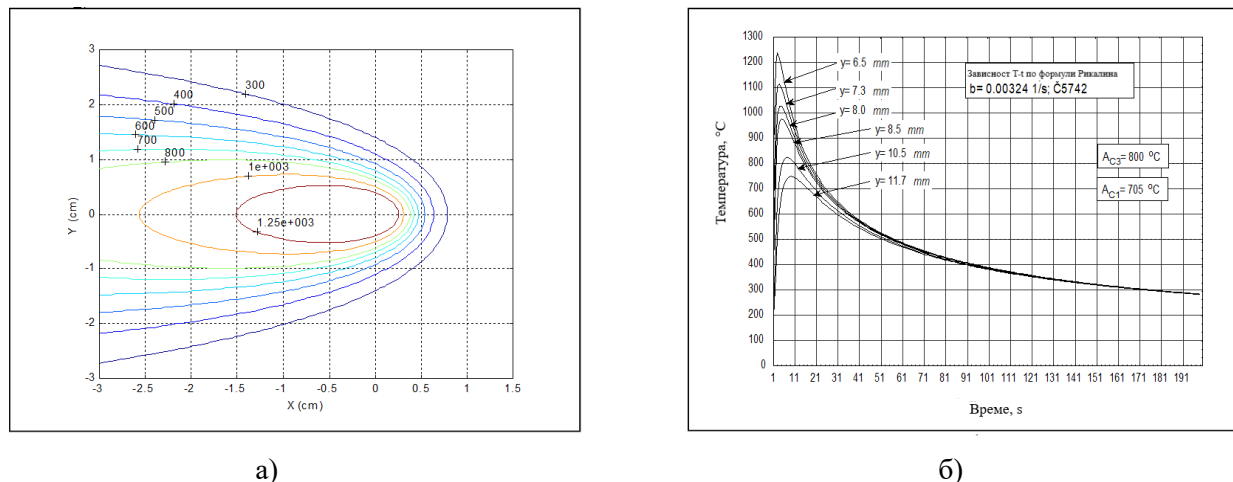
а) $s = 29 \text{ mm}$; $q_{ef} = 4256 \text{ W}$; $v_z = 0.152 \text{ cm/s}$;
 $q_l = 28049 \text{ J/cm}$; $T_p = 218^{\circ}\text{C}$

б) $s = 7.4 \text{ mm}$; $q_{ef} = 2300 \text{ W}$; $v_z = 0.215 \text{ cm/s}$;
 $q_l = 10698 \text{ J/cm}$; $T_p = 169^{\circ}\text{C}$

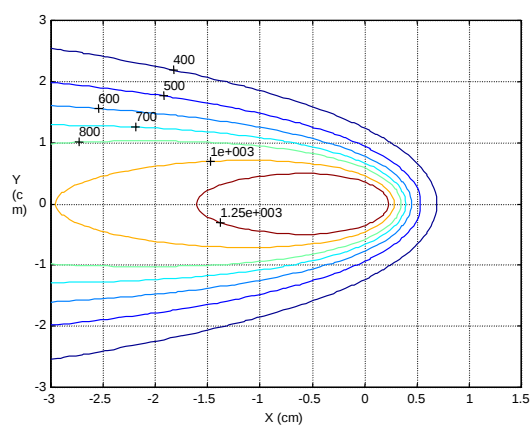
Слика 5.7 Температурски циклуси ЗУТ-а – експериментална метода $\check{C}5742$: а) дебела плоча плоча и б) танка плоча

Применом Рикалинових формула извршени су аналитички прорачуни температурских поља и циклуса, који се односе на различите рачунске шеме у случају покретног извора топлоте.

На основу израза израчунати су температурски циклуси за одговарајуће погонске енергије и неке тачке испод шавва. Резултати су приказани на сликама 5.8 до 5.11.

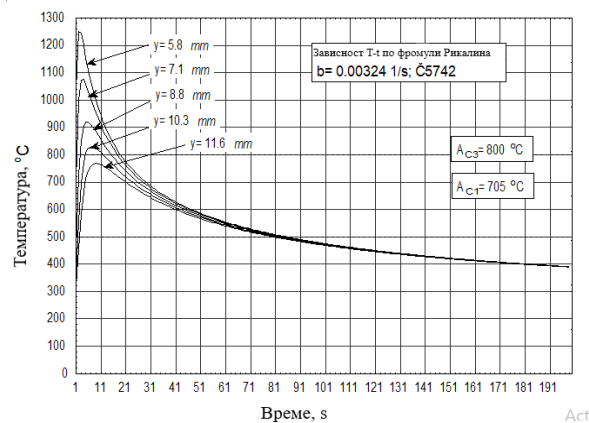


Слика 5.8 Температурско поље око вара (а) и температурски циклуси појединих тачака ЗУТ-а навара (б) ($s = 7.4 \text{ mm}$; $q_l = 10698 \text{ J/cm}$; $T_p = 169^{\circ}\text{C}$; UTOP 38; $\check{O}3.25 \text{ mm}$)



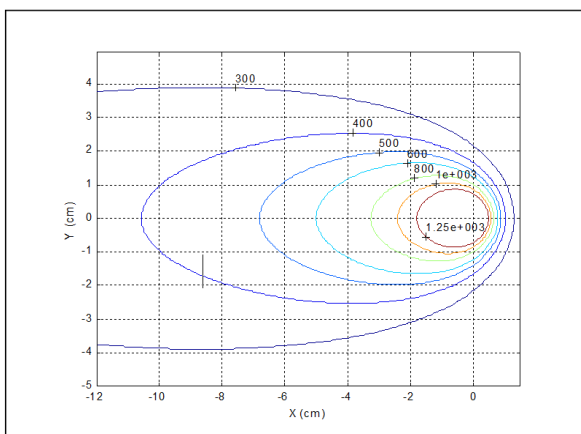
$T_p = 218^\circ\text{C}$

Слика 5.9 Температурско поље око завареног споја ($s = 7.4 \text{ mm}$; $q_l = 8543 \text{ J/cm}$; $T_p = 300^\circ\text{C}$; UTOP 38; $\varnothing 3.25 \text{ mm}$)

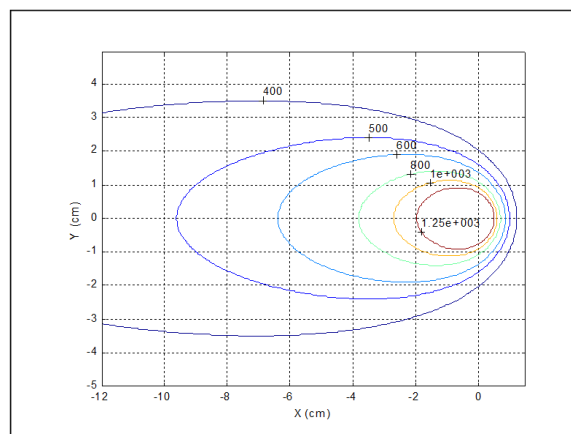


$T_p = 300^\circ\text{C}$

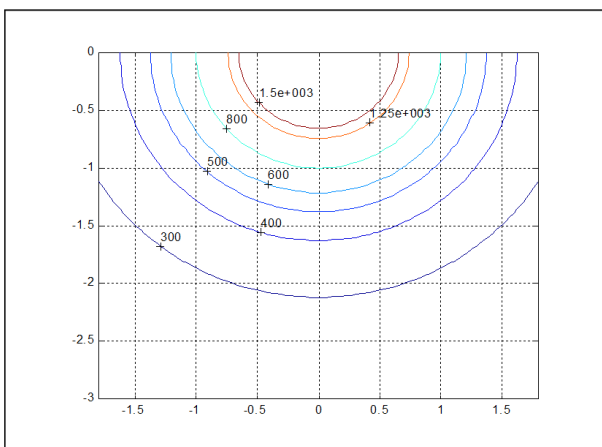
Слика 5.10 Температурски циклуси тачака ЗВТ-а завареног споја ($s = 7.4 \text{ mm}$; $q_l = 8543 \text{ J/cm}$; $T_p = 300^\circ\text{C}$; UTOP 38; $\varnothing 3.25 \text{ mm}$)



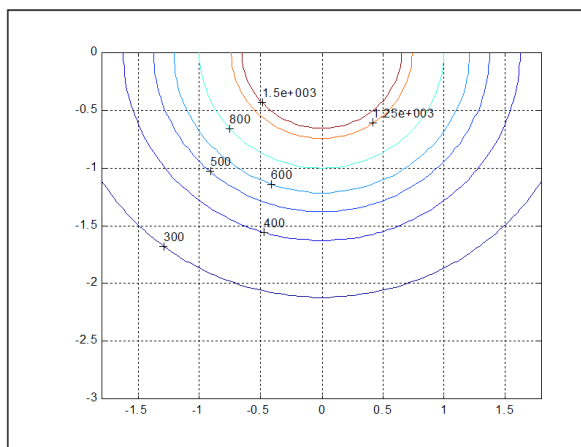
а) $T_p = 218^\circ\text{C}$



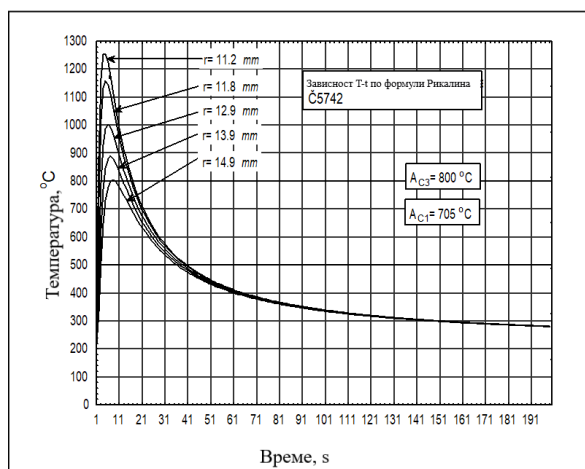
г) $T_p = 300^\circ\text{C}$



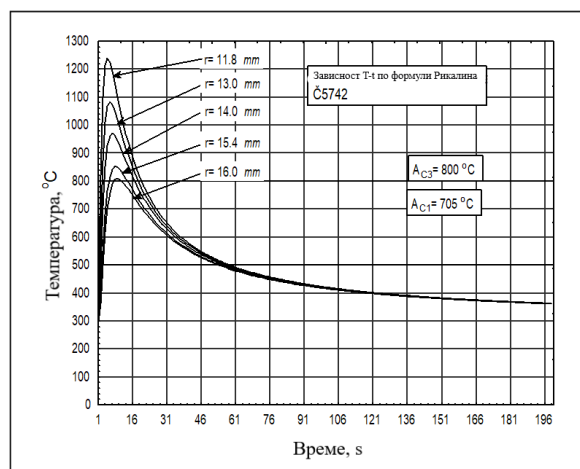
б) $T_p = 218^\circ\text{C}$



д) $T_p = 300^\circ\text{C}$



B) $T_p = 218^\circ\text{C}$

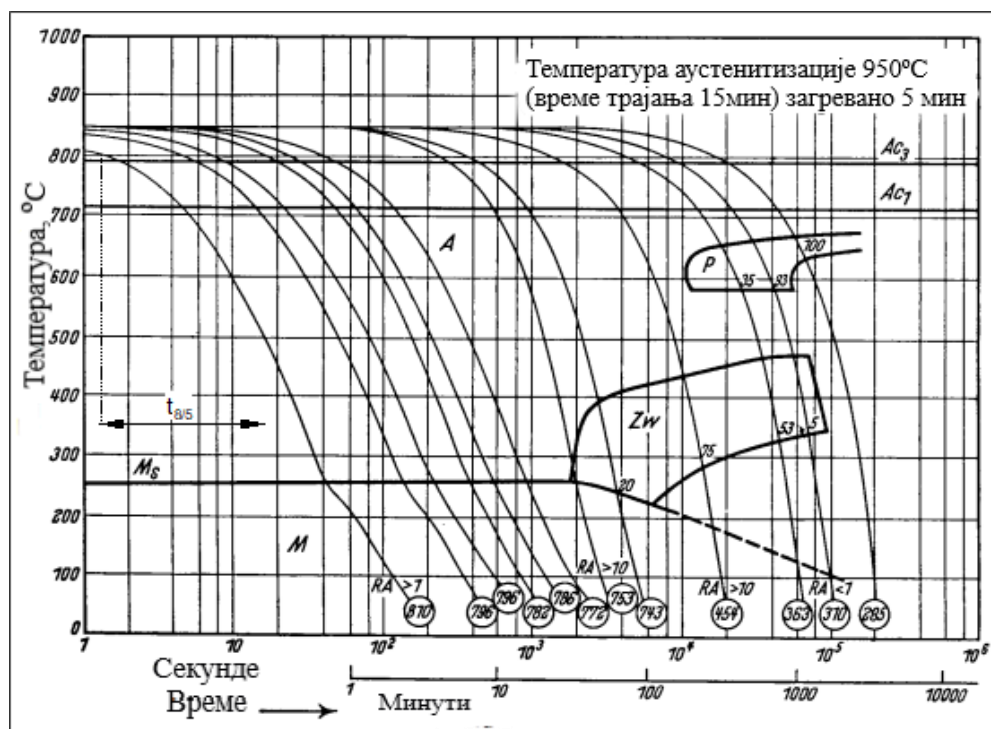


h) $T_p = 300^\circ\text{C}$

Слика 5.11 Температурско поље око вара - (а) и (г), распоред температура по пресеку плоче (б) и(д), и температурски циклуси појединих тачака ЗУТ-а завареног споја (в) и (ђ) ($s = 29 \text{ mm}$, $q_l = 28049 \text{ J/cm}$, UTOP 55, $\varnothing 5.0 \text{ mm}$)

5.2.3 Оцена заварљивости основног материјала

Ради повезивања излазних особина завареног слоја са примењеном технологијом, као и утврђивања новонастале структуре и тврдоће у зони око шави (после заваривања и хлађења), корисно је познавати дијаграм континуалног хлађења КН дијаграм. За челик Č5742 одговарајући дијаграм КН приказан је на слици 5.12. Уношењем времена $t_{8/5}$ у овај дијаграм може се проценити новонастала структура и очитати тврдоћа. Време $t_{8/5}$ може се прорачунати или очитати са температурског циклуса.



Слика 5.12 *KH* дијаграм за челик - 56NiCrMoV7 (Č5742)

Овај термостопостояни челик спада у веома закаљиве челике ($C > 0.35\%$) и доста је осетљив на унос топлоте. Према разним методама за оцену заварљивости произилази да је неопходно предгревање, бирати неопходну технологију заваривања и применити накнадну термичку обраду како би се снизио ниво заосталих напона. Време хлађења одређивано је применом формуле јапанских аутора, односно формула $t_{8/5} = f(s_{gr})$. Прорачунате вредности су приказане у табели 5.10.

Табела 5.10 Време хлађења ($t_{8/5}$)

Дебљина О.М., s, mm	Пречник електроде, d_e, mm	Погонска енергија, $q_l, J/cm$	Време хлађења, $t_{8/5}, s$			
			Формула јап. аутора		$t_{8/5} = f(s_{gr})$	
			$T_0 = 20^\circ C$	$T_p = 300^\circ C$	$T_0 = 20^\circ C$	$T_p = 300^\circ C$
40	3.25	8543	1.9	6.4	3.6	13.6
	5.00	17632	5.1	19.0	7.5	28.0
7.4	3.25	8543	6.7	25.2	16.3	127.1
	5.00	17632	20.0	74.8	69.5	541.4

5.3 Избор најповољније формуле за прорачун времена хлађења ($t_{8/5}$)

5.3.1 Одређивање температурских циклуса експерименталном методом помоћу термопарова

❖ Избор и баждање термопарова

За одређивање времена хлађења $t_{8/5}$ неопходно је познавање температурских циклуса ЗУТ-у завареног споја, где се температуре крећу између температуре солидуса (T_s) и температуре A_{C1} . Применом оклопљених термопарова могуће је мерење температура и у тој уској зони, али узимајући у обзир њихову цену и могућност оштећења, одлучили смо се за термопарове непознатих карактеристика (из класе типа "К") пречника $\varnothing 0.25 mm$ и $\varnothing 0.40 mm$ чије смо врхове спајали заваривањем у заштити аргона, TIG поступком.

Код ових термопарова највећу тешкоћу, представљала је непозната карактеристика Е-Т (Е- електромоторна сила у mV , Т- температура у $^\circ C$), коју је требало одредити. Према одговарајућим шемама баждање изабрали смо велики број овако припремљених термопарова, па затим одређивали њихове карактеристике и упоређивали са термопаром познатих карактеристика, тј. са термопаром типа К.

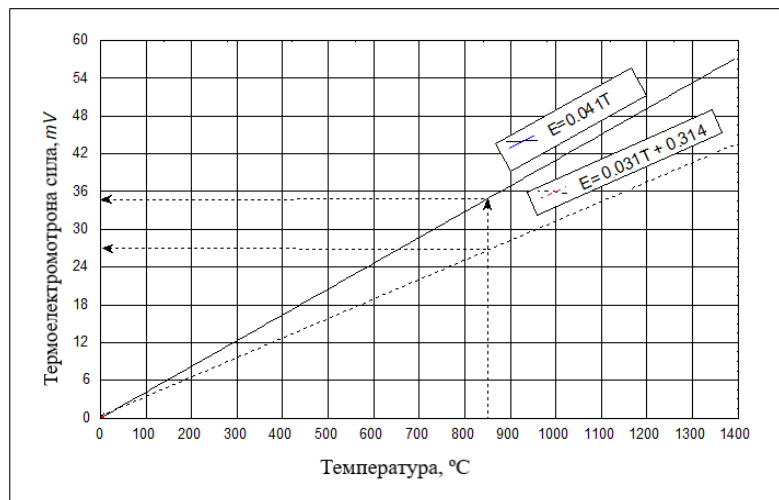
Карактеристика термопара К је:

$$E = 0.041 \cdot T,$$

а карактеристика примењиваних – непознатих термопарова је одређена на основу баждање како на нижим температурама ($T \leq 100^\circ C$), тако и на знатно вишим температурама ($T = 300^\circ C, 500^\circ C$ и $800^\circ C$). Такође је утврђена и линеарна зависност Е-Т, која после статистичке обраде добијених резултата мерења гласи:

$$E = 0.031 \cdot T + 0.314.$$

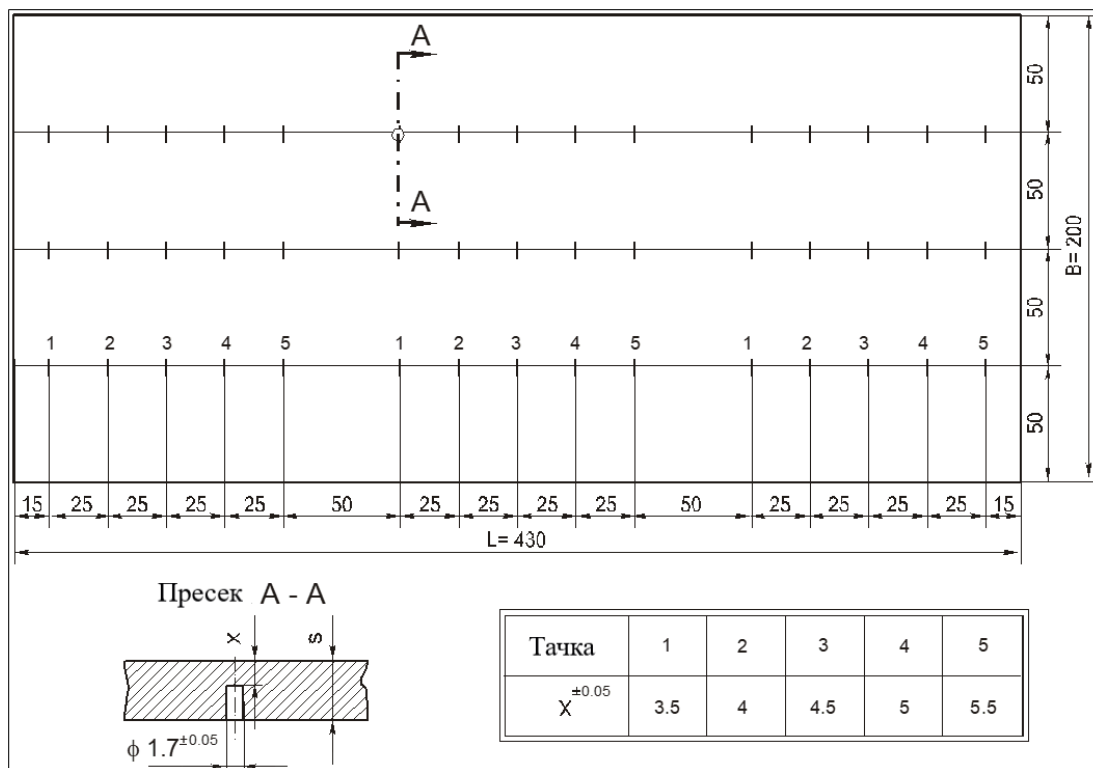
На слици 5.13 можемо видети експериментално добијене зависности Е–Т за оба коришћена термопара. Провера измерених вредности температура извођена је и помоћу дигиталног термометра са две скале мерења DTIM, са термопаром од NiCr-Ni.



Слика 5.13 Зависност термоелектромоторне силе од температуре за два типа термопара

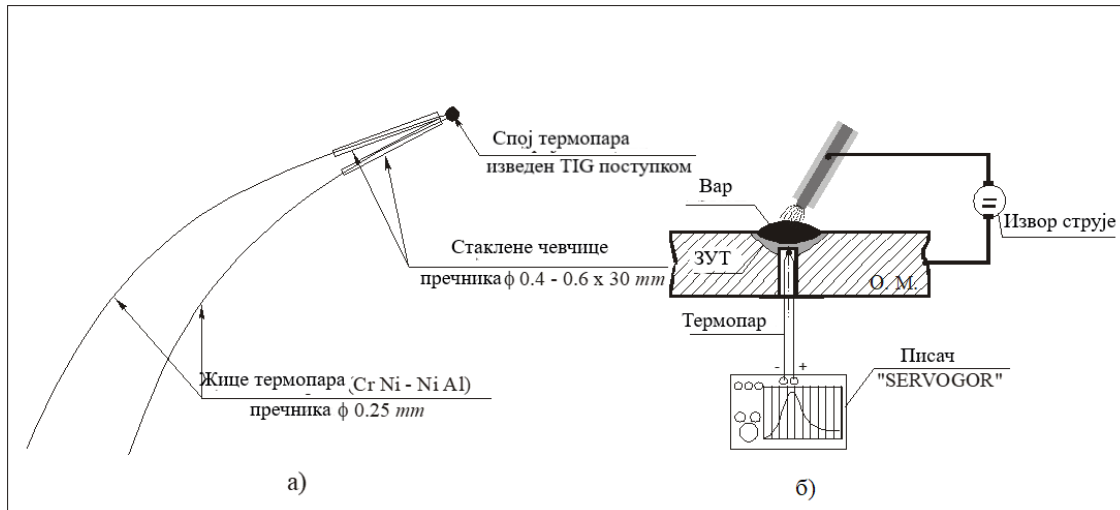
❖ Избор и припрема плоча за мерење температура

Плоче су припремане од легираног челика предвиђеног за ковачке алате - Č5742. Плоче су биле различитих дебљина ($s=7.4\text{ mm}$ и $s=29\text{ mm}$), такође у плоче су бушени отвори пречника $1.7\pm0.05\text{ mm}$ према слици 5.14. У те отворе су убацивани и причвршћивани термопарови (оклопљени или приручни) пречника $\varnothing 1.5\text{ mm}$.



Слика 5.14 Изглед плоча за мерење температура

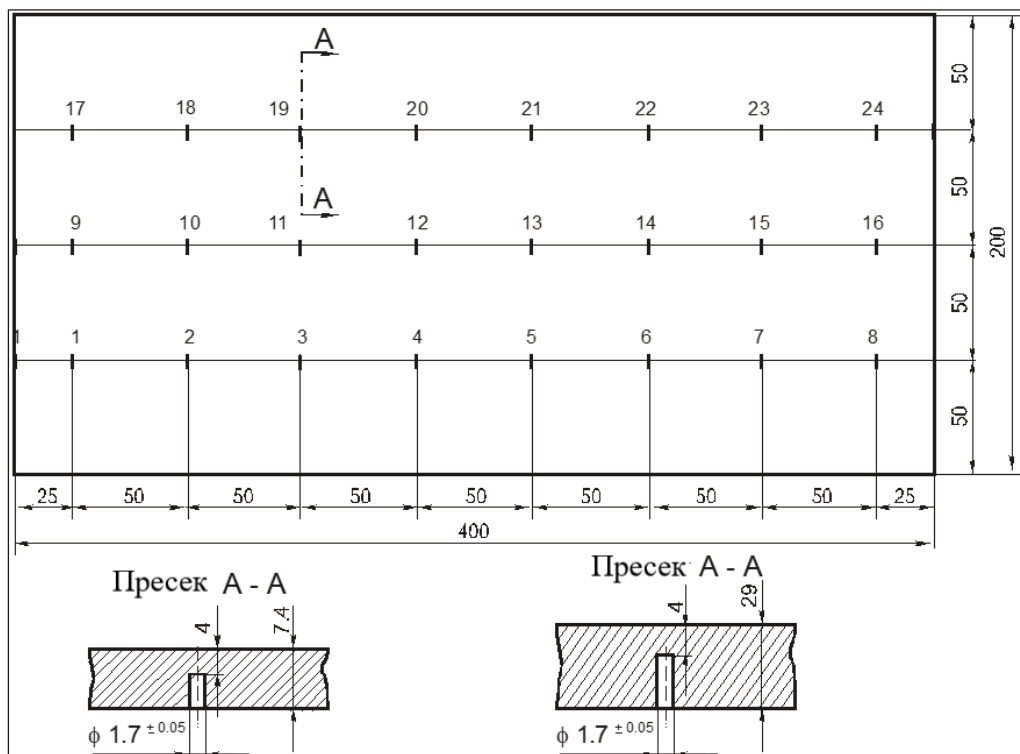
На жице приручних термопарава пре убацивања у отвор навучене су стаклене цевчице пречника $\varnothing 0.4-0.6 \text{ mm}$, ради смањења грешке мерења (сл. 5.15).



Слика 5.15 Припрема приручних термопарава (а) и начин причвршћивања (б)

5.3.2 Експериментални резултати који се односе на температурске циклусе при заваривању челика за рад на топло - Č5742

На слици 5.16 могу се видети плоче-модели који су припремљени за ковачке алате. Плоче су термички побољшане и на њима су избрушени одговарајући отвори за мерење температура.



Слика 5.16 Изглед плоча за мерење температура

У табелама 5.11 и 5.12 приказани су резултати експериментално одређеног, односно прорачунатог времена хлађења $t_{8/5}$ добијеног уносом различитих вредности линијских енергија, у условима са предгревањем и без предгревања. При заваривању плоча дебљине $s = 7.4 \text{ mm}$ параметри заваривања су се кретали у следећим границама: линијска енергија - $q_l = 9543\text{--}16911 \text{ J/cm}$, брзина заваривања - $v_z = 0.241\text{--}0.136 \text{ cm/s}$ и температура предгревања - $T_p = 20\text{--}290^\circ\text{C}$ (УТОР 38 - $\varnothing 3.25 \text{ mm}$). При заваривању дебелих плоча $s = 29 \text{ mm}$, наведени параметри су били: $q_l = 16500\text{--}32738 \text{ J/cm}$, $v_z = 0.258\text{--}0.130 \text{ cm/s}$ и $T_p = 20\text{--}355^\circ\text{C}$ (УТОР 55 - $\varnothing 5.0 \text{ mm}$).

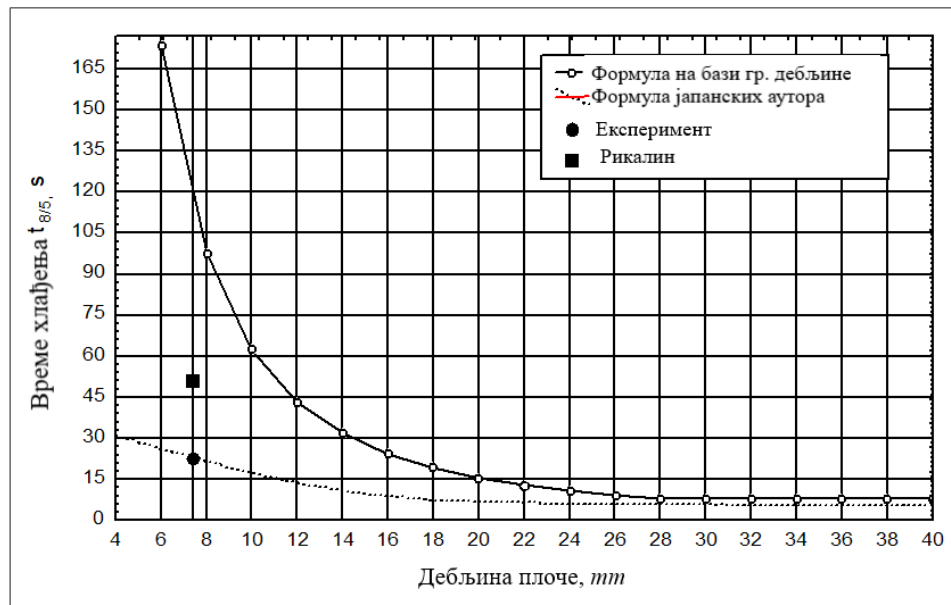
Табела 5.11 Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ ($s = 7.4 \text{ mm}$, $I = 115 \text{ A}$, $U = 25 \text{ V}$, $q_{ef} = 2300 \text{ W}$)

Брзина заваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија заваривања $q_l, \text{ J/cm}$	Темп. Предгревања $T/T_p, ^\circ\text{C}$	Време хлађења $t_{8/5}, \text{ s}$				Тачка / Слој
			$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$	
0.238	9663	20	8.62	24.00	14.50	16.5-20	1/1
0.220	10560	20	9.85	29.0	17.00	20-21	24/1
0.186	12192	20	13.34	43.63	16.00	24-26	21/1
0.241	9543	70	10.14	31.17	16.50	20.5-23.5	21/2
0.172	13372	273	44.20	273.9	28.00	88-90	17/1
0.169	13609	280	47.35	304.50	34.00	94-98	10/1
0.136	16911	185	39.00	206	23.50	70-76	9/1
0.208	11058	180	20.1	84.9	27.00	42-50	18/1
0.175	13142	240	35.50	194.2	30.50	71-78	18/2
0.190	12105	178	22.80	100.3	23.00	48-54	11/1
0.183	12568	178	24.05	107.3	19.00	48.5-57	19/1
0.215	10698	169	18.19	73.4	19.50	36-43	3/1
0.150	15333	180	32.90	163.2	24.50	59-68	2/1
0.158	14557	290	55.80	386.7	31.00	104-113	2/2

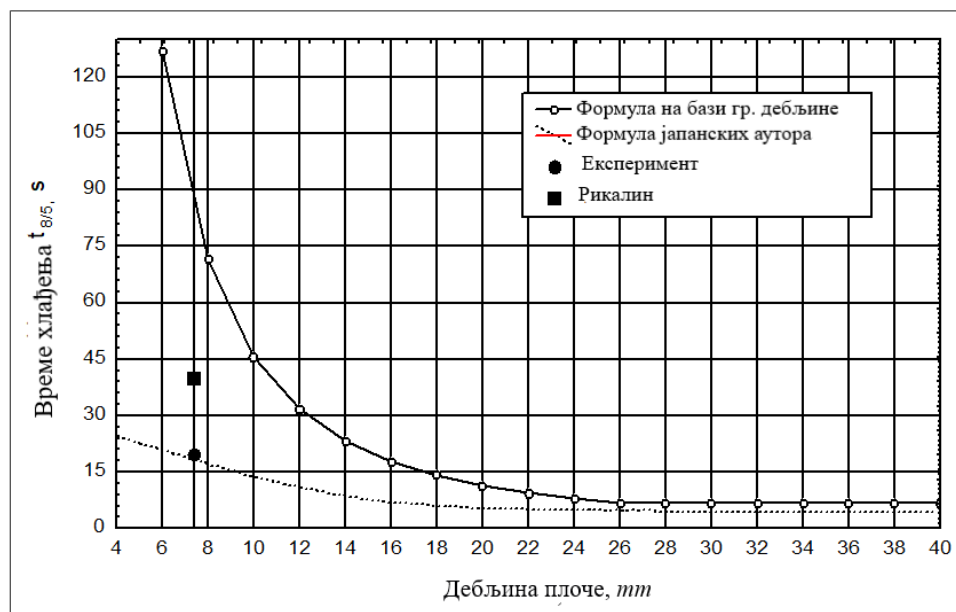
Табела 5.12 Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ ($s = 29 \text{ mm}$, $I = 190 \text{ A}$, $U = 28 \text{ V}$, $q_{ef} = 4256 \text{ W}$)

Брзина заваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија заваривања $q_l, \text{ J/cm}$	Темп. предгревања $T_o/T_p, ^\circ\text{C}$	Време хлађења $t_{8/5}, \text{ s}$				Тачка / Слој
			$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$	
0.148	28757	20	11.20	14.10	16.0	10.8-12.5	1/1
0.130	32738	355	76.17	287.50	78.0	70.5-74.5	16/1
0.161	26436	231	24.36	47.30	25.0	24-27	14/1
0.152	28049	218	24.80	47.80	22.0	23.2-25.5	7/1
0.142	29870	231	29.30	60.40	24.0	27-29.6	7/2
0.258	16500	204	10.43	14.89	12.0	13.5-14.5	6/1
0.257	16912	204	10.83	15.52	12.0	13.6-14.7	6/2
0.167	25414	178	17.60	28.80	16.0	18-20	13/1
0.185	23000	235	20.20	37.10	20.5	21-23.5	21/1
0.163	26136	271	30.12	66.80	23.0	30-32	19/2

На дијаграмима 5.17 до 5.21 дати су карактеристични упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$.



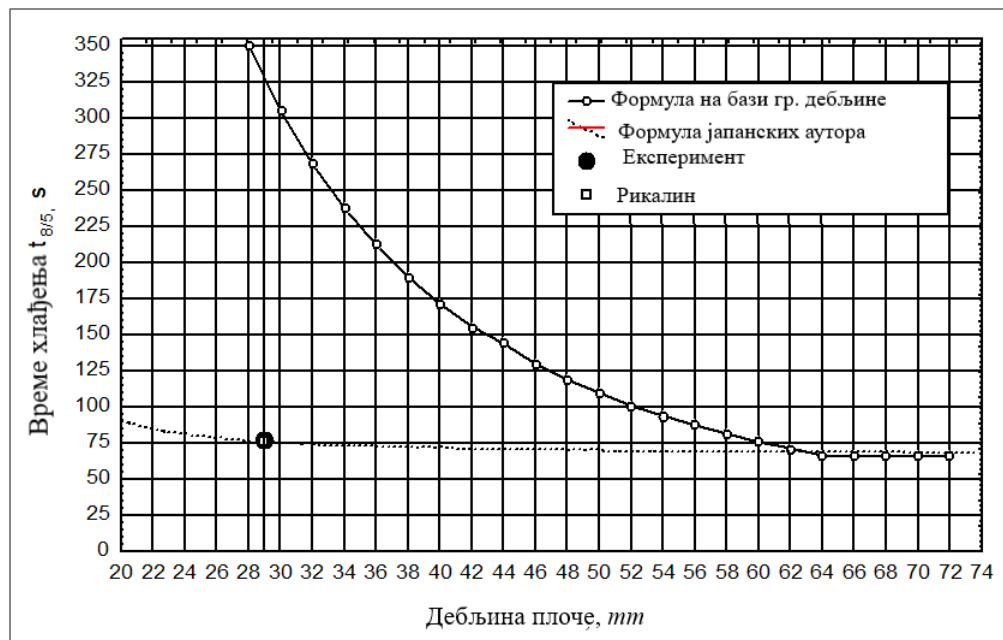
Слика 5.17 Упоредни резултати времена хлађења ($s = 7.4 \text{ mm}$, $d_e = 3.25 \text{ mm}$, $T_p = 178^\circ\text{C}$, $q_l = 12105 \text{ J/cm}$)



Слика 5.18 Упоредни резултати времена хлађења ($s = 7.4 \text{ mm}$, $d_e = 3.25 \text{ mm}$, $T_p = 169^\circ\text{C}$, $q_l = 10698 \text{ J/cm}$)

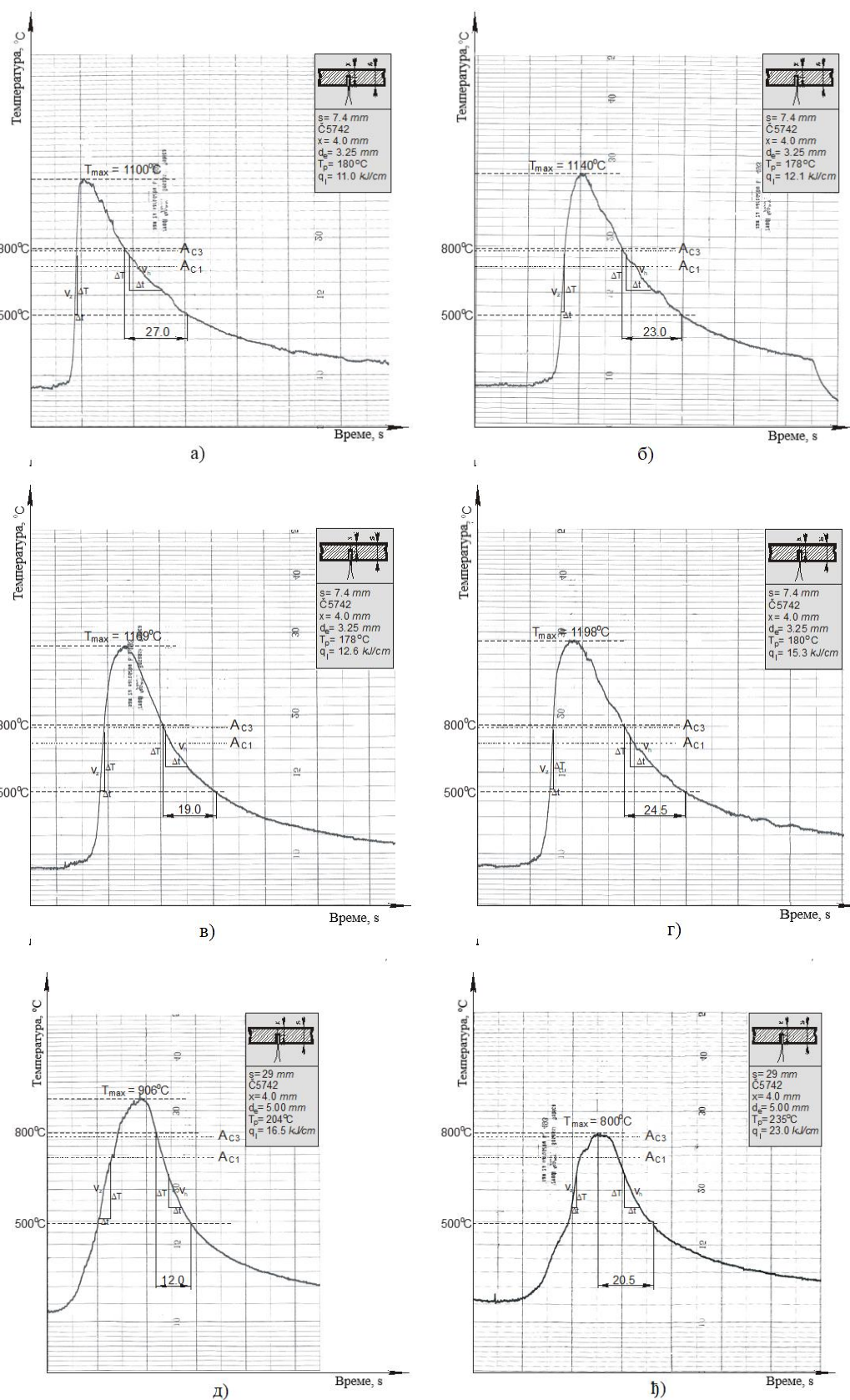


Слика 5.19 Упоредни резултати времена хлађења ($s = 29 \text{ mm}$, $d_e = 5 \text{ mm}$, $T_p = 204^\circ\text{C}$, $q_l = 16912 \text{ J/cm}$)



Слика 5.20 Упоредни резултати времена хлађења ($s = 29 \text{ mm}$, $d_e = 5 \text{ mm}$, $T_p = 355^\circ\text{C}$, $q_l = 32738 \text{ J/cm}$)

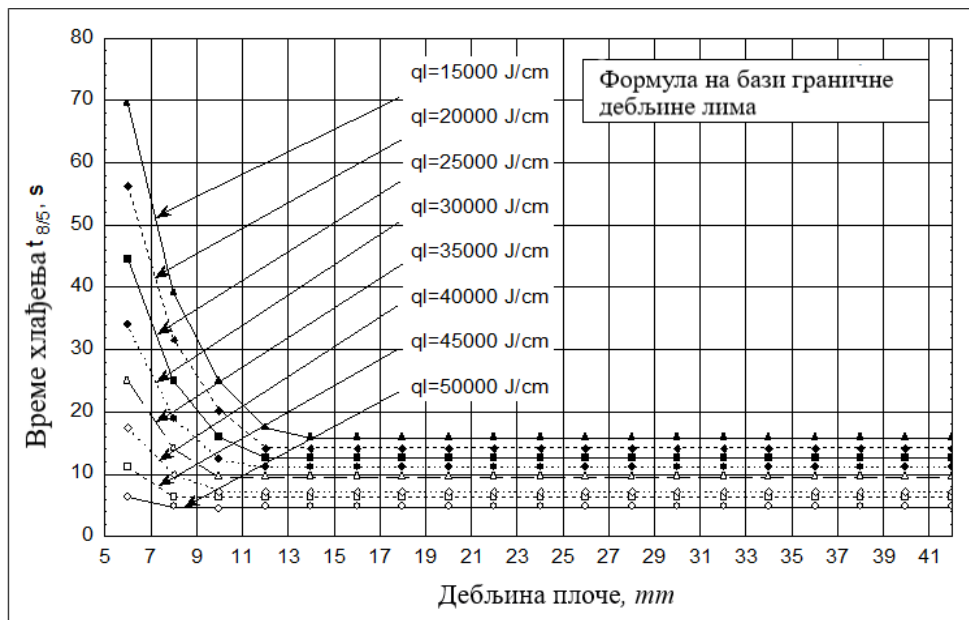
Карактеристични температурски циклуси за поједине тачке приказани су на слици 5.21.



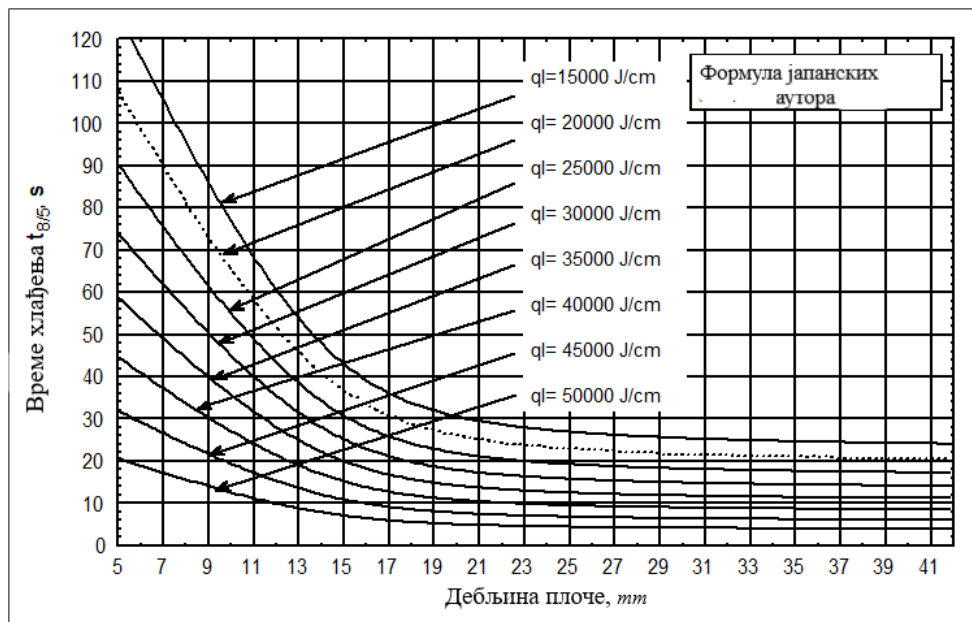
Слика 5.21 Температурски циклуси ЗУТ-а завареног споја

5.3.3 Оцена тачности аналитичких израза за прорачун времена хлађења

На сликама 5.22 и 5.23 приказане су зависности времена хлађења за REL заваривање.

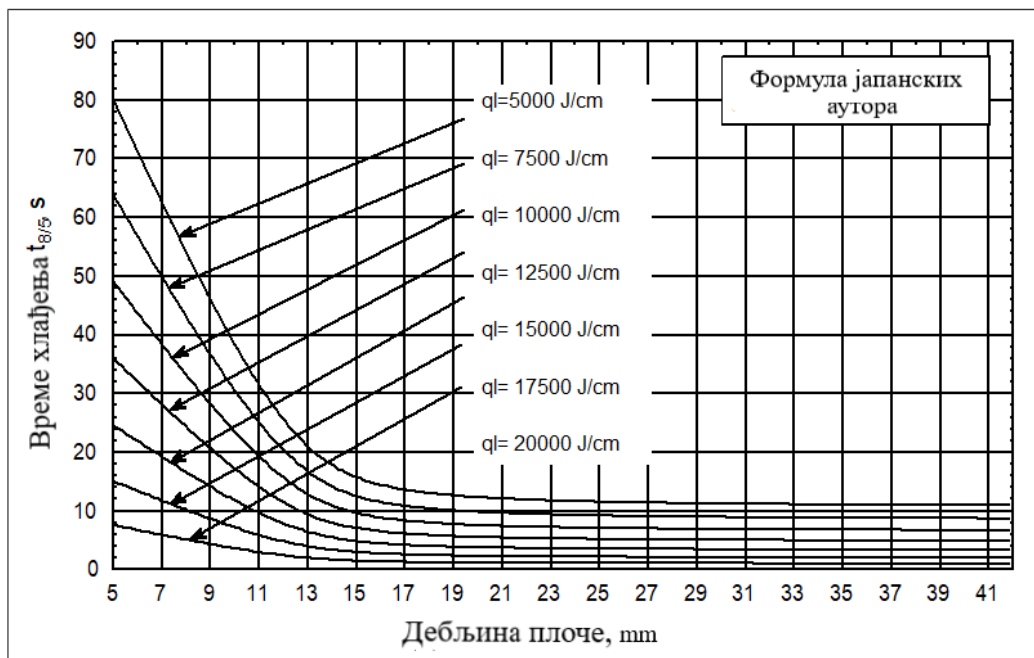


Слика 5.22 Зависност времена хлађења $t_{8/5}$ од дебљине плоче и погонске енергије - $t_{8/5} = f(s_{gr})$



Слика 5.23 Зависност времена хлађења $t_{8/5}$ од дебљине плоче и погонске енергије – формула јапанских аутора

На слици 5.24 приказана је зависност времена хлађења $t_{8/5}$ од дебљине лима и погонске енергије одређеног по формули јапанских аутора, будући да време $t_{8/5}$ одрађено по формули на бази граничне дебљине не зависи од врсте примењиваног поступка заваривања.



Слика 5.24 Зависност времена хлађења $t_{8/5}$ од дебљине плоче и погонске енергије – формула јапанских аутора

5.3.4 Анализа добијених резултата

При прорачуну времена хлађења $t_{8/5}$ намеће се дилема коју формулу изабрати. Другим речима до сада није било познато која формула даје резултат најближи кривој експерименталног циклуса или кривој температурског циклуса добијеног осталим методама. У том циљу, изведена су бројна испитивања.

Најбољу сагласност са експерименталним резултатима даје формула јапанских аутора. Овај закључак се односи само за заваривање равних плоча. Предност је то што не раздваја танке и дебеле лимове па се прорачунски поступак поједностављује. Такође треба указати и на различите облике снимљених температурских циклуса за танке и дебеле плоче.

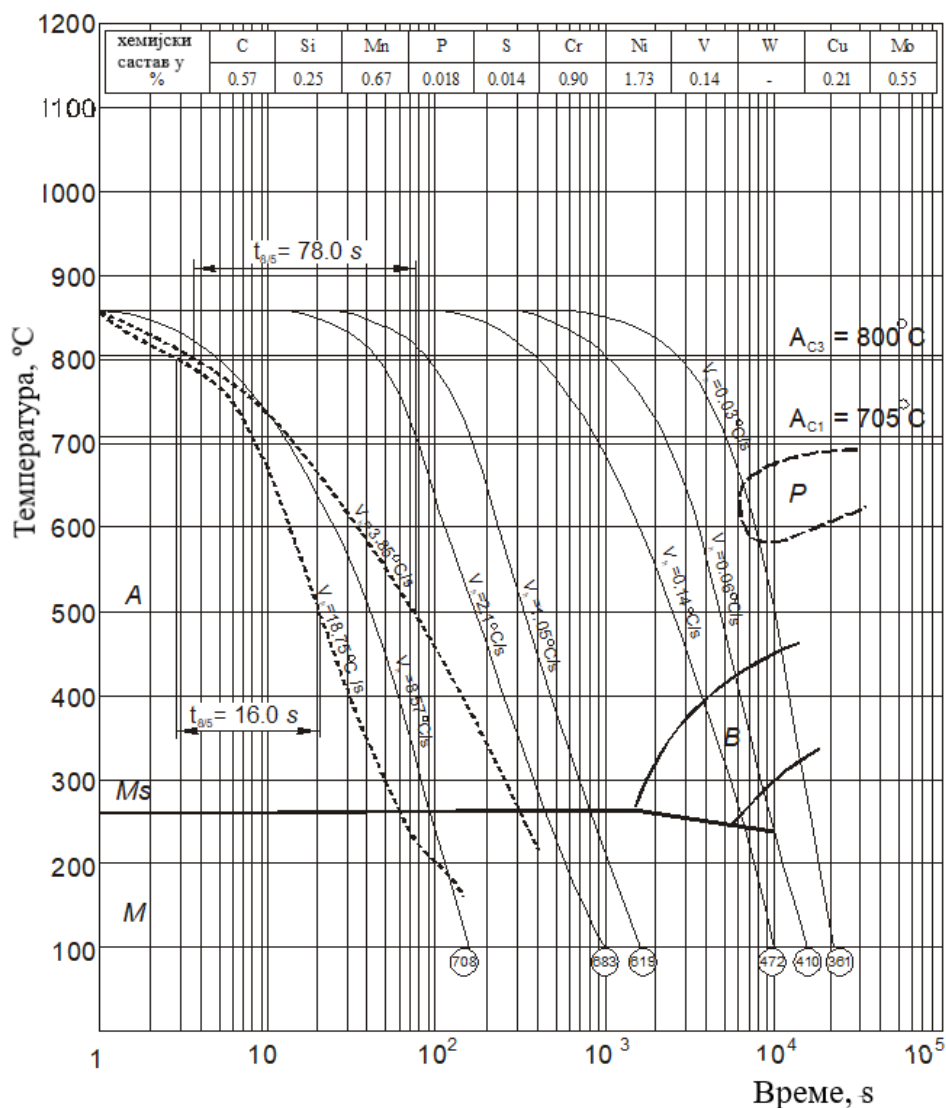
Код танких плоча ($s = 7.4 \text{ mm}$) део криве који карактерише загревање је готово увек линеаран и потребно је знатно краће време за постизање максималне температуре, док код дебљих плоча ($s = 29 \text{ mm}$) то није случај. Разлика се објашњава сложенијим начином одвођења топлоте код дебљих плоча (највише кондукцијом, а мање конвекцијом и зрачењем) и већим бројем праваца одвођења топлоте код дебљих плоча.

5.3.5 Веза између улазних параметара заваривања и излазних особина вара на основу КН – дијаграма при заваривању челика - Č5742

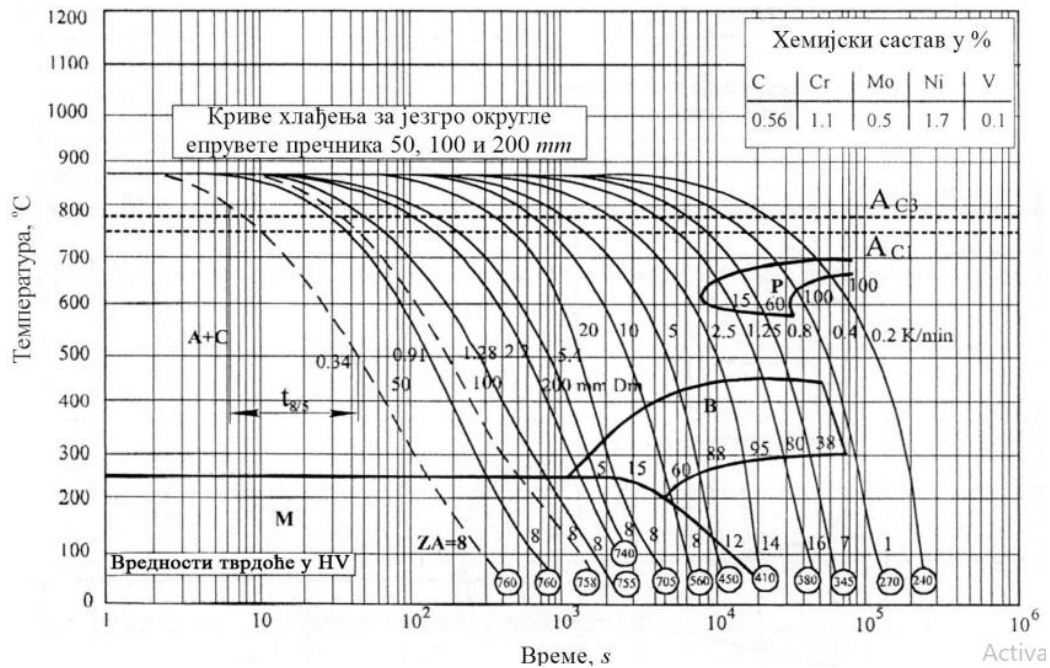
За челик Č5742 у каталозима произвођача челика односно другим литературним изворима могу се наћи одговарајући IRA и ARA дијаграми који приказују ток промене потхлађеног аустенита и дају утицај температуре и времена на ток промена. Иако су конструисани за челик тачно одређеног хемијског састава и за одређене.

Пошто је ово челик са повећаним садржајем угљеника и легиран са карбидотворним елементима (Cr, V и Mo), они изазивају раздвајање перлитног и бејнитног преображаја, проширују област стабилности аустенита и снижавају (померају на доле) температуру почетка мартензитне трансформације.

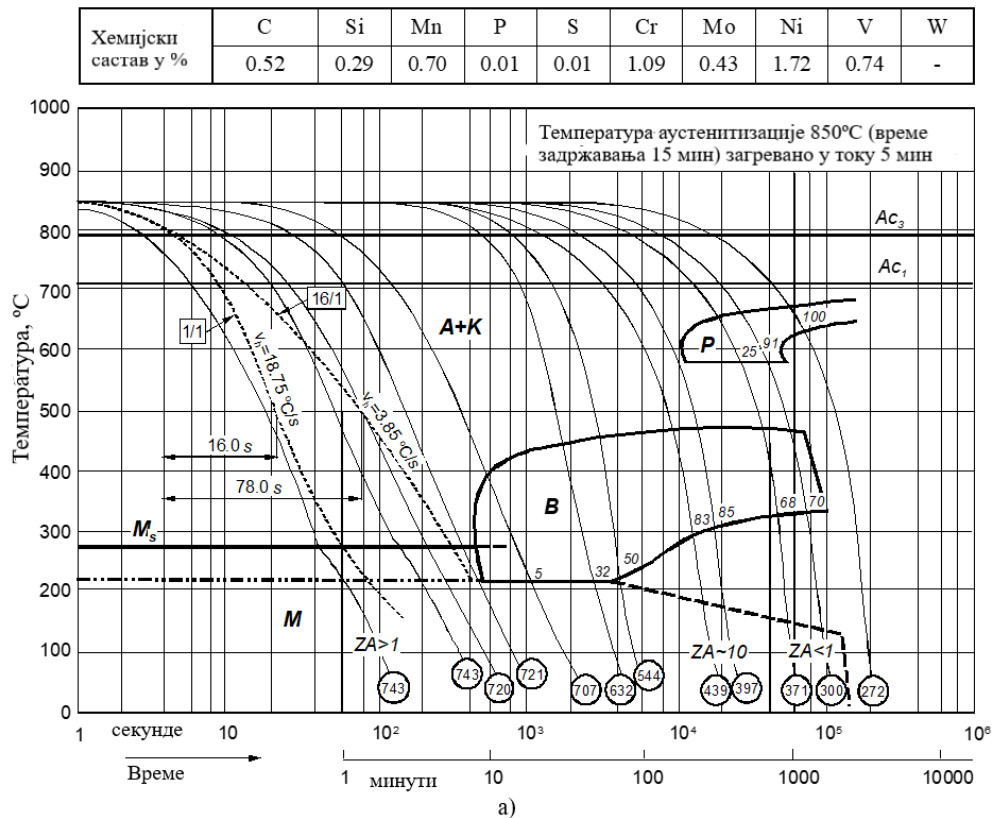
Из КН-дијаграма се могу уочити карактеристичне температуре и времена почетка и завршетка појединих фазних промена (слике 5.25, 5.26, 5.27 и 5.28).



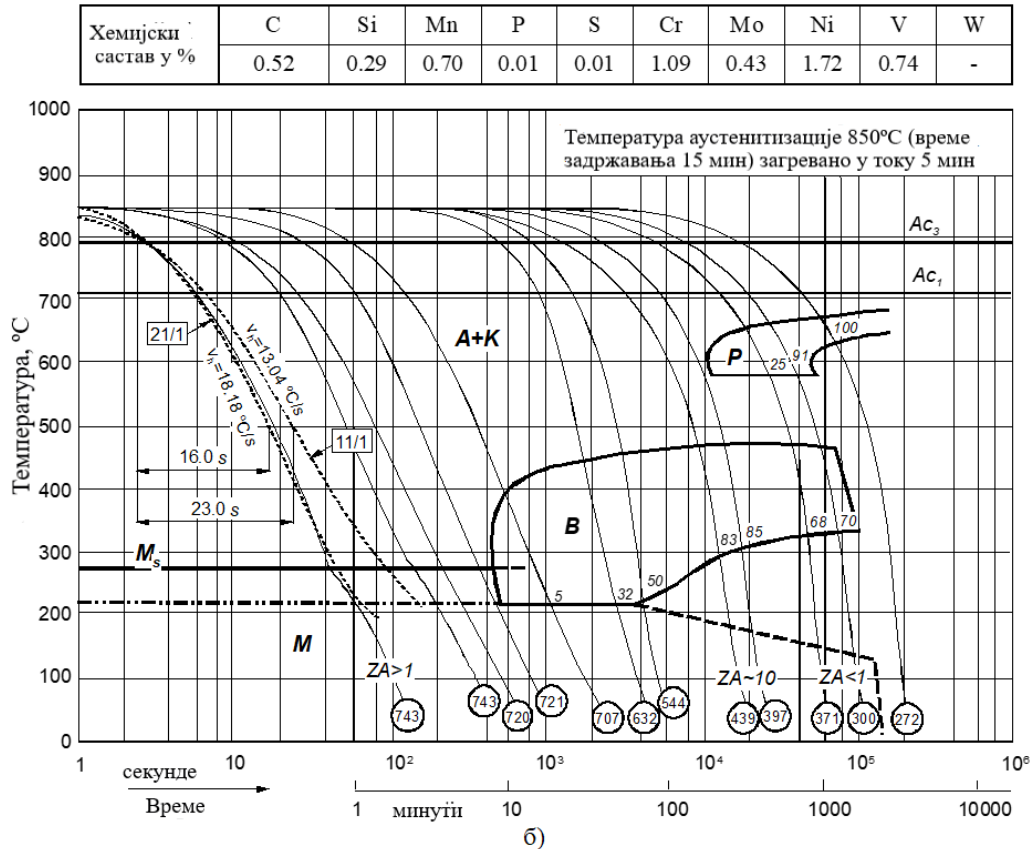
Слика 5.25 КН-дијаграм - Č5742



Слика 5.26 КН-дијаграм - челик 56NiCrMoV7



Слика 5.27 1) КН-дијаграм - челик 56NiCrMoV7



Слика 5.28 2) КН-дијаграм - челик 56NiCrMoV7

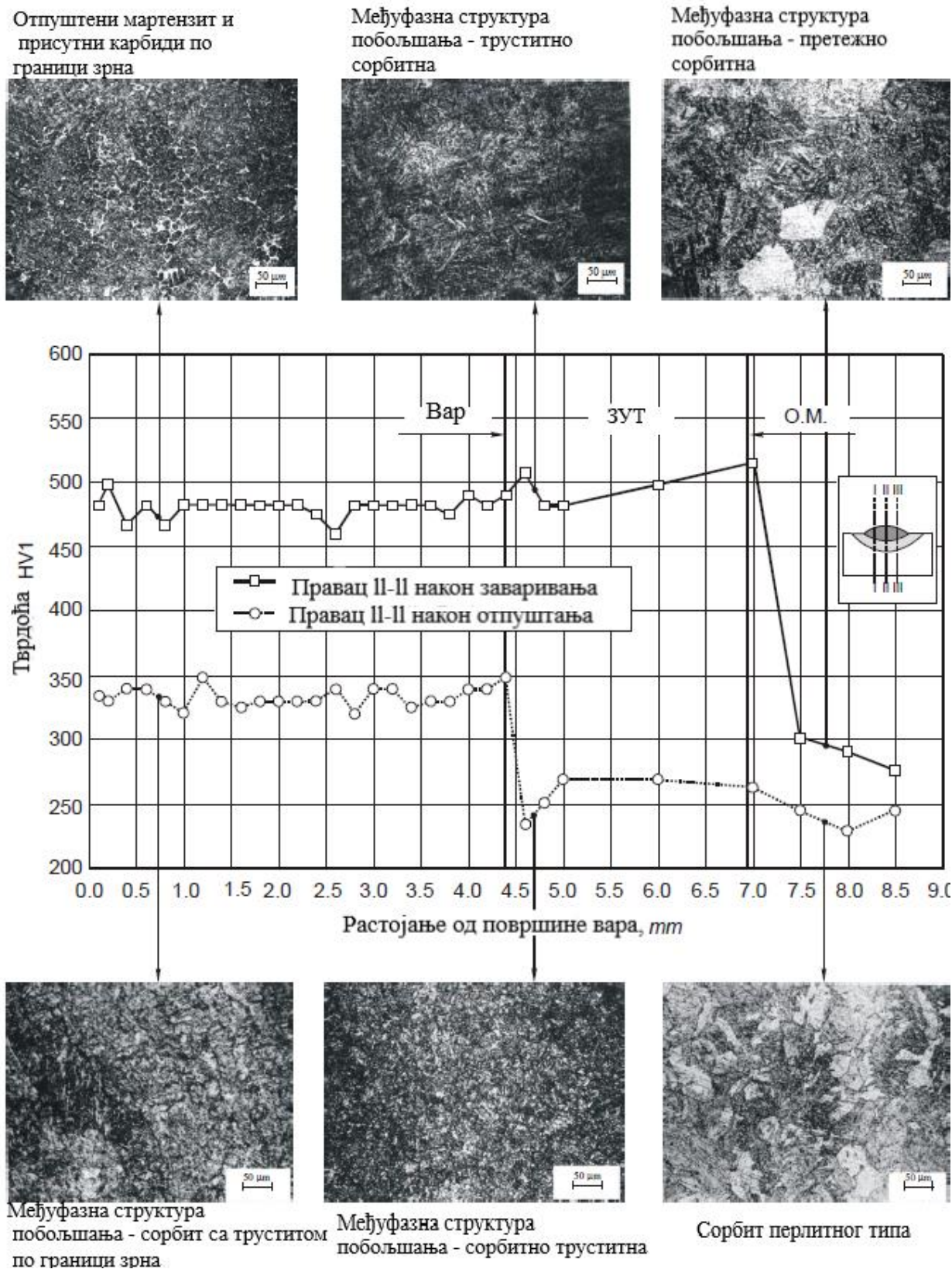
Табела 5.13 Услови аустенитизације, критичне преображајне температуре и времена и макс. тврдоћа

Литературни извор	$T_{\text{ауст.}}/t_{\text{задрж}}$ °C/min	A_{C1} , °C	A_{C3} , °C	M_s , °C	t_{100} , s	t_p , s	HV_{max}
[Железарна Равне]	860/10	713	798	275	1500	6000	708
[Atlas zur wärmebehandlung der stähle...]	880/15	740	780	250	1050	8000	760
[Thyssen Marathon Edelstahl ...]	850/5	715	785	275	500	10000	743

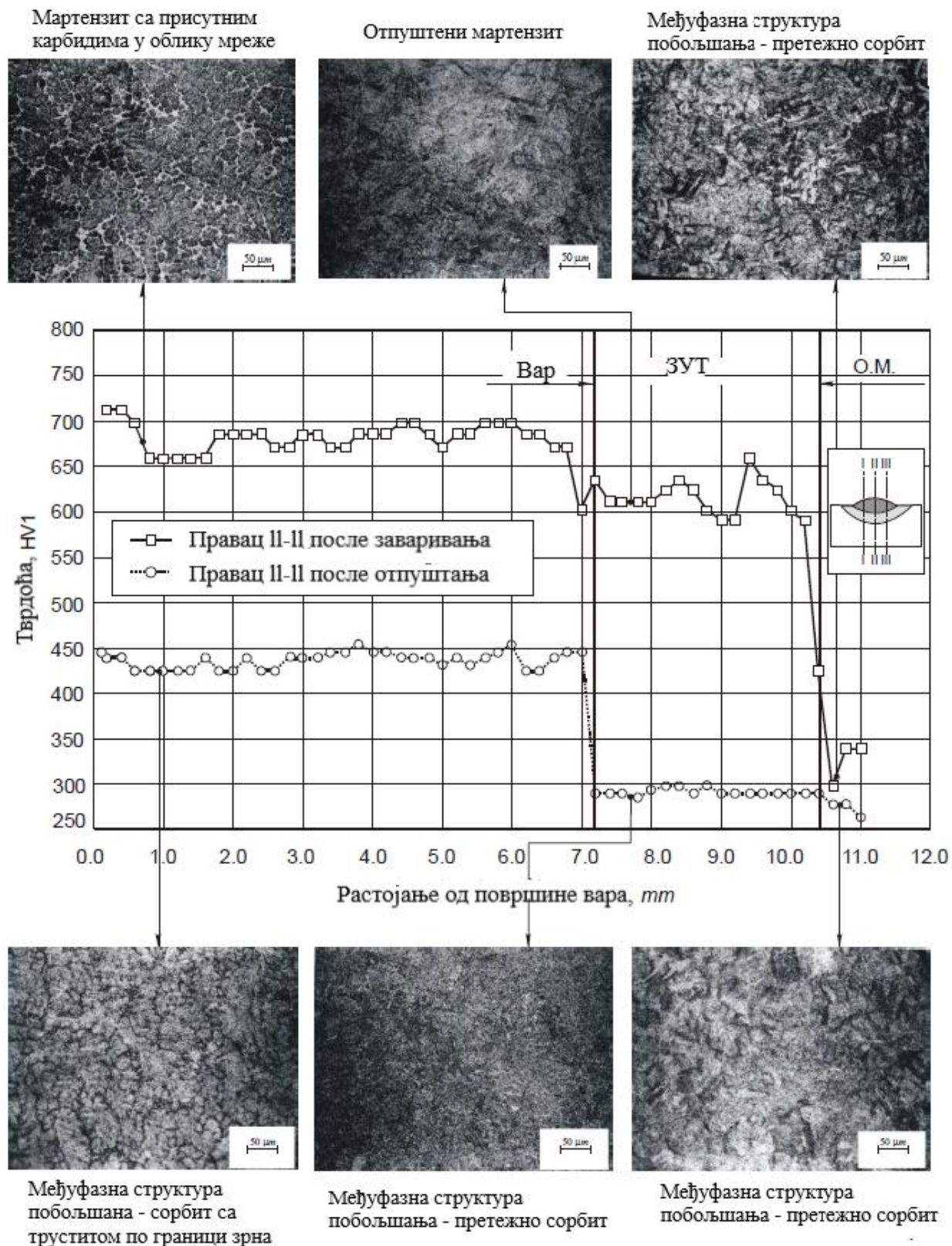
* гранично време које одговара крају чисто мартензитне структуре (за свако $t_{8/5} \leq t_{100}$)

** време које одговара почетку настанка перлитне промене.

Уношењем времена хлађења $t_{8/5}$ у КН-дијаграм за дати челик (сл. 5.26, 5.27а и 5.28б), процењује се новонастала структура и тврдоћа ЗУТ-а. На основу познатих кривих хлађења неких карактеристичних температурских циклуса упоређивали смо структуре очитане из КН-дијаграма и структуре добијене металографским испитивањима (слике 5.29 и 5.30). Са датих дијаграма као и из табеле 5.13 може се уочити да се гранично време хлађења $t_{8/5} = t_{100}$ креће од 500 до 1500s. Гранично време $t_{8/5} = t_{100}$ приближно 500s уз предгревање ($T_p = 300^\circ\text{C}$), могло би се постићи са $q_l = 60 \text{ kJ/cm}$ за $s = 7.4 \text{ mm}$, односно са $q_l = 150 \text{ kJ/cm}$ за $s = 29 \text{ mm}$. Ове вредности енергија није могуће остварити са REL поступком, што значи да се без обзира на улазне параметре заваривања (q_l и T_p) увек добија мартензитно – карбидна структура ЗУТ-а, а тврдоће између 700 HV1 и 743 HV1.



Слика 5.29 Расподела тврдоће и микроструктура појединих зона навара
(О. М. Č5742 - DM UTOP 38 - $s = 7.4$ mm)



Слика 5.30 Расподела тврдоће и микроструктура појединих зона завареног споја
(О. М. Č5742 - DM UTOP 55 - s= 29 mm)

6. Закључак

У овом раду дата су општа објашњења која су значајна за боље разумевање сложених експерименталних истраживања, као што су:

- простирање топлоте и температурско поље и температурски циклуси,
- начини одређивања температурског поља и температурских циклуса,
- експериментално одређивање температурских циклуса и
- примена трансформационих КН и КНЗ дијаграма за два одабрана термопостојана челика.

Теоријски делови служе као подлога за опис и разјашњење појединих појмова и појава који се користе у експерименталном делу рада.

Експериментално истраживање се односи на проблематику заваривања ковачких алата који су у експлоатационим условима изложени ударном оптерећењу и цикличном загревању до повишених температура. Челици који су намењени за израду ових алата треба да издрже велика ударна оптерећења, да задрже добре механичке особине на повишеним температурама, да буду отпорни на хабање и термички замор.

За ове алате се највише користе нисколегирани и високолегирани алатни челици. Експериментална испитивања су извођена на челицима Č5742 и Č4751 , а као додатни материјал су највише коришћене високолегиране базичне електроде UTOP 38 и UTOP 55 .

При избору технологије заваривања водило се рачуна о излазним особинама најважнијих зона навара које су за већину челика функција критичне брзине хлађења и времена хлађења у температурском интервалу најмање стабилности аустенита 800 до 500°C - $t_{8/5}$. При прорачуну времена хлађења доказано је да најбољу сагласност са експериментом даје формула јапанских аутора. Применом ове формуле може се довољно тачно одредити време хлађења у критичном температурском интервалу и без сложеног и скупог поступка снимања температурских циклуса.

Такође је показано да је при наваривању дебелих плоча и при наношењу већег броја слојева повољније високо отпуштање, док је при заваривању тањих плоча и при извођењу једнослојних варова повољније средње или ниско отпуштање. Одабрани режим отпуштања треба да се прилагоди делу и да се по потреби и коригује, како у погледу температуре загревања, тако и времена држања и начина хлађења.

На основу бројних експеримената (снимљених циклуса професионалним или приручним термометрима, металографских и других испитивања) закључено је следеће:

- најбољу сагласност са експерименталним испитивањима дала је тзв. формула јапанских аутора у погледу одређивања времена хлађења - $t_{8/5}$, посебно при наваривању дебелих (масивних) плоча,
- време хлађења - $t_{8/5}$ израчунато по формули јапанских аутора знатно појефтиније и скраћује време одређивања својстава ЗУТ-а навара у односу на скупа и сложена експериментална испитивања,
- на основу што тачније одређеног времена хлађења - $t_{8/5}$ може се применом трансформационих КН и КНЗ дијаграма за два одабрана термопостојана челика

поуздано проценити микроструктура и тврдоћа, као најважније особине ЗУТ-а навара и без скуких експеримената,

- без обзира на примењену технологију наваривања/заваривања, структура ЗУТ-а је увек мартензитна са укљученим карбидима по границама металних зрна, што се може лако уочити из приложених трансформационих КН (KNZ) дијаграма,
- будући да је мартензит изузетно тврда и крта фаза, неопходно је после заваривања/наваривања извести једнофазно или вишефазно високо отпуштање у циљу добијања међуфазних структура, чиме се делом отклања неповољан утицај мартензитно-карбидне структуре,
- примењена идеја у овом мастер раду провере својстава ЗУТ-а на основу времена хлађења $t_{8/5}$ може се применити и код других врста челика, под условом да је добијена велика сагласност између експерименталних резултата и предложених формула,
- треба напоменути, да поред наведених метода одређивања температурског циклуса, односно времена хлађења - $t_{8/5}$, у најновије време велику примену налазе и нумеричке методе, којима се такође може заменити или скратити скуп експеримент, који је ипак неизбежан у циљу потребне верификације одабраног нумеричког модела.

7. Литература

1. М. Јовановић, В. Лазих: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
2. В. Лазих: *Оптимизација процеса наваривања са аспекта триболошких карактеристика навара и заосталих напона*, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2000.
3. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазих: *Технологија заваривања - приручник*, друго издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
4. М. Јовановић, В. Лазих: *Наука о заваривању - рукописи предавања*, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, школска 2017-2018.
5. М. Јовановић, В. Лазих, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
6. М. Јовановић, В. Лазих: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2001-2018.
7. Р. Чукић: *Техно економска анализа производног у репаратурног заваривања и наваривања различитих делова механичких система*, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Београд, 2010.
8. В. Ђорђевић: *Машински материјали - први део*, Машински факултет у Београду, Београд, 1999.
9. Н. Комарица: *Нестационарно температурно поље и напони у еласто-пластичном подручју код тренутног деловања извора топлоте*, Зборник радова – Међународно саветовање Заваривање '94, Нови Сад, 1994., стр. 211-214.
10. В. Лазих: *Прилог прорачуну температурских поља при тачкастом заваривању*, магистарски рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1991.
11. В. Лазих, Д. Јосифовић, М. Јовановић: *Оцена тачности емпиријских израза за прорачун времена хлађења при заваривању*, Међународно саветовање - Заваривање '94, Нови Сад, 1994., стр. 59-62.
12. Р. Лучић: *Машински материјали*, Научно инжењерство, II издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.
13. V. Lazić, D. Josifović, M. Jovanović: *Validity of some formulae for calculation of cooling time during welding*, Zavarivač, 40(2), 1995., Beograd.
14. Н. Видојевић: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1973.
15. А. Мајсторовић, М. Јовановић: *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1991.
16. В. Шијачки-Жеравчић, В. Милосављевић, А. Седмак: *Приручник за машинске материјале - Заваривање, лемљење и ливење*, Машински факултет, Београд, 1996.