

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Термичка обрада метала

Број индекса: 311/2013

Милош Д. Николић

**Термичка обрада угљеничних и легираних
челика за побољшање**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Драган Адамовић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

Да основе термичке обраде челика и да на примеру једног угљеничног и једног легираног конструкционог челика за побољшање покаже утицај различитих термичких обрада (жарење, каљење, отпуштање) на промену тврдоће изабране групе материјала. На почетку објаснити фазне промене које настају у чврстом стању код челика. Затим описати употребу дијаграма изотермичког и анизотермичког хлађења при извођењу термичке обраде челика. У даљем делу рада дати преглед различитих врста термичких обрада са основним смерницама за њихово извођење и ефектима који при томе настају. Такође описати и средства и опрему за загревање и хлађење која се користе при термичкој обради, као и грешке које могу да настану при термичкој обради. Затим дати начине испитивања прокаљивости челика и одговарајуће мере заштите које се користе при термичкој обради.

У оквиру експерименталног дела рада на примерима једног угљеничног и једног конструкционог челика за побољшање показати поступак избора режима термичке обраде жарења, каљења и отпуштања, као и ефеката тих обрада на промену тврдоће изабраних материјала.

Препоручена литература:

- [1] **М. Јовановић, Д. Адамовић**, и др.: *Машински материјали*, *Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.*
- [2] **Девеџић, Б.:** *Машински материјали*, *Машински факултет у Крагујевцу, 1980.*
- [3] **Ђорђевић, В.:** *Машински материјали - први део*, *Машински факултет, Београд, 1999.*
- [4] **Ђукић, В.:** *Машински материјали*, *Крагујевац, 1994.*
- [5] **Лучић, Р.:** *Машински материјали*, *Научно инжењерство, III издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.*
- [6] **Божич, Б.:** *Физичка металургија*, *Научна књига, Београд, 1964.*
- [7] **Божич, Б.:** *Хемијска металургија звожђа и челика*, *Научна књига, Београд, 1967.*
- [8] **Schumann, H.:** *Metallographie*, *превод на српски: Н. Видојевић и др., Завод за издавање уџбеника СРС, Београд, 1965.*
- [9] **Видојевић, Н.:** *Термичка обрада метала*, *Технолошко-металуришки факултет, Београд, 1973*
- [10] **W. D. Callister:** *Materials Science and Engineering*, *John Wiley & Sons, Inc. New York*

Крагујевац, датум

ментор:

др Драган Адамовић, ред. проф.

Резиме: У раду се разматрају поступци термичке обраде метала као и њихови ефекти на промену механичких и структурних карактеристика метала. Извршена је анализа два различита типа челика за побољшање CK45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) и експерименталним путем је показан утицај различитих видова термичке обраде на њихова механичка својства (тврдоћу). У другом делу експеримента извршено је мерење прокаљивости наведених челика методом чеоног хлађења (Џомини метода). Урађен је упоредни табеларни и графички приказ добијених резултата експеримента.

Кључне речи: термичка обрада, челик, каљење, тврдоћа, прокаљивост

Abstract: An analysis of the heat treatment methods and their effects on change of mechanical and structural properties of metals is presented in this thesis. The two types of Q + T (quenching + tempering) steels CK45 (Č1531) and 41Cr4 (Č4131) were analyzed and the influence of different methods of heat treatment on their mechanical properties (hardness) was considered experimentally. The other part of experiment consisted of the hardenability measurements of the two considered steels by the front surface cooling method (the Jomini method). The comparative presentation of obtained experimental results is given in the form of tables and as graphical presentations.

Key words: Heat treatment, steel, quenching, hardness, hardenability.

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
1.1 ПОЈАМ И ЗНАЧАЈ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ	1
1.2 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ У ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ	1
1.3 МАТЕРИЈАЛИ И ТЕРМИЧКА ОБРАДА.....	2
2. ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ КОД ЧЕЛИКА	3
2.1 ДИЈАГРАМ СТАЊА Fe-Fe ₃ C И ОСНОВНЕ СТРУКТУРЕ ЧЕЛИКА	3
2.2 ФАЗЕ У БИНАРНОМ ДИЈАГРАМУ Fe – Fe ₃ C.....	5
2.3 ПРОМЕНА ПОТХЛАЂЕНОГ АУСТЕНИТА	6
2.3.1 Образовање проеутектоидних фаза	7
2.5.2 Перлитна промена	8
2.5.3 Бејнитна промена.....	9
2.5.4 Мартензитна промена.....	10
3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ	13
3.1 ДИЈАГРАМИ ИЗОТЕРМИЧКОГ РАСПАДА АУСТЕНИТА (ИРА, ТТТ)	13
3.2 ДИЈАГРАМИ КОНТИНУАЛНОГ РАСПАДА АУСТЕНИТА (АРА, КХ).....	16
4. ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ПОСТУПАКА ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ И ЊИХОВИХ КАРАКТЕРИСТИКА.....	18
4.1 ЖАРЕЊЕ	19
4.2 КАЉЕЊЕ	23
4.3 ОТПУШТАЊЕ	25
5. СРЕДСТВА И ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ И ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ	27
5.1 ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ	27
5.2 СРЕДСТВА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ	28
5.3 СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ	29
6. СОПСТВЕНИ НАПОНИ И ГРЕШКЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ.....	31
7. КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА ИЗВЕДЕНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ	34
7. 1 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА	35
7.2 ИСПИТИВАЊЕ ТВРДОЋЕ	36
7.3 ОДРЕЂИВАЊЕ ЗАТЕЗНЕ ЧВРСТОЋЕ.....	37
7.4 ОДРЕЂИВАЊЕ УДАРНЕ ЖИЛАВОСТИ ЖИЛАВОСТ ЛОМА.....	38
7.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ВЕЛИЧИНЕ АУСТЕНИТНОГ ЗРНА	39
7.6 ИСПИТИВАЊЕ ПРОКАЉИВОСТИ.....	42
7.7 ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА.....	45
7.8 ХИГИЈЕНСКО-ТЕХНИЧКА ЗАШТИТА ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ.....	48
8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	50
8.1 ЦИЉ ЕКСПЕРИМЕНТА.....	50
8.2 ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА.....	50
8.3 МАТЕРИЈАЛИ УЗОРАКА.....	51
8.3.1 ЧЕЛИК СК45 (Č1531).....	52
8.3.2 ЧЕЛИК 41Cr4 (Č4131).....	54

8.4 ОПРЕМА ЗА ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА.....	57
8.4.1 Пећи за загревање	57
8.4.2 Термометар ST-8855.....	57
8.4.3 Термовизијска камера FLIER E50	58
8.4.4 Апарат за мерење тврдоће по Викерс методи	58
8.5 ТОК И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА	59
8.5.1 Потпуно жарење	59
8.5.2 Нормализационо жарење	60
8.5.3 Изотермално жарење.....	60
8.5.4 Континуално каљење	61
8.5.5 Каљење у два расхладна средства.....	61
8.5.6 Ниско отпуштање	62
8.5.7 Средње отпуштање	62
8.5.8 Високо отпуштање.....	63
8.5 РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТА	64
8.5.1 Мерење прокаљивости Џомини методом.....	78
9. ЗАКЉУЧАК	82
Литература.....	83

1. УВОД

1.1 ПОЈАМ И ЗНАЧАЈ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

Захваљујући својим веома погодним механичким и физичким особинама метал и легуре представљају основне техничке материјале. Те особине су пре свих: добра својства отпорности, својства пластичности, добра својства електричне и топлотне проводљивости итд. Како стални развој науке, технологије и технике захтева и развој материјала при чему се то најчешће односи на побољшање својстава отпорности (затезна јачина, граница течења, тврдоћа, жилавост итд.). С обзиром да карактеристике материјала зависе од његовог хемијског састава, структуре, стања површине то је кроз промену тих утицајних параметара могуће утицати на особине материјала.

Постоји више начина за промену особина метала и легура. Тако се нпр. јачина (чврстоћа) и тврдоћа могу повећати: обликовањем на хладно, легирањем, смањењем величине зрна и фазним трансформацијама (основ термичке обраде).

Термичком обрадом се могу знатно побољшати механичке особине као што су граница течења, затезна јачина, динамичка чврстоћа према чијим вредностима се и димензионишу машински елементи и машинске и металне конструкције. Што су поменуте карактеристике веће то ће бити потребно користити мање пресеке услед чега ће се смањити цена и тежина конструкције што је даље важно нпр. у случају заварених конструкција јер ће и потрошња додатног материјала при заваривању бити мања.

Термичка обрада је заступљена у готово свим технолошким процесима везаним за машинство. Тако се нпр. милиони тона челика у виду лимова, плоча, шина, цеви, жица, профила, полуфабриката и готових машинских делова подвргавају термичкој обради. Нарочито се значај термичке обраде огледа у обради алата чији квалитет директно утиче на његову постојаност.

Термичка обрада примену налази и у побољшању особина ливених гвожђа, челичних ливова и заварених конструкција као и у побољшању особина обојених метала као што су алуминијум, бакар, никл итд.

1.2 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ У ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

У основи, термичка обрада претставља технолошки процес који се састоји из загревања метала до одређене температуре, задржавања на тој температури и хлађења до собне температуре (слика 1.1). Понекад се у циљу трансформације заосталог аустенита, наставља са хлађењем испод 0°C, део се задржава на ниској температури ("замрзава") и поново загрева до собне температуре. (слика 1.2).

Из дефиниције термичке обраде проистиче да су температура и време основни фактори који одређују термичку обраду. Режим термичке обраде дефинисан је следећим параметрима: максималном температуром до које се легура загрева, временом држања на датој температури, брзином загревања и брзином хлађења, при чему полазна структура има битног утицаја на избор наведених параметара. Режим загревања може бити представљен кривом загревања која почиње од собне

температуре, а завршава се постизањем захтеване температуре на предмету који се обрађује.



Слика 1.1. Ток извођења процеса термичке обраде



Слика 1.2. Ток термичке обраде са хлађењем испод 0°C

Операција држања на температури термичке обраде омогућава да се потпуно обаве структурне промене у предмету обраде, а дефинише се температуром и временом држања. Режим хлађења се одређује температуром почетка хлађења, временом и брзином хлађења, интензитетом хлађења, зависно од средства за хлађење.

Термичка обрада може да буде и сложена, брзина загревања може да се мења у зависности од температурног интервала, задржавање може да се изводи на 2-3 температура, при чему може да варира и брзина хлађења у појединим температурним областима [1].

1.3 МАТЕРИЈАЛИ И ТЕРМИЧКА ОБРАДА

Како је процес термичке обраде директно везан за материјал и његово стање и структуру није тешко повезати ова два термина у једну међусобно зависну целину. Пре почетка термичке обраде потребно је познавати све карактеристике материјала као што су: хемијски састав, структура, механичке и физичко-хемијске карактеристике, геометрију и намену комада (дела) итд. На основу тих параметара се прописују режими термичке обраде који треба да обезбеде побољшање особина третираног материјала. У појединим случајевима термичка обрада обухвата релативно једноставне поступке отпуштања или жарења у циљу смањења напона у материјалу који у току експлоатације могу довести до концентрације напона и појаве прелина. С друге стране, значај термичке обраде за материјале је веома изражен. Термичком обрадом се могу побољшати особине материјала и тако продужити њихов век трајања, степен сигурности, смањити масу конструкције итд. Такође, данас термичка обрада представља готово незаобилазан процес у преради челика и обради готових комада. Из свега горе изложеног може се закључити да су материјали и термичка обрада веома уско повезани.

2. ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ КОД ЧЕЛИКА

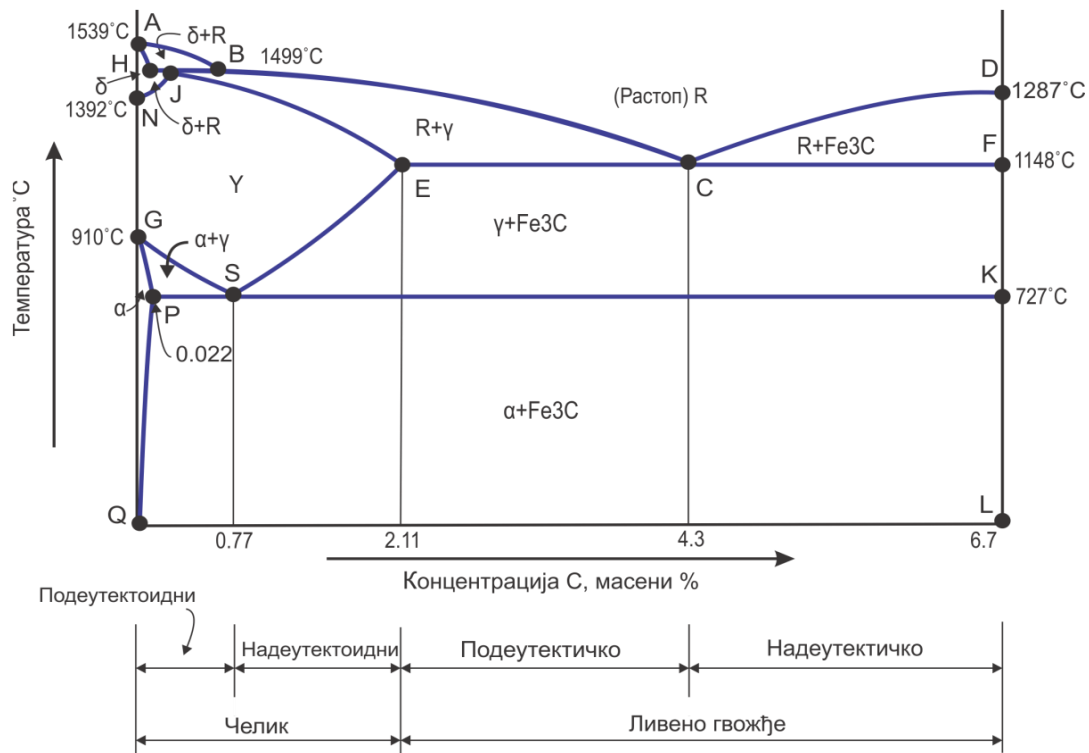
У овом поглављу биће речи о фазним променама у чврстом стању код челика, фаза које притом настају као и о распаду потхлађеног аустенита. При хлађењу легуре гвожђа и угљеника (челика) из растопа почињу да се издвајају кристали очврслог метала. Тај тренутак почетка очвршћавања се везује за слободну енергију растопа која је испод ¹солидус линије мања него изнад ње. Због тога метал тежи да пређе у чврсто стање. Даљим хлађењем количина очврслог метала расте све до тренутка достизања температуре која лежи на ликвидус линији односно када је целокупна легура постала чврста. При даљем хлађењу, после очвршћавања, већина метала и легура подлеже даљим променама, којима се могу битно мењати њихове особине. За разлику од кристализације, која се увек одвија на високим температурама при којима је брзина дифузије веома велика, фазне промене у чврстом стању могу се одвијати како при вишим тако и нижим температурама на којима је дифузија знатно тежа. На основу тога да ли промене настају трансфером масе или не, фазне промене могу бити: дифузионе и бездифузионе. Дифузионе промене јако зависе од температуре. После појаве клице, ка њој дифундују атоми што доводи до раста клица и померања (ширења) њених граница. Промена се дакле одвија појавом заметка (нуклеуса) и његовим даљим растом. Супротно томе, при довољно брзом хлађењу, на температурама испод 200°C кад је већ елиминисана дифузија, могуће су само бездифузионе промене, које се дешавају тзв. механизмом клизања. При тој промени долази до правилног и групног престројавања атома, при чему релативно померање суседних атома не прелази међуатомско растојање. Да би се догодила фазна промена у чврстом стању, морају најпре бити створени термодинамички услови, који се заснивају на истим принципима као при кристализацији, узимајући у обзир и отпор околне средине који је знатно већи код чврстих него течних материја [1].

2.1 ДИЈАГРАМ СТАЊА Fe-Fe₃C И ОСНОВНЕ СТРУКТУРЕ ЧЕЛИКА

Дијаграм гвожђе-угљеник (сл.2.1) представља равнотежни дијаграм метастабилног система (привремено задржаног); врста је бинарног (двојног) система. При садржају 6.67 масених % C (25 атомских %) угљеник са гвожђем образује интерстицијално хемијско једињење Fe₃C - цементит. Пошто се при реакцијама у метастабилном систему цементит не мења, може се сматрати као компонента и дијаграм означавати као дијаграм Fe-Fe₃C. За техничку праксу од значаја је готово цео опсег концентрације угљеника (0 до 6.7%). Легуре са садржајем угљеника до 2.11% C називају се челици; еутектоидна концентрација (0.77% C) дели челике на подеутектоидне (до 0.77% C) и надеутектоидне (0.77 до 2.11% C). Легура са садржајем

¹ **Солидус линија** је вишеструко изломљена линија на дијаграму метастабилног система Fe-Fe₃C која раздваја тестасто стање од легуре у чврстом стању. Између ликвидус и солидус линије челик је у тестастом стању.

0.77% C је еутектоидни челик. Легуре са $C > 2.11\%$ зову се сиво ливено гвожђе и бело ливено гвожђе (ознака према изгледу површине прелома), а еутектичка концентрација (4.3% C) их дели на подеутектичке (2.11 - 4.3% C) и надеутектичке (4.3 - 6.7% C); легура са садржајем угљеника 4.30% је еутектичка легура.



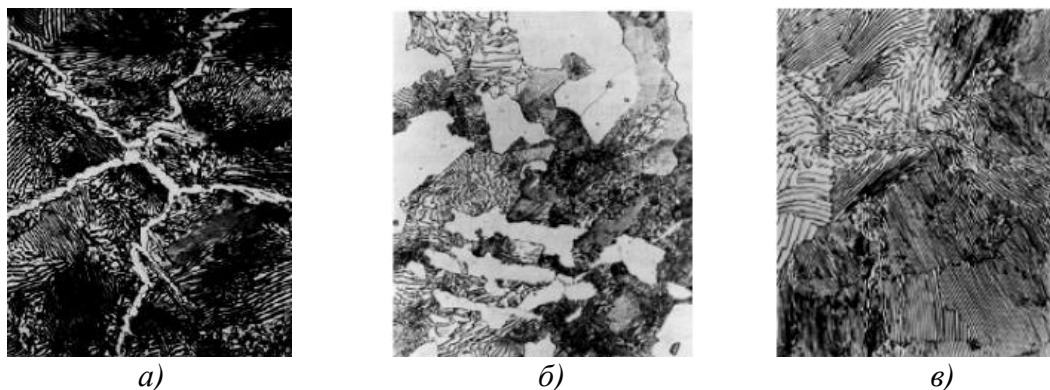
Слика 2.1. дијаграм метастабилног система Fe-Fe₃C

Ликвидус линија ABCD је вишеструко изломљена линија која представља границу између челика у течном стању и мешавине растопљеног челика и већ очврслог материјала.

Солидус линија AHJECF је вишеструко изломљена линија која раздваја течасто стање легуре од чврстог стања. Између ликвидус и солидус линије челик је у течастом стању.

Солвус линије PQ и SE представљају границе растворљивости угљеника у гвожђу, тако да се снижавањем температуре испод дате границе растворљивост угљеника смањује и угљеник се из чврстог раствора излучује у облику цемента.

Еутектоидна линија PSK је позната и као AC₁ чија је температура 727 °C. То је линија која представља границу испод које аустенитна фаза у легури не постоји. У пракси се ова линија назива и линија аустенизације [1, 2].



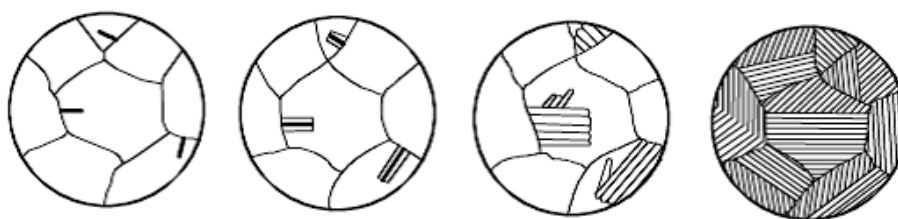
Слика 2.2. а) Микроструктура подеутектоидног, б) еутектоидног, и в) надеутектоидног челика

2.2 ФАЗЕ У БИНАРНОМ ДИЈАГРАМУ Fe – Fe₃C

Основне структуре челика се могу поделити на: перлит, бејнит и мартензит. Поред њих јављају се и сорбит, трустит, карбиди (основни карбид гвожђа – цементит као и легирани карбиди) итд.

Ферит представља интерстицијски чврст раствор угљеника у α – гвожђу. Највећа растворљивост угљеника у фериту је 0.022% при температури 727°C; са опадањем температуре смањује се на занемарљивих 0.008% при 20°C. Ферит има тврдоћу око 80 НВ, јачину 250 МПа и релативно издужење око 50%. Из дијаграма Fe-Fe₃C произилази да су нискотемпературске фазе угљеничних челика ферит и цементит. Пошто се на собној температури у α - гвожђу раствара само 0.008% C, то се ферит може сматрати технички чистим гвожђем. Ако се занемаре примесе (Si < 0.6%, Mn < 0.8%) и нечистоће (P, S < 0.06%) угљенични челици су у ствари хомогена смеша гвожђа и цементита.

Перлит представља структуру челика (88% ферита и 12% цементита) добијену при потхлађивању аустенита на константној температури од 727°C у условима који су блиски равнотежним. Структура се састоји од густо пакованих ламела (плочица) ферита и цементита.



Слика 2.3. Схема трансформације аустенита у перлит код еутектоидног челика из једног зрна

Настајање ове структуре прати присуство потпуне дифузије односно у великој мери су присутна и интерстицијска и супституцијска дифузија. При овом преображају, с обзиром да су услови готово равнотежни, угљеник може слободно да се креће у кристалним решеткама, као и да се атоми у решетки супституцијски заменују са атомима примеса. Дифузија је присутна услед високе температуре трансформације јер је топлота главни њен покретач. Чисто перлитна структура се може добити једино

код еутектоидних челика (0.77% C) и у неким посебним условима потхлађивања када је принудно омогућено да се аустенит трансформише у перлит и при саставу различитом од еутектоидног. У случајевима подеутектоидних челика ($< 0.77\% \text{ C}$) поред перлита у структури ће бити присутан и ферит који се није трансформисао а који је настао у појасу хлађења од GS линије до еутектоидне линије PSK. Такав ферит се назива проеутектоидни ферит да би се разликовао од ферита садржаног у структури перлита. Тада укупну структуру чине ферит + перлит. У случају надеутектоидних челика ($> 0.77\% \text{ C}$) уместо проеутектоидног ферита појављује се секундарни цементит који настаје у појасу хлађења између линија SE и PSK. У случају ових челика структура је сачињена од секундарног цементита и перлита.

Цементит представља интерстицијско хемијско једињење сачињено од 3 атома гвожђа и 1 атом угљеника. Садржај угљеника у легури Fe-C може бити већи него што одговара граничној растворљивости за дату температуру у гвожђу α или γ ; тај вишак гради са гвожђем интерстицијско хемијско једињење - карбид гвожђа Fe_3C , или се излучује као графит. Карбид гвожђа Fe_3C (цементит) и садржи 6.7% (масених %) угљеника и кристалише се по орторомбној решетки ($a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$). Цементит нема алотропске промене али и није стабилна фаза; при ниским температурама слабо је феромагнетичан, изнад 210°C ²парамагнетичан. Његова температура топљења је око 1287°C , специфична маса 7.82, тврдоћа 800 до 1000 HBS. У решетки цементита могу бити атоми угљеника замењени и атомима других елемената, нпр. азота (настају карбонитриди). Заменом атома гвожђа у решетки цементита нпр. атомима Cr, Mo, W, Mn настају легирани карбиди (нпр. Fe, Mn_3C и тсл.).

2.3 ПРОМЕНА ПОТХЛАЂЕНОГ АУСТЕНИТА

Аустенит је структурна фаза која се одликује средњом концентрацијом угљеника у облику чврстог раствора од 0.77% угљеника, настаје разлагањем перлита, односно дифузионим премештањем атома угљеника у γ -гвожђу.

Разлагање аустенита догађа се само на температурама нижим од 727°C (критична тачка A_{r1}), за описивање кинетичке трансформације потхлађеног аустенита користе се експериментално добијени дијаграми време-температура-степен разлагања, или дијаграми изотермалне трансформације потхлађеног аустенита, тј. разлагања аустенита при константној температури.

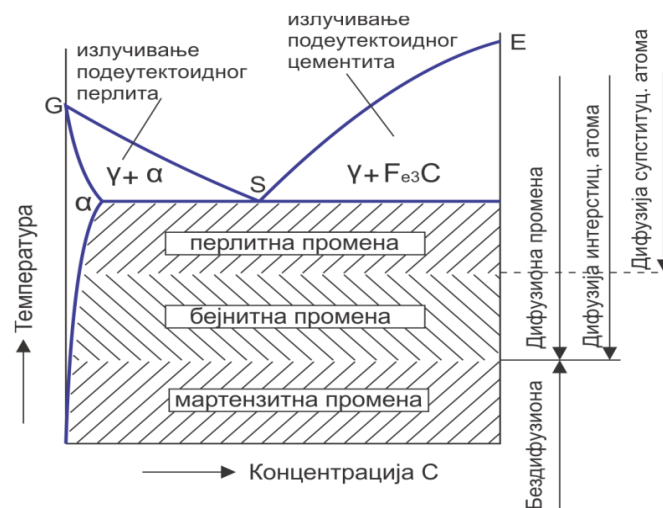
Суштина распада аустенита у равнотежним условима везана је за полиморфну промену аустенита у ферит што доводи до снижавања концентрације угљеника у чврстом раствору и образовања цементита. Промена површински центриране решетке γ у просторно центрирану решетку α остварује се с једне стране дифузијом атома гвожђа а с друге стране дифузијом атома угљеника. Обе врсте дифузије (супституцијска и интерстицијска) зависе од температуре распада аустенита. У условима блиским равнотежним (то значи при малом потхлађењу) одвијаће се реакције како дифузијом гвожђа тако и дифузијом угљеника. Нпр. аустенит са еутектоидном концентрацијом се у описаним условима распада у смешу ферита и цементита тј. у

² **Парамагнетични** материјали који имају малу позитивну подложност магнетног поља. Ови материјали су благо привлачни магнетном пољу и не задржавају магнетне особине када се уклони спољашње поље.

перлит. Може се констатовати да је перлитна промена условљена дифузијом гвожђа и угљеника [1].

При већем потхлађењу аустенита до температуре при којој брзина дифузије гвожђа и супституцијски растворених примеса опада до занемарујућих вредности, остаје могућност дифузије атома растворених интерстицијски (пре свега угљеника), настаје бејнитна промена. Продукт распада аустенита у оваквим условима је бејнит – неравнотежна смеша плочастих кристала прехлађеног чврстог раствора α и ситних карбидних честица. При знатном потхлађивању аустенита, када су обе врсте дифузије онемогућене, долази до бездифузионе мартензитне промене. Продукт овакве промене аустенита јесте неравнотежни чврст раствор угљеника у α – гвожђу – тетрагонални мартензит.

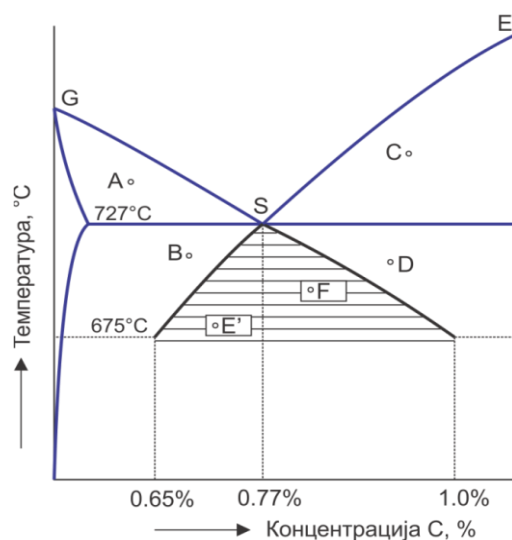
Код подеутектоидних или надеутектоидних челика промене аустенита, при спором хлађењу, почињу излучивањем ферита односно секундарног цементита. Те се промене означавају као проеутектоидне и имају велики утицај на структуру и особине челика и на промене преосталог аустенита.



Слика 2.4. Област главних промена потхлађеног аустенита

2.3.1 Образување проеутектоидних фаза

Проеутектоидни ферит или секундарни цементит настају онда када састав челика није еутектоидни односно када долази до пресићења матичне фазе феритом или цементитом. Нпр. проеутектоидни ферит може настати онда када састав и температура аустенита одговарају тачкама у равнотежном дијаграму гвожђе-угљеник, које леже испод криве GS (нпр. тачка А, сл. 2.5) и у неравнотежним условима изнад продужетка криве SE (нпр. тачка В). Слично ће се и у надеутектоидном челику излучивати проеутектоидни цементит, буду ли састав и температура аустенита дати тачком која лежи испод криве SE, али и изнад продужетка криве GS (нпр. тачка С за равнотежне и D за неравнотежне услове). Ако би разматрана тачка лежала испод обеју кривих (нпр. тачке E', F), био би аустенит пресићен како феритом (тј. гвожђем) тако и цементитом (тј. угљеником). У таквим би се условима из аустенита излучивали истовремено ферит и цементит – одвијао би се онда еутектоидни распад потхлађеног аустенита и без проеутектоидних реакција. Тако настаје перлит другачијег састава од еутектоидног ($\neq 0.77\% C$) тзв. квази - еутектоид.



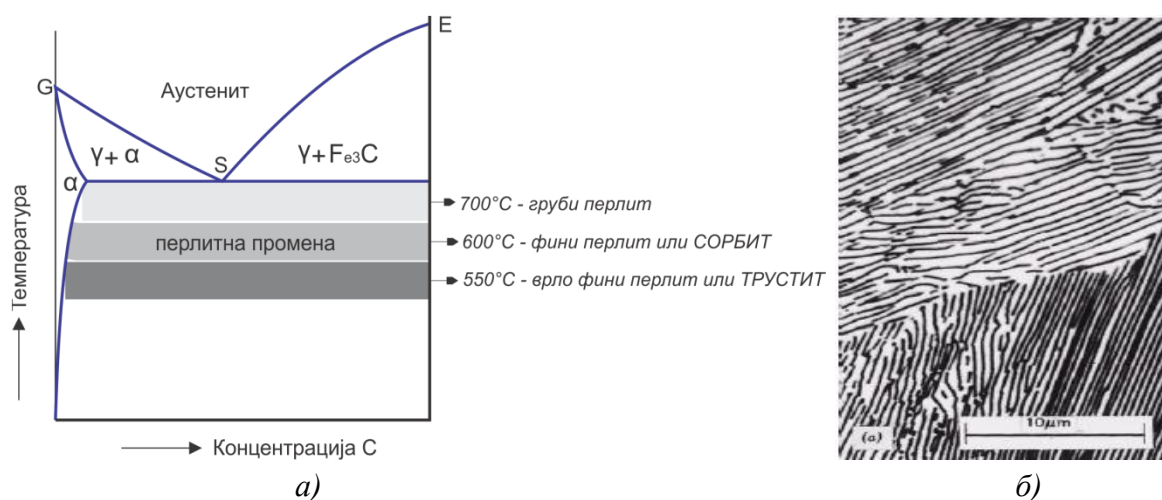
Слика 2.5. Област стабилне и метастабилне везе Fe – Fe₃C

Промена преосталог аустенита у перлит на еутектоидној температури се одвија без утицаја на већ настали проеутектоидни ферит и цементит. Проеутектоидне фазе без изузетака настају на границама аустенитних зрна и при даљем потхлађењу расту и дебљају. При великим потхлађењима долази до престанка задебљања мрежасте фазе и почиње да се формира *Видмаништенова* структура (игличаста) карактеристична за веће брзине хлађења и може се срести у зони утицаја топлоте код заварених спојева.

2.5.2 Перлитна промена

У равнотежним условима, из аустенита који садржи 0.77% C издваја се (при константној температури, 727°C) смеша ферита (~88%) и цементита (~12%), која се назива еутектоидни перлит. При већим брзинама хлађења перлит настаје из аустенита и испод 727°C све док је термодинамички могуће да се из γ – фазе излуче истовремено ферит и цементит. За то је поробна довољно висока температура за дифузију угљеника, као и дифузију гвожђа и супституцијски растворених атома примеса. Температуру и хемијски састав почетног аустенита, који се може трансформисати у перлит даје област метастабилне равнотеже три фазе (аустенита, ферита и цементита) омеђена продуженим кривама GS и ES испод еутектоидне линије (слика 2.6;а). У овим условим концентрације угљеника и температуре распада аустенита може настати перлитна структура како код подеутектоидних тако и код надеутектоидних челика блиских еутектоидном саставу.

Пошто је перлит састављен од честица (обично ламела) двају фаза, при образовању перлита мора се појавити клица како ферита тако и цементита. За услове потхлађивања кад се из аустенита не излучују проеутектоидне фазе већ се аустенит трансформише директно у перлит, појавиће се као активна клица она фаза која би се и иначе излучила из аустенита у равнотежном дијаграму. Нпр. у аустениту, чији састав и температуру одређују тачке које леже у шрафираној области ближе продужетку криве SE (слика 2.6;а), активни заматак биће ферит, при температурама и саставима аустенита блиским продужеку криве GS то ће бити цементит.



Слика 2.6. а) Перлитна промена; б) Микроструктура перлита

Перлитне колоније (зрна) су дакле састављене од двају врста честица које се при расту међусобно допоњују. Према овом моделу довољне су за појаву колоније само две клице: једна феритна, друга цементитна. Обе клице израстају на почетку перлитне промене одвојено, као компактна зрна а у току раста се разграђавају.

Брзина перлитне промене је, слично као и брзина било које друге дифузне промене, дата брзином нуклеације и брзином раста. Нуклеација перлита је типичан пример хетерогене нуклеације, клице се образују искључиво на границама аустенитних зрна. При малом потхлађењу брзина нуклеације је мала (ствара се мали број клица у јединици времена и запремине), а са порастом потхлађивања се повећава. У околини температуре 550°C настаје веома ситан перлит који се некада означавао као трустит. Уситњавањем перлитних зрна долази до пораста не само тврдоће, напона течења и јачине челика, већ и својстава пластичности и жилавости. Разлог томе је што је код финијих зрна већа повезаност дуктилног ферита и кртог цементита.

На перлитну промену утичу такође и легирајући елементи и примесе у челику. Сви додати елементи изузев кобалта и алуминијума успоравају ток перлитне промене тиме што смањују како брзину нуклеације тако и брзину раста. Релативно једноставна перлитна промена код угљеничних челика се знатно компликује код легираних челика, нарочито ако је челик легиран карбидотворним елементима (Cr, V, Mo, W) и ако је потхлађење аустенита мало [1].

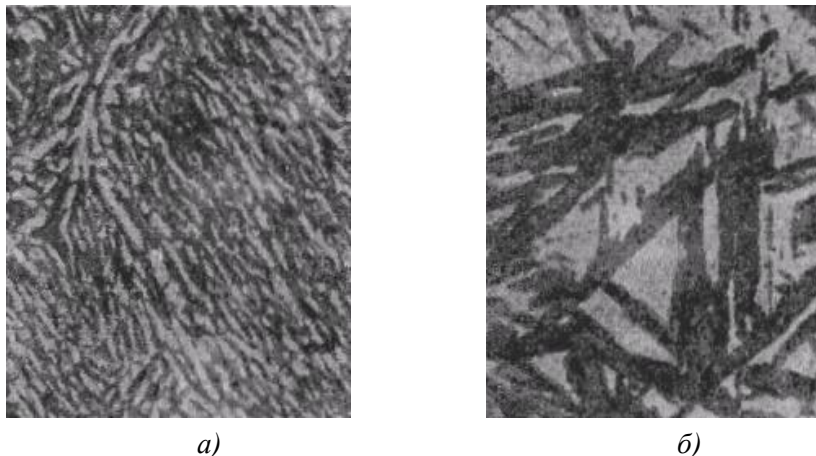
2.5.3 Бејнитна промена

Бејнитна промена настаје на нижим температурама од перлитне, тачније у појасу температура од 550°C до M_s ($\approx 200^\circ\text{C}$) температуре. Код ове трансформације супституцијска дифузија је онемогућена. Структура се састоји из пресићеног ферита и игличастог цементита насталих услед појаве зона обогаћених и осиромашених угљеником.

Бејнит представља продукт изотермичког преображаја потхлађеног аустенита на некој температури у области од $\approx 550^\circ\text{C}$ до тачке M_s ($\approx 200^\circ\text{C}$) је прелазна структурна компонента. Бејнитна промена се остварује при температури на којој престаје дифузија супституцијски растворених елемената, а остаје само интерстицијска дифузија. То значи да угљеник дифундује из потхлађеног аустенита чиме се стварају зоне које су осиромашене или обогаћене угљеником. Такве зоне трансформишу се у

пресићен ферит и игличасти цементит који заједно чине бејнит. С обзиром да структура бејнита зависи од температуре трансформације бејнит се може поделити на горњи и доњи бејнит.

Горњи бејнит код подеутектоидних челика настаје у појасу температура од $550 \div 350^{\circ}\text{C}$ и састоји се од ламела пресићеног ферита (бејнитни ферит) и њима паралелних ламела цементита. Најпре се образује клица бејнитног ферита расте бочно и чеоно док се истовремено таложе цементитне честице не само на боковима већ и у самим ламелама.



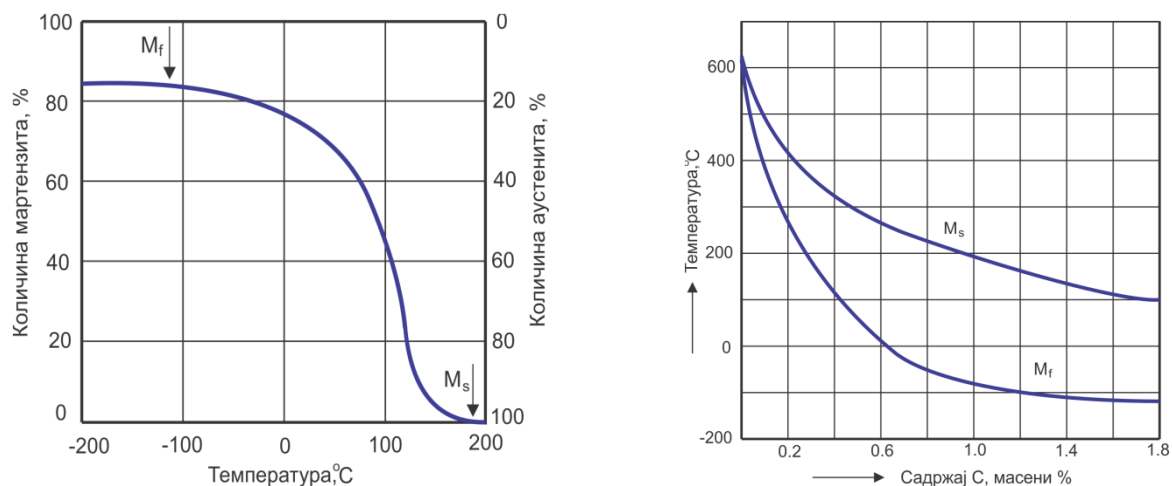
Слика 2.7. Микроструктура бејнита: а) горњи бејнит $\times 5000$; б) доњи бејнит $\times 500$

Доњи бејнит настаје почев од температуре 350°C па до температуре почетка настајања мартензита. Структура му је слична мартензиту. Карбидне честице су смештене унутар бејнитних зрна под углом од $55-60^{\circ}$ у односу на подужну осу ламела ферита. За разлику од перлитне бејнитна промена се не одиграва до краја већ увек остаје одређени проценат непреображеног аустенита. Бејнит се одликује повећаном тврдоћом и јачином у односу на перлит али му је жилавост нешто нижа.

2.5.4 Мартензитна промена

Ова врста промене назива се бездифузиона јер се одвија на температури испод 216°C , где дифузија еутектоидног челика престаје. Мартензитна трансформација настаје када брзина хлађења стабилног аустенита достигне вредност критичне брзине, тако да се аустенит без претходног ослобађања угљеника трансформише у презасићен α -чврсти раствор. Структура челика који се добија при условима критичне брзине хлађења назива се мартензит. Мартензит је једнофазна структура и представља презасићен чврсти раствор угљеника и других легирајућих елемената у α -Fe. Настаје као резултат бездифузионе трансформације аустенита и зависи само од температуре, а не и од времена трајања процеса. Атоми угљеника растворени у КПЦ решетке аустенита, после врло брзог хлађења, остају присилно растворени у решетки α -Fe, несиметрично је проширују и преводе у нову тетрагоналну запремински центрирану решетку (ТЗЦ). Мартензитна трансформација настаје на температури M_s а завршава се на температури M_f .

Мартензитна промена доводи до веома високе тврдоће челика. После хлађења испод температуре M_s део аустенита се не трансформише и остаје задржан као тзв. заостали мартензит.



Слика 2.8. Кинетичка крива мартензитне промене и утицај садржаја угљеника раствореног у аустениту на температуре M_s и M_f

Трансформација аустенита у мартензит повезана је са повећањем запремине (промена запремине може прећи и 5%). Мартензитни агрегат, због своје веће специфичне запремине, у односу на заостали аустенит ствара заостало напонско поље. Треба ли даље запремине аустенита трансформисати у мартензит, морају такође и оне да повећају своју почетну запремину чиме се у међуфазним зонама и даље повећава напон. Повећана еластична деформација делује својим енергетским ефектом против даље трансформације, те се распад аустенита зауставља и део аустенита остаје непромењен као заостали аустенит. На величину температура M_s и M_f , па и температурски интервал у коме се одвија мартензитна промена, највише утиче количина угљеника раствореног у аустениту (никако укупна количина угљеника у легури); мањи утицај имају остали легирајући елементи. Сви елементи растворени у аустениту, осим алуминијума и кобалта, снижавају температуру M_s . Ток промене температура M_s и M_f угљеничних челика у зависности од садржаја угљеника у аустениту дат је на слици (2.8). Са слике се запажа да при садржају око 0.6% С температура M_f одговара тачки умрежавања, а за све више садржаје угљеника у аустениту M_f је испод те тачке. Тај ток истовремено показује да је челике са вишим садржајем угљеника (надеутектоидне) потребно калити са температуре која је незнатно изнад A_1 . Каљењем са виших температура, аустенит раствара више угљеника, па после каљења у структури остаје задржана већа количина заосталог аустенита.

Заостали аустенит је, нарочито код алатних челика, непожељна структурна компонента. Код челика са порастом количине заосталог аустенита опада тврдоћа а као последица распада заосталог аустенита при радним или случајно повишеним температурама долази до промене димензија делова. Удео заосталог аустенита може се снижити тако што се каљење у кади (20°C) допуњује додатним хлађењем на температури испод M_f . Овакво каљење тзв. замрзавање се изводи пре свега код неких алатних челика. Најчешћи начин снижења удела заосталог аустенита у мартензит или његово одстрањивање ипак је отпуштање [1,2].



Слика 2.8. а) кристална решетка мартензита, б) структура закаљеног челика, в) микроструктура мартензита

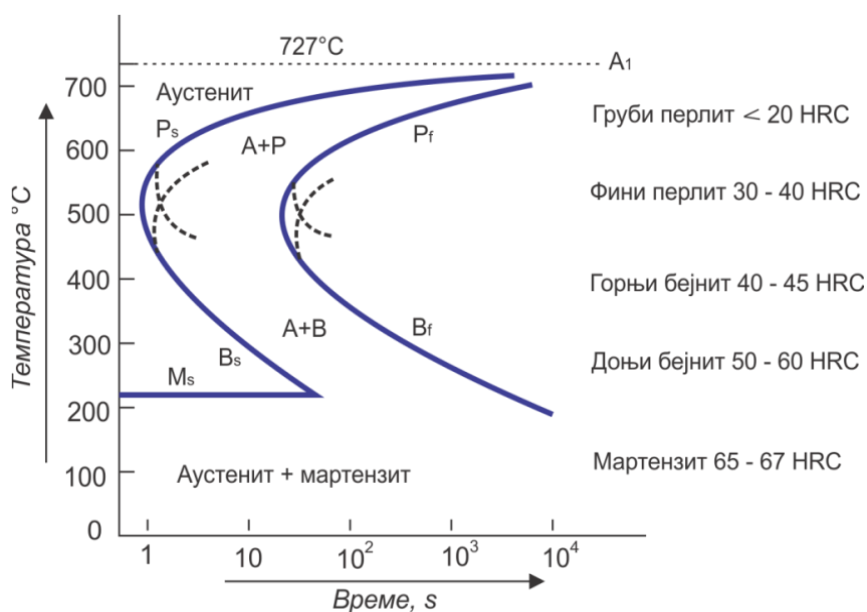
Микроструктура закаљеног челика састоји се из плочастих или иверичастих кристала мартензита, између којих је распоређен нетрансформисани – заостали аустенит.

3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ

Дијаграми који приказују ток промене потхлађеног аустенита, зависно од температуре и времена, називају се трансформациони дијаграми. За разлику од равнотежних ови дијаграми важе само за одређени челик (хемијски састав, услови аустенизације итд.) и садрже податке о почетку и крају образовања фаза као и температурске зоне перлитне, бејнитне и аустенитне промене аустенита. Поред поменутог у њима се могу наћи и подаци о нпр. уделима продуката одређене трансформације, тврдоћи истих итд. Као што је већ поменуто постоје два облика ових дијаграма и то: Изотермички (ИРА, ТТТ) дијаграми који дају промене аустенита при одређеним константним температурама и анизотермички (АРА, КХ, ССТ) дијаграми који дају промене при различитим брзинама хлађења. ИРА дијаграми се пре свега користе при избору видова термичке обраде док се КХ дијаграми користе и за термичку обраду али и за оцену заварљивости закаљивих челика.

3.1 ДИЈАГРАМИ ИЗОТЕРМИЧКОГ РАСПАДА АУСТЕНИТА (ИРА, ТТТ)

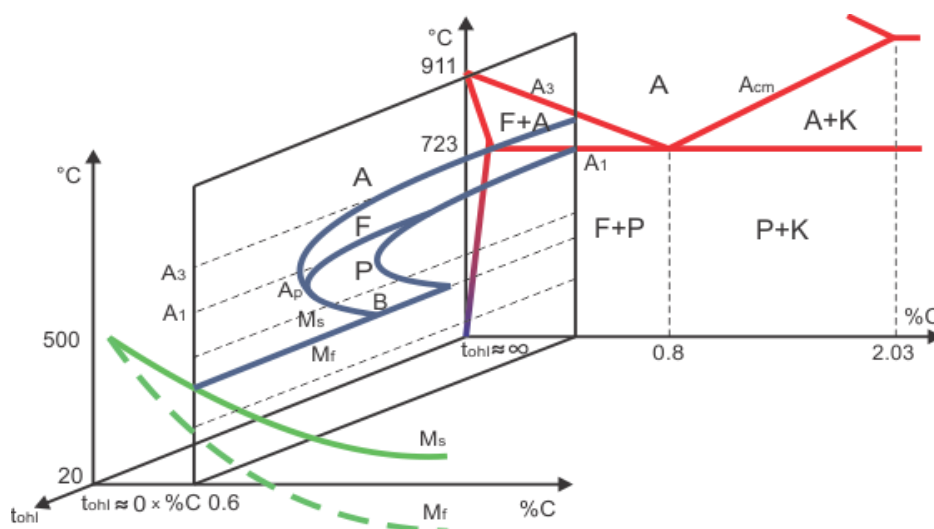
Перлитна промена у еутектоидним челицима је дифузна промена, која се одвија нуклеацијом клица и њиховим растом. Брзина промене је дата брзином образовања клица и брзином њиховог раста. При малом потхлађењу аустенита испод температуре A_1 кинетички параметри промене су готово занемарљиви па је брзина промене зато мања. Прва зрна перлита (P_s) се појављују тек после веома дугог времена задржавања на трансформационој температури. 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.



Слика 3.1. ИРА дијаграм еутектоидног челика (0.77% C)

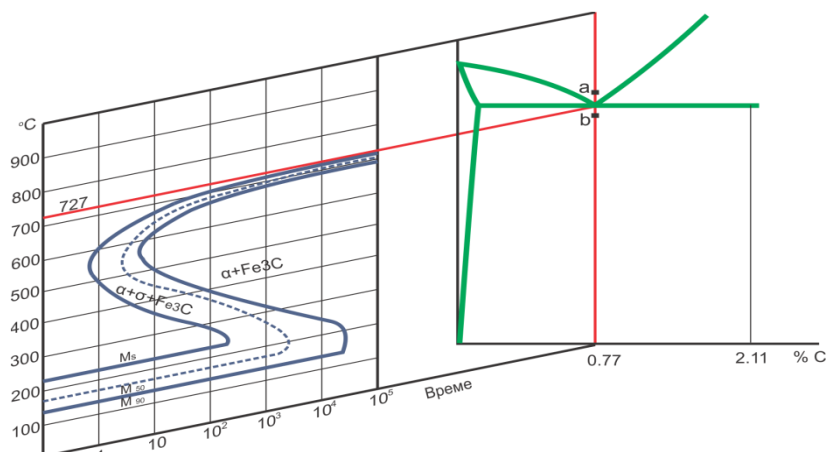
Криве почетка и краја промене називају се ИРА дијаграми, а понекад и С или ТТТ (*time-temperature transformation*) дијаграми. Изглед тог дијаграма за еуектоидни угљенични челик дат је на слици 3.1.

На облик и положај кривих у дијаграмима утичу многи фактори али треба поменути утицај легирајућих елемената. Сви легирајући елементи осим Со и Аl повећавају стабилност аустенита, односно померају криве удесно. Такође, подижу или спуштају температуру најмање стабилности аустенита и M_s температуру. Легирајући елементи који образују супституцијски чврст раствор (Ni, Cu) не мењају облик дијаграма већ га само померају удесно док елементи који граде карбиде (Cr, Mo, V, W) изразито мењају облик дијаграма. Такође, већа аустенитна зрна померају криве удесно а ситнија улево.



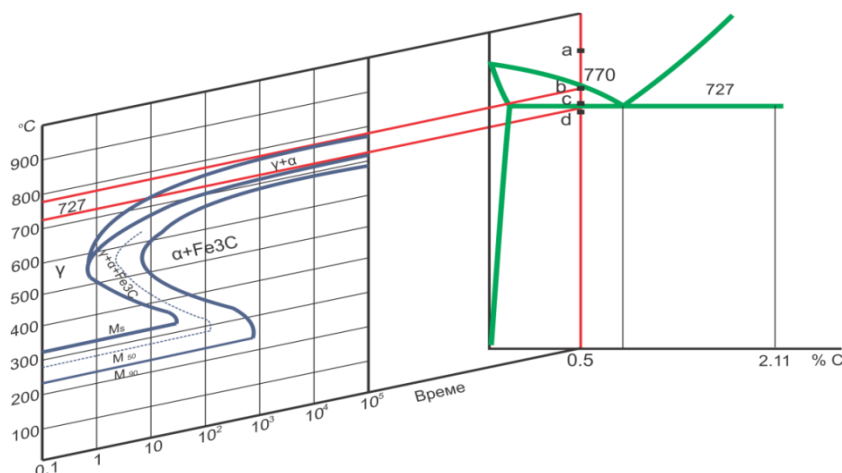
Слика 3.2. Просторни дијаграм : Fe – Fe₃C, ИРА дијаграм и дијаграм зависности температура M_s и M_f од садржаја угљеника раствореног у аустениту

Ако челик са садржајем угљеника од 0.77% загревамо до температуре око 900°C и држимо довољно дуго, његова структура ће бити хомогени аустенит (0.77% C). Ако овај еуектоидни челик хладимо нормалном брзином до температуре близу еуектоидне (тачка а), (сл. 3.3), његова структура остаје аустенит. Даљим хлађењем до еуектоидне температуре или нешто испод (тачка б), целокупан аустенит се трансформише у ферит (0.022% C), а вишак угљеника који је истиснут из решетке γ -Fe, гради једињење Fe₃C и остаје у слојевитом распореду са феритом. Овако настала слојевита структура, састављена је од ламела ферита и Fe₃C и назива се перлит (ламеларни перлит). Пошто се растворљивост угљеника у α -Fe веома мало мења од температуре 727°C до собне, то ће и структура перлита остати непромењена у том интервалу. Механичка својства перлита налазе се између својстава меког и пластичног ферита и тврдог, кртог цемента [1].



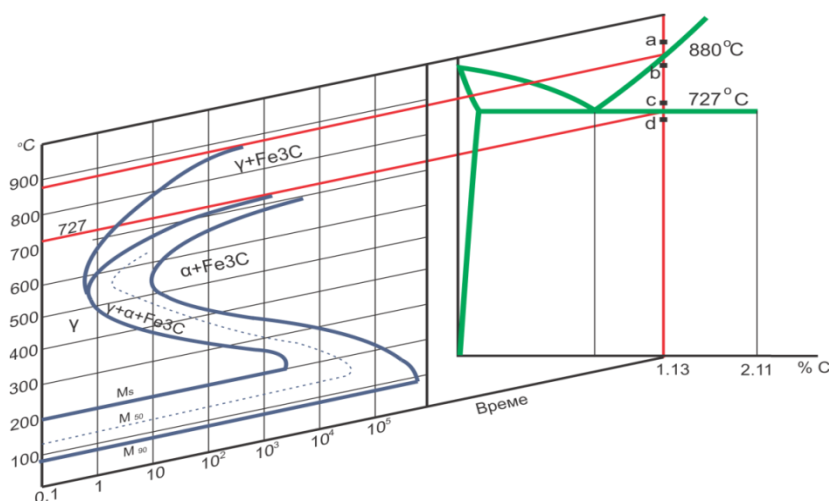
Слика 3.3. Еутектоидни угљенични челик

Ако угљенични челик са 0.5% C загревамо до температуре од око 900°C (тачка а, сл. 3.4) довољно дуго, структура ће се састојати од хомогеног аустенита. Хлађењем нормалном брзином до температуре око 775°C, долази до формирања проеутектоидног ферита на границама аустенитног зрна. Ако ову легуру и даље хладимо у температурном интервалу од *b* до *c*, количина проеутектоидног ферита стално расте, а количина трансформисаног аустенита износи око 60%. У том интервалу садржај угљеника у преосталом аустениту расте од 0.50% до 0.77%. На еутектоидној температури при условима спорог хлађења преостала количина аустенита са 0.77% C трансформише се у перлит. Одмах испод еутектоидне температуре (тачка *d*), структура легуре подеутектоидног челика са 0.5% C је перлит + ферит. Ферит у перлиту називамо еутектоидни ферит за разлику од проеутектоидног ферита, који се формирао на температури изнад 727°C. На слици 3.4 приказана је микроструктура подеутектоидног челика са 0.5% C.



Слика 3.4. Подеутектоидни угљенични челик

Ако легуру са 1.4% C загревамо до температуре од 925°C и држимо довољно дуго, целокупна структура биће хомогени аустенит (сл. 3.5.).



Слика 3.5. Надеутектоидни угљенични челик

Хлађењем нормалном брзином од температуре која одговара тачки b, издвајају се први кристали цементита на границама аустенитних зрна. Овај цементит назива се проеутектоидни цементит. Даљим хлађењем у температурном интервалу, од b до c, количина проеутектоидног цементита на границама аустенитних зрна расте, док садржај угљеника у аустениту опада од 1.4% C на 0.77% C. На еутектоидној температури или нешто испод ње (тачка d), преостали аустенит се трансформише у перлит по еутектоидној реакцији. Цементит формиран у еутектоидној реакцији назива се еутектоидни цементит, за разлику од проеутектоидног цементита који се формира изнад температуре 727°C.

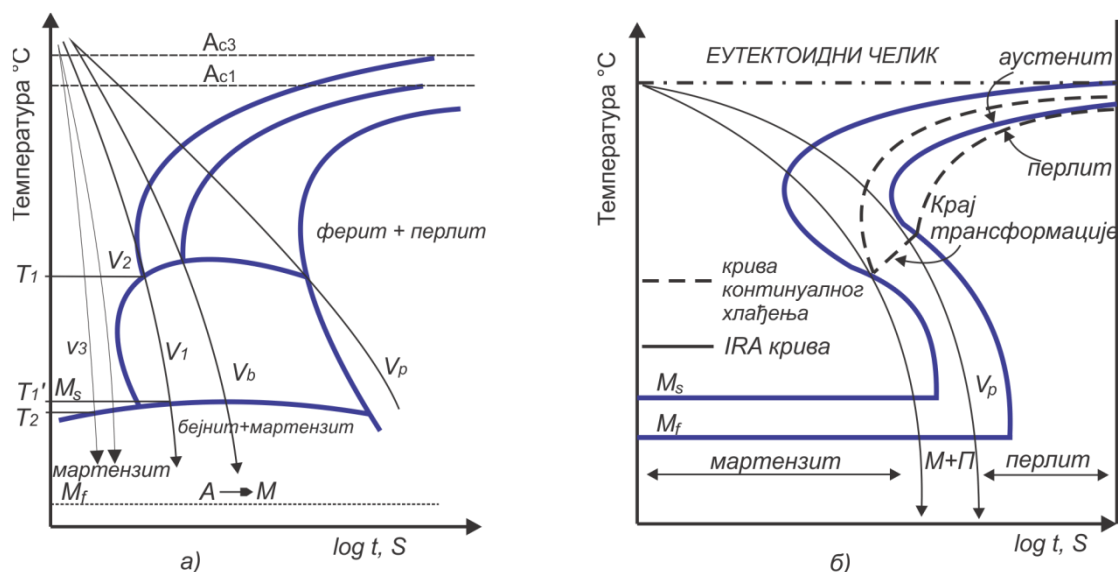
3.2 ДИЈАГРАМИ КОНТИНУАЛНОГ РАСПАДА АУСТЕНИТА (АРА, КХ)

Трансформација аустенита може настати када се аустенит потхлади за одређену температуру, односно када постане метастабилан и тежи да се преобрази у стабилније фазе за дату температуру. Ако се раније поменутим методама одреди време почетка и краја трансформације аустенита у условима непрекидног хлађења различитим брзинама добија се дијаграм континуираног хлађења, тзв. КХ, АРА или CCT (*Continuous Cooling Transformation*) дијаграм.

Слично као код изотермичког разлагања аустенита најмањим брзинама одговара феритно-перлитна структура подеутектоидних челика и феритно-цементитна структура код надеутектоидних челика. Нешто већим брзинама одговара бејнитно мартензитна структура а највећим брзинама хлађења одговара чисто мартензитна структура [1, 8].

Разлика између ових дијаграма се огледа у:

- континуалним хлађењем аустенита се не може добити чисто бејнитна структура,
- КХ дијаграми су померени доле и удесно у односу на криве изотермалног распада аустенита,
- код ИРА дијаграма промена се прати по изотерми $T = \text{const.}$ а код КХ по одређеним брзинама хлађења v_1, v_2, v_3 , ИТД.



Слика 3.6. а) КХ - дијаграм подеутектоидног челика, б) ИРА дијаграм (пуна линија) и КХ дијаграм (испрекидана линија) еутектоидног челика

Анализом КХ дијаграма (сл. 3.6;а) уочава се да, при брзини хлађења V_1 нешто мањој од критичне ($v_{kr} = v_2$), један део аустенита дифузионо се мења у фини перлит (бејнит), а други део остаје непромењен све до M_s -температуре, кад почиње његов бездифузиони преображај у мартензит. Крајњу структуру тада чине бејнит и мартензит. Ако се брзина хлађења повећа до v_3 ($v_3 > v_{kr}$), дифузиона промена аустенита више није могућа, он се прехлађује до тачке M_s , трансформишући се даље механизмом клизања у мартензит. Испитивања су показала да се сав аустенит не трансформише у мартензит, већ да у структури каљених челика увек остаје мања или већа количина непреображеног - заосталог аустенита. Из дијаграма на слици (3.6;а) се види да при хлађењу брзинама мањим од v_p настаје коначна структура ферит + перлит, при брзини између v_p и v_b добија се мешовита структура ферита, перлита, бејнита и мартензита (Ф+П+Б+М). Најзад, брзини хлађења између v_b и v_1 одговара мешовита структура (Ф+Б+М). Минимална брзина хлађења, којом се одлаже промена аустенита све до M_s температуре, одговара тангенти на колено КХ криве и назива се критична брзина хлађења (v_2 , сл. 3.6;а). Нелегирани (угљенични) челици имају веома велику критичну брзину хлађења која се креће од 200-600°C/s; веће брзине одговарају нискоугљеничним челицима, а најмања v_{kr} одговара еутектоидном челику. Код легираних челика, као и код изотермалног распада, сви додатни елементи (изузев Co и Al) повећавају стабилност аустенита, померају удесно кинетичке криве, то значи да продужују период инкубације, односно смањују v_{kr} . Најзад, треба истаћи да су структуре легираних челика сложеније од нелегираних. Оне могу бити мешавина ферита, перлита, бејнита, мартензита и нешто заосталог аустенита, па се краће називају међуфазним структурама.

4. ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ПОСТУПАКА ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ И ЊИХОВИХ КАРАКТЕРИСТИКА

Као што је већ речено, термичка обрада представља процес обраде метала који се састоји из загревања, држања на одређеној температури (прогревања) и хлађења, брзог или спорог. У зависности од режима термичке обраде као и од структуре коју желимо да добијемо након ње разликујемо више видова термичке обраде, а то су: жарење, каљење, отпуштање, површинско каљење и термо-механичка обрада. У наредним поглављима ће бити више речи о свакој од поменутих термичких обрада.

Пре него што се пређе на опис појединих врста термичке обраде челика корисно је дати уобичајено означавање преображајних тачака у легурама Fe-Fe₃C односно FeC.

Табела 1. Дефиниција критичних температура

Ознака	Дефиниција
A_0	Температура ($T=210^{\circ}\text{C}$) при којој магнетични Fe ₃ C прелази у немагнетични
A_{C1}	Температура почетка еутектоидне промене ферита и цементита у аустенит при загревању
A_{C3}	Температура завршетка промене ферита у аустенит при загревању подеутектоидних челика
A_{Cm}	Температура завршетка растварања секундарног цементита у аустениту при загревању надеутектоидних челика
A_{r1}	Температура завршетка еутектоидне промене аустенита у ферит и цементит при хлађењу
A_{r3}	Температура почетка промене аустенита у ферит при хлађењу подеутектоидних челика
A_{rCm}	Температура почетка издвајања секундарног цементита из аустенита при хлађењу надеутектоидних челика
M_s, M_f	Температура почетка, односно завршетка мартензитне промене
B_s, B_f	Температура почетка, односно завршетка бејнитне промене

Као што је већ споменуто, у поступке обичне термичке обраде спадају:

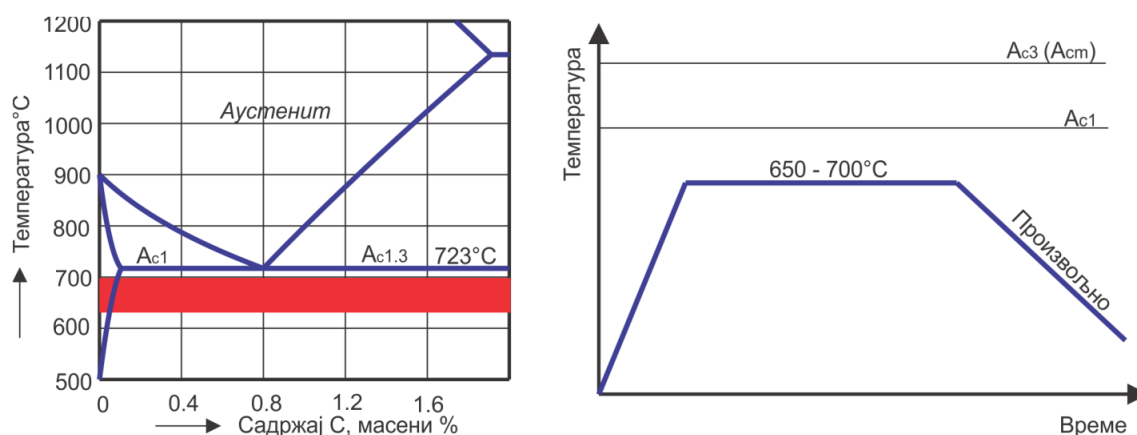
- Жарење (дифузионо, нормализационо, меко, потпуно, рекристализационо, отклањање напона);
- Каљење (запреминско или потпуно, површинско);
- Отпуштање (ниско, средње, високо).

4.1 ЖАРЕЊЕ

Жарење представља вид термичке обраде који се састоји из загревања метала на одређену температуру, прогревања и затим спорог хлађења. Циљ жарења је, пре свега, снижавање заосталих напона, повећање дуктилности материјала и побољшање обрадивости. Смањују се својства јачине. Поступак жарења се може поделити на:

- жарење без фазне трансформације – рекристализационо и за уклањање заосталих напона и
- жарење са фазном трансформацијом – дифузионо, нормализација, потпуно, изотермално жарење и сфероидизација.

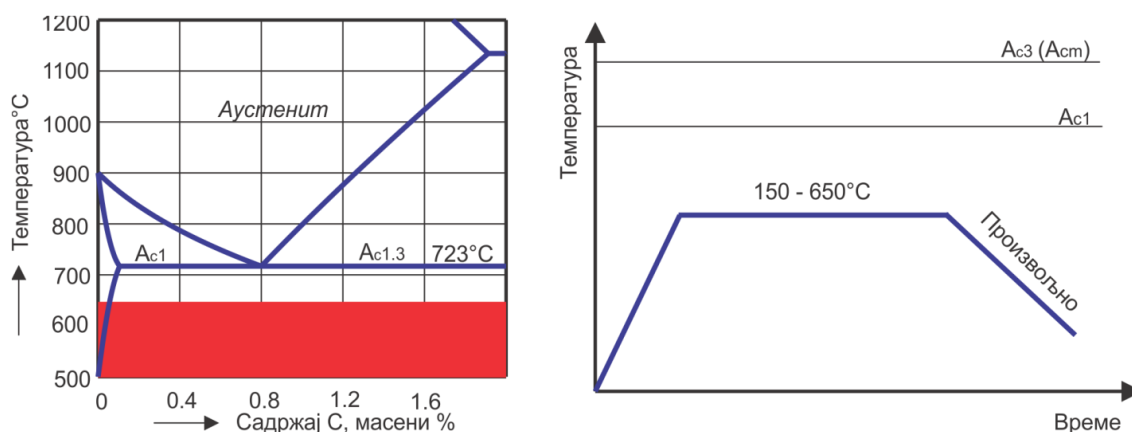
Рекристализационо жарење. Рекристализационом жарењу (сл. 4.1) се подвргавају челици који су обрађивани деформисањем у хладном стању и код којих је дошло до деформационог ојачавања, тј. до повећавања својстава чврстоће, а смањења пластичности. Овим жарењем уклањају се негативни ефекти обраде деформисањем у хладном стању, тј. смањење својстава чврстоће и повећања пластичности. Деформисана–оријентисана метална зрна поново добијају полигонални облик. Овај вид жарења се примењује пре обраде деформисања у хладном стању и као међуфазна операција за смањење ефекта ојачавања између две обраде деформисањем. У неким случајевима рекристализационо жарење се изводи и као завршна термичка обрада. Рекристализационо жарење се састоји од загревања челика до температура од 650–730°C, а које зависе од састава. За нискоугљеничне челике (0.08–0.2% C), хладно ваљане лимове, температура рекристализације је 680–700°C, а време жарења 8–12 часова. Хладно ваљани профили од високоугљеничних и легираних челика жаре се на температури од 730°C у трајању од 0.5–1.5 часова [1, 8].



Слика 4.1. Рекристализационо жарење

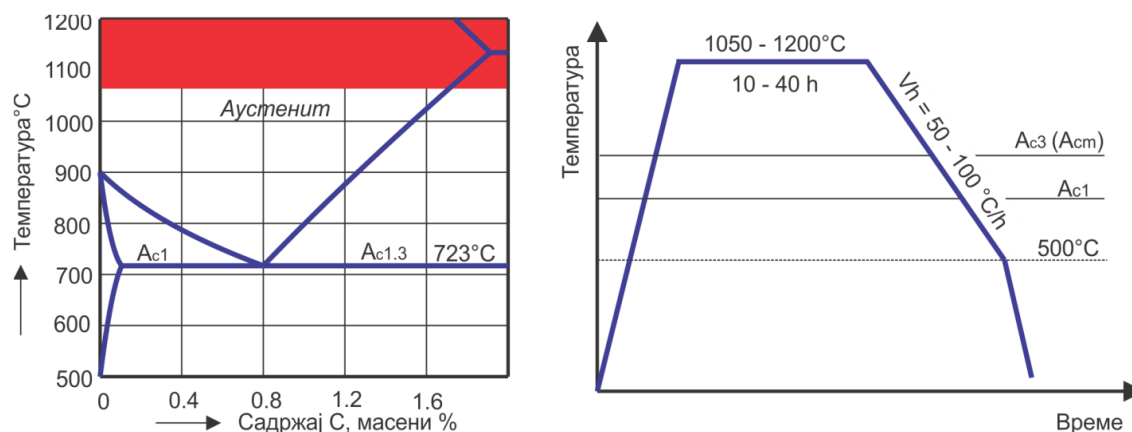
Жарење за уклањање заосталих напона (сл. 4.2) се примењује у циљу уклањања заосталих напона који могу настати: (1) у току обраде деформисањем или резањем; (2) неуједначеним хлађењем делова који се израђују на повишеним температурама, као и у процесима заваривања и ливења; (3) фазним трансформацијама код којих се хлађењем стварају фазе које имају различите густине. Уклањање заосталих напона доводи до димензионалне стабилности, касније уклањање заосталих напона у току рада после неког времена може бити разлог кривљења делова. Такође, смањује се склоност ка стварању прслина услед напонске корозије. Жарење у циљу уклањања заосталих напона остварује се загревањем до температура испод тачке A_{c1} да би се избегле фазне трансформације, држањем на температурама довољно дуго време и

коначно споро хлађење до собне температуре. После грубе обраде резањем делови се жаре на температури 570–600°C у трајању од 2–3 часа, а после завршне – фине обраде брушењем на температури од 160–180°C у трајању од 2–2.5 часа. Жарење за уклањање заосталих напона у изведеним завареним конструкцијама и код одливака остварује се загревањем на температурама од 650–700°C у трајању од неколико часова [1, 8].



Слика 4.2. Жарење за уклањање напона

Дифузно жарење (хомогенизација) (сл. 4.3) се примењује за изједначавање хемијске неједначености металних зрна чврстог раствора, тј. за умањење микросегрегације код челичних одливака и шипки, и то углавном код легираних челика. У процесу дифузионог жарења загревање се изводи до високих температура 1100–1200°C јер само у том случају имамо потпуније протицање дифузионих процеса неопходних за изједначавање хемијског састава у појединим деловима металне масе. Време трајања процеса (загревање, држање на температурама и споро). Споро одвијање дифузионих процеса, у условима нормалног хлађења (кристализације), доводи до различитог састава кристала. Неједначеност састава унутар кристала назива се микросегрегација.

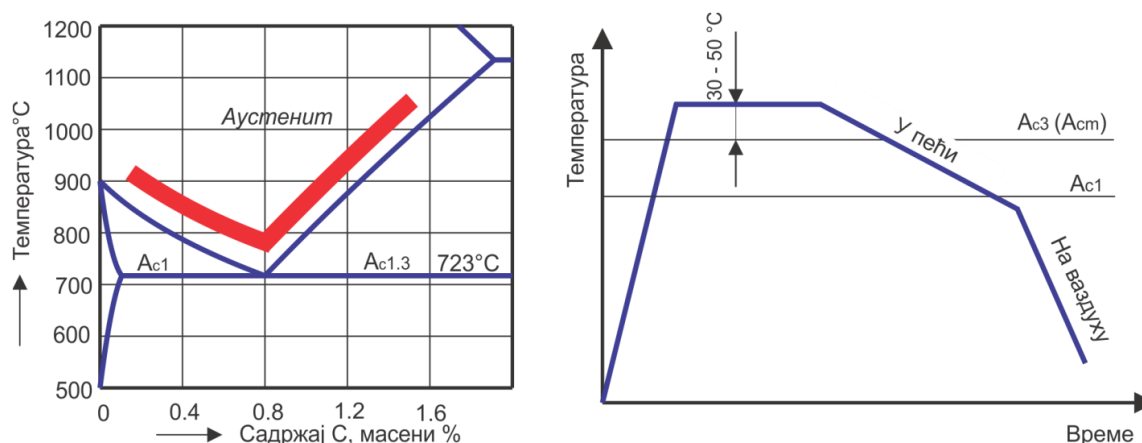


Слика 4.3. Дифузно жарење

После дифузионог жарења, због високих температура и дуготрајног загревања, добија се крупнозрна структура. У циљу уситњавања металних зрна и поправљања својстава код челичних шипки се постиже накнадном обрадом деформисањем, а одливци се подвргавају потпуном жарењу или нормализацији.

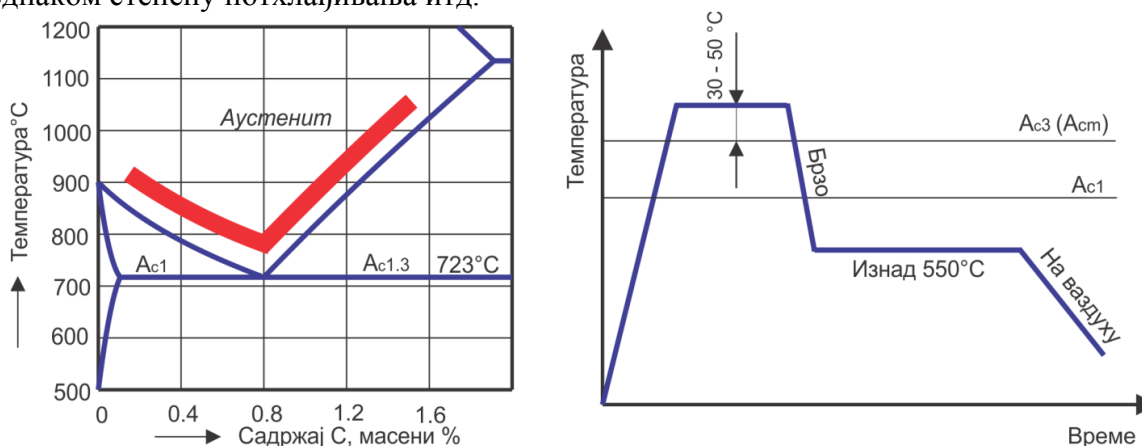
Потпуно жарење. Потпуном жарењу (сл. 4.4) се подвргавају нискоугљенични и средњеугљенични челици (подеутектоидни) са циљем добијања уједначене ситнозрне

структуре, смањене тврдоће, повећане жилавости и пластичности. Потпуно жарење остварује се загревањем челика на температуре $30\text{--}50^\circ\text{C}$ изнад тачке A_{c3} ; загревањем, почетна феритно–перлитна структура преводи се у ситнозрну структуру аустенита, и каснијим спорим хлађењем брзином $\sim 10^\circ\text{C/h}$ (хлађењем у пећи) све до собне температуре. Из ситнозрног аустенита образује се ситнозрна уједначена феритно–перлитна структура релативно мале тврдоће и довољне пластичности. Потпуно жарење се не користи за надеутектоидне челике јер се при веома спором хлађењу цементит издваја по границама металних зрна, тј. формира се цементитна мрежа на границама перлитних зрна. Овако добијена структура има лоша механичка својства.



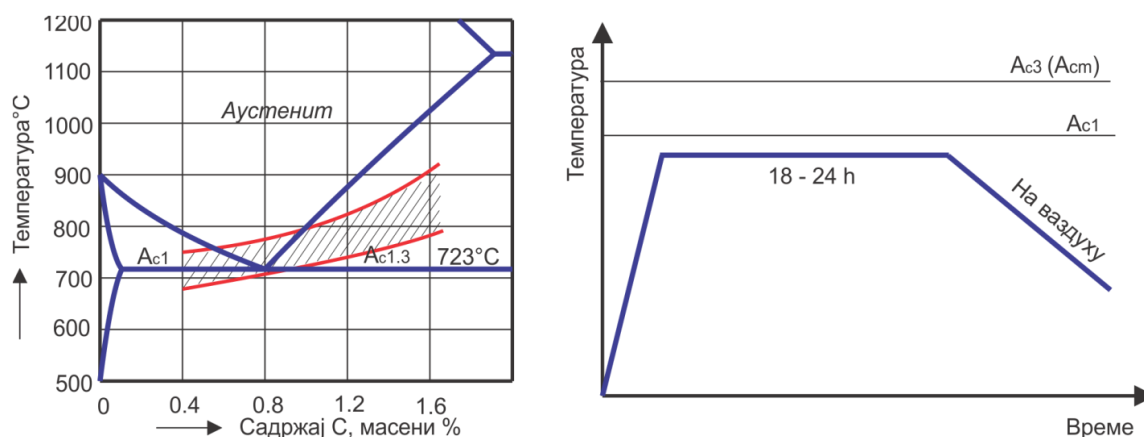
Слика 4.4. Потпуно жарење

Изотермално жарење. Изотермалним жарењем (сл. 4.5) добија се феритно–перлитна структура из аустенита при константној температури, а не хлађењем као код потпуног жарења. Изотермално жарење се остварује загревањем до температуре $50\text{--}70^\circ\text{C}$ изнад тачке A_{c3} , држањем одређено време, а затим се примењује брзо хлађење до температуре нешто ниже од тачке A_{c1} за око $100\text{--}150^\circ\text{C}$, а у зависности од карактеристика ТТТ криве. На тој температури се челик држи све до потпуног разлагања аустенита и образовања феритно–перлитне структуре, а затим се хлади на мирном ваздуху. Изотермално жарење има предност у поређењу са потпуним жарењем: скраћено време процеса, посебно код легираних челика, добијање једнородније структуре јер се трансформација обавља по целој запремини челика при једнаком степену потхлађивања итд.



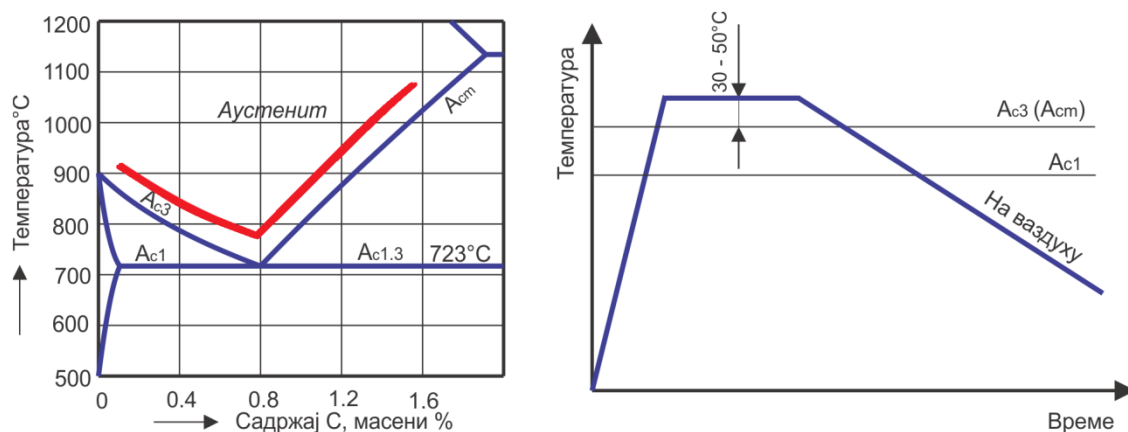
Слика 4.5. Изотермално жарење

Меко жарење (сфероидизација) се изводи са циљем побољшања машинске обрадивости и припреме структуре за каљење. Жарење челика се изводи на температурама од 650 до 750°C, (слика 4.6). Дуготрајним жарењем у области A_1 температуре настаје сфероидизација ламела цементита тј. прелаз ламеларног перлита у зрнасти. Услед промене облика и величине честица цементита знатно се побољшава обрадивост резањем и обрадивост деформисањем. Најпогоднија структура меко жареног челика је феритна са округлим честицама карбида средње величине. У случају веома ситних честица карбида челик има велику чврстоћу и тврдоћу, па се због тога тешко обрађује, док у случају крупних честица карбида челик има превелику жилавост услед чега при резању настаје тракаста струготина, која је непогодна. Обрађена површина жилавих челика је такође слабијег квалитета. Након меког жарења изводи се веома споро хлађење.



Слика 4.6. Меко (сфероидно) жарење

Нормализационо жарење (нормализација) (сл. 4.7) је процес жарења челика на температури вишој за 30–50°C од тачке A_{c3} или A_{cm} , што зависи од састава челика. После потпуне трансформације полазне структуре у аустенит следи споро хлађење на мирном ваздуху до собне температуре.



Слика 4.7. Нормализационо жарење

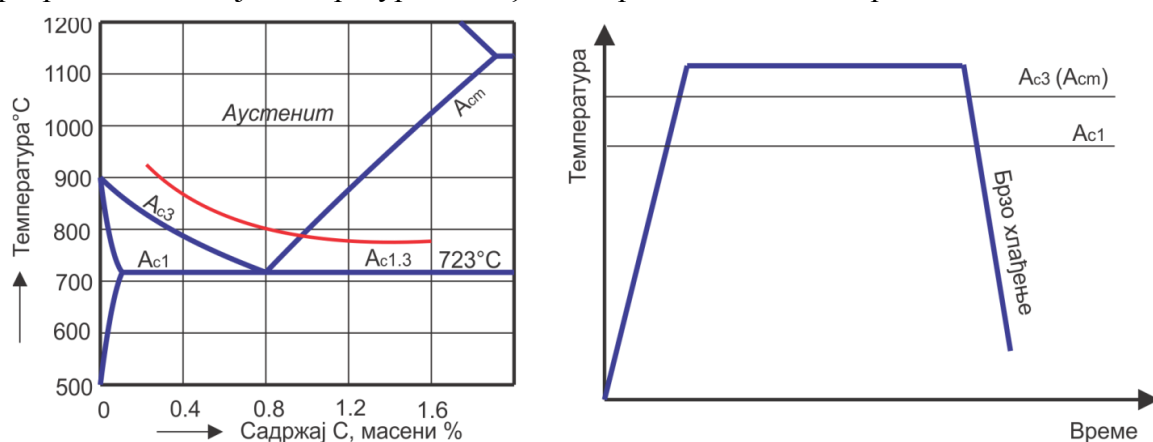
Нормализација се примењује да се уклони крупнозрна структура добијена у поступцима обраде у топлом стању (ливење, ковање, ваљање, заваривање и др.). Код нискоугљеничних челика у процесу нормализације дешавају се исти процеси као и код потпуног жарења тј. уситњавање металног зрна. Међутим, због нешто веће брзине хлађења (хлађење на ваздуху) добија се финија структура перлита (тање ламеле ферита

и цементита). Овако добијена структура, после нормализације, обезбеђује боља механичка својства (већу чврстоћу и тврдоћу), у односу на својства добијена потпуним жарењем. Због тога се код нискоугљеничних и средњеугљеничних челика уместо потпуног жарења углавном примењује нормализација [1, 8].

Нормализацијом високоугљеничних челика уклања се цементитна мрежа тако што се нешто бржим хлађењем (хлађењем на ваздуху) аустенита спречава издвајање цементита на границама металних зрна тј. спречава се поновно стварање цементитне мреже. Добијена структура састоји се од ситних ламела ферита и цементита (сорбит).

4.2 КАЉЕЊЕ

Каљење челика је термичка обрада која се изводи загревањем радног предмета изнад температуре A_{c3} , за подеутектоидне и $A_{1,3}$ за надеутектоидне челике (слика 4.8) прогревањем на тој температури и хлађењем брзином већом од критичне.



Слика 4.8. Температура загревања за каљење челика

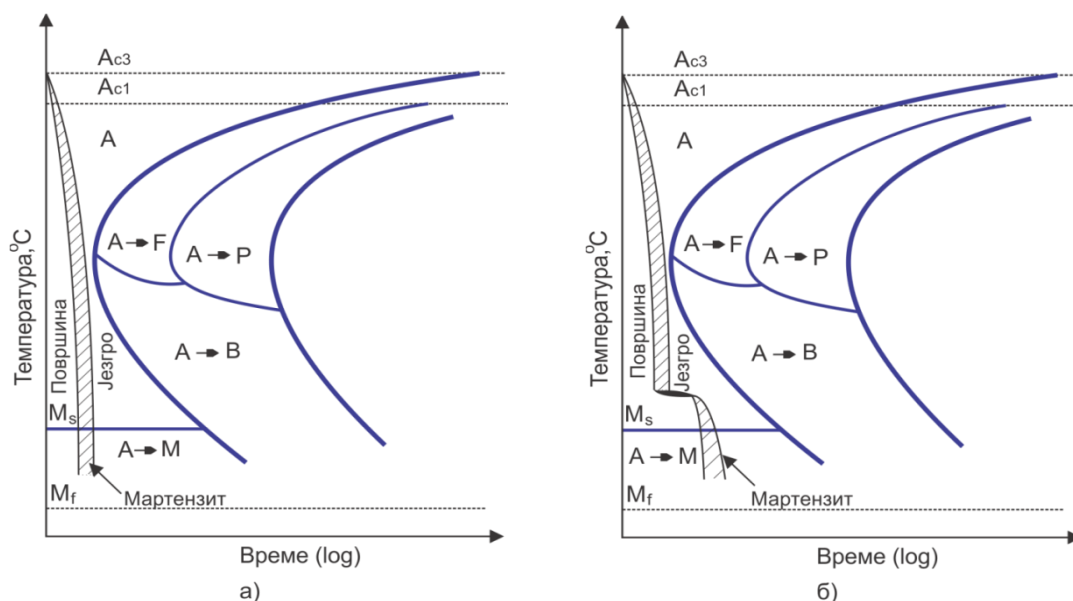
Суштина каљења челика је да се потхлађивањем аустенита спречи његова дифузиона промена до M_s -температуре, испод које настаје промена механизмом клизања, тзв. мартензитна трансформација. Као резултат каљења добија се тетрагонални мартензит, структура која се одликује великом тврдоћом и високим својствима отпорности, али ниским вредностима дуктилности и жилавости. Због тога што се кубна решетка аустенита трансформише механизмом клизања (а не дифузијом као у равнотежним условима).

Каљење се може различито изводити. Запреминско каљење може бити континуално, у два расхладна средства, степенасто (каљење са прекидом) и изотермално. Површинско каљење се изводи само континуално [1, 8].

Континуално (обично) каљење се изводи у једном расхладном средству. Загрејани предмет се потопи у расхладно средство и држи потопљен док се не охлади. Област температура са које се изводи каљење је приказана на слици (4.9;а). Брзина хлађења се бира тако да се спречи дифузиона промена аустенита све до температуре мартензитног преображаја (слика 4.9;а).

Степенасто мартензитно каљење (мартемперинг) се примењује код угљеничних челика танких пресека или малих пречника (8–10 mm). Суштина је у промени брзине хлађења на температури нешто изнад M_s . Материјал се задржава на тој температури а затим хлади до собне температуре. Добијена структура је мартензит.

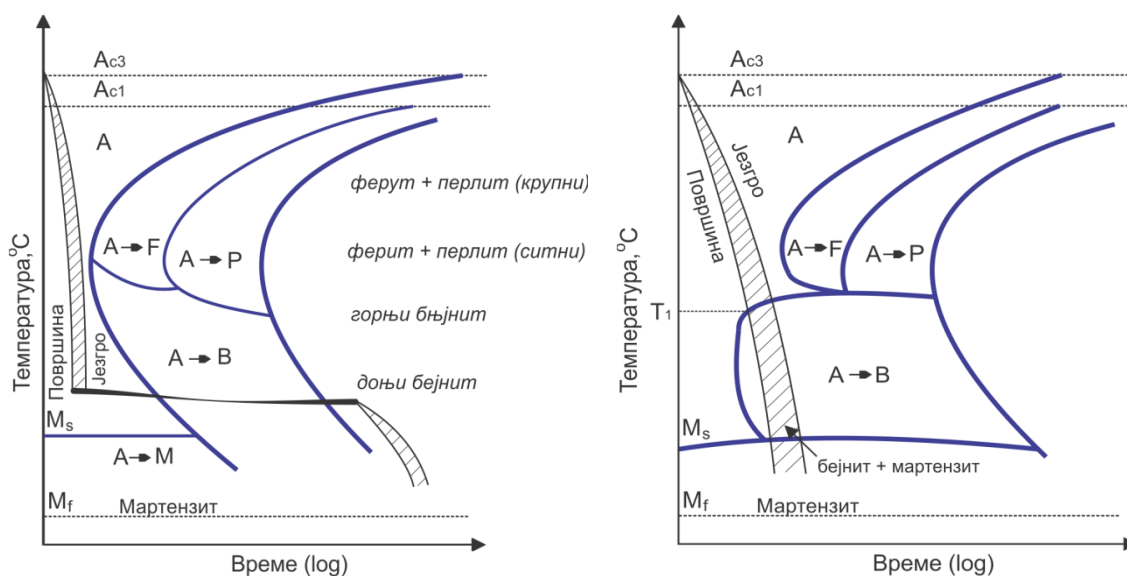
Степенастим каљењем смањују се унутрашњи напони, дегормације и могућност појаве прслина (слика 4.9;б).



Слика 4.9. Мартензитно каљење: а) континуално, б) степенасто

Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг) подразумева брзо хлађење челика до температуре настајања доњег бејнита, држање на тој температури док се не заврше све промене (аустенит у бејнит), и затим спорог хлађења (слика 4.10;а). Челик бејнитне структуре има знатно мању тврдоћу, али му се повећавају особине дуктилности (пластичност и жилавост). Изотермички се кале, углавном, делови малих пресека, израђени од угљеничних и нисколегираних челика [1, 8].

Континуално бејнитно каљење се примењује једино за челике чији КХ-дијаграм има истурено колено. Као резултат каљења добија се бејнитно-мартензитна структура (слика 4.10;б).



Слика 4.10. Бејнитно каљење: а) изотермичко б) континуално

Каљење на ниским температурама се састоји из загревања челика до аустенитног подручја, прогревања на тим температурама и затим брзог хлађења до температура које иду и испод нуле (-80°C па чак и до -150°C). Резултат тога је већи проценат мартензита у структури, односно мање заосталог аустенита који је нестабилан и може довести до пада тврдоће, димензионе нестабилности итд. Поред тога смањују се и унутрашњи структурни напони који могу настати услед нехомогености структуре.

4.3 ОТПУШТАЊЕ

Термичка обрада којом се каљени челик загрева до температура нижих од тачке A_{c1} , држи на тој температури одређено време, а затим споро хлади, и при том проузрокује трансформацију нестабилне структуре каљеног челика у стабилнију структуру назива се отпуштање.

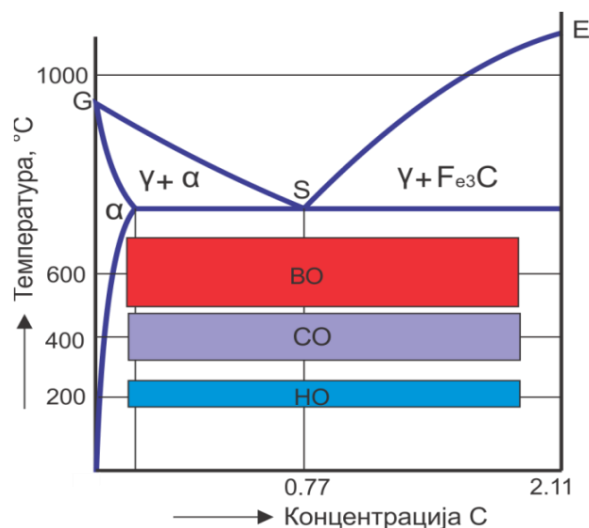
Отпуштање има за циљ смањење или потпуно уклањање унутрашњих напона, смањивање кртости каљеног челика и добијање жељених структура и механичких својстава. У зависности од температуре загревања разликују се три вида отпуштања: ниско, средње и високо (сл. 4.11).

Ниско отпуштање. Загревањем до температуре 250°C у трајању л до 2,5 часа и лаганим хлађењем долази до смањења унутрашњих напона, тетрагонални мартензит прелази у мање крти кубни мартензит, повећава се чврстоћа и незнатно жилавост без битнијег смањења тврдоће. Мањи део заосталог аустенита трансформише се у мартензит што изазива мало повећање запремине. Каљени челици са процентом угљеника од 0.6-1.3% C достижу тврдоћу 58–63 HRC. Ниском отпуштању подвргавају се алати за резање и мерни инструменти израђени од угљеничних и нисколегираних челика, као и делови после површинског каљења и хемијско-термичких обрада (цементација, нитрирање, цијанизирање, карбонитрирање).

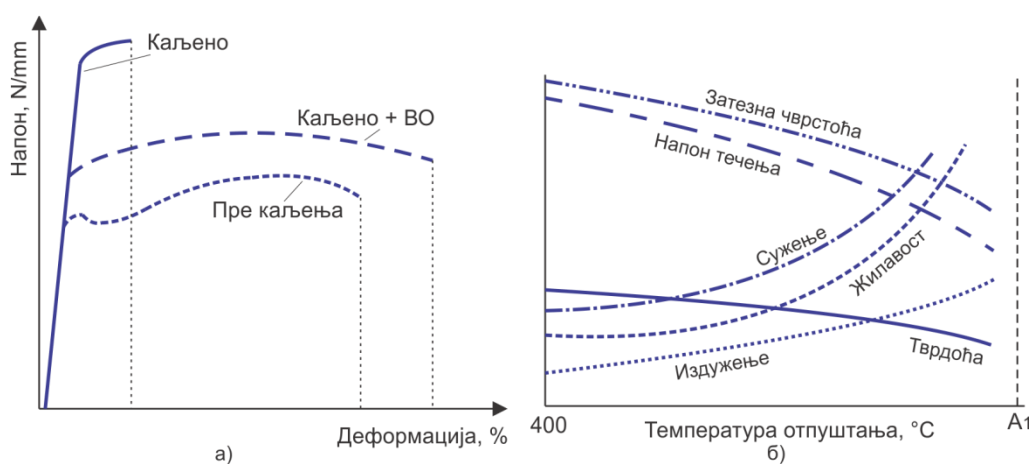
Средње отпуштање. Загревањем до температура $350\text{--}500^{\circ}\text{C}$ и држањем на њима одређено време. Велики део угљеника бива истиснут из решетке мартензита. Истиснути угљеник се издваја у виду ситних ламела цементита, карактеристичних за труститну структуру. Структура челика после средњег отпуштања је отпуштени трустит. Отпуштањем смањује се тврдоћа на $\text{HRC} = 40\text{--}50$, повећава граница еластичности и жилавост.

Високо отпуштање. Загревањем до температура $500\text{--}680^{\circ}\text{C}$ и држањем 1–6 часова, у зависности од димензија делова, долази до укрупњавања цементитних ламела, а добијена структура је отпуштени сорбит. Високим отпуштањем постиже се најбољи однос између чврстоће и жилавости.

Побољшање. Побољшање је процес који се састоји из каљења и високог отпуштања. Назив побољшање потиче од чињенице да долази до пораста скоро свих механичких особина нарочито ударне жилавости [1, 3].



Слика 4.11. Температурна област отпуштања челика



Слика 4.12. (а) Дијаграм напон–издужење, пре каљења, после каљења и побољшања; (б) промена механичких својстава у зависности од температуре отпуштања.

Термичком обрадом побољшања повећава се чврстоћа, постиже се најбољи однос између чврстоће и жилавости, умањује осетљивост на концентрацију напона, снижава се прелазна температура и потребна је већа енергија за развој прслине. Међутим, отпорност на хабање, због смањења тврдоће, није велика.

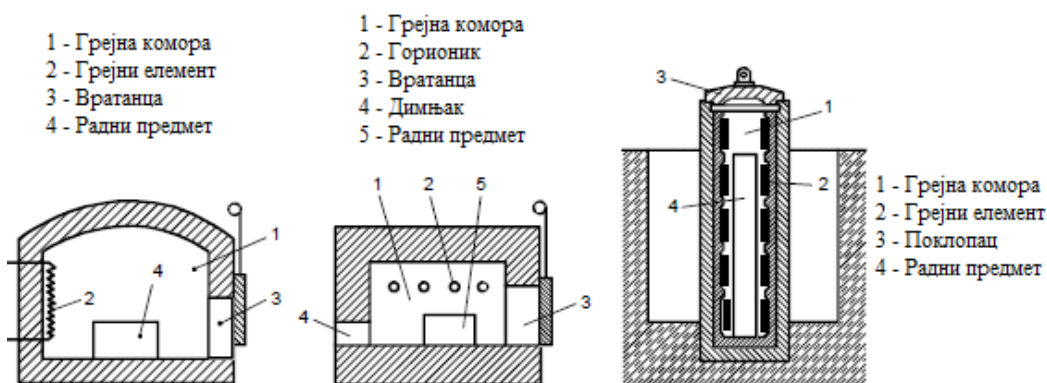
5. СРЕДСТВА И ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ И ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

5.1 ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ

За загревање челика при термичкој обради највише се употребљавају специјалне пећи. Оне се загревају електричним отпором - ефектом или индукцијом, односно сагоревањем чврстих, течних и гасовитих горива. При томе се топлота предаје директно преко гаса који окружује делове (конвекцијом) или зрачењем. Загревање се у неким ређим случајевима обавља и у вакуумским пећима и тада се топлота предаје зрачењем. Пећи на чврста горива имају решетке (ростове) на којима сагорева чврсто гориво (ћумур, угаљ), а пећи на течна и гасовита горива опремљене су посебним уређајима за распршивање горива-горионика.

Пећи за загревање при термичкој обради могу бити веома различите по конструкцији, услед чега имају различите називе као што су: коморне, јамске, дубинске, ротационе, нагибне, комбиноване, проточне итд. Међутим, оне се према конструкционом извођењу обично разврставају на:

- коморне,
- јамске,
- сона и метална купатила.



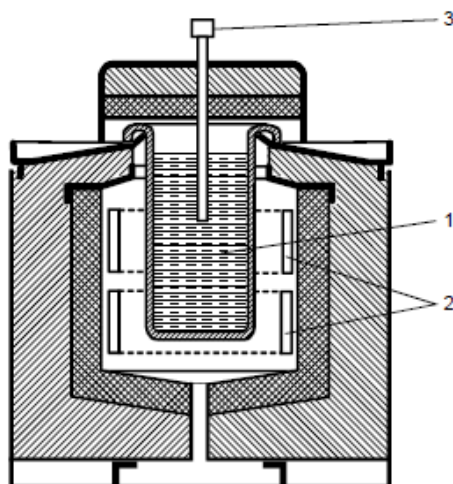
Слика 5.1. Схема једнокоморне (а), двокоморне (б), јамске пећи (в) [1]

С обзиром на то да ли су намењене загревању различитих или само одређених делова, пећи могу бити универзалне и специјалне.

Код коморних пећи делови се могу загревати директно (када продукти сагоревања долазе у непосредан додир са деловима) или индиректно (када су делови смештени у затвореној комори тзв. "муфл"-пећ, која се споља греје топлим гасом). Често су ове пећи двокоморне, при чему једна комора служи за предгревање, а друга за завршно загревање.

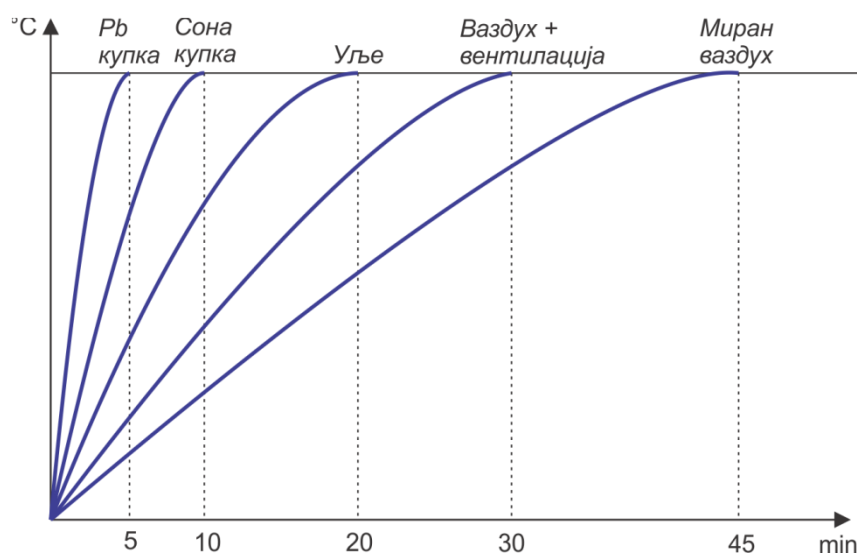
5.2 СРЕДСТВА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ

Делови се могу загревати и у течној и вакуумској средини. За течну средину се користе „купатила“ у којима је растопљена нека со (сона купатила) или метал (метална купатила). Пећи се најчешће загревају електричном струјом (ређе пламеном) тако да истопљена со или метал (најчешће олово) добије потребну температуру, када се делови убацују у растоп.



Слика 5.2. Метално купатило; 1) течан метал, 2) грејачи, 3) термометар [1]

Загревање у овим течним средствима је брзо, а регулисање температуре веома тачно. Температурни опсег загревања у соним кадама је обично 150-750°C док је у оловним купатилима 330-850°C.



Слика 5.3. Различите брзине загревања у зависности од средства за загревање

Један од проблема при загревању челика је делимична оксидација по површини и формирање оксидне коре, уколико загрејани челик дође у контакт са ваздухом или другим оксидишућим гасовима који се могу наћи у пећи. Погодније је користити коморне пећи са неутралном или контролисаном атмосфером, у које се убацује неки неутрални гас под мањим натпритиском.

Атмосфера у пећи би могла бити неповољна и у том смислу што неки њени састојци доводе до извесног губитка угљеника из површинских зона челика (разугљеничавање), док други могу довести до супротног ефекта – повећања количине угљеника (наугљенисавање). Зато је остварење контролисане атмосфере у коморама пећи значајно, како због спречавања оксидације тако и са овог становишта.

Друга могућност је да се термичка обрада обави у соној кади или оловном купатилу, чиме се спречава додир са ваздухом и избегава сагоревање по површини. При томе не долази ни до разугљенисавања.

Јасно је да и у случају евентуалне примене вакуумских пећи не постоји могућност површинске оксидације. Међутим, ове пећи су скупе, па се користе само у неким специјалним случајевима.

5.3 СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ

Што се тиче средстава за хлађење највише примењивана су вода, ваздух и уље. С обзиром на претходна објашњења, угљенични челици захтевају знатне брзине хлађења (имају малу прокаљивост) при каљењу, а нарочито они са нижим садржајем угљеника. Зато се угљенични челици нормално хладе водом, као средством које најинтезивније хлади. Међутим, ни тада се ови челици не могу охладити довољно великом брзином по читавом пресеку масивнијих делова. Вода се такође употребљава и за каљење неких нисколегираних челика.

Легирани челици имају мању критичну брзину каљења и зато се хладе уљем (блаже расхладно средство него вода), док се неки високолегирани челици могу хладити у струји ваздуха, па чак и на мирном ваздуху (ови последњи се називају мартензитни или природно каљиви челици). Треба приметити да на избор средства за хлађење могу утицати и димензије дела. Тако на пример, у неким случајевима се мањи делови могу хладити уљем, али се већи делови од истог материјала морају хладити водом, како би се и њихова унутрашњост довољно брзо охладила, односно прокалила.

Из табеле 2 је јасно да је најефикасније расхладно средство вода и неки водени раствори (каустична сода NaOH). Али њихова је мана што у температурском опсегу $M_s - M_f$ ($\approx 350-250^\circ\text{C}$) имају велику брзину хлађења, који индукује знатне заостале термичке напоне. Такође се види да уљна купатила у поређењу са водом хладе 3 до 4 пута спорије у области температура $650-550^\circ\text{C}$ и скоро 10 пута спорије на температурама мартензитног преображаја. Иако је њихова примена као мање интензивног средства за хлађење понекад неопходна, уља, код појединих поступака и материјала ипак не могу да потисну водена купатила.

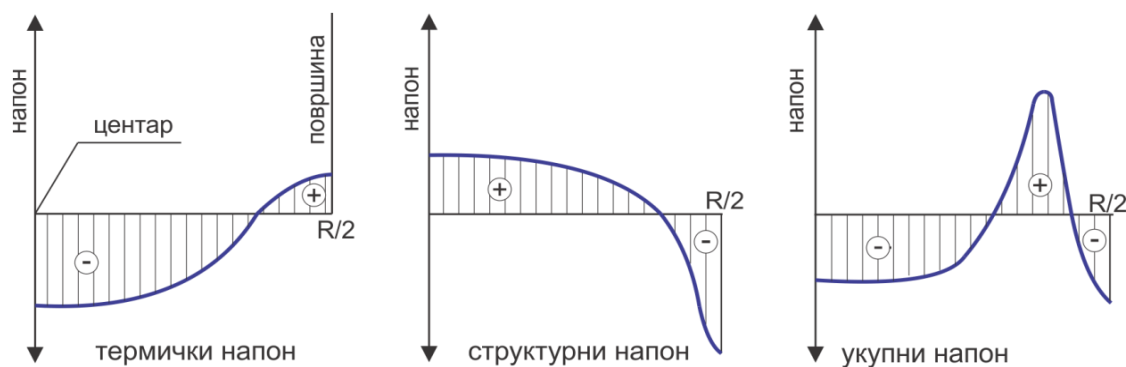
Табела 2. Брзина хлађења челика у различитим условима

Средство за каљење	Брзина хлађења (°C/s) у температурском опсегу	
	650-550°C	350-250°C
Вода 18°C	600	270
Вода 26°C	500	270
Вода 50°C	100	270
Раствор 10 % NaOH у H ₂ O при 18°C	1200	300
Раствор 10 % NaCl у H ₂ O при 18°C	1100	200
Емулзија уља у води	70	200
Раствор сапуна у води	30	200
Минерално машинско уље	150	35
Трансформаторско уље	120	25
Жива	800	70
Бакарне плоче	60	30
Гвоздене плоче	35	15

Треба истаћи да је најефикасније каљење воденим млазом (прскањем) јер млаз одстрањује све парне мехурове који се јављају тако што их преводи у капљице које су способне за трансфер топлоте. Уља за хлађење могу бити различита по саставу, односно интензитету (способности) хлађења. То су обично минерална уља са евентуалним додатком масних уља. Понекад се за хлађење употребљавају сона или метална купатила. Она су нарочито погодна при брзом хлађењу до температура које су изнад нормалних за тзв. "термално каљење". При томе је брзина хлађења већа него при хлађењу у уљу. Хлађење дела смештеног између металних плоча долази у обзир за делове листастог облика. Наиме, у овим случајевима постоји опасност од витоперења делова, па се они притискају бакарним плочама које се изнутра хладе водом, тако да се делови истовремено кале и спречава њихово деформисање. Овом случају одговара каљење поступком мартемперинг [1].

6. СОПСТВЕНИ НАПОНИ И ГРЕШКЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

Сопствени напони се могу дефинисати као напони који настају у материјалу услед неке обраде која је на њему извршена (резање, деформисање, заваривање итд.). Они лоше утичу на карактеристике материјала тако што у току експлоатације могу да доведу до разарања, димензионе нестабилности итд. Треба их разликовати од радних напона јер радни потичу од радних (спољашњих) оптерећења којима је део изложен. Када је реч о термичкој обради челика, сопствени напони се јављају због неравномерног загревања и хлађења – термички напони као и услед структурних преображаја – структурни напони. Ови унутрашњи напони не само што изазивају еластичне деформације, већ у мањем или већем степену изазивају и неједновремену и неједнаку пластичну деформацију слојева по попречном пресеку, што има за последицу појаву заосталих напона. Неједнаке брзине хлађења спољних и унутрашњих слојева челика праћене су и променом запремине. Површински слојеви се брже скупљају од унутрашњих, што има за последицу појаву унутрашњих напона. После потпуног хлађења на површини се јављају заостали напони на притисак, а у унутрашњости дела заостали напони на затезање. Образовање структурних напона је последица неједнаке структуре у површинским и унутрашњим слојевима. Мартензитна структура се прво формира у површинским слојевима, па тек касније у унутрашњим (потпуна прокаљивост). Како је мартензитна трансформација (аустенит → мартензит) праћена повећањем запремине, то ће довести до образовања у површинским слојевима напона на притисак, а у унутрашњим слојевима напона на истезање. Као резултат завршене трансформације у површинским слојевима јављају се заостали напони на затезање, а у унутрашњим слојевима заостали напони на притисак (сл. 6.1). У зависности од односа термичких и структурних напона у површинском слоју заостали напони могу се разликовати у знаку и величини. Код делова сложеног облика обично су структурни напони већи од термичких. Ако унутрашњи напони у процесу каљења достигну веће вредности од затезне чврстоће материјала, тада може доћи до појаве прелина. Појаву прелина посебно поспешују напони на затезање у површинским слојевима. Због тога је потребно напоне затезања, који се углавном јављају као последица структурних напона, умањити.



Слика 6.1. Схематски приказ расподеле напона

Смањење структурних напона може се постићи смањивањем брзине хлађења непосредно испод температуре почетка мартензитне трансформације, као и избегавањем високих температура загревања, односно прегревања материјала. Појава прслина и деформација је честа појава код челика код којих је потребна велика критична брзина хлађења, као што су нискоугљенични челици. Унутрашњу напони изазивају и витоперење, кривљење и зато се при каљењу треба водити рачуна о њиховом положају при хлађењу. Термичком обрадом се могу постићи значајна повећања механичких особина челика али уколико она није правилно изведена она доводи до грешака које могу потпуно уништити термичком обрадом се могу постићи значајна повећања механичких особина челика али уколико она није правилно изведена она доводи до грешака које могу потпуно уништити комад или смањити његов радни век. Све грешке које настану на материјалу а последица су термичке обраде називамо грешкама термичке обраде.

Грешке термичке обраде обухватају велики низ истих и све оне мање или више утичу на радни део. Да би се оне избегле треба спровести поједине мере у оквиру припреме термичке обраде као што су:

- неприхватање неправилних, недовољно дефинисаних или немогућих захтева,
- потпуно познавање материјала који се обрађује и
- извођење процеса ТО по одговарајућој технологији и прописима.

Када су испуњени горе наведени услови могућности за појаву грешака се смањују али и даље постоји простор за њихово појављивање.

Услед неправилно примењене технологије термичке обраде челика на деловима могу настати различите грешке као што су:

Недовољно загревање. Недовољно загревање настаје у случају када се челик загреје до температура које су ниже од потребних. На пример, ако се подеутектоидни челик загреје до температура које су ниже од тачке A_{c3} , што значи да ће део ферита остати нетрансформисан у аустенит. После хлађења, аустенит се трансформише у мартензит, а ферит који није трансформисан остаје у структури каљеног челика. Као резултат добија се структура мартензит + ферит. Како је ферит релативно мек, он смањује тврдоћу делова после каљења. Ова грешка може се исправити тако што се недовољно загрејан каљени челик жари, а затим поново загрева до потребних температура.

Прегревање. До прегревања долази у случају када се челик загрева до температура које су много више од потребних температура (знатно изнад A_{c3} и A_{cm}), или ако се при нормалним температурама држи дуже време. Последица прегревања је појава крупнозрног аустенита. У процесу спорог хлађења прегрејаног челика у температурном интервалу критичних тачака $A_{r3}-A_{r1}$, долази до појаве јако крте Видманштетенове структуре. Као резултат прегревања у процесу каљења образује се крупноигличасти мартензит. Механичка својства прегрејаног челика су знатно нижа. Отклањање грешака прегревања насталих у процесу жарења захтева поновно жарење, или делове подвргнути процесу нормализације. Челике прегрејане у процесу каљења жарити и поновити каљење.

Прегоривање. Прегоривање настаје у случају када се челик загрева до температура које су блиске температури топљења. Прегоривање је праћено издвајањем оксида железа по границама металног зрна због чега су челици веома крти. Прегоривање је непоправљива грешка [2, 3, 5].

Оксидација и разугљеничавање. Оксидација и разугљеничавање челика у процесу загревања долази као последица узајамног дејства његове површине са гасовима који се налазе у атмосфери пећи (кисеоник, водоник). Оксидацију карактерише стварање оксида гвожђа FeO на површини делова. Оксид представља неповратни губитак материјала, доводи до неуједначене тврдоће и захтева неопходну допунску обраду делова, што повећава трошкове израде. Разугљеничавање је процес смањивања садржаја угљеника у површинским слојевима делова ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) и доводи до стварања феритне структуре у површинском слоју, што јако смањује тврдоћу на површини делова, а тиме и отпорност на хабање. Најбољи начин да се делови у процесу загревања заштите од оксидације и разугљеничавања јесте загревање у пећима са заштитном (контролисаном) атмосфером која је инертна у односу на челик.

Прслине. У процесу термичке обраде прслине се образују при сувише великим брзинама хлађења или загревања. Прслине се појављују када унутрашњи напони достигну вредност затезне чврстоће челика. Оне се, углавном, образују у процесу каљења када се хлађење одвија великом брзином у температурном интервалу M_s – M_f . Склоност образовања прслина расте са порастом угљеника у челику и са повећањем температуре загревања. Поред тога прслине могу настати и због појаве концентрације напона (оштре промене попречног пресека, зарези, удубљења и сл.). Прслине су грешке које се не могу исправити и делови са прслинама се одбацују. Да би се спречило образовање прслина препоручује се: при конструисању делова избегавање извора концентрације напона, каљење са што је могуће нижим температурама, постизање потпуне прокаљивости, споро хлађење у температурном интервалу M_s – M_f (хлађење у два расхладна средства, степенасто или изотермално каљење, извођење отпуштања одмах после каљења).

Деформације. Деформације (измена димензија и облика), које настају на деловима при термичкој обради, јесу резултат термичких и структурних напона који се јављају у челику услед неравномерног хлађења и фазних трансформација. Неравномерно загревање, високе температуре, неправилан положај делова у средству за хлађење и велике брзине хлађења у температурном интервалу мартензитне трансформације могу довести до кривљења делова. Спречавање кривљења делова постиже се правилним избором режима термичке обраде (температура загревања, брзина и начин хлађења), а код дугих и танких делова користити се каљење у алатима.

7. КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА ИЗВЕДЕНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

На крају процеса термичке обраде третиране делове треба повргнути контроли како би се утврдило њихово стање и успешност процеса термичке обраде. Контрола се може поделити у три фазе:

- контрола делова пре термичке обраде,
- контрола тока термичке обраде и
- контрола делова после термичке обраде.

Контрола делова пре термичке обраде треба да обухвати основна сазнања о материјалу и његовом стању пре третирања. Тестирањем материјала разним методама добијају се информације и карактеристике тог материјала. Уколико део није адекватно израђен и на себи има прслине или могућа места концентрације напона онда се и то узима у обзир, односно отклања. Уколико немамо довољно сазнања о материјалу, процес веома лако може бити неуспешан. Најчешћа испитивања материјала пре термичке обраде су механичке особине које се односе на:

- испитивање затезањем,
- мерење тврдоће,
- одређивање ударне жилавости и др.

Контрола тока термичке обраде се пре свега односи на контролу температура, времена и брзине загревања. Уколико неки од поменутих параметара одступа од прописаних, може доћи до лоше изведене термичке обраде.

И на крају се увек приступа контроли комада после термичке обраде. С обзиром да су то најчешће делови коначних димензија оне морају бити стабилне и у оквирима прописаних толеранција.

Контрола се односи и на контролу геометрије комада као и на контролу тврдоће (чије су методе напоменуте) и дубине на којој се жељена својства протежу. Поред тога, може се приступити и одређивању микроструктуре али и провери стања површине комада као што су металографска испитивања.

Под стањем површине комада се мисли на могуће постојање микропрслина које у току експлоатације могу да доведу до хаварије. У том циљу се изводе пенетрантна и магнетна дефектоскопија које могу дати слику о стању материјала на површини.

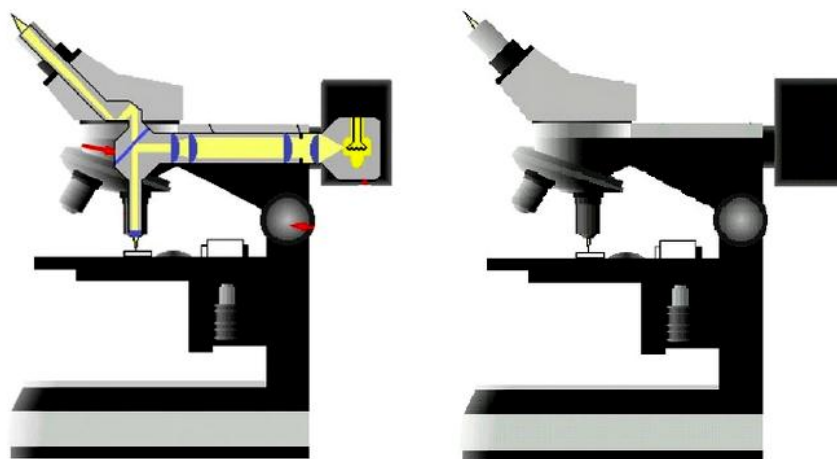
Постоји много фактора који утичу на правилно извођење процеса и уколико се они не испуне може доћи до грешака. Те грешке се огледају у недовољној и неравномерној тврдоћи, димензионом одступању, пуцања делова услед заосталих напона итд. Све је то последица недовољне температуре или времена загревања, агресивног или спорог хлађења, оксидације делова итд. Испитивање квалитета изведене термичке обраде обухвата низ механичких испитивања у циљу добијања потпуне слике о ефектима термичке обраде.

7.1 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА

Металографска испитивања спадају у методе контроле узорака са разарањем. Њима се може стећи слика о структури материјала, распореду тврдог слоја итд. Металографска испитивања се могу поделити на микроскопска и макроскопска.

Макроскопска испитивања се заснивају на посматрању, голим оком или са лупом повећања до 20х малог узорка исеченог из термички обрађеног дела. После брушења и полирања површине попречног пресека добија се тзв. "шлиф", који се нагриза специјалним хемијским средством како би се обезбедила боља видљивост зона. Макроскопским испитивањима стичемо слику о распореду тврде и меке зоне. На овај начин се може одредити дубина отворног слоја и његов положај на површини.

Микроскопска испитивања се заснивају на посматрању узорака узетих из термички обрађеног комада и његовог посматрања под микроскопом при увећању од 200-500х. После полирања и нагризања узорка, постаје видљива микроструктура материјала. На тај начин се могу анализирати структуре које настају при термичкој обради, распоред и облик карбида (ламеле или зрна) итд. Такође, на овај начин се може анализирати и величина зрна и тако закључити да ли је дошло до прегревања или можда прегоревања челика [2, 4, 7].



Слика 7.1. Схема рада и изглед оптичког микроскопа

Принцип рада оптичких микроскопа заснива се на усмеравању и пропуштању светлосног зрака кроз систем сочива, призми, филтера, пропусних огледала и одбијању зрака од припремљене површине узорка ка објективу и окулару, где се уочава увећана слика структуре. Такође, могуће је и фото снимање структуре. Користи се за увећања од 20 до 2000 пута.

Полирање је поступак обраде који се користи за побољшање изгледа обрађеног дела и уклањање оксидације као и смањења храпавости. У металографији и металургији, полирање се користи за стварање равне површине без грешака (дефеката) за даље испитивање микроструктуре метала под микроскопом.

Полирање је дорада глачања површине материјала помоћу абразива и алата. То је широко распрострањен поступак обраде површине.

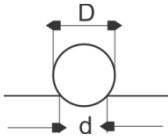
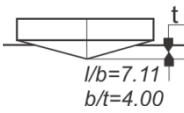
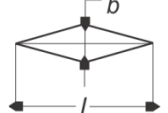
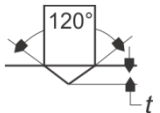
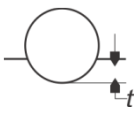
Сам поступак полирања се састоји у трењу између материјала, алата за полирање релативно велике брзине и пасте за полирање (абразива). Трењем се локално загрева метални део који се полира, те долази до топљења микро избочина и

попуњавања микро удубљења, док се не добије глатка површина. Зато се поступак полирања мора изводити у разним смеровима.

7.2 ИСПИТИВАЊЕ ТВРДОЋЕ

Под тврдоћом се подразумева физичко својство, тј. отпор којим се супротставља једно тело ка продирању другог тврђег тела у његову површину. Тврдоћа се може одредити статичким, динамичким и специјалним методама. Код статичких метода сила испитивања која делује на утискивач постепено расте до максималне вредности. Код динамичких испитивања сила на утискивачу се остварује ударом, или се пак тврдоћа одређује на основу еластичног одскока утискивача од површине која се испитује. Најчешће коришћене методе у пракси јесу статичке и динамичке.

Табела 3. Методе мерења тврдоће [1]

Метода	Утискивач	Изглед утискивача		Оптерећење	Формула за израчунавање тврдоће	
		Бочни поглед	Поглед одозго			
Бринел	Куглица од челика или волфрам карбида пречника од 10mm			F	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Викерс	Дијамантска пирамида			F	$HV = \frac{1.854F}{d^2}$	
Кнуп	Дијамантска купа			F	$HK = \frac{14.2}{l^2}$	
Роквел A C D	Дијамантска купа			60 kg 150 kg 100 kg	HRA= HRC= HRD=	100-500 t
B F G	1/16 пречника челичне куглице			100 kg 60 kg 150 kg	HRB= HRF= HRG=	130-500 t
E	1/8 пречника челичне куглице			100 kg	HRE=	

Динамичке методе се најчешће изводе неким преносним уређајем и њихова тачност није висока. У такве методе спадају: Полди (HP), склероскопска или по Шору (HSh) и дуроскопска (HD). Ове методе се користе када нам је потребно сазнање о тврдоћи материјала које не мора бити потпуно тачно. Предност ових метода је што су уређаји углавном преносиви.

Статичке методе се изводе на апаратима за мерење тврдоће при чему се узорак пре испитивања чисти како би мерење било што тачније. У статичке методе спадају:

Бринел (HB), Викерс (HV), Роквел (HRC), Кнуп (HK) итд. Подела је начињена према врсти утискивача (геометрија и материјал). У табели 3 приказане су статичке методе мерења

Бринелова тврдоћа (HB) мери се на равном узорку утискивањем челичне или волфрамске куглице пречника $D = 10, 5, 2.5 \text{ mm}$. На куглицу се преко система полуга и тегова делује оптерећењем $F = K D^2, \text{ daN}$. За челике се узима $K = 30$, а за мекше материјале (нежелезне) усваја се $K = 10, 5, 1.5$ или 1. При правилно одабраној сили, пречник отиска d треба да буде у границама: $d = (0.25 - 0.6)D$. На основу F , D и пречника отиска d , измереног на микроскопу уграђеном у Бринелов апарат, рачуна се тврдоћа по формули датој у табели 3.

Највећа тврдоћа која се може мерити са утискивачем од каљене челичне куглице је 450 HB, а са куглицом од синтерованих волфрамских карбида, та је граница 750 HB.

Викерсова тврдоћа (HV) мери се помоћу дијамантске пирамиде са углом при врху од 136° која се утискује под оптерећењем од 5, 10, 20, 30, 50, 100 daN , односно преко полуге на коју делују тегови од 5, 10, 20, 30, 50 и 100 kg .

Очитавање димензија отиска обавља се на микроскопу уграђеном у апарат за мерење тврдоће. Метода по Викерсу нарочито је погодна за контролу тврдоће веома тврдих површина као што су каљене, цементиране, нитриране или дифузионо метализиране. Поред тога могу се мерити тврдоће танких предмета ако се примене мала оптерећења којима се делује на утискивач. Тврдоћа HV блиска је тврдоћи HB у границама 250-600; изван овог интервала тврдоће се знатно разликују, те за превођење једне у другу служе упоредне таблице. На крају треба нагласити да је на методи Викерс засновано мерење микротврдоће са веома малим оптерећењем реда величине од неколико стотина грама. За веома тврде материјале микротврдоћа се мери методом Кнупа са дијамантским утискивачем који оставља отисак у облику ромба.

Роквелова тврдоћа (HRC, HRB) мери се директним очитавањем на скали апарата. Утискивач код методе HRC је дијамантска купа са углом од 120° . Најпре се ручним окретањем притискивача уводи предоптерећење од 10 daN , а затим помоћу полуге стандардно оптерећење од 140 daN . После уклањања главног оптерећења очитава се HRC, и најзад узорак потпуно растеређује. Може се приближно узети да је тврдоћа $HRC \cong \frac{1}{10} HB$. Друга скала HRB употребљава се за мерење тврдоће релативно

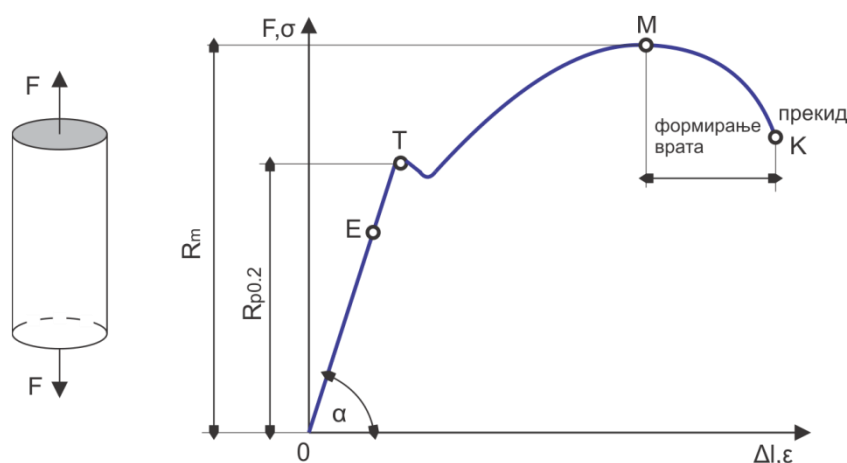
мекших материјала ($HB < 400$). Као утискивач користи се челична куглица пречника 1/16 инча на коју се делује помоћним и главним оптерећењем од $(10+90) \text{ daN}$. Мерење тврдоће по Роквелу је веома брзо, а отисак је готово невидљив.

Склероскопска тврдоћа или тврдоћа по Шору (HSh) одређује се према висини еластичног одскока малог тега који слободно пада са одређене висине. После мерења не остају никакви трагови, који би могли деловати као иницијалне прслине код динамички оптерећених делова. Контрола показивања Шоровог склероскопа обавља се помоћу еталон-плочица познате тврдоће дате у јединицама HSh или HB [1, 5].

7.3 ОДРЕЂИВАЊЕ ЗАТЕЗНЕ ЧВРСТОЋЕ

Испитивањем затезањем узорка стандардног облика могуће је одредити затезну чврстоћу који је показатељ квалитета материјала, напона течења, односно границу између еластичног (тренутног) и пластичног (трајног) деформисања услед дејства

оптерећења. Највећи ниво напона којим део сме оптеретити, мора бити нижи од напона течења, што се код одговорне конструкције дефинише степеном сигурности.



Слика 7.2. Затезање материјала

Издужење може бити бољи показатељ металуршког квалитета челика него јачина, јер у случају порозности или неметалних укључака издужење драстично опада. При релативно ниском оптерећењу производ издужења и затезне јачине је индикатор жилавости челика.

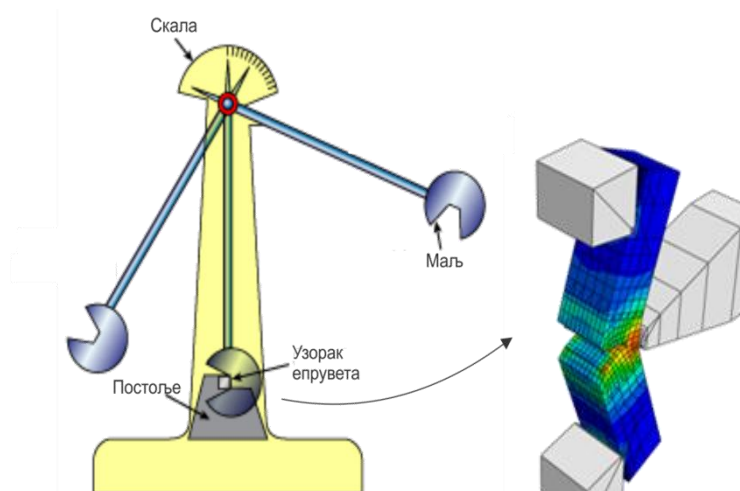
Модул еластичности је карактеристика која одређује угиб односно крутост одређеног машинског дела. Модул еластичности не мења се са променом јачине челика (нпр. због легирања, хладног ојачања, термичке обраде), већ увек остаје $E_{\text{ч}} = 207000 \text{ МПа}$ при собној температури. При температури око 650°C , модул еластичности опада до око 60000 МПа . Стога се може рећи да је модул еластичности стална величина за групу легура али линеарно опада са порастом температуре [9].

7.4 ОДРЕЂИВАЊЕ УДАРНЕ ЖИЛАВОСТИ ЖИЛАВОСТ ЛОМА

Енергија која се утроши при ударном савијању је мерило осетљивости материјала на локалну концентрацију напона. Испитивање ударне жилавости први је увео Шарпи (*Charpy*) и дефинисао је као рад потребан за прелом пробног узорка пресека 1 cm^2 , који садржи жлеб прописаних димензија.

Овако дефинисана величина ударне жилавости нема физички карактер, па резултати могу бити упоредиви само ако су добијени на истим пробним узорцима и у истим условима. Метали склони кртом лому разарају се при малом утрошку енергије и готово без видљиве деформације на месту прелома.

Што се тиче пробног узорка, најважнији је жлеб који је урезан попречно на средини узорка. Тако се локализује место прелома и стварају услови за крти лом чак и код жилавих материјала. Према облику жлеба (зареза), жилавост одређена на узорцима $10 \times 10 \text{ mm}$ и клатну расположиве енергије од 300 J , означава се са KU и KV, што значи да је у питању (U) жлеб дубине 5 mm , односно (V) жлеб дбине 2 mm . Поред тога, резултати испитивања у великој мери зависе од температуре пробног узорка, нарочито код метала са кристалном решетком типа. Код угљеничних челика, са снижавањем температуре, жилавост нагло пада у уском температурском интервалу [1, 5].



Слика 7.3. Шарпијево клатно за испитивање жилавости

7.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ВЕЛИЧИНЕ АУСТЕНИТНОГ ЗРНА

Због утицаја величине зрна структуре на својства материјала, потребно је у неким случајевима одредити врсту, величину и количину појединих зрна, користећи специјалне поступке мерења. Најчешће се одређује тзв. стварна величина зрна, односно величина зрна после одређених видова обраде (термичке, механичке, термо-механичке итд.) и природно-наследна величина зрна, тачније зрна која су склона ка расту при загревању.

Металографски избрусак се подвргава нагризању граница металних зрна како би оне биле уочљиве. Зрна могу бити приближно једнаке величине и облика али се могу и разликовати у одређеној мери. Према договору, за величину зрна се усваја величина зрна у равни пресека и то, најбоље, средња величина пресека или пречника зрна. При одређивању величине зрна изводе се најмање три мерења на различитим местима, при истом увећању.

Одређивање величине природног зрна. За одређивање величине природног зрна се примењују узорци истог облика и размера као и узорци за микроскопска металографска испитивања. Они се претходно обрађују методама цементације, оксидације или загревања а затим се припремају и испитују:

1. Код методе цементације узорак који се испитује, цементира се у чврстом средству на температури 930°C (8 сати), хлади у пећи до 600°C и даље на ваздуху. Затим се узорак бруси на дубину већу од 2 mm, полира и нагриза, после чега је спреман за одређивање величине зрна.
2. Код методе оксидације узорак се бруси и загрева у пећи на $930 \pm 10^{\circ}\text{C}$ (3 сата), хлади водом и припрема као микрошлиф. Нагриза се са 15% раствором HCl у алкохолу 2-10 минута, чиме је спреман за испитивање.
3. Код методе загревања узорак се загрева у пећи на $930 \pm 10^{\circ}\text{C}$ (30-60 мин) и хлади на ваздуху. Припрема се као микрошлиф и одређује величина зрна после нагризања са 4% раствором HNO_3 у алкохолу.

Која метода ће се користити зависи од врсте челика.

Одређивање величине стварног зрна. За одређивање величине стварног узорка није потребан термички третман, већ се узорци исецају из комада и припремају за испитивање.

Одређивање величине металних зрна се врши мерењем појединих зрна на микроскопу. Најчешће коришћене методе су:

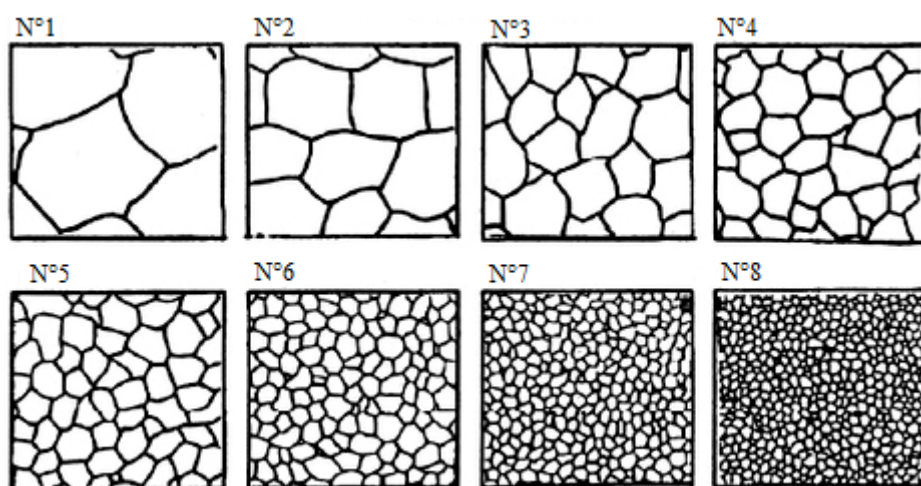
1. метода поређења величине зрна са зрнима еталона (ASTM метода) и
2. метода бројања зрна:
 - обухваћених површином и
 - по линији.

Метода поређења обухвата посматрање зрна на узорку и њихово упоређивање са еталоном. Америчко друштво за испитивање материјала (ASTM) је дало стандард за методу поређења величине зрна и она се заснива на поређењу слике зрна и еталона при увећању 100:1. За овакво поређење потребан је оптички микроскоп, а узорак се најпре бруси, након тога полира и нагриза (раствор киселина или соли).

Зрна се деле у 8 група (1-8) које показују број зрна на 1 mm^2 .

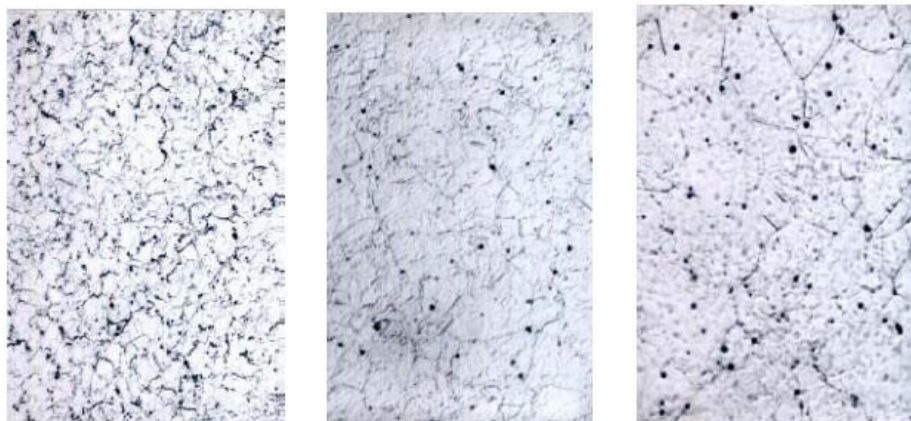
Tabela 4. Групе зрна у зависности од броја зрна по mm^2

ASTM	1	2	3	4	5	6	7	8
Зрна/ mm^2	16	32	64	128	256	512	1024	2048



Слика 7.4. Упоредни приказ величине зрна класе од 1 до 8

Величина металног зрна аустенита има великог утицаја на прокаљивост. Ако се повећавањем температуре и времена загревања величина аустенитног зрна повећа од N°8 на N°2, дубина закаљеног слоја расте 2–3 пута. Очекивано је да величина аустенитног зрна на температуру аустенизације достигне до класе N°3-4.



а)

б)

в)

Слика 7.5. Промена величине аустенитног зрна при загревању
 а) температура 700°C / N°6,7,8/; б) температура 950°C / N°4-8/; в) температура преко 950°C / N°1-5/;

За посматрање објеката чија је величина далеко испод границе видљивости оптичких микроскопа користе се електронски микроскопи.



а)

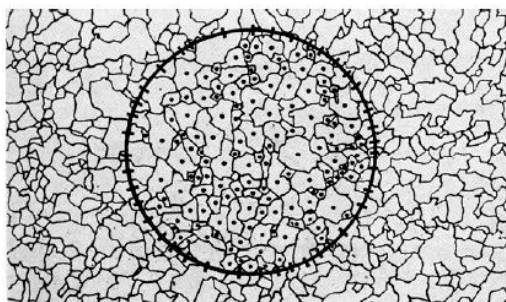
б)

Слика 7.6. Изглед микроскопа за скенирање а) SEM, б) TEM

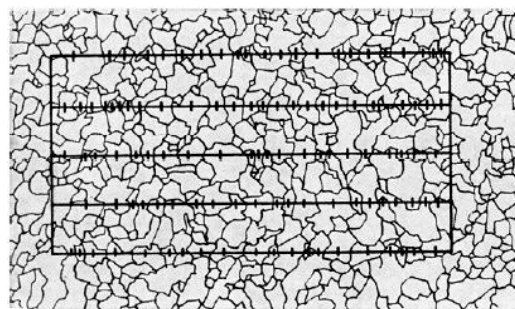
Електрични микроскоп за скенирање (SEM) користи се за прегледање и анализу површине чврстих узорака. Поседује могућност увећања 20000 пута. Добија се 3D слика узорка. Користи фокусирани сноп електрона да скенира површину узорка. Слика може да се увећа, али се увећањем слике не увећава резолуција.

Трансмисиони електрични микроскоп (TEM) користи се за анализу унутрашњих структура узорака, поседује могућност увећања до 50×10^6 . Док SEM може да скенира само површину узорка, TEM може да види кроз узорак што је велика предност у односу на SEM [8].

Метода бројања зрна обухваћених површином. На фотоснимку структуре чију величину зрна одређујемо црта се круг одређеног пречника и броје се зрна обухваћена кружницом као и зрна пресечена њом. Средња површина зрна се одређује по дефинисаном обрасцу, након тога може се одредити и средњи пречник зрна.



Слика 7.7. Бројање зрна обухваћених површином



Слика 7.8. Бројање зрна по линији

Бројање зрна по линији. На фотоснимку структуре непознате величине зрна црта се мрежа са p линија, неке усвојене дужине l , а затим се броје зрна пресечена тим линијама.

7.6 ИСПИТИВАЊЕ ПРОКАЉИВОСТИ

Прокаљивост представља технолошку особину материјала да се закали до одређене дубине. Како се при извођењу каљења не може остварити иста брзина хлађења површинског слоја и језгра предмета обраде, то се не може добити иста тврдоћа по целокупној запремини. Површински слој у току каљења се интензивно хлади, тако да је брзина хлађења већа од критичне брзине хлађења, па се у тој зони добија мартензитна структура односно највећа тврдоћа дела. Што више идемо у дубину тврдоћа се смањује али се повећава жилавост материјала. Почев од површинског слоја према језгру дела смањује се интензитет хлађења, односно брзина хлађења опада. На некој дубини од површинског слоја, која је одређена критичним пречником D_k , брзина хлађења добија вредности критичне брзине хлађења V_k , односно интензитет хлађења је такав да крива хлађења тангира криву почетка трансформације у дијаграму изотермалне трансформације.

Језгро предмета обраде хлади се са интензитетом који не обезбеђује добијање мартензитне структуре, односно крива хлађења задира у део дијаграма изотермалне трансформације и настаје бејнитна или перлитна структура.

Фактори који имају највећи утицај на дубину окаљене зоне односно критичну брзину хлађења су:

- хемијски састав,
- хомогеност и величина аустенитног зрна,
- температура аустенитизације,
- присуство нерастворених карбида и неметалних укључака и
- начин израде челика и његова предходна обрада.

Сви фактори који утичу на смањење критичне брзине хлађења обезбеђују добијање мартензитне структуре по већој дубини предмета обраде. Највећи утицај свакако имају присутни легирајући елементи, посебно хром, молибден, кобалт и др.

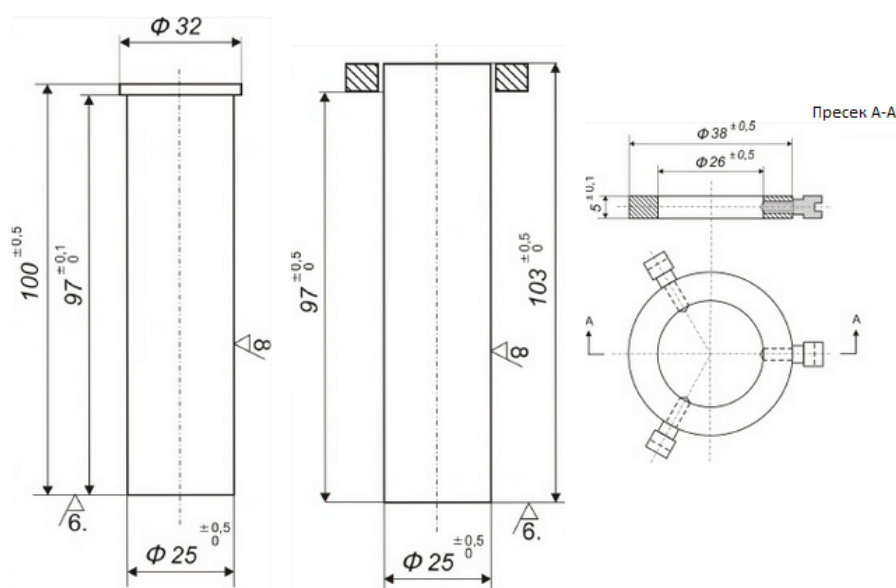
За одређивање дубине окаљене зоне, односно дубине прокаљивости, у пракси се користе двр методе, и то:

- метода чеоног хлађења - Џомини метода (*Jominy*),
- метода свестраног каљења - Гросман метода

Код поменутих метода као мерило прокаљивости усваја се дубина отврдњавања, тј. растојање од хлађене површине до места са критичном тврдоћом, односно места са тврдоћом 50% мартензитне структуре за дати челик (или 50 HRC за средње угљенични челик). Величина ове критичне тврдоће зависна је првенствено од садржаја угљеника.

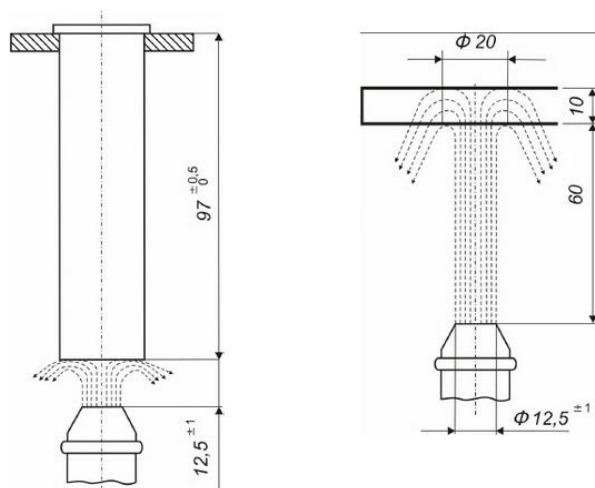
Прокаљивост се најчешће одређује по Џомини методи и она омогућава да се установи промена тврдоће по дубини после чеоног хлађења и да се на основу тих промена донесе закључак о погодности челика за термичку обраду каљењем.

Узорак из кога се израђује епрувета за испитивање прокаљивости мора бити нормализован. Ако је узорак знатно већих димензија, онда се ковањем доводи на мере блиске пречнику епрувете, а после нормализације обрађује се на завршне мере. На слици 7.9. су приказане епрувете за испитивање са датим димензијама.



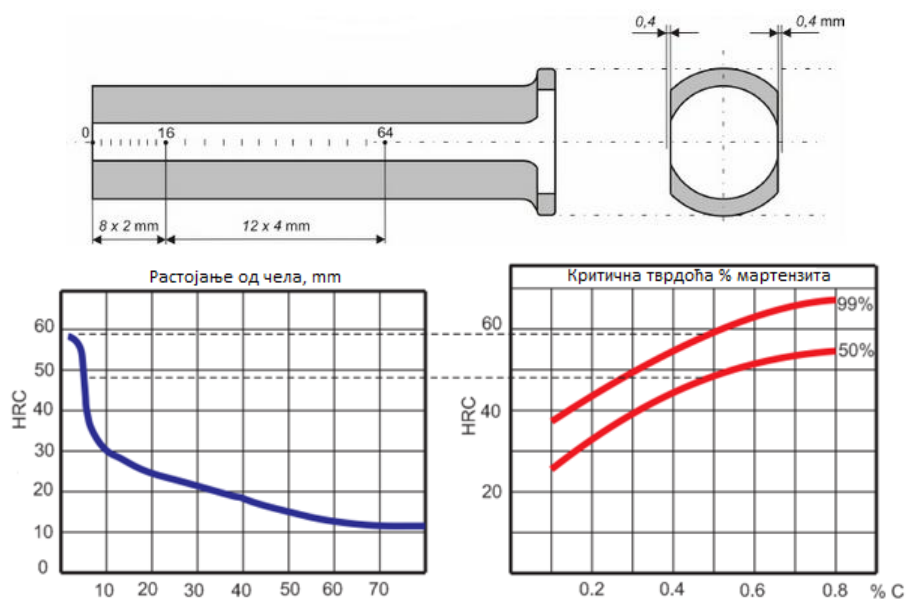
Слика 7.9. Епрувете за испитивање прокаљивости Џомини методом

Ток и услови испитивања. Епрувета са којом се врши испитивање мора имати облик, мере и квалитете обраде према цртежу. Чеона површина мора бити полирана (због хлађења), док ивице чеоне површине морају остати оштре. Загревање епрувете мора се извршити у неутралној атмосфери. У недостатку исте, користи се заштитна кутија са или без поклопца, у коју се ставља мало материјала богатог угљеником (нпр.: опилци сивог лива, графит, кокс и тсл.). Загревање епрувете врши се у пећима из којих се епрувета може лако и брзо извадити. Пећи морају да су такве електричне снаге, да се епрувета загреје до температуре каљења највише за 40 мин. са тачношћу регулације температуре $\pm 5^{\circ}\text{C}$. По истеку трајања времена загревања на температури каљења од 30 мин. епрувета се преноси до уређаја за чеоно хлађење [6, 7].



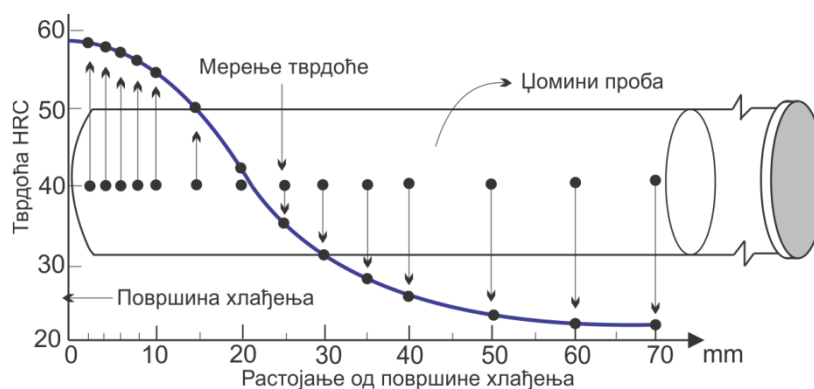
Слика 7.10. Чеоно хлађење

Уређај треба да је близу пећи, да температура каљења не падне испод критичне температуре. Хлађење се врши у кади и то прскањем чеоне површине. Када се комад охлади приступа се одређивању дубине закаљеног слоја, односно слоја са 50% мартензитном структуром (сл. 7.11).



Слика 7.11. Одређивање дубине окаљене зоне Џомини методом

На исправно брушеним површинама мери се ток промене тврдоће, по методи Викерс или Роквел, дуж једне изводнице и то за првих 8 тачака на одстојању 2 mm, а надаље на одстојању 4 mm. Тврдоћа се може мерити на више обрушених површина једне епрувете. При мерењу тврдоће положај сваке тачке мора бити тачно одређен, у подужном и попречном правцу, што се понекад обезбеђује коришћењем уређаја за померање епрувете. Резултати мерења тврдоће се уносе табеларно у извештај о испитивању као и у дијаграм величине тврдоће - одстојање од чела. Дубина прокаљивости одређује се на основу дијаграма зависности тврдоће челика од садржаја угљеника, и преношењем критичне тврдоће на криву прокаљивости (сл 7.12).



Слика 7.12. Крива прокаливаемости. Тврдоћа у зависности од растојања од чеоне површине хлађења

Као што је већ речено, на повећање прокаливаемости највише утиче садржај легирајућих елемената али с обзиром да су у угљеничним челицима присутни углавном Si и Mn повећање прокаливаемости није значајно. Потребна дубина закаљене зоне се остварује, пре свега, избором расхладног средства [6, 7].

7.7 ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА

Испитивања без разарања се базирају на испитивању материјала без његовог разарања као што је то случај при металографији или пак при затезању и удару. Предност ових испитивања је могућност добијања информација о стању унутар материјала које никако не можемо видети споља. Користе се пре свега у сврху контроле обављања процеса термичке обраде и контроле добијених делова. Испитивања без разарања се могу поделити на: претходна, текућа и завршна.

Претходна контрола. Претходном контролом се могу проверавати комади на улазу, односно њихово стање пре термичке обраде. Уколико комади имају унутрашње грешке које су потенцијални концентратори напона, оне се услед излагања термичким шокovima могу “активирати” и проширити што доводи до шкарта.

Текућа контрола обухвата испитивање комада после завршене једне етапе термичког третмана, нпр. после првог каљења.

Завршна контрола обухвата контролисање готових комада. С обзиром да испитивања без разарања спадају у релативно скупу контролу, она се користе код одговорнијих конструкција.

У испитивања без разарања спадају:

- визуелна контрола комада,
- радиографија (x и γ зраци),
- ултразвучна контрола и
- пенетрантна и магнетна дефектоскопија.

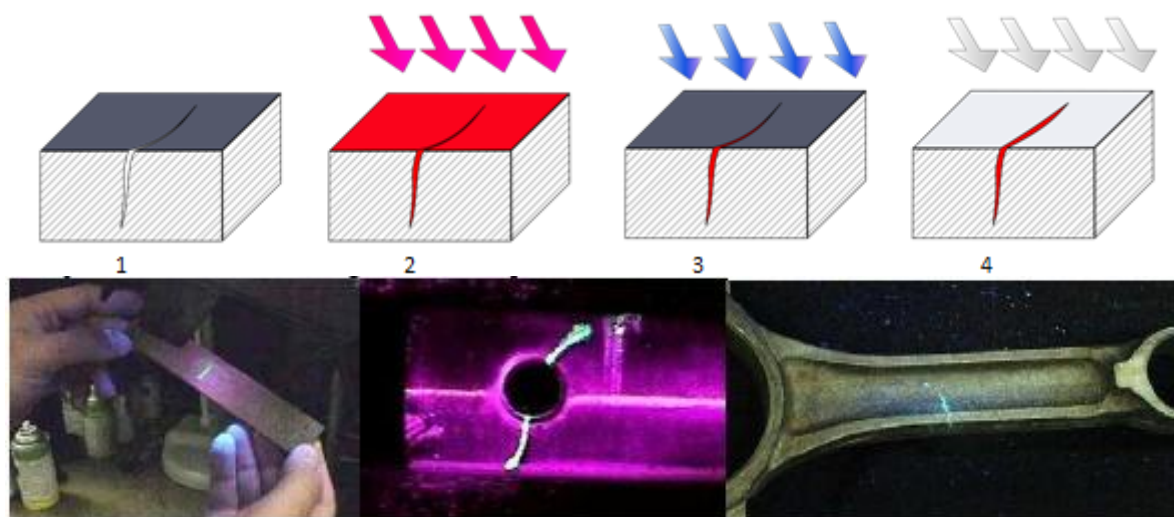
За термички обрађене делове се користе прва и последња од горе наведених.

Визуелна контрола. Најједноставнији и наравно најзаступљенији вид контроле јесте визуелна контрола комада. Наравно, овакав вид контроле представља обавезу и служи као почетни стадијум контролисања елемента алата. Визуелном контролом се могу уочити површинске грешке на комаду али се за озбиљнију контролу термички обрађених делова најчешће користи пенетрантна или магнетна дефектоскопија.

Пенетрантна или капиларна дефектоскопија је један од најстаријих начина контроле машинских делова. Омогућава откривање грешака које излазе на површину као нпр. поре, напрслине, нехерметичност и сл. Пенетранти су у ствари течности црвене боје мале вискозности или течности са додацима флуоресцентних материја. Испитивање се заснива на капиларном продирању течних пенетраната у површинске грешке и затим уочавању тих грешака. Стога је за овај вид контроле потребно припремити:

- средство за чишћење површине испитиваног споја (технички денатурисани алкохол, бензин, трихлоретилен),
- пенетрант,
- развијач.

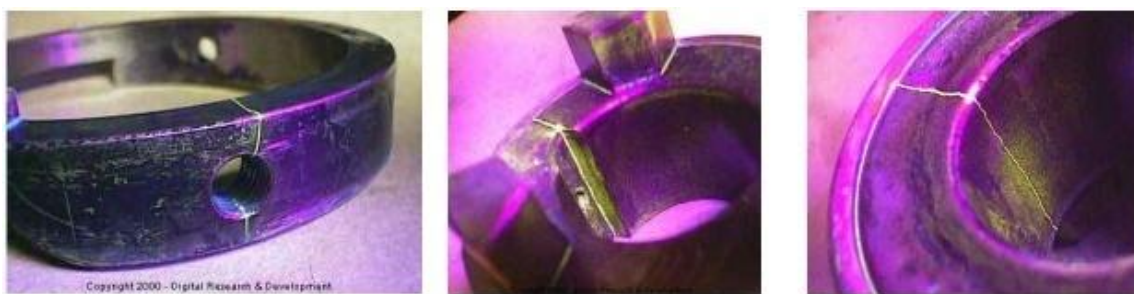
Испитивана површина се најпре пажљиво очисти, а затим нанесе пенетрант (данас углавном у облику спреја) који треба да делује 5–10 минута, после тога се растварачем уклања вишак пенетраната и слој пере водом. Најзад се наноси развијач који извлачи пенетрант стварајући црвену линију или црвене тачкице као што је приказано на слици 7.13.



Слика 7.13. Примери примене пенетраната

Магнетна метода. За утврђивање површинских грешака само код феромагнетних материјала често се примењују магнетне методе. Суштина ових метода је да се предмет који се испитује постави између полова електромагнета, кроз чије намотаје пролази једносмерна или наизменична струја. Линије магнетних сила при пролазу кроз хомогени материјал су равномерне, док наилазком магнетних линија сила на неки укључак, прслину и сл. (са другом магнетном попустљивошћу - премабилитетом) доћи де до скретања магнетних линија сила.

Да би се грешке у материјалу уочиле, обзиром да су магнетне линије невидљиве, предмет који се испитује посипа се феромагнетним прахом у трансформаторском уљу са керозином (1:1) или у алкохолу [2].

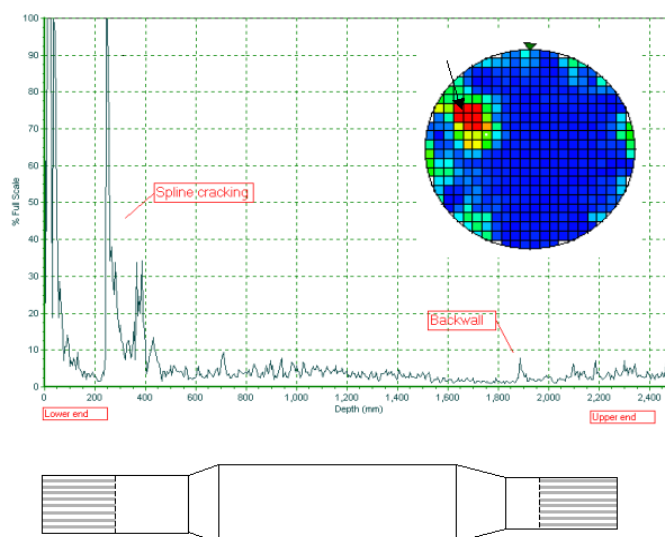


Слика 7.14. Грешке откривене магнетном методом - методом ферофлукса

Примена феромагнетних прашкова заснована је на способности феромагнетних честица, када се нађу у магнетном пољу, да се оријентишу у правцу поља и распоређују у правцу највећег повећања магнетне густине магнетних линија, тако да се у околини дефекта групишу, односно, честице феромагнетног праха се у дефекту сакупљају.

Ултразвучна метода контроле квалитета заснива се на својству ултразвука да се шири кроз хомогене материјале и да се одбија на граници материјала различитих акустичких особина (отпорности), односно од нехомогености (грешака) у материјалу. Од извора ултразвука шире се ултразвучни таласи кроз материјал који се контролише. Ако у материјалу постоји грешка, иза ње ће, зависно од врсте грешке, ултразвучни таласи ослабити или се неће појавити (одбију се од грешке).

Ултразвук је врста механичких таласа фреквенције од 20 kHz до 10 GHz, а код испитивања материјала најчешће се користе фреквенције од 0,5 MHz до 10 MHz. Иако постоје различите технике ултразвучног испитивања, обично се у пракси користи метода импулс – одјек, метода прозвучавања и метода резонанце, при чему се користе равне и/или угаоне ултразвучне главе [5].



Слика 7.15. Пример ултразвучне контроле вратила

7.8 ХИГИЈЕНСКО-ТЕХНИЧКА ЗАШТИТА ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

Да би се осигурао безбедан рад у постројењима термичке обраде неопходно је предузети одговарајуће мере заштите. Велика пажња се мора посветити унутрашњем транспорту и саобраћају јер при преношењу ужарених делова или потапању у воду или уље може доћи до незгода. Подови морају бити равни и чисти. Поред општих прописа о ХТЗ у постројењима се морају предузети и специфичне мере заштите везане за одређени процес или уређај.



Слика 7.16. Пример модерног постројења за термичку обраду (каљење+отпуштање)

Проветравање. У постројењима за термичку обраду у атмосфери се јављају угљен-моноксид, штетне паре олова и цијанидних једињења, паре уља итд. Због свега тога просторије за термичку обраду треба повремено проветравати или уградити систем аспиратора који ће “упијати” штетне гасове из ваздуха. Промаја се треба избегавати а свеж ваздух треба убацивати дуваљкама које се налазе близу калионичара тако да лако може и њима да управља.

Предострожност при раду са пећима. Што се тиче рада са пећима треба се највише обратити пажња на гасове који се око ње јављају и који могу бити запаљиви. У близини пећи, при убацивању и вађењу комада, неопходно је лична средства заштите, радну кецељу, рукавице и заштитну маску.

Још неке од општих мера су:

- после завршеног рада обавезно је туширање,
- у радној просторији је забрањено пушење и употреба отворене ватре,
- базени за каљење морају имати систем за хлађење ради одржавања жељене температуре,
- при раду са растопима олова користе се специјалне заштитне маске итд.

Када је реч о растопима соли, нарочито цијанидних треба водити рачуна о:

- цијенидне соли се морају држати у херметички затвореним посудама,
- цијанидне соли не смеју доћи у контакт са киселинама јер настају отровна испарења,

- просторија мора да има вентилацију,
- средство за хлађење се мора неутралисати раствором фери-сулфата итд.

При цементацији у чврстим средствима треба се придржавати следећих мера:

- смешу за цементацију припремити у одвојеној просторији са посебним системима за вентилацију,
- да би се спречило паљење угљене прашине, у просторији не сме да се појави ватра,
- у случају пожара за гашење се користи CO_2 итд.

Поред општих прописа о ХТЗ у постројењима се морају предузети и мере заштите везане за одређени процес као што је термичка обрада. Потребно је користити елементе личне заштите као што су рукавице, заштитна кецеља и заштитна маска.



Слика 7.17. ХТЗ опрема

Пожељно је да радници без искуства најпре прођу својеврсну обуку о безбедности и правилној употреби ХТЗ опреме као и начину реаговања у екстремним ситуацијама, што и јесте пракса у модерним европским фирмама, без обзира на то да ли је ниво угрожености радника висок или низак [2, 3].

8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

8.1 ЦИЉ ЕКСПЕРИМЕНТА

Експеримент се изводи ради поређења механичких карактеристика различитих челика након појединих термичких обрада које битно утичу на структурне, механичке и експлоатационе карактеристике материјала.

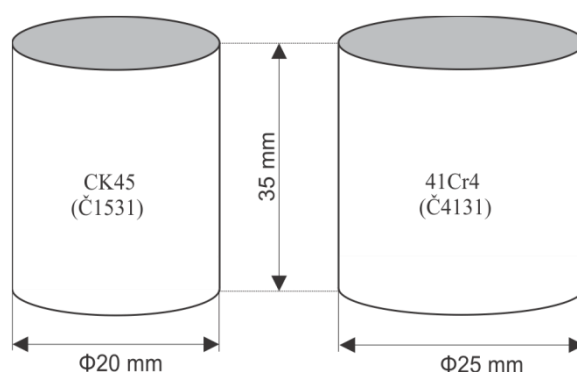
8.2 ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА

За експеримент који ће бити приказан у овом поглављу коришћене су две врсте челика намењених побољшању:

- угљенични челик CK45 (Č1531) и
- легирани челик 41Cr4 (Č4131).

За наведене типове материјала предвиђено је по десет узорака који ће бити подвргнути термичким третманима. Димензије узорака су приказане на слици 8.1, а тврдоћа пре термичке обраде дата је у табели 5.

Поред наведених узорака, коришћен је још по један узорак наведених материјала због испитивања прокаљивости, с тим што постоји извесна разлика у дужини узорака ($L=100\text{ mm}$).



Слика 8.1. Димензије узорака CK45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131)

Табела 5. Димензије и ознаке узорака

Материјал	Димензије	Број узорака	Тврдоћа
CK45 (Č1531)	$\phi 20 \times 35 \text{ mm}$	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19	280 HV
41Cr4 (Č4131)	$\phi 25 \times 35 \text{ mm}$	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	263 HV

Видови термичке обраде које је потребно извршити над наведеним узорцима дате су у табели 6.

Табела 6. Видови термичке обраде

Жарење	Каљење	Отпуштање
потпуно	континуално	ниско
нормализационо	у два средства	средње
изотермално	-	високо

Након извршене термичке обраде, потребно је приказати измерене резултате тврдоће за сваки наведени поступак, упоредити резултате и одредити прокаљивост материјала.

8.3 МАТЕРИЈАЛИ УЗОРАКА

За извођење експеримента коришћени су челици за побољшање. Термичком обрадом челика намењених побољшању постиже се висока вредност напона течења затезне чврстоће, релативно добра пластичност, мала осетљивост на концентрацију напона и релативно висока жилавост. Челици за побољшање се могу поделити на угљеничне и легиране.

Угљенични челици за побољшање садрже око 0.2 до 0.6 % С што обезбеђује максималну тврдићу од око 63 HRC. И поред велике тврдоће после термичке обраде ових челика, затезна чврстоћа, услед мале прокаљивости, се креће у границама од 550 – 1000 MPa у зависности димензија. Угљенични челици за побољшање се приминују како у побољшаном стању тако и у нормализованом стању.

Легирани челици за побољшање погодни су за израду делова релативно већих димензија (до 250 mm) оптерећених ударним и наизменичним оптерећењима. Могу бити легирани хромом, никлом и молибденом.

За извођење експеримента коришћена су два челика и то:

- угљенични челик SK45 (Č1531) и
- легирани челик 41Cr4 (Č4131).

8.3.1 Челик CK45 (Č1531)

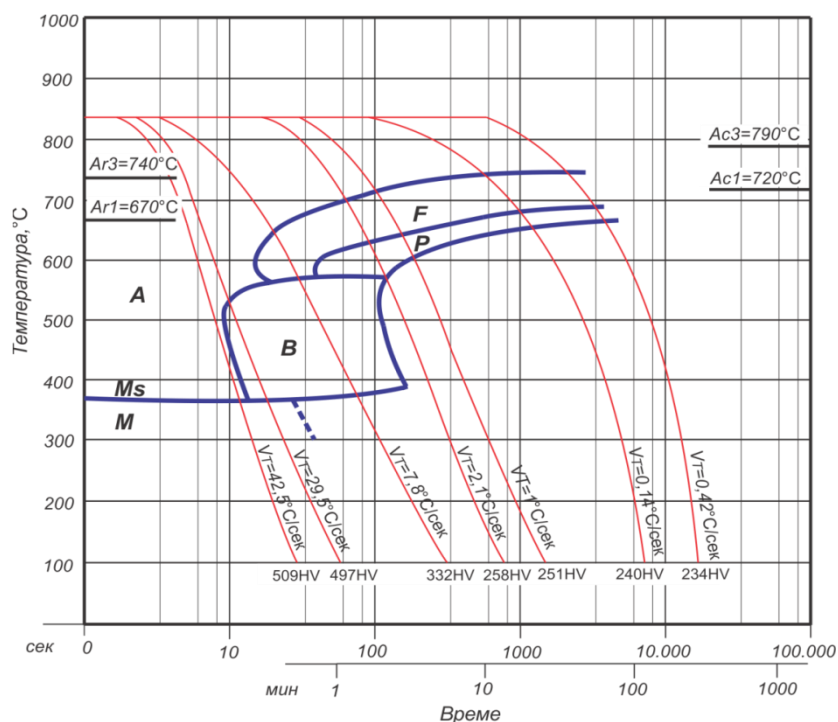
Спада у групу квалитетних средњеугљеничних челика намењених побољшању и по потреби површинском каљењу, са садржајем угљеника од 0.42 - 0.50% С. Поред угљеника присутне су и примесе силицијума и мангана као и одређени проценат нежељених нечистоћа.

Табела 7. Хемијски састав челика CK45 (Č1531)

Упоредне ознаке челика	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %	Остало
ISO: CK45 JUS: Č1531 EN: CK45E DIN: CK45	0.42-0.50	0.15-0.35	0.50-0.80	max 0.4	max 0.1	0.4	-

Челик CK45 (Č1531) у каљеном стању има просечну тврдоћу од око 58 HRC. На малој удаљености од закаљене површине (5 - 6 mm) тврдоћа почиње да пада па се може рећи да прокаљивост није баш идеална. Може се примењивати и у нормализованом и у побољшаном стању али се не може користити за рад на ниским температурама (испод 20 °C). Пад температуре са +20°C на -30°C доводе до осетног пада жилавости ових челика. Испод -30°C може доћи до лома и при ниским напрезањима. Препорука је да се не употребљавају за рад на температурама нижим од -20°C. Нису добро заварљиви због високог садржаја угљеника. Уколико се ипак заварују треба применити посебне мере предгревања, контролисаног уноса топлоте и накнадне термичке обраде како би процес био успешан. Овај челик није склон образовању прслина услед заваривања. Отпорност на хабање је изражена нарочито код површински каљених делова. Отпорност на хабање се може повећати поступком нитрирања у соним купатилима. Површинско каљење се примењује после побољшања челика [10].

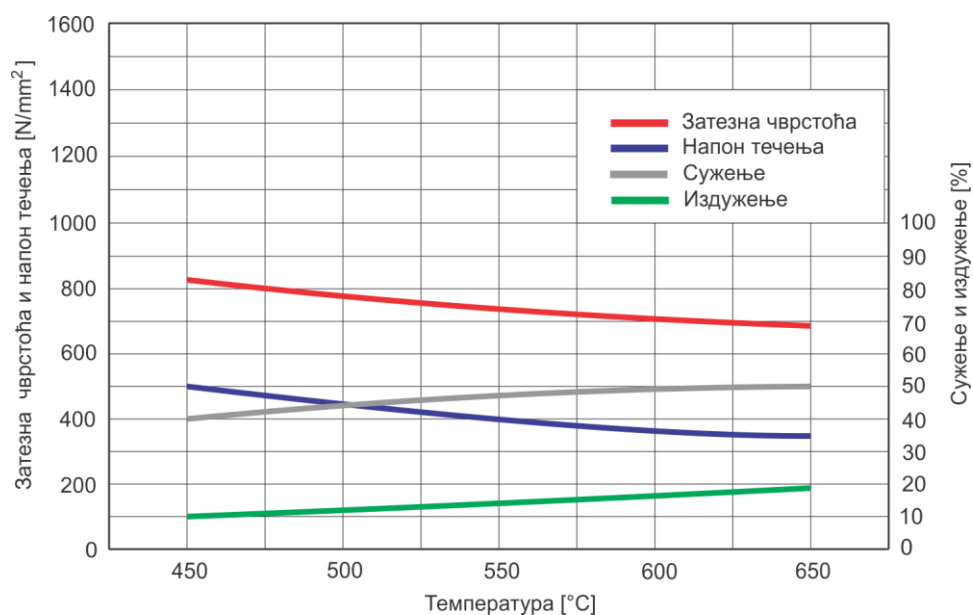
Употреба: Користи се у нормализованом, побољшаном или каљеном стању за делове средње чврстоће као што су: зупчаници, осовине, чауре, вратила итд.



Слика 8.2. Дијаграм континуалног хлађења за челик СК45 (Č1531) [10]

Табела 8. Механичке карактеристике челика СК45 (Č1531)

Димензије, mm	Напон течења $R_{p0,2}$, MPa	Затезна јачина R_m , MPa	Издужење, %	Суужење, %
do 16	480	700-850	14	30
od 16 do 40	410	660-810	16	35
od 40 do 100	375	620-770	17	40



Слика 8.3. Механичке карактеристике челика СК45 (Č1531) [10]

Физичке карактеристике челика SK45 на собној температури су:

- модул еластичности $190-210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$
- густина 7.84 g/cm^3
- топлотна проводност $15.1 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$

Препоруке произвођача за термичку и механичку обраду:

- меко жарење: температура загревања $650-700 \text{ }^\circ\text{C}$, споро хлађење.
- каљење: температура загревања $820-860 \text{ }^\circ\text{C}$, хлађење у води или уљу.
- нормализација: $820 \text{ }^\circ\text{C}$ температура загревања, умерено хлађење.
- ковање: $850-1050 \text{ }^\circ\text{C}$.

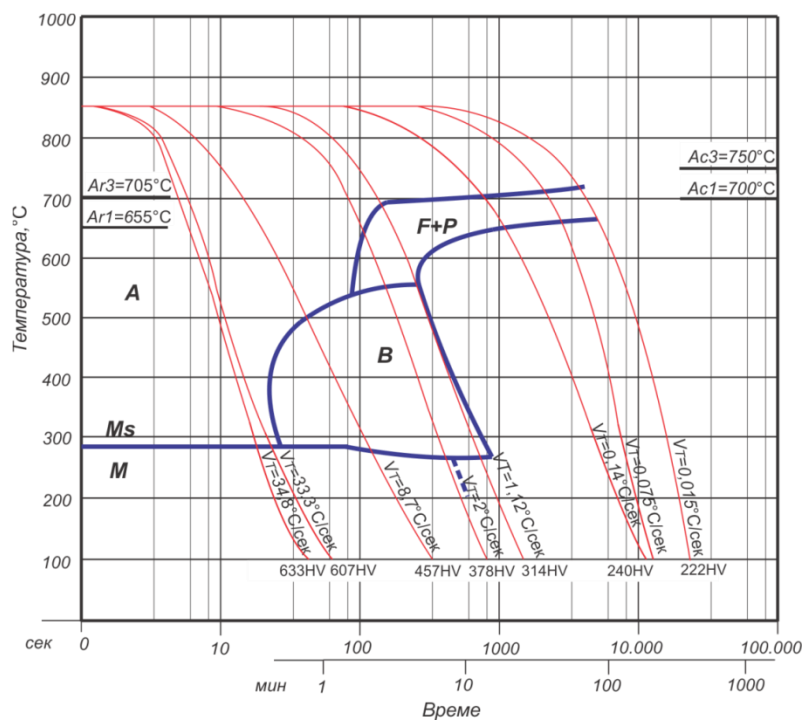
8.3.2 Челик 41Cr4 (Č4131)

Спада у групу квалитетних легирајућих челика намењених побољшању и по потреби површинском каљењу, са садржајем угљеника од $0.41\% \text{ C}$.

Табела 9. Хемијски састав челика 41Cr4 (Č4131)

Упоредне ознаке челика	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Остало
ISO: 41Cr4 JUS: Č4131 EN: 41Cr4 DIN: 41Cr4	0.41	max 0.4	0.75	1.05	-

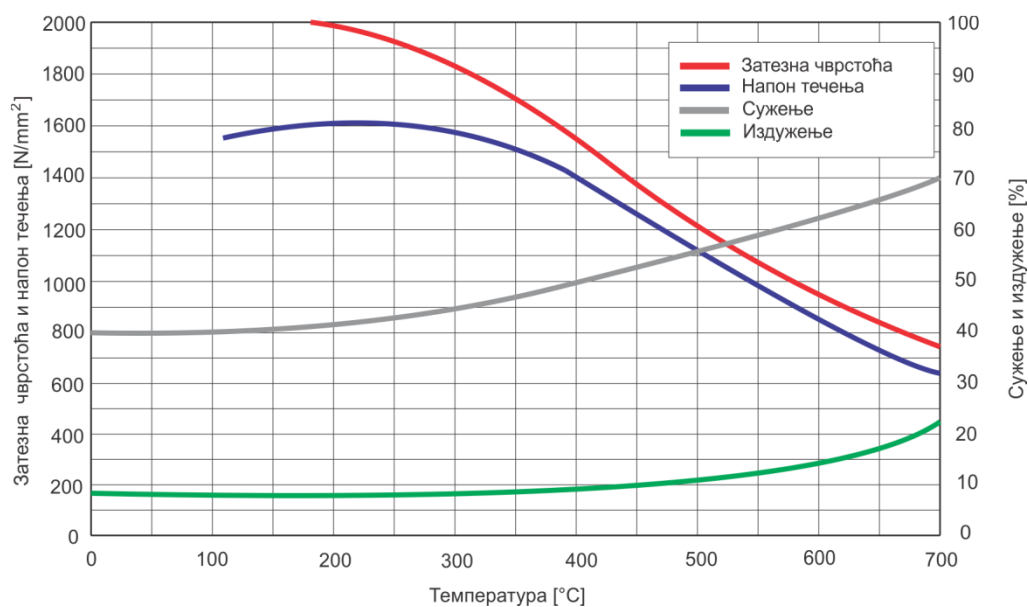
Челик 41Cr4 (Č4131) има просечну тврдоћу у каљеном стању око 56 HRC. Овај челик је склон образовању прслина због чега се практикује каљење у уљу и није погодан за заваривање топлеем. Челик 41Cr4 има повећану ударну жилавост на ниским температурама и температура хладног лома се помера ка нижим температурама. Изузетно велика отпорност на хабање код челика 41Cr4 се постиже површинским каљењем већ побољшаног материјала.



Слика 8.4. Дијаграм континуалног хлађења за челик 41Cr4 (Č4131) [10]

Табела 10. Механичке карактеристике челика 41Cr4 (Č4131)

Димензије, mm	Напон течења $R_{p0,2}$, MPa	Затезна јачина R_m , MPa	Издужење, %	Сужење, %
do 16	800	1100-1200	10	30
od 16 do 40	660	900-1100	12	35
od 40 do 100	560	800-950	14	40



Слика 8.5. Механичке карактеристике челика 41Cr4 (Č4131) [10]

Физичке карактеристике челика 41Cr4 на собној температури су:

- модул еластичности $210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$
- густина 7.85 g/cm^3

Препоруке произвођача за термичку и механичку обраду:

- Меко жарење: температура загревања 680-720°C, споро хлађење.
- Каљење: температура загревања 820-860°C, хлађење у води или уљу.
- Нормализација: 820-860°C температура загревања, умерено хлађење.
- Ковање: 850-1050°C.

Употреба: Примењује се код мотора са унутрашњим сагоревањем и других погонских механизма [10].

8.4 ОПРЕМА ЗА ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

8.4.1 Пећи за загревање

За загревање узорака коришћене су три врсте пећи. По конструкцији пећи спадају у једнокоморне без система за постепено загревање и одлагање радних комада. Извођен је процес директног загревања узорака, без заштитне атмосфере.

На слици 8.6 су приказане пећи у коме су вршени процеси термичке обраде жарења, каљења и отпуштања.



Слика 8.6. Пећи за загревање

8.4.2 Термометар ST-8855

ST-8855 инфрацрвени термометар марке „Tagor“ представља професионални мобилни уређај за бесконтактно мерење површинске температуре.



Слика 8.7. Инфрацрвени бесконтактни термометар ST-8855.

Омогућује брзо, лако и прецизно читавање мера помоћу бежичног USB интерфејса (RF 433 MHz).

Однос мерног одстојања инфрацрвеног термометра према величини мерне тачке износи 30:1. То значи да се при мерењу површина на већој удаљености повећава мерна тачка. Код одстојања од 380 *mm* пречник мерне тачке износи 12 *mm*, док при одстојању од 180 *mm* пречник мерне тачке износи 6 *mm*. Тако се при мањим мерним растојањима може измерити температура веома малих објеката.

8.4.3 Термовизијска камера FLIER E50

Термовизијска камера даје приказ слика са приказом температуре у одређеној мерној тачки. Нови детектори од 160 x 120, 240 x 180 и 320 x 240 на фреквенцији рада од 50 *Hz* омогућују интензиван рад без пропустања детаља, док велики *LCD* екран са *touchscreen* опцијом и пуно алатки омогућује фино подешавање анализа слика на терену.

На слици 8.8 је приказана камера са датом сликом објекта мерења и сликом са приказаном измереном температуром.



Слика 8.8. Термовизијска камера FLIER E50

8.4.4 Апарат за мерење тврдоће по Викерс методи

Мерење тврдоће по Викерс методи је количник силе утискивања и површине отиска кога оставља дијамантна четворострана пирамида са углом 136° и квадратном основом.

Тврдоћа по Викерсу одређује се на основу израза:

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

Где је:

F - Сила утискивања, N ;
 d - Дијагонала отиска.



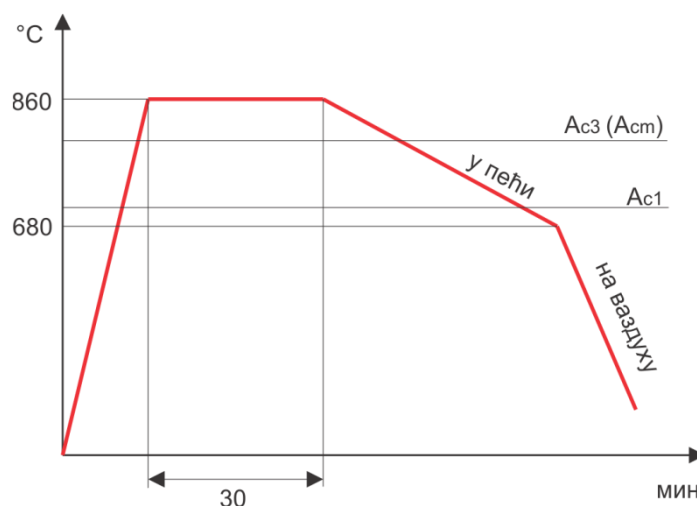
Слика 8.9. Мерење тврдоће по Викерс методи

Основна одлика методе Викерс је да нема ограничења при испитивању, тако да се овом методом може мерити тврдоћа и меких и тврдих материјала. Такође нема неких ограничења у погледу величине силе утискивања, која се креће у врло широким границама од 0,01 до 1000 N.

8.5 ТОК И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

8.5.1 Потпуно жарење

Потпуно жарење је вршено на узорцима 1 и 2 на температури од 860°C у већ загрејаној пећи.



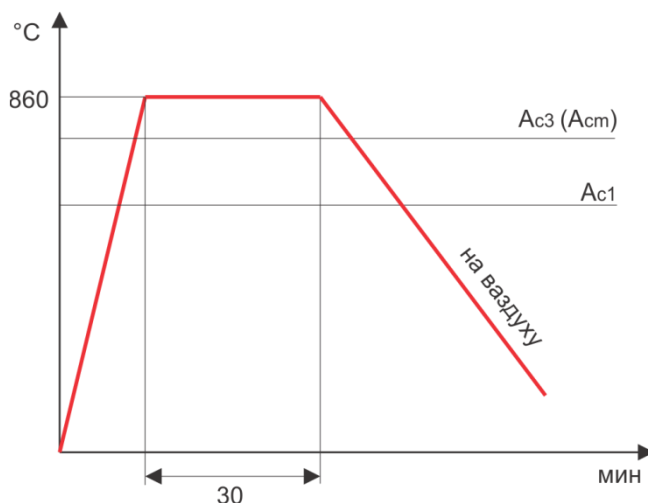
Слика 8.10. Потпуно жарење

Након достизања температуре узорака од 860°C, вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 30 минута а затим су се

узорци хладили у пећи до 680°C , односно нешто испод A_{c1} и даље су се хладили на ваздуху, до собне температуре. Описани процес потпуног жарења дат је на слици 8.10.

8.5.2 Нормализационо жарење

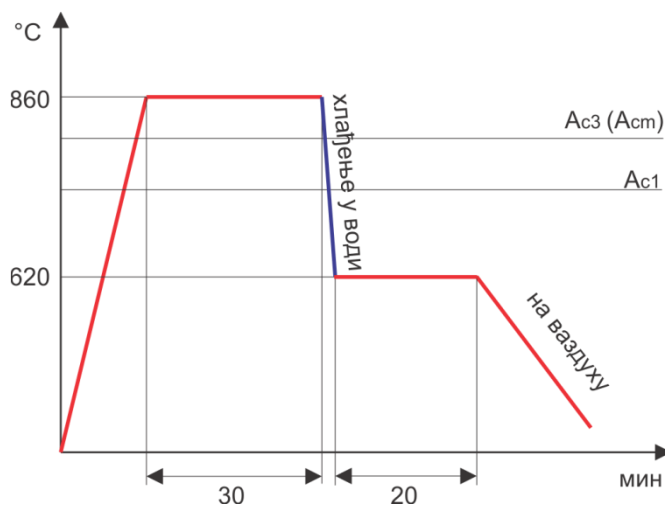
Нормализационо жарење је вршено на узорцима 3 и 4 на температури од 860°C у већ загрејаној пећи. Након достизања температуре од 860°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 30 минута а затим су се узорци хладили на ваздуху. Описани процес нормализационог жарења дат је на слици 8.11.



Слика 8.11. Нормализационо жарење

8.5.3 Изотермално жарење

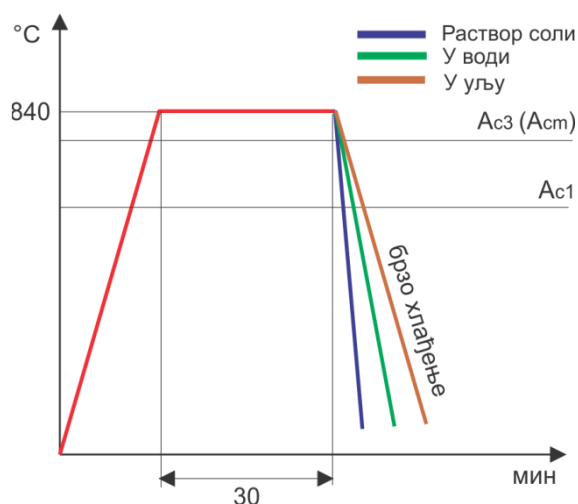
Изотермално жарење је вршено на узорцима 5 и 6 на температури од 860°C у већ загрејаној пећи. Након достизања температуре од 860°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 30 минута, затим су се узорци нагло хладили до температуре од 620°C а потом и задржавали на тој температури у временском интервалу од 20 минута. Након задржавања следило је лагано хлађење на ваздуху. Описани процес изотермалног жарења дат је на слици 8.12.



Слика 8.12. Изотермално жарење

8.5.4 Континуално каљење

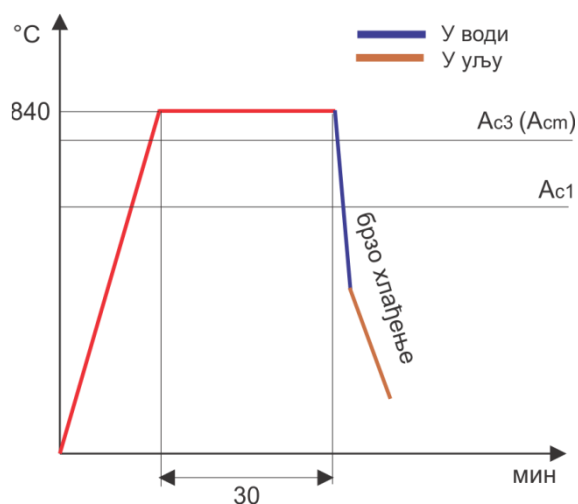
Континуално каљење је поступак загревања узорака на температури од 840°C у већ загрејаној пећи. Након достизања температуре од 840°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 30 минута а затим су се узорци нагло хладили до температуре раствора за хлађење. За нагло хлађење користиле су се три различита средства: вода, вода са раствором соли и уље. Континуално каљење је вршено на узорцима 7 и 8 са хлађењем у води, 9 и 10 са хлађењем у раствору соли и узорци 11 и 12 са хлађењем у уљу. Описани процес континуалног каљења дат је на слици 8.13.



Слика 8.13. Континуално каљење

8.5.5 Каљење у два расхладна средства

Каљење је вршено на узорцима 13 и 14 на температури од 840°C . Загревање узорака било је заједно са загревањем пећи до достизања дате температуре.



Слика 8.14. Каљење у два расхладна средства

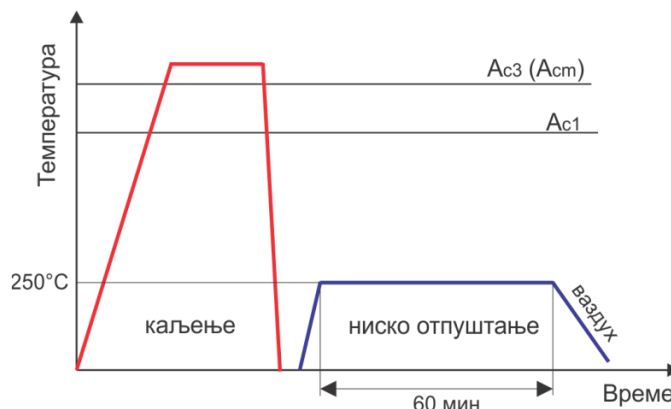
Након достизања температуре од 840°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 30 минута а затим су се узорци нагло хладили у води до температуре која одговара њиховим дијаграмима (слике 8.2 и

8.4) а то су температуре око 520°C (СК45), односно око 420°C (41Cr4). Након хлађења у води до температура датих, вршено је даље хлађење у уљу до собне температуре.

Напомена: У зависности од КХ дијаграма узете су две температуре прогревања 520°C (СК45) и 420°C (41Cr4) као и времена прогревања.

8.5.6 Ниско отпуштање

Ниско отпуштање је вршено на узорцима 15 и 16 на температури од 250°C .



Слика 8.15. Ниско отпуштање

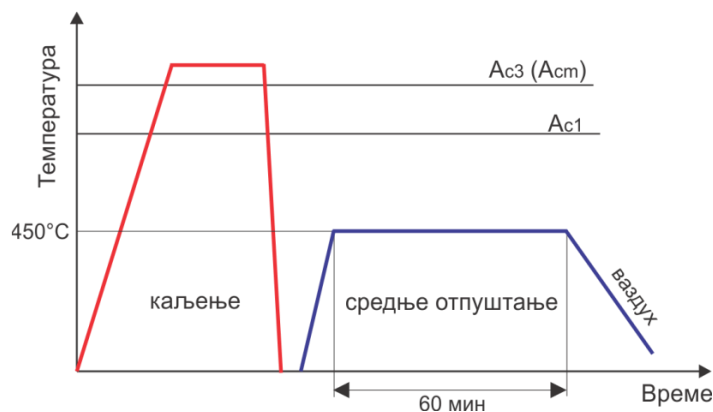
Загревање узорака вршено је у загрејаној пећи. Након достизања температуре од 250°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 60 минута а затим су се узорци хладиле на ваздуху. Описани процес ниског отпуштања дат је на слици 8.15.

Напомена: Пре отпуштања вршен је процес каљења узорака.

8.5.7 Средње отпуштање

Средње отпуштање је вршено на узорцима 17 и 18 на температури од 450°C у већ загрејаној пећи. Након достизања температуре од 450°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 60 минута а затим су се узорци хладиле на ваздуху. Описани процес ниског отпуштања дат је на слици 8.16.

Напомена: Пре отпуштања вршен је процес каљења узорака.

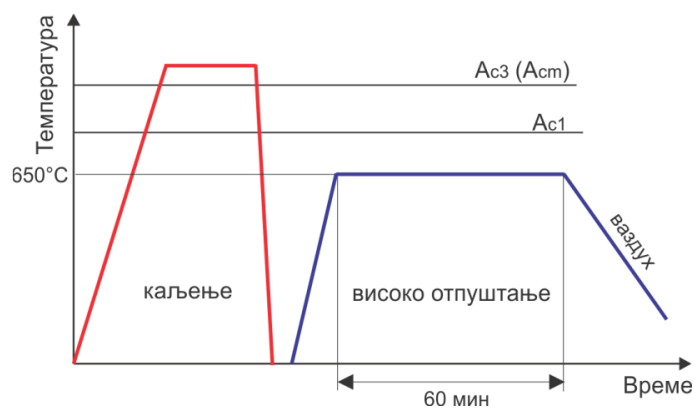


Слика 8.16. Средње отпуштање

8.5.8 Високо отпуштање

Високо отпуштање је вршено на узорцима 19 и 20 на температури од 650°C у већ загрејаној пећи. Након достизања температуре од 650°C , вршено је прогревање тј. држање на поменутој температури у временском интервалу од 60 минута а затим су се узорци хладиле на ваздуху. Описани процес ниског отпуштања дат је на слици 8.17.

Напомена: Пре отпуштања вршен је процес каљења узорака.

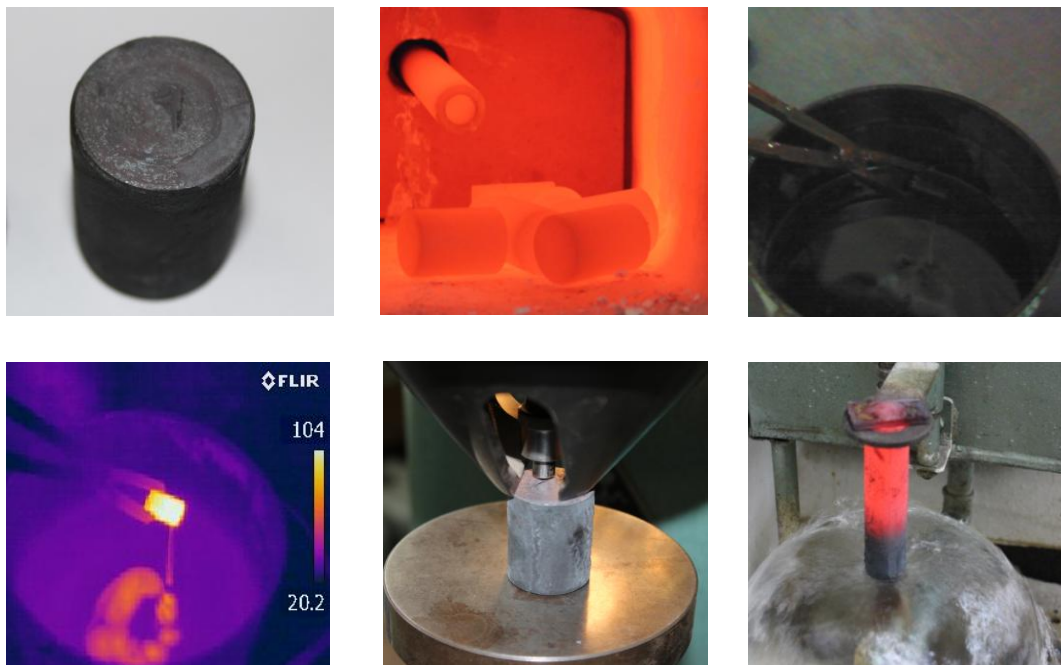


Слика 8.17. Високо отпуштање

Процес каљења са високим отпуштањем представља побољшање. Челици који се користе за ивођење експеримента припадају групи челика за побољшање, односно каљењем са високим отпуштањем дају најбољи однос тврдоће и жилавости.

8.5 РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТА

Током термичке обраде праћене су температуре и времена држања, наведене у претходној тачки, а након термичке обраде мерене су тврдоће узорака изражене у Викерсима.



Слика 8.18. Ток процеса термичке обраде

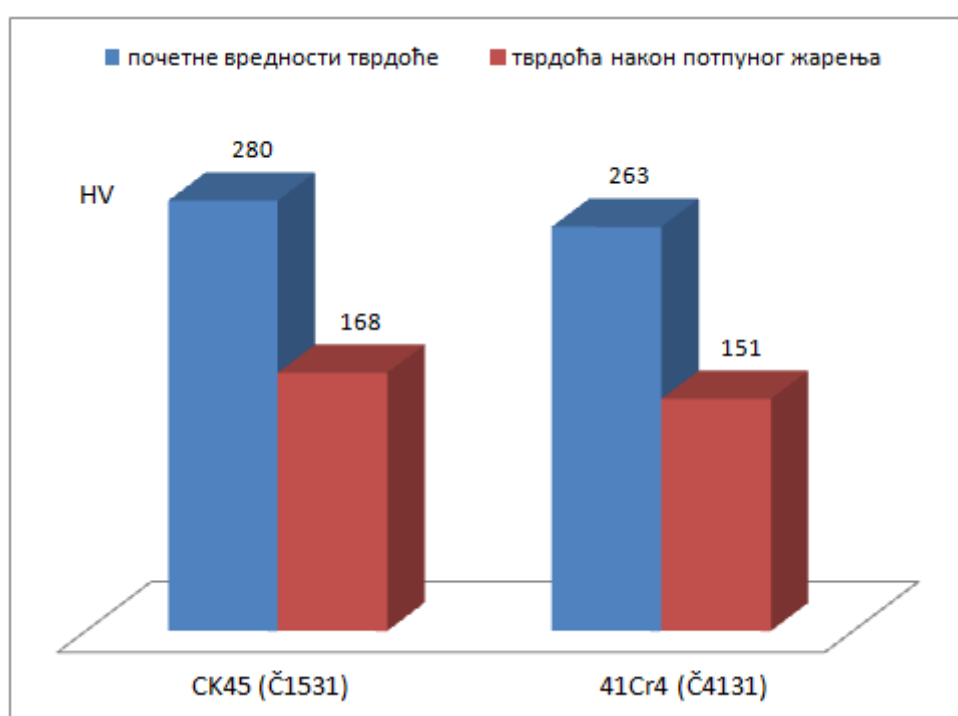
Даље су кроз рад приказане табеле и дијаграми упоредних вредности тврдоћа након појединачних видова термичких обрада за челике СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131).

У табели 11 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде потпуног жарења.

Табела 11. Потпуно жарење

Ознака челика	Број узорка	Тврдоћа, HV			
		Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	1	164	165	174	168
41Cr4 (Č4131)	2	151	151	152	151

На слици 8.19 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 1 и 2 после потпуног жарења.



Слика 8.19. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после потпуног жарења

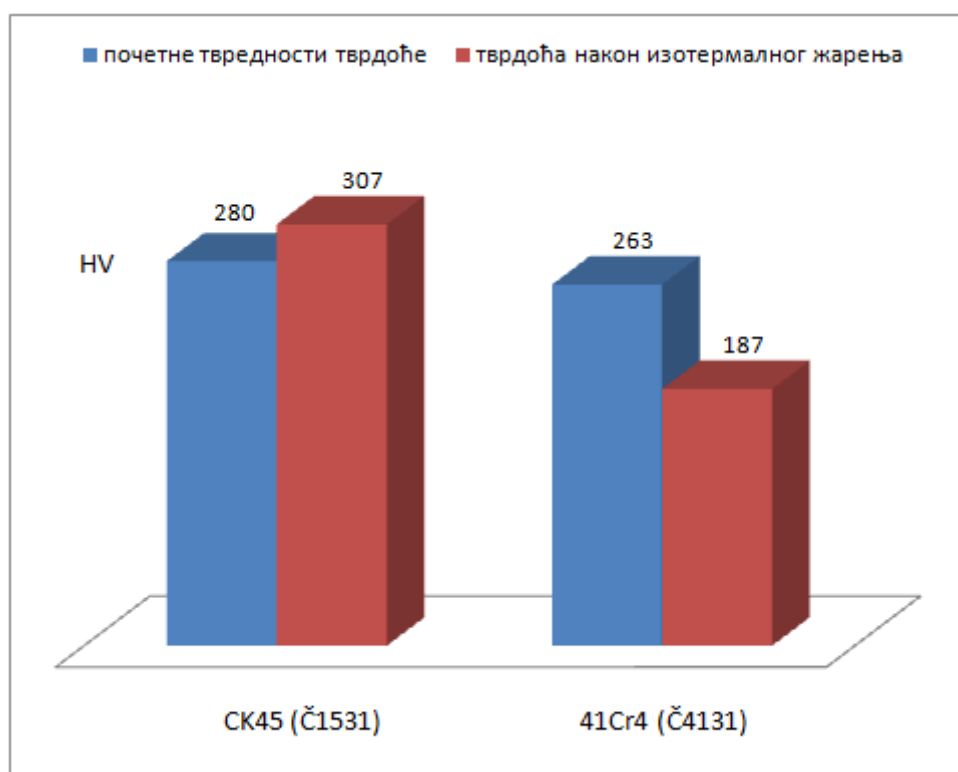
Са графика се може видети нешто већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131) али те разлике у вредностима тврдоће су мале, скоро занемарљиве.

У табели 12 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде изотермалног жарења.

Табела 12. Изотермално жарење

Ознака челика	Број узорка	Тврдоћа, HV			
		Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	3	295	315	311	307
41Cr4 (Č4131)	4	184	185	191	187

На слици 8.20 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 3 и 4 после потпуног жарења.



Слика 8.20. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после изотермалног жарења

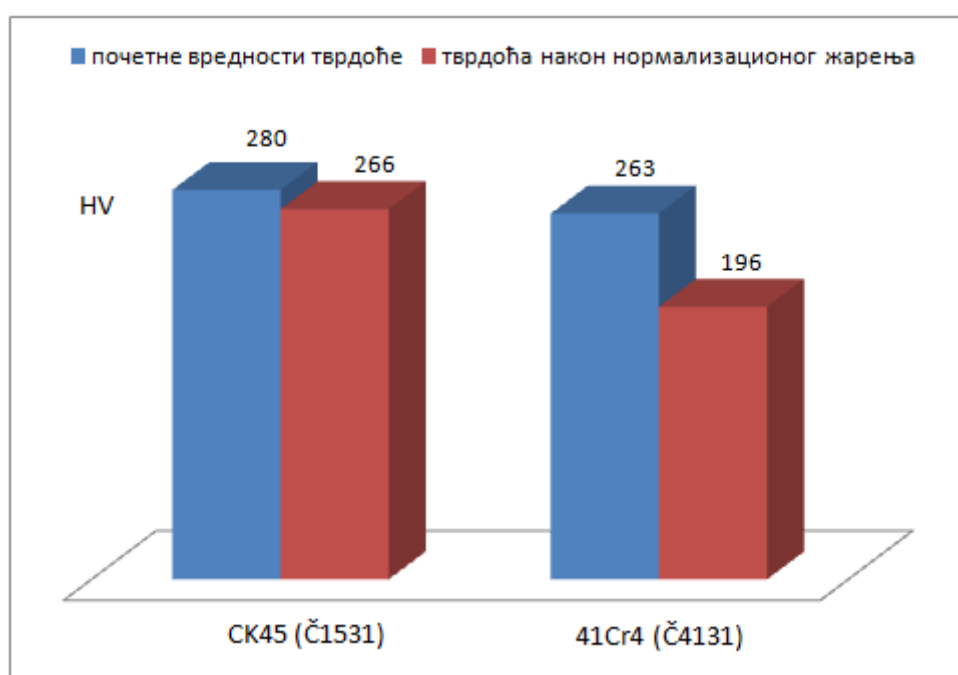
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Разлике измерене тврдоће су нешто веће него при потпуном жарењу, па се може рећи да при изотермалном жарењу веће вредности тврдоће има челик СК45 (Č1531) док је челик 41Cr4 (Č4131) мање тврдоће па је повољнији за обраду што се након термичке обраде жарењем и тражи.

У табели 13 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде нормализационог жарења.

Табела 13. Нормализационо жарење

Ознака челика	Број узорка	Тврдоћа, HV			
		Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	5	263	257	277	266
41Cr4 (Č4131)	6	192	198	197	196

На слици 8.21 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 5 и 6 после потпуног жарења.



Слика 8.21. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после нормализационог жарења

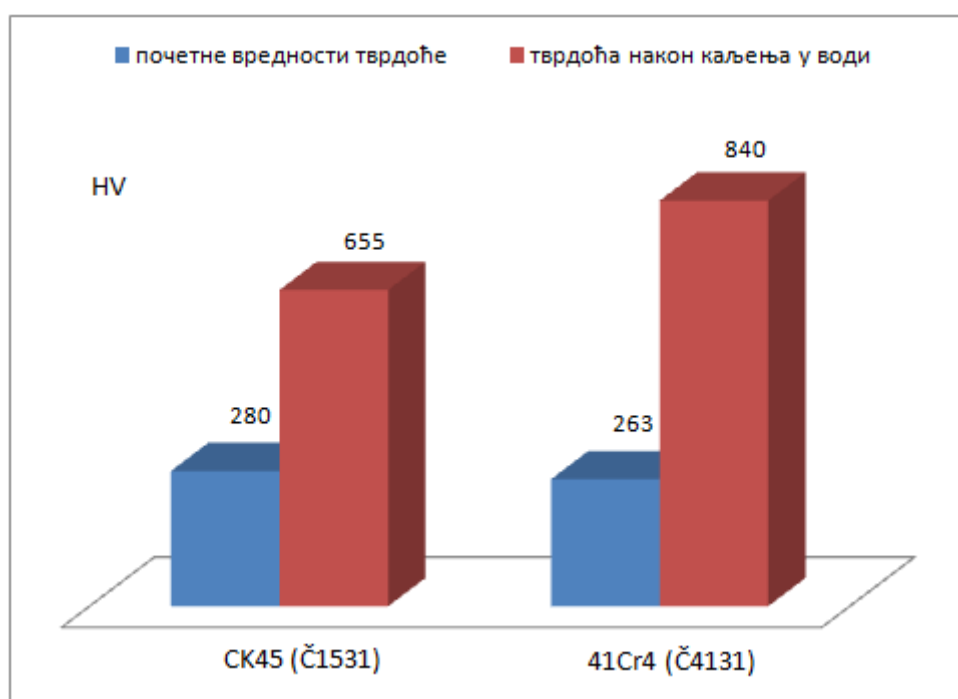
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Може се рећи да при нормализационом жарењу веће вредности тврдоће има челик СК45 (Č1531) док је челик 41Cr4 (Č4131) мање тврдоће па је повољнији за обраду што се термичком обрадом жарењем и тражи.

У табели 14 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорака после термичке обраде континуалног каљења у води.

Табела 14. Континуално каљење у води

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	7	Вода	644	671	650	655
41Cr4 (Č4131)	8	Вода	856	829	836	840

На слици 8.22 су приказане измерене вредности тврдоће узорака 7 и 8 после континуалног каљења у води.



Слика 8.22. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после континуалног каљења у води

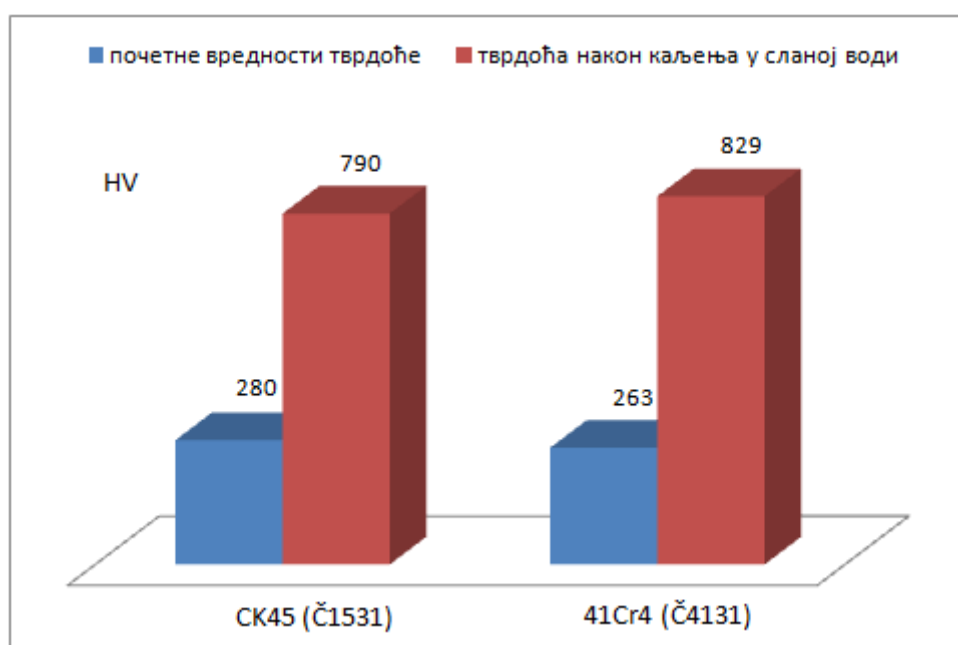
Каљење је процес термичке обраде која за резултат даје велике вредности тврдоће челика. Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика 41Cr4 (Č4131) у односу на челик СК45 (Č1531).

У табели 15 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорака после термичке обраде континуалног каљења у сланој води.

Табела 15. Континуално каљење у раствору NaCl у води

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	9	$\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$	798	786	786	790
41Cr4 (Č4131)	10	$\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$	823	842	823	829

На слици 8.23 су приказане измерене вредности тврдоће узорака 9 и 10 после континуалног каљења у сланој води.



Слика 8.23. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после континуалног каљења у сланој води

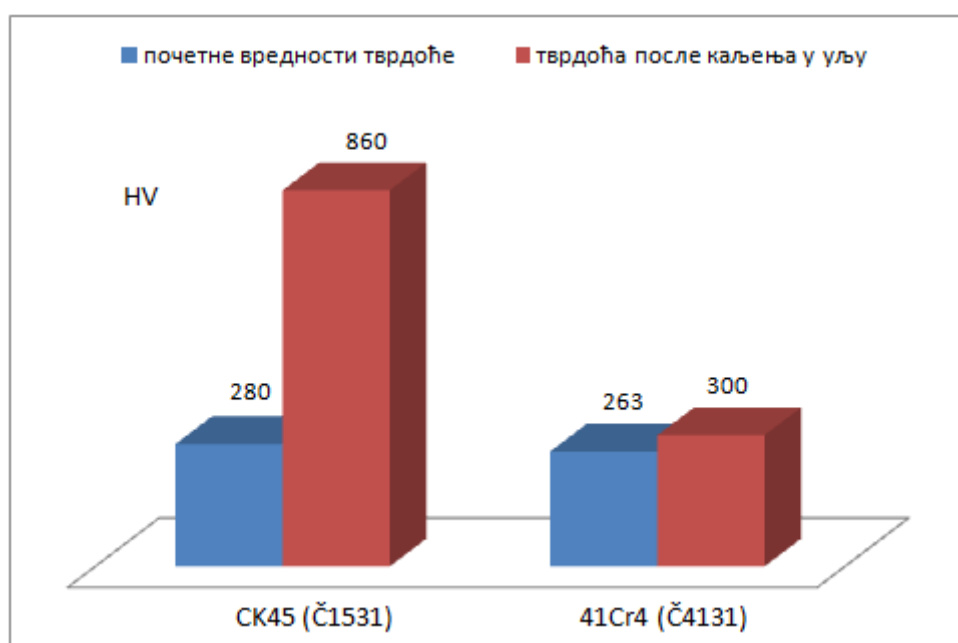
Каљење је процес термичке обраде који за резултат даје велике вредности тврдоће челика. Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика 41Cr4 (Č4131) у односу на челик СК45 (Č1531).

У табели 16 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорака после термичке обраде континуалног каљења у уљу.

Табела 16. Континуално каљење у уљу

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	11	Уље	876	856	849	860
41Cr4 (Č4131)	12	Уље	302	302	295	300

На слици 8.24 су приказане измерене вредности тврдоће узорака 11 и 12 после континуалног каљења у уљу.



Слика 8.24. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после каљења у уљу

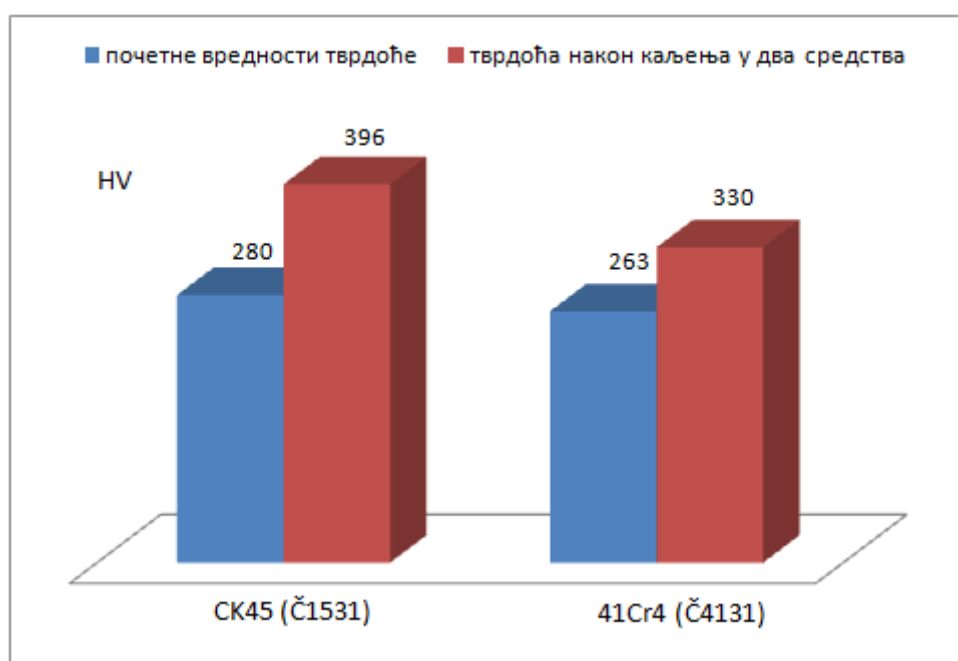
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Могу се приметити јако ниске вредности тврдоће челика 41Cr4 (Č4131) што је вероватно условљено грешком током извођења процеса термичке обраде каљења у уљу. Претпоставка је да је дошло до потхлађења епрувете и немогућности одвијања мартензитне промене у материјалу.

У табели 17 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде каљења у два расхладна средства.

Табела 17. Каљење у два расхладна средства

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	13	Вода+Уље	402	400	385	396
41Cr4 (Č4131)	14	Вода+Уље	320	331	339	330

На слици 8.25 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 13 и 14 после каљења у води и уљу.



Слика 8.25. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после каљења у два расхладна средства

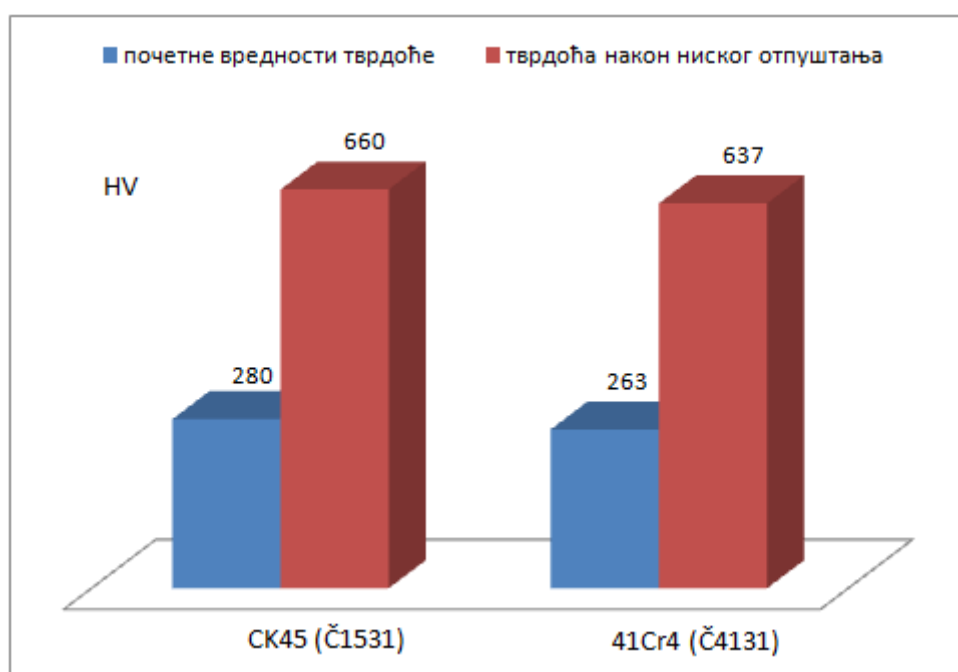
Каљење у два средства је процес термичке обраде који за резултат даје нешто ниже вредности тврдоће челика у односу на каљења у једном расхладном средству, али се добијају неке друге механичке особине. Са графика се може видети нешто већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131).

У табели 18 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде каљења са ниским отпуштањем.

Табела 18. Ниско отпуштање

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	15	Вода	652	661	666	660
41Cr4 (Č4131)	16	Вода	657	618	635	637

На слици 8.26 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 15 и 16 после каљења са ниским отпуштањем.



Слика 8.26. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после ниског отпуштања

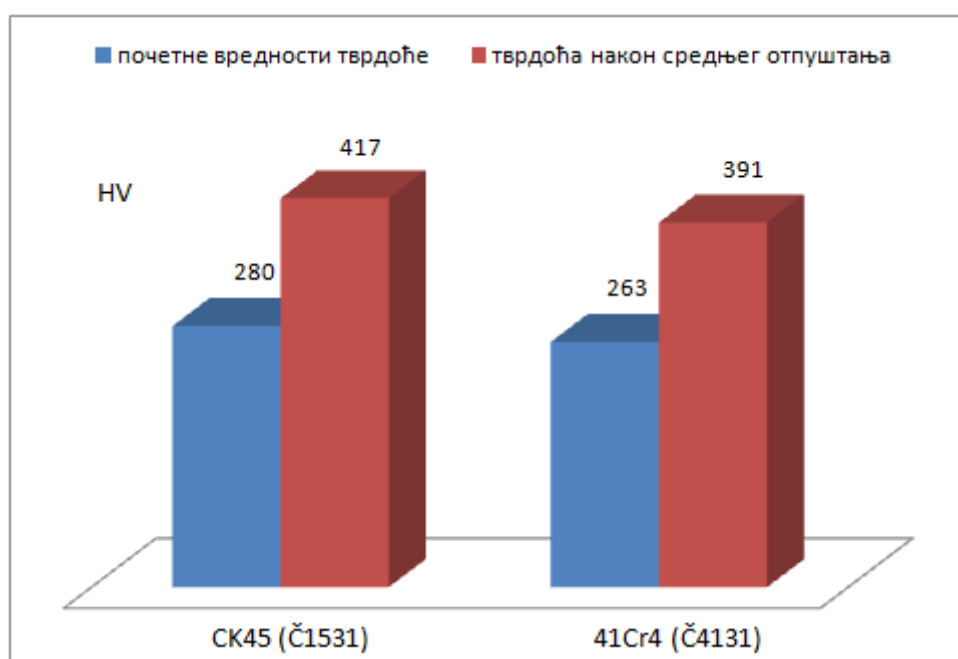
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Може се рећи да при ниским отпуштањем веће вредности тврдоће има челик СК45 (Č1531) док је челик 41Cr4 (Č4131) нешто мање тврдоће.

У табели 19 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде каљења са средњим отпуштањем.

Табела 19. Средње отпуштање

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	17	Вода	418	413	420	417
41Cr4 (Č4131)	18	Вода	406	385	381	391

На слици 8.27 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 17 и 18 после каљења са средњим отпуштањем.



Слика 8.27. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после средњег отпуштања

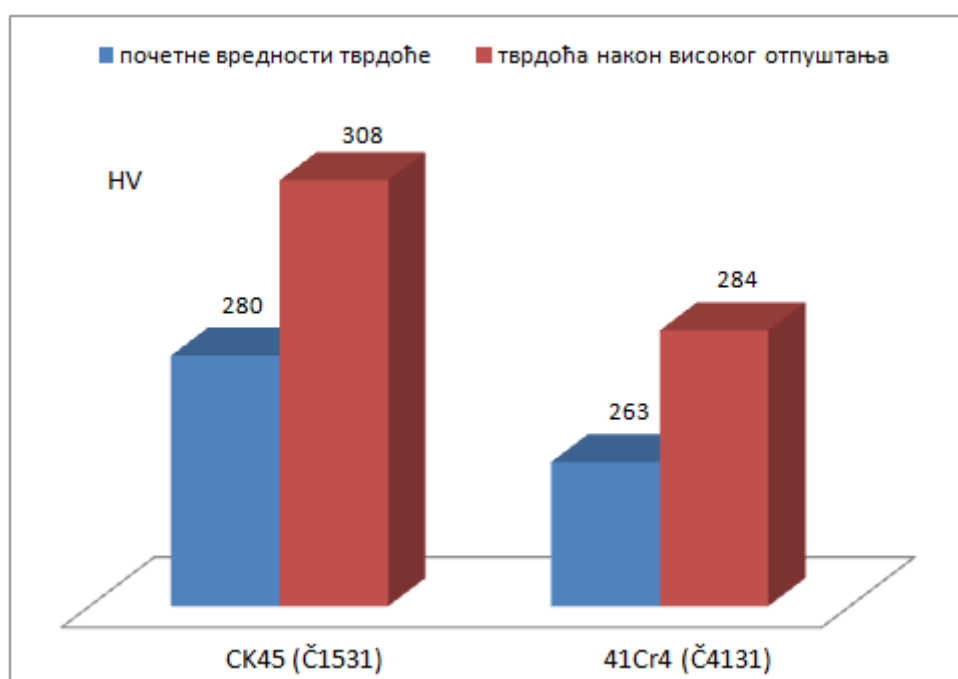
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Може се рећи да при средњим отпуштањем веће вредности тврдоће има челик СК45 (Č1531) док је челик 41Cr4 (Č4131) нешто мање тврдоће.

У табели 20 су приказане вредности три мерења и средње вредности тврдоће узорка после термичке обраде каљења са високим отпуштањем.

Табела 20. Високо отпуштање

Ознака челика	Број узорка	Расхладно средство	Тврдоћа, HV			
			Мерење 1	Мерење 2	Мерење 3	Средња вредност
СК45 (Č1531)	19	Вода	308	309	307	308
41Cr4 (Č4131)	20	Вода	272	287	293	284

На слици 8.28 су приказане измерене вредности тврдоће узорка 19 и 20 после каљења са високим отпуштањем.



Слика 8.28. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после високог отпуштања

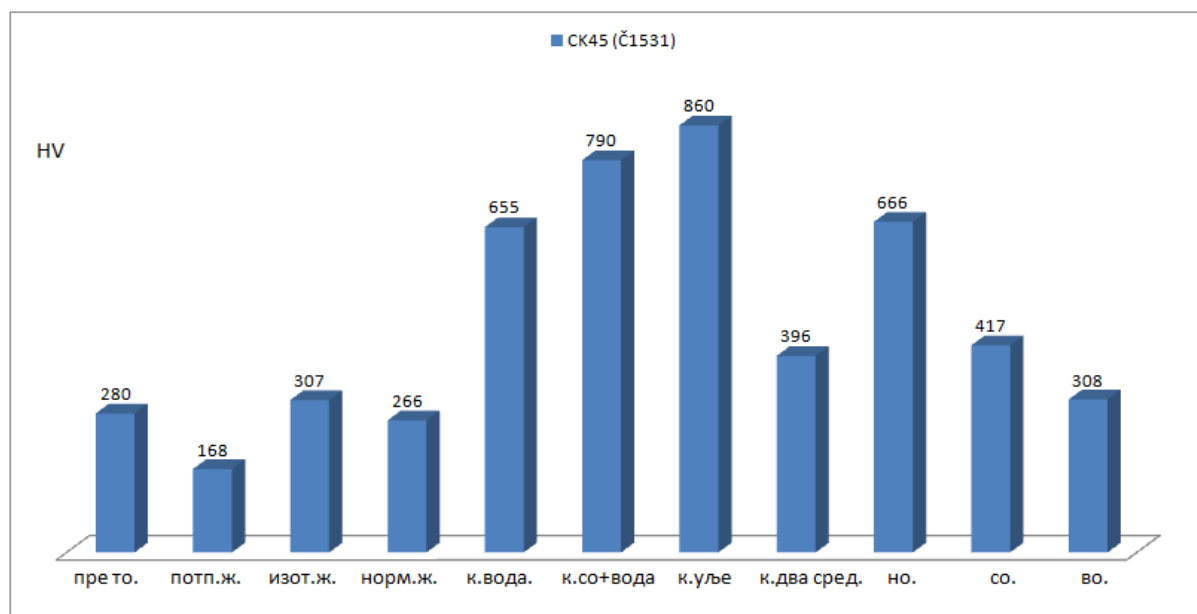
Са графика се може видети већа измерена тврдоћа челика СК45 (Č1531) у односу на челик 41Cr4 (Č4131). Може се рећи да при високом отпуштањем веће вредности тврдоће има челик СК45 (Č1531) док је челик 41Cr4 (Č4131) нешто мање тврдоће.

У табели 21 су приказане средње вредности тврдоће челика СК45 (Č1531) после различитих видова термичких обрада.

Табела 21. Тврдоће челика СК45 (Č1531) после различитих видова термичких обрада

СК45 (Č1531)		
Процес термичке обраде	Број узорка	Тврдоћа, НV
Почетна вредност тврдоће	/	280
Потпуно жарење	1	168
Изотермално жарење	3	307
Нормализационо жарење	5	266
Каљење у води	7	655
Каљење са раствором NaCl у води	9	790
Каљење у уљу	11	860
Каљење у два расхладна средства	13	396
Ниско отпуштање	15	666
Средње отпуштање	17	417
Високо отпуштање	19	308

На слици 8.29 су приказане измерене вредности тврдоће узорка челика СК45 (Č1531) после различитих видова термичких обрада.



Слика 8.29. Вредности тврдоће челика СК45 (Č1531) за сваки процес термичке обраде

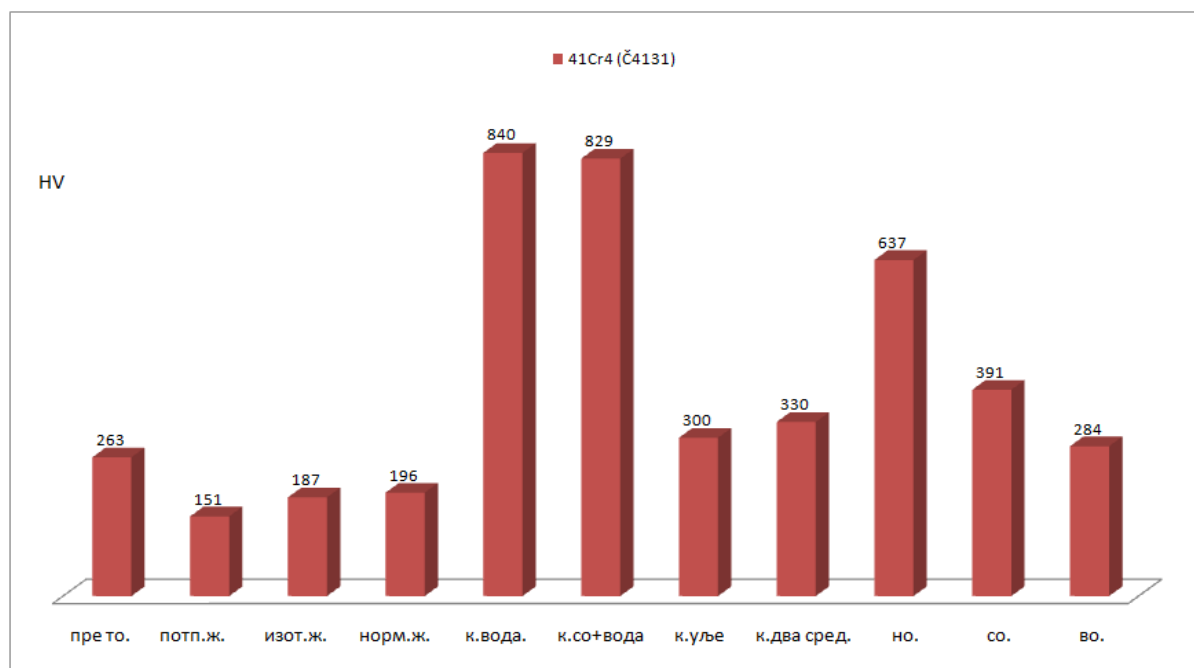
Највећа вредност тврдоће је забележена на узорку 11, односно, при вршењу термичке обраде каљења у уљу. Може се закључити да процес каљења у уљу даје најбоље резултате тврдоће за челик СК45 (Č1531).

У табели 22 су приказане средње вредности тврдоће челика 41Cr4 (Č4131) после различитих видова термичких обрада.

Табела 22. Тврдоћа челика 41Cr4 (Č4131) после различитих видова термичких обрада

41Cr4 (Č4131)		
Процес термичке обраде	Број узорка	Тврдоћа, HV
Почетна вредност тврдоће	/	263
Потпуно жарење	2	151
Изотермално жарење	4	187
Нормализационо жарење	6	196
Каљење у води	8	840
Каљење са раствором NaCl у води	10	829
Каљење у уљу	12	300
Каљење у два расхладна средства	14	330
Ниско отпуштање	16	637
Средње отпуштање	18	391
Високо отпуштање	20	284

На слици 8.30 су приказане измерене вредности тврдоће узорка челика 41Cr4 (Č4131) после различитих процеса термичких обрада.



Слика 8.30. Вредности тврдоће челика 41Cr4 (Č4131) за сваки вид термичке обраде

Највећа вредност тврдоће је забележена на узорку 8, односно, при вршењу термичке обраде каљења у води. Може се закључити да процес каљења у води даје

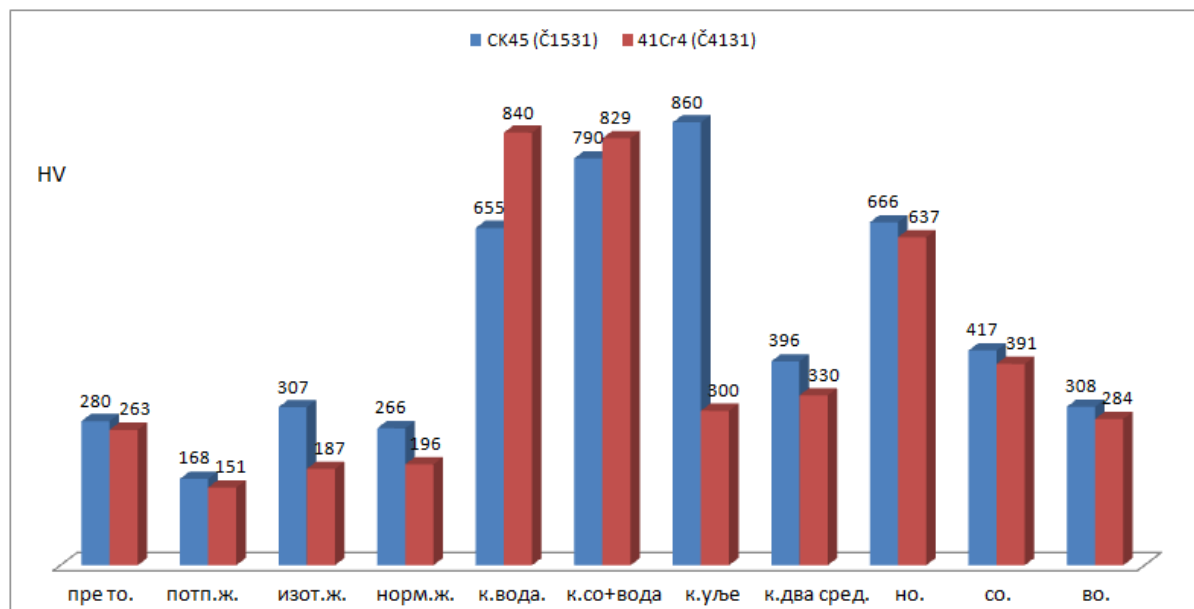
најбоље резултате тврдоће за челик 41Cr4 (Č4131), али ако се не узима у обзир процес каљења у уљу где је примећена грешка у извођењу термичке обраде.

У табели 23 су приказане упоредне вредности тврдоћа челика SK45 (Č1531) и челика 41Cr4 (Č4131) после различитих видова термичких обрада.

Табела 23. Упоредне вредности тврдоћа челика SK45 (Č1531) и челика 41Cr4 (Č4131)

Процес термичке обраде	Тврдоћа, HV	Тврдоћа, HV
	SK45 (Č1531)	41Cr4 (Č4131)
Почетна вредност тврдоће	280	263
Потпуно жарење	168	151
Изотермално жарење	307	187
Нормализационо жарење	266	196
Каљење у води	655	840
Каљење са раствором NaCl у води	790	829
Каљење у уљу	860	300
Каљење у два расхладна средства	396	330
Ниско отпуштање	666	637
Средње отпуштање	417	391
Високо отпуштање	308	284

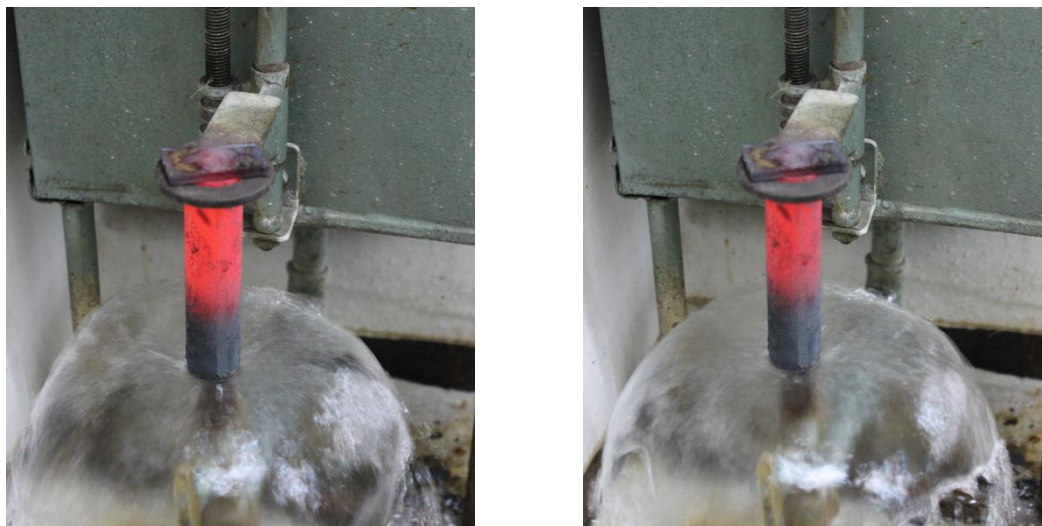
На слици 8.31 су приказане упоредне вредности тврдоће челика SK45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после различитих видова термичких обрада.



Слика 8.31. Упоредне вредности тврдоћа челика SK45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) за сваки процес термичке обраде

8.5.1 Мерење прокаљивости Џомини методом

Над епруветама је вршен проце чеоног хлађења млазом воде у временском интервалу од 10 минута. Методом чеоног хлађења је могуће одредити прокаљивост, односно, дубину окаљене зоне. На слици 8.32 је приказан процес чеоног хлађења.



Слика 8.32. Процес чеоног хлађења



Слика 8.33. Процес чеоног хлађења приказана термовизијски са датом температуром

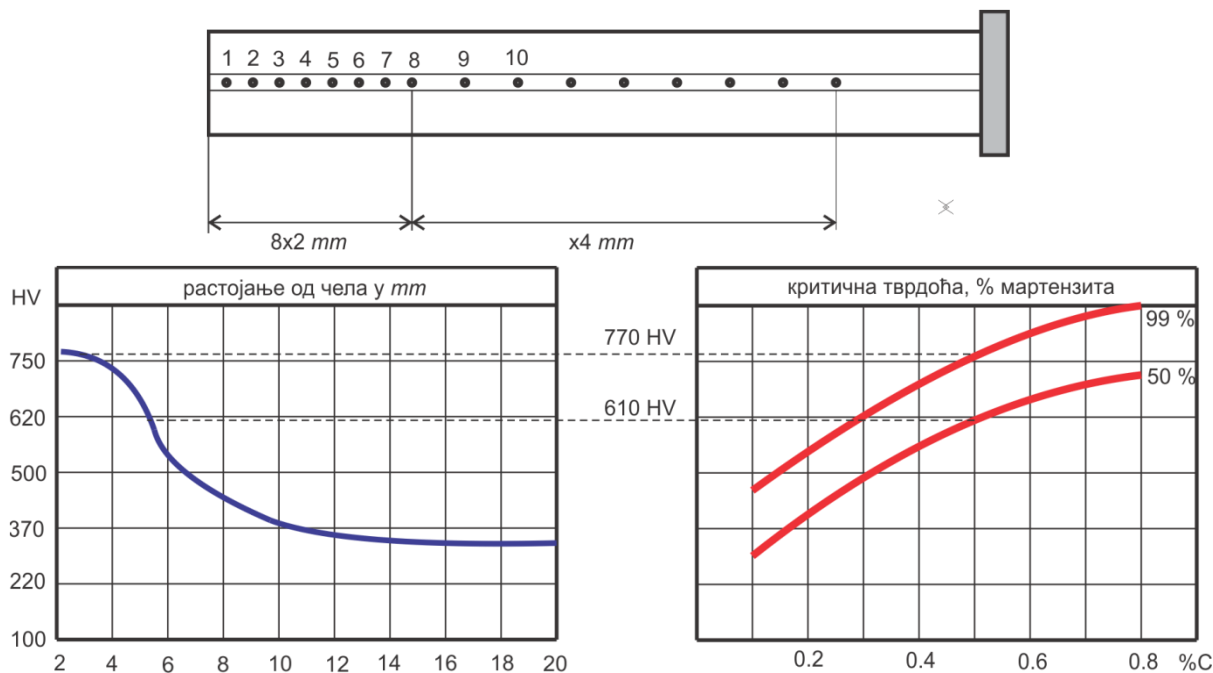
Након чеоног хлађења извршено је мерење тврдоће са циљем добијања информације о дубини окаљене зоне над узорцима челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131).

У табели 24 приказане су измерене вредности тврдоће са испитивања прокаљивости Џомини методом за челик СК45 (Č1531).

Табела 24. Мерење прокаљивости за челик СК45 (Č1531)

СК45 (Č1531)	Мерење прокаљивости челика Цомини методом									
Растојање од чела, mm	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Тврдоћа HV	775	736	514	429	373	348	341	331	329	328

На слици 8.34 су приказана мерна места на испитаном материјалу и дате вредности тврдоће за десет мерних места.



Слика 8.34. Вредности тврдоће челика СК45 (Č1531) после чеоног хлађења

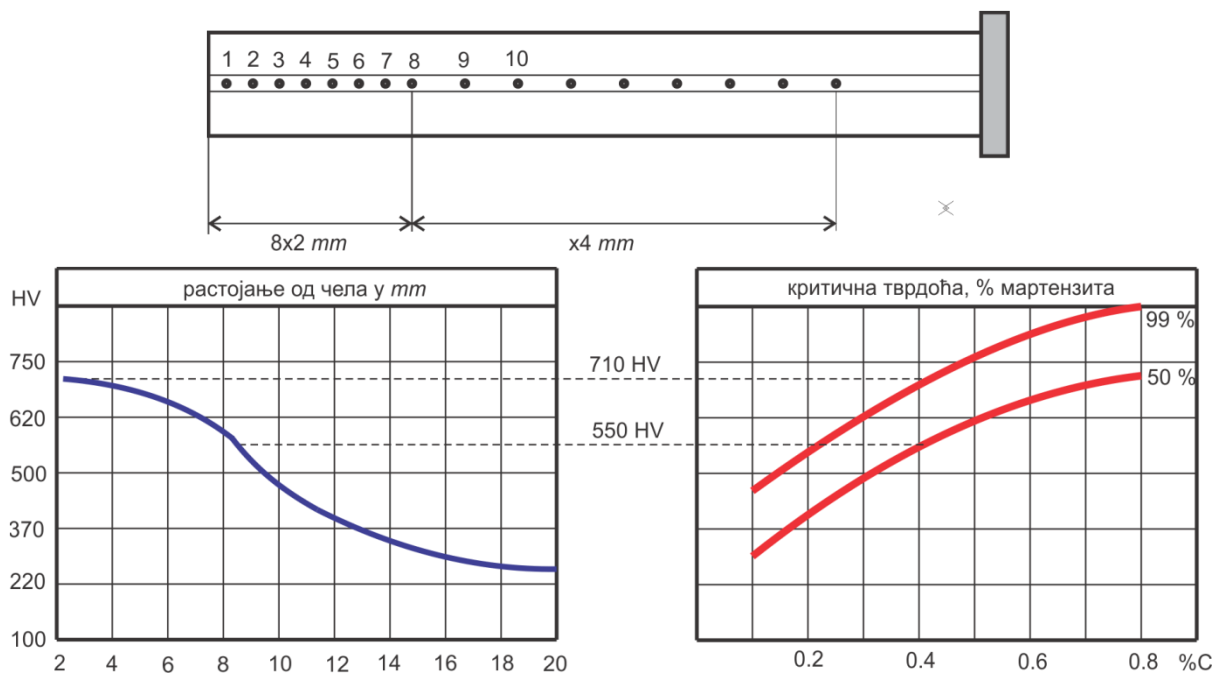
Са слике се може видети да се тврдоћа нагло смањује после 4 mm окаљене зоне унутар језгра и може се закључити да челик СК45 (Č1531) нема добру прокаљивост.

У табели 25 приказане су измерене вредности тврдоће са испитивања прокаљивости Џомини методом за челик 41Cr4 (Č4131).

Табела 25. Мерење прокаљивости за челик 41Cr4 (Č4131)

41Cr4 (Č4131)	Мерење прокаљивости челика Џомини методом									
Растојање од чела, mm	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Тврдоћа HV	710	690	652	579	434	355	315	257	251	240

На слици 8.35 су приказана мерна места на испитаном материјалу и дате вредности тврдоће за десет мерних места.



Слика 8.35. Вредности тврдоће челика 41Cr4 (Č4131) после чеоног хлађења

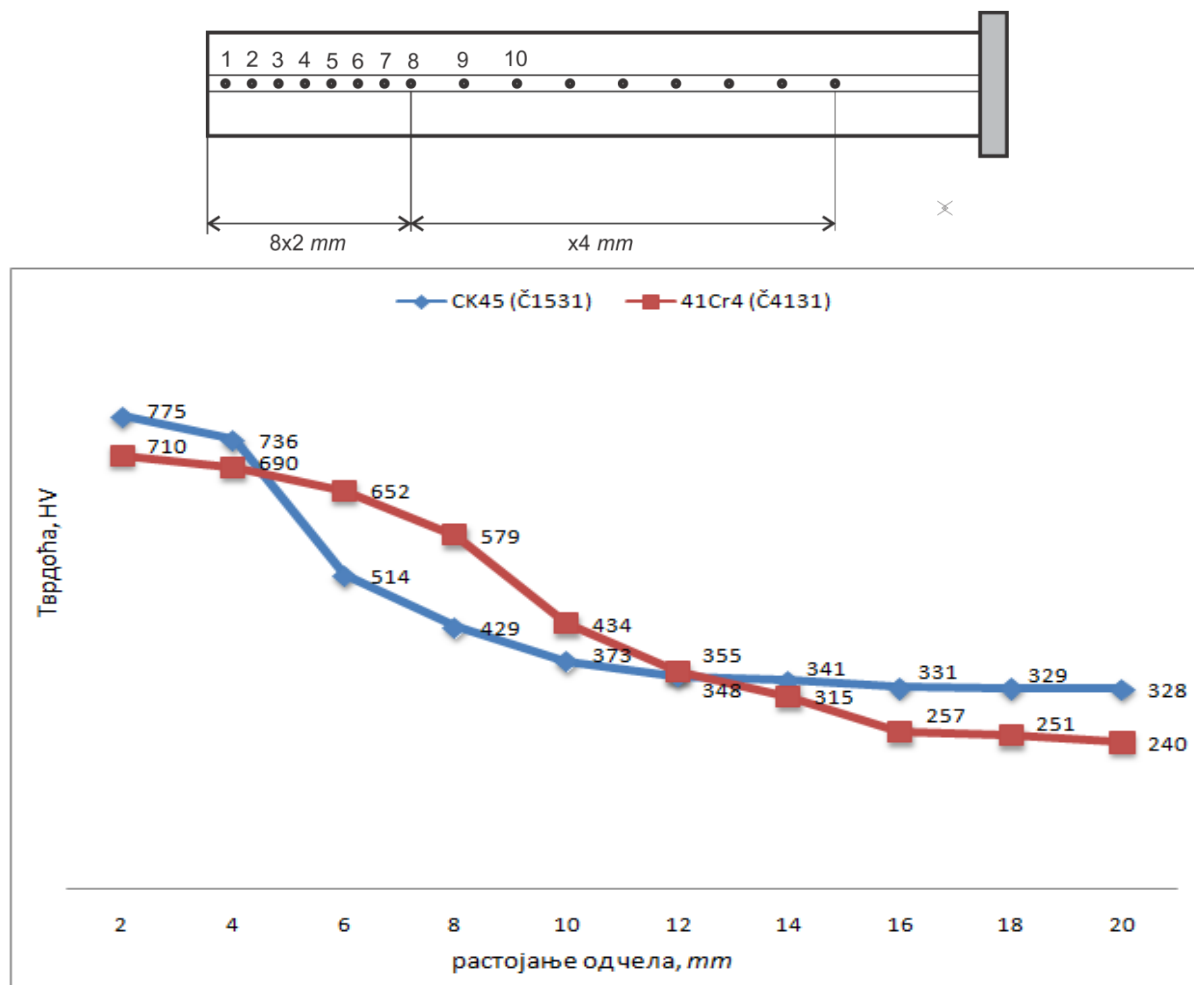
Са слике се може видети да се тврдоћа постепено смањује и закључити да челик 41Cr4 (Č4131) има добру прокаљивост јер на већој дубини каљене зоне задржава висок ниво тврдоће.

У табели 26 приказане су упоредне вредности тврдоће са испитивања прокаљивости Џомини методом за челике СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131).

Табела 26. Мерење прокаљивости за челике СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131)

Мерење прокаљивости челика Џомини методом										
Мерна места	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тврдоћа HV СК45 (Č1531)	775	736	514	429	373	348	341	331	329	328
Тврдоћа HV 41Cr4 (Č4131)	710	690	652	579	434	355	315	257	251	240

На слици 8.36 су приказана мерна места за челик СК45 (Č1531) и челик 41Cr4 (Č4131) и дате упоредне вредности тврдоћа за десет мерна места.



Слика 8.36. Упоредне вредности тврдоћа челика СК45 (Č1531) и 41Cr4 (Č4131) после чеоног хлађења

Са слике се може видети да се тврдоћа постепено смањује и закључити да челик 41Cr4 (Č4131) има добру прокаљивост јер на већој дубини каљене зоне задржава висок ниво тврдоће.

9. ЗАКЉУЧАК

Термичка обрада метала је врло битан елемент технолошког процеса у великом броју металуршких предузећа, машиноградњи, индустрији мотора, производњи алата и др. Тако се, на пример, термички обрађују милиони тона челика у виду лимова, плоча, шина, цеви и жица. Нарочити значај има термичка обрада алата од чијег квалитета зависи производност машина алатки, а самим тим и целокупна производност одређених индустријских процеса. Термичка обрада налази примену и у побољшању особина ливеног гвожђа, челичног лива, заварених конструкција као и код нежелезних легура као што су: алуминијум, магнезијум, бакар, никл и друге.

Успешно извођење термичке обраде изискује добро познавање хемијског састава материјала као и структурну грађу и фазне промене. Недовољно познавање понашања материјала услед термичког третмана може довести до низа негативних ефеката који би негативно утицали на карактеристике материјала након термичке обраде (концентрација напона, појава прслина, итд.). Дакле, може се закључити да су материјали и термичка обрада уско повезани и да је неминовност добро познавање материјала ако се жели озбиљно разматрати проблематика и параметри извођења термичке обраде.

У раду је учињен покушај да се експерименталним путем испитају механичке особине (тврдоћа) појединих типова челика намењених побољшању након различитих термичких третмана. Материјали који су узети у разматрање су:

- угљенични челик СК 45 (Ћ1531) и
- легирани челик 41Cr4 (Ћ4131).

Над наведеним материјалима вршени су сви основни видови термичке обраде и дат је упоредни табеларни и графички приказ добијених резултата измерених вредности тврдоће. Процеси термичке обраде вршени су уз помоћ више расхладних средстава.

Може се закључити да добијени резултати у великој мери одговарају каталожним вредностима прописаним за ове материјале, који своју индустријску примену најчешће налазе у побољшаном стању. Разлике у измереним вредностима тврдоће, након термичких третмана, између ова два челика нису велике па уколико је површинска тврдоћа једина меродавна карактеристика и један и други материјал би имали сличне експлоатационе карактеристике. Остале механичке карактеристике и цене ових материјала су фактори које такође треба узети у обзир да би се створила јаснија слика о могућностима примене једног од наведених челика.

Прокаљивост је испитана Џомини методом, тј. методом чеоног хлађења узорка водом ради одређивања дубине каљене зоне. Након овог испитивања може се констатовати да легирани челик има бољи распоред тврдоће из разлога што нема наглог пада вредности тврдоће као код угљеничног челика.

Литература

- [1] **Јовановић, М., Адамовић, Д., и други:** *Машински материјали, Машински факултет Крагујевац, 2003.*
- [2] **Видојевић, Н.:** *Термичка обрада метала, Технолошко-металуришки факултет, Београд, 1973.*
- [3] **Шуман, Х.:** *Металографија, Технолошко-металуришки факултет, Београд, 1989.*
- [4] **Ђукић В.:** *Термичка обрада метала, Завод за уџбенике, Београд, 2002.*
- [5] **А. Мајсторовић, В. Ђукић:** *Испитивање машинских материјала – упутства, Научна књига, Београд, 1991.*
- [6] **И.Пантелић:** *Технологија термичке обраде челика – / део, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.*
- [7] **И.Пантелић:** *Технологија термичке обраде челика – // део, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.*
- [8] www.tribology.fink.rs - Приступљено: април 2015.
- [9] **Александровић С., Стефановић М.:** *Технологија пластичног обликовања метала, Машински факултет, Крагујевац, 2010.*
- [10] http://www.koposteel.com/selector/unalloyed_carbon_steels/unalloyed_carbon_steels.html
- Железарна Равне - Приступљено, мај 2015.