

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу**



**Назив студијског програма: Машинско инжењерство**

**Ниво студија: Основне академске студије**

**Модул: Производно машинство**

**Предмет: Машински материјали**

**Број индекса: 157/2012**

**Јован З. Петковић**

## **Врсте отпуштања, побољшање и отпусна кртост челика за рад на топло**

**завршни рад**

**Комисија за преглед и одбрану:**

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор

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

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

Датум одбране: \_\_\_\_\_

Оцена: \_\_\_\_\_

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

Опише основне поступке термичке обраде челика, објасни њихов значај и примену у индустрији, као и начине њиховог извођења. Посебну пажњу треба да усмери на каљење и отпуштање челика (побољшање). Такође, треба да објасни појаву феномена отпусне кртости при термичкој обради челика за рад на топло, начине њеног спречавања и отклањања. Уз то треба да наведе и одговарајуће примере термичке обраде ових челика, који се најчешће срећу у пракси.

Препоручена литература:

- [1] Јовановић, М., Лазић, В., Адамовић, Д., Ратковић, Н.: *Машински материјали*, Машински факултет у крагујевцу, 2003.
- [2] Видојевић, Н.: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд 1973.
- [3] Ђорђевић, В.: *Машински материјали*, Машински факултет у београду, 2000.
- [4] Шуман, Х.: *Металографија*, Технолошко-металуршки факултет, Београд 1989. (превод)

Крагујевац, 25.09.2015.

ментор:

Проф. др. Вукић Лазић

## Резиме

У склопу овог рада, разматрана је тема термичке обраде челика. У првом делу рада су наведене основне информације о челику, његовом историјском развоју, примени, значају термичке обраде и укратко објашњени основни поступци термичке обраде челика. Затим су детаљно описани поступци каљења, отпуштања и њихова комбинација – поступак побољшања челика, уз анализу промене микроструктуре (мартензитне структуре) закаљеног челика при отпуштању угљеничних и легираних челика, као и разлози због којих ове промене настају. После тога су наведени и објашњени принципи рада и основне карактеристике средстава за загревање и хлађење челика, помоћу којих се термичка обрада изводи. Други део рада је обухватио анализу практичних примера термичке обраде угљеничних челика за зупчанике и легираних челика, уз које је детаљно објашњен утицаји термичке обраде отпуштања на механичке особине челика, као и феномен отпусне кртости који се појављује код неких високолегираних челика (посебно код челика за рад на топло).

Кључне речи: термичка обрада, каљење, отпуштање, побољшање, отпусна крност, легирани челици.

## Abstract

This work contains discussion about heat treatment of steel. First part of work contain basic information about steel, it's progress, use and significance through human history and heat treatment importance. Also, there was listed and briefly explained each one of regular heat treatments. After this, there was given more detailed analysis of quenching, tempering, their combination – Q + T and changes of microstructure (martensite structure) of quenched steel, as well as reasons for appearance of these changes in steels. Then, the basic principles and features about resources and devices used for high temperature heating and cooling, needed for heat treatment of steel were listed and explained. The second part of the work analyzed examples of heat treatment applied to medium carbon steel for gears and alloyed steels. In the end there was given detail information about effects of heat treatment on mechanical properties of steel and phenomenon of tempering brittleness which appears with tempering some of high alloy steels (especially hot working steels).

Key words: heat treatment, quenching, tempering, Q + T, tempering brittleness, alloyed steels.

## Садржај

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Увод                                                                           | 1  |
| 2. Преглед поступака термичке обраде челика                                       | 3  |
| 2.1 Поступци термичке обраде челик                                                | 5  |
| 3. Каљење челика                                                                  | 11 |
| 3.1 Начини каљења                                                                 | 20 |
| 3.2 Прокаљивост челика                                                            | 23 |
| 3.3 Грешке и сопствени напони при каљењу челика                                   | 24 |
| 4. Отпуштање и побољшање челика                                                   | 27 |
| 4.1 Отпуштање                                                                     | 27 |
| 4.2 Промена мартензита при отпуштању угљеничних челика                            | 28 |
| 4.3 Промена мартензита при отпуштању легираних челика                             | 34 |
| 4.4 Побољшање                                                                     | 37 |
| 4.5 Отпусна кртост                                                                | 38 |
| 5. Уређаји и средства за загревање и хлађење при термичкој обради челика          | 42 |
| 5.1 Загревање челика                                                              | 42 |
| 5.2 Хлађење челика                                                                | 44 |
| 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима                   | 46 |
| 6.1 Термичка обрада зупчаника израђеног од челика Č1531 (C45)                     | 46 |
| 6.1.1 Избор материјала зупчаника и потребна својства                              | 47 |
| 6.1.2 Физичка, механичка, технолошка и структурна својства челика Č1531           | 48 |
| 6.1.3 Избор термичке обраде                                                       | 50 |
| 6.1.4 Параметри и технологија термичке обраде                                     | 51 |
| 6.1.5 Испитивање квалитета изведене термичке обраде                               | 53 |
| 6.2 Термичка обрада челика Č4730                                                  | 55 |
| 6.2.1 Подаци о материјалу - Č4730 (25CrMo425)                                     | 55 |
| 6.2.2 Режим термичке обраде челика Č4730 на основу IRA дијаграма                  | 58 |
| 6.2.3 Карактеристике челика после изведене термичке обраде                        | 61 |
| 6.3 Утицај отпуштања на механичке особине и отпусна кртост челика за рад на топло | 63 |
| 6.3.1 Челици за рад на топло                                                      | 63 |
| 6.3.2 Утицај отпуштања на механичке особине и отпусна кртост челика Č5742         | 66 |
| 7. Закључак                                                                       | 69 |
| 8. Литература                                                                     | 71 |

## 1. УВОД

Употреба металних материјала датира још од праисторијских времена када су од бронзе прављена прва ливена и кована оруђа и оружја, која је наш далеки предак користио у циљу обезбеђивања хране и одбране од дивљих животиња. Много касније, са даљим развојем, дошло се и до развоја нових алатки које су коришћене како у пољопривредне, тако и у ратне сврхе. Међутим, метални материјали добијају глобални значај тек у периоду индустријске револуције у Великој Британији, појавом парне машине *James Watt-a* (1764. год.), а њихов значај расте и данас.

Метали и њихове легуре представљају најзначајније техничке материјале због широког дијапазона могућих механичких и физичких својстава, од којих се највише истичу: затезна јачина, жилавост, тврдоћа, пластичност, магнетичност, могућност физичке и хемијске обраде, као и добра топлотна и електрична проводљивост. Међитим, непрестани напредак различитих технологија захтева развој нових материјала са побољшаним или новим својствима која су неопходна за поуздано извођење задатих функција.

Како би се добила жељена својства метала, потребно је деловати на њихову кристалну структуру, величину и облик металних зрна насталих при кристализацији течног метала и легура, као и на хемијски састав ових метала и легура или појединих структурних фаза. Према томе, од суштинског значаја је добро познавање атомске и кристалне структуре, фазних промена, као и хемијских особина материјала који се прерађују, како би се деловањем на њих оствариле потребне механичке и физичке особине применљиве у пракси.

Главни видови промене ових особина јесу:

- прерада у хладном стању, која директно утиче на појаву нагомиланих грешака (дислокација) и клизања по одговарајућим равнима кристалне решетке, која утичу на промену механичких особина метала,
- променом величине металних кристалних зрна од које зависе, како механичке особине тако и могућност механичке обраде и хемијске прераде метала,
- легирањем различитим врстама металних и неметалних елемената, од којих сваки на свој начин делује на хемијске, структурне, механичке и остале особине метала,
- фазним трансформацијама које су последице промена насталих у чврстом стању због деловања вештачки доведене спољашње енергије (топлоте), и као такве чине основу за разне видове термичке обраде метала.

Термичка обрада се дефинише као операција загревања метала до критичних температура за настајање фазних трансформација подвргнутих метала, задржавања на тим температурама одређено време (прогревања) и хлађења жељеним режимима до собне температуре (у неким посебним случајевима се у циљу трансформације

заосталог аустенита хлађење изводи и испод  $0^{\circ}\text{C}$ , тзв. замрзавање). Као таква, термичка обрада се не може примењивати код једнофазних метала, као што је нпр. алуминијум (Al) (механичка својства чистог алуминијума се могу мењати само прерадом на хладно), већ искључиво код двофазних или вишефазних, тј. полиморфних метала и легура, које поседују својства структурних промена при загревању до критичних температура, као и могућност дифузије атома на високим температурама. Нпр. за челик еутектоидног састава (0.77% C) фазна трансформација ферита и цементита у аустенит настаје на температури од  $727^{\circ}\text{C}$ , што се види са фазног бинарног дијаграма  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ .

Немогуће је са поузданом тачношћу утврдити када се почело са применом термичке обраде у циљу побољшања особина метала, али се претпоставља да је термичка обрада челика приближно стара као и његова израда и употреба. Предмети пронађени у египатским пирамидама у Гизи су доказ да се још тада знало за цементацију и каљење челика. Међутим, да би термичка обрада добила данашњи индустријски значај, морало је да протекне још приближно три хиљаде година.

Данас термичка обрада захваљујући свеобухватном развоју науке, а нарочито физичке металургије и металологије, поприма још већи значај и са сигурношћу се може предвидети понашање метала при термичкој обради. Према томе, врло прецизно можемо знати каква ће се структура и механичке особине добити када се метал подвргне одређеним режимима термичке обраде. То нам омогућавају широко теоријско знање, искуствени подаци, као и и софистицирани инжењерски софтверски пакети.

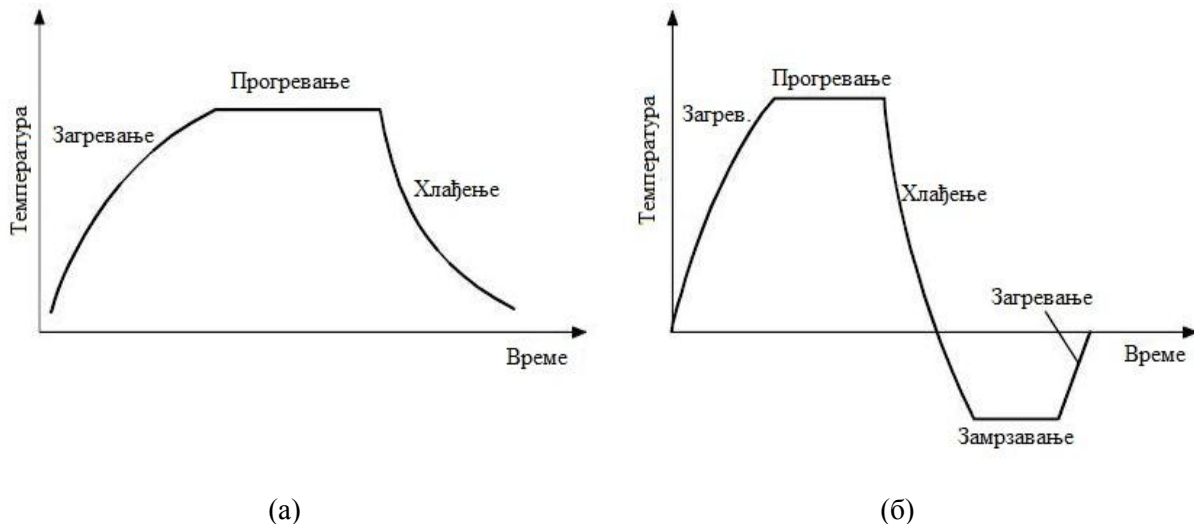
Термичка обрада је од великог значаја готово у свим гранама индустрије, па се њена примена огледа у: аутомобилској индустрији, машиноградњи, производњи алата, војној индустрији, пољопривреди и др. То значи да се термички обрађују милиони тона челика у виду плоча, профила, цеви, жица итд. Одговорни делови машина се скоро увек подвргавају термичкој обради, па куглични лежајеви, зупчаници, блокови мотора, резни алати машина алатки и другу делови, скоро увек се третирају неким видом термичке обраде.

Обим примене термичке обраде је у сталном порасту. Наиме, са побољшањем механичких особина метала знатно се може смањити маса конструкције или машинског система, што омогућава свеукупно смањење тежине, али и напредна техничка и технолошка решења која без особина добијених термичком обрадом нису била могућа.

Важно је напоменути да се термичком обрадом, поред механичких, могу побољшати и физичко-хемијске особине: магнетичност, корозиона отпорност, ватроотпорност и термостойаност челика предвиђених за рад на високом температурама, као и многе друге корисне особине.

## 2. ПРЕГЛЕД ПОСТУПАКА ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ ЧЕЛИКА

Као што је већ наведено, видови термичке обраде могу бити различити и углавном су у функцији температуре и времена (у неким случајевима и околине – хемијско-термичка обрада). Примери основних режима термичке обраде дати су на слици 2.1.



Слика 2.1 Ток термичке обраде без замрзавања (а) и са замрзавањем (б) [1]

Ефикасност термичке обраде зависи од састава челика или легуре, микроструктуре, брзине загревања и хлађења, степена хладне прераде, могућности дифузије итд. Па је због тога веома важно добро припремити почетне услове за извођење конкретне термичке обраде.

Хемијско-термичка обрада (ХТО) се изводи променом хемијског састава површинских слојева и то путем интерстицијске дифузије појединих елемената као што су угљеник, азот, бор, алуминијум, ванадијум, калај, силицијум итд. (интерстицијски елементи). На основу тога разликујемо поступке цементације, нитрирања, борирања, калајисања, силицирања итд.

Термо-механичка обрада (ТМО) се изводи тако што се првенствено челик механички обликује на топло (нпр. поступком ваљања) и то у аустенитном подручју, а затим се подвргава брзом хлађењу у циљу добијања мартензитне структуре. Хлађење се изводи под млазом воде, као и код неких других врста челика повишене јачине. Овај поступак је веома скуп, па се примењује само код специјалних челика који се користе за транспортне цистерне, железничке платформе, конструкције мостова, бродску опрему итд.

Пре него што се размотре појединачне врсте термичке обраде челика, потребно је назначити како су уобичајено означене преображајне температуре на трансформационим дијаграмима  $Fe-Fe_3C$  и  $Fe-C$ . У табели 2.1 су дате критичне

## 2. Преглед поступака термичке обраде челика

температуре за одвијање појединих структурних промена, па самим тим и температуре од суштинског значаја за извођење појединих видова термичке обраде:

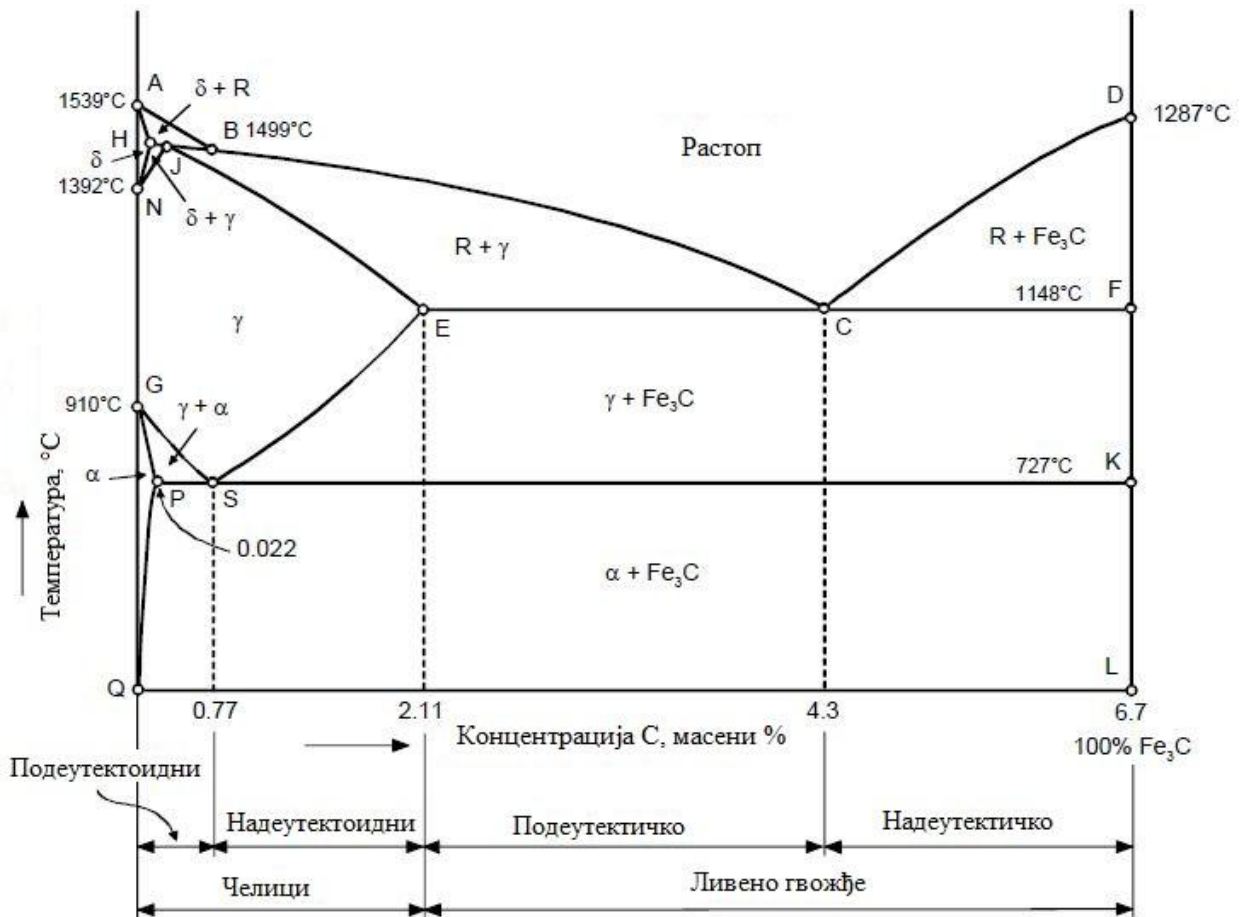
**Табела 2.1** Дефиниција критичних температура [1]

| ОЗНАКА     | ДЕФИНИЦИЈА                                                                                              |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_0$      | Температура на којој магнетични $Fe_3C$ прелази у немагнетични, $T = 210^\circ C$                       |
| $A_{C1}$   | Температура почетка еутектоидне промене ферита и цементита у аустенит при загревању                     |
| $A_{C3}$   | Температура завршетка промене ферита у аустенит код 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     |
| $M_s, M_f$ | Температуре почетка и завршетка мартензитне промене                                                     |
| $B_s, B_f$ | Температуре почетка и завршетка бејнитне промене                                                        |

Треба поменути да се при загревању челика на температуре испод  $A_{C1}$  одвијају структурне, а при загревању челика на температуре изнад  $A_{C1}$  и структурне и фазне промене.

Ове критичне температуре, њихове промене у зависности од састава челика и фазне промене при загревању и хлађењу челика приказане су на равнотежном дијаграму метастабилног бинарног система гвожђе – карбид гвожђа (цементит) –  $Fe - Fe_3C$ , који је приказан на слици 2.2. Његово познавање је од великог значаја за проучавање, даљи развој, као и правилно извођење већ постојећих поступака термичке обраде челика.

## 2. Преглед поступака термичке обраде челика



Слика 2.2 Равнотежни дијаграм метастабилног система  $Fe - Fe_3C$  [1]

### 2.1 Поступци термичке обраде челика

Основни поступци термичке обраде челика деле се на:

- Жарење (нормализационо, дифузионо, меко, потпуно, изотермичко, рекристализационо, жарење у циљу отклањања заосталих напона, на грубо зрно итд.);
- Каљење (површинско и запреминско);
- Отпуштање (ниско, средње и високо).

Поред основних поступака термичке обраде срећу се још: дисперзионо отврђавање, већ споменути видови ХТО и ТМО, побољшање (каљење + отпуштање), и др.

**Жарење челика** представља вид термичке обраде код кога се челик загрева до одређених температура, прогрева одређен временски период на тој температури и онда лагано хлади (најчешће у пећи) до собне температуре. На овај начин се делимично или потпуно враћа почетно структурно стање које је део имао пре него што је изложен неком поступку механичке или термичке обраде. У зависности од састава челика,

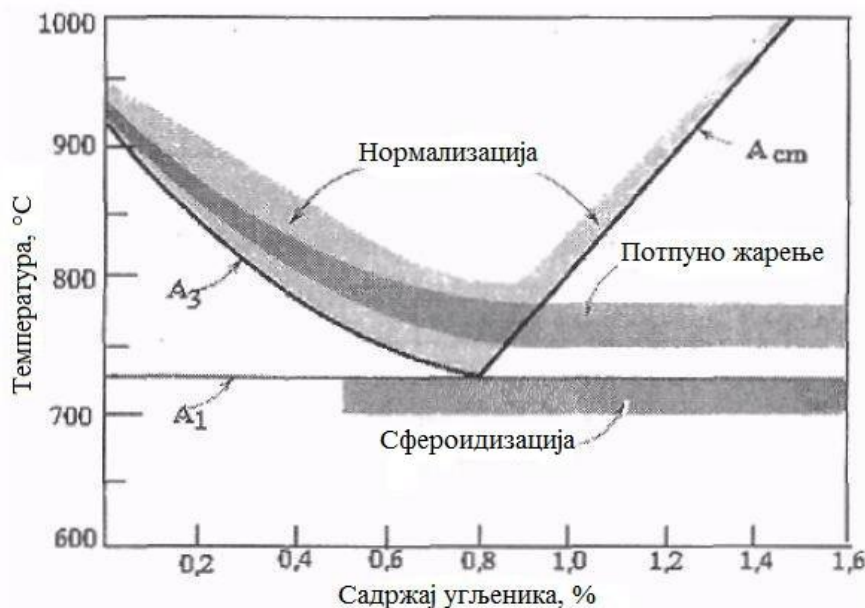
## 2. Преглед поступака термичке обраде челика

после жарења се добија перлитна, перлитно-феритна или перлитно-цементитна структура. Поступком жарења челика смањује се тврдоћа, а повећава жилавост и пластичност (једном речју - дуктилност), па је жарен део способан за даљу обраду резањем, пластичним обликовањем итд. Ово је могуће зато што се поступцима жарења отклањају заостали структурни напони.

У случаји пластичног обликовања заостали напони се испољавају у виду повећања напона на граници течења ( $R_{p02}$ ), који је неопходно смањити да би даље обликовање било могуће (поступак међуоперационог жарења). Када се жарење користи у циљу уједначавања или смањења металних зрна, назива се хомогенизационо жарење.

Подела поступака жарења углавном се заснива на температури до које се део загрева, начину хлађења и примени. Такође, жарење се дели на поступке без фазних промена (рекристализационо, у циљу смањивања заосталих напона,...) и са фазним променама (меко, потпуно, нормализационо, дифузионо,...)

На слици 2.3, приказан је део дијаграма  $Fe-Fe_3C$  са назначеним температурским интервалима унутар којих се загрева челик за неке од поступака жарења.



Слика 2.3 Температуре загревања челика за поједине поступке жарења [3]

**Дифузионо (хомогенизационо) жарење** се изводи тако што се челик загрева високо до аустенитног подручја (1100 до 1200°C), дуго прегрева, а после тога споро хлади. Примењује се код одливака код којих се појављује груба и крта дендритна структура која се на овај начин преводи у крупнозрну. До промене структуре долази због дуготрајног прегревања (8 до 15 h), које омогућава потпуно уклањање хемијске нехомогености. Ова крупнозрна структура се нормализационим жарењем накнадно уситњава.

**Нормализационо жарење** се примењује код челика (или челичног лива) и изводи тако што се део загрева на температуру око  $50^{\circ}\text{C}$  изнад  $A_{C3}$  за подеутектоидне или изнад  $A_{Cm}$  за надеутектоидне челике, затим прогрева на тој температури и споро хлади на мирном ваздуху. Нормализација се изводи у циљу дубијања ситнозрнасте структуре. Примењује се код челичних одливака, ваљаних производа и заварених делова од лоше заварљивих материјала. Нешто ређе се користи код високоугљеничних и легираних челика.

**Меко (сфероидално) жарење** се примењује код делова од високоугљеничних и високолегираних челика. Изводи се тако што се они загревају око доње критичне температуре  $A_{C1}$  прогревају неколико десетина сати, а потом споро хладе. Овако се добија мекши (зрнасти) цементит у односу на ламеларан који је тврђи. Тако се добија зрнаста перлитна структура (структура са лоптастим карбидима у феритној основи), која има велику пластичност и минималну тврдоћу. Меко жарење се изводи у циљу олакшања обрадивости резањем и пластичним деформисањем на хладно.

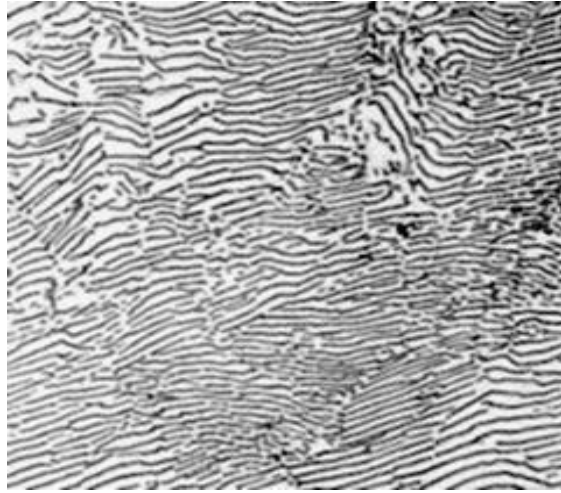
**Потпуно жарење** представља вид жарења код кога се део загрева у аустенитно подручје ( $30 - 50^{\circ}\text{C}$  изнад  $A_{C3}$  или  $A_{Cm}$ ) задржава на тој температури одређено време, а затим веома споро хлади у пећи, па после тога на ваздуху. Сврха овог поступка јесте уситњавање зрна, уједначавање структуре, отклањање унутрашњих напона, отклањање крпе и неповољне Видманштетенове структуре (сл. 2.4), а све то у циљу постизања мекше структуре ради лакшег пластичног обликовања.



Слика 2.4 Видманштетенова структура [1]

**Изотермичко жарење** представља вид потпуног жарења који се користи код челика који претходно третираним поступком могу постати превише тврди. Према томе, челик се загрева до температуре  $30 - 50^{\circ}\text{C}$  изнад  $A_{C3}$ , а онда брзо хлади до

температуре мало изнад  $550^{\circ}\text{C}$ . После потпуне перлитне трансформације (сл. 2.5) која се одвија на тој температури, део се споро хлади на ваздуху до собне температуре.

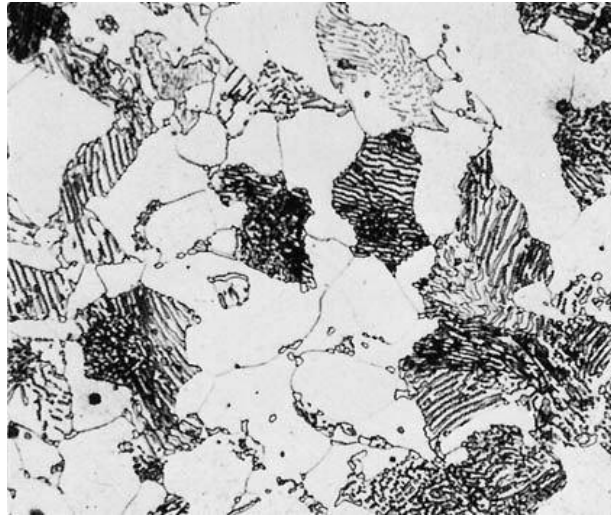


Слика 2.5 Перлитна структура [10]

**Рекристализационо жарење** представља вид жарења код кога се део који је претходно изложен пластичном деформисању загрева изнад температуре рекристализације, па после прогревања на тој температури хлади произвољном брзином до собне температуре. Користи се као међуоперационо жарење код поступака ваљања и вучења метала на хладно. Овако се повећава дуктилност, па је део подобан за даље обликовање. Време прогревања зависи од дебљине и димензија дела који се жари, због потребе за једнаким прогревањем по целом попречном пресеку.

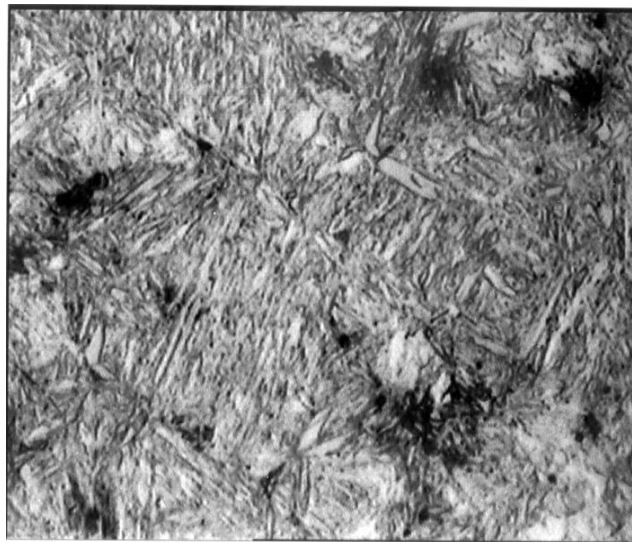
**Жарење за отпуштање напона** се користи у циљу отклањања сопствених напона насталих при процесима прераде метала. Овај вид жарења се не односи на напоне настале при обради делова дејством спољашњих сила. Изводи се тако што се део загрева изнад  $450^{\circ}\text{C}$  (до око  $650^{\circ}\text{C}$ ) и излаже што дужем хлађењу, како се заостали напони сигурно не би поново појавили. Ови напони су опасни зато што могу довести до кривљења дебљих или витоперења тањих делова, настајања топлих и хладних прслина, тј. прслина насталих при транспорту или простом манипулисању делова, као и напонску корозију, па је њихово смањење препоручљиво пре него што се део подвргне даљој обради.

**Жарење на грубо зрно (високо жарење)** се примењује код нискоугљеничних и средњеугљеничних челика, како би се олакшала њихова машинска обрада. Овим видом жарења се постиже феритно-перлитна структура (сл. 2.6) са нешто грубљим зрнима. Део се загрева на температуру од  $950$  до  $1100^{\circ}\text{C}$  и прогрева  $1$  до  $2\text{ h}$ , после чега следи хлађење у пећи. При споријем хлађењу, део се дуже задржава у области аустенитно-перлитне промене. Када се оствари ова промена, део се може брже хладити до собне температуре. Грубље зрно подразумева лако ломљиву струготину, па при поступцима резања, ивице алата мање подлежу хабању.



Слика 2.6 Феритно–перлитна структура [10]

**Каљење** представља вид термичке обраде која се одвија тако што се део загрева изнад температуре рекристализације  $A_{C3}$  код подеутектоидних или  $A_{C1,3}$  код надеутектоидних челика, потпуно прогрева на тој температури, а затим хлади брзином већом од критичне до собне температуре, при чему се хлађење изводи у уљу или води. Каљењем се добија тврда мартензитна структура (сл. 2.7) погодна за делове изложене ударним оптерећењима као што су ковачки чекићи, оштрице делова за просецање, пробијање и сечење лима итд.



Слика 2.7 Мартензитна структура [10]

**Отпуштање челика.** Мартензитна структура је због своје тврдоће веома крта, тако да би употреба таквих делова у машинству била могућа, потребно их је после каљења изложити поступцима високог, средњег или ниског отпуштања.

Ова три поступка се разликују по температури на коју се део загрева и времену прогревања (не сме бити превисока температура и предуго време загревања да се не би

## 2. Преглед поступака термичке обраде челика

изгубила тврдоћа остварена каљењем). Режи́ми загревања зависе, како од димензија дела који се отпушта, тако и од његовог хемијског састава.

Поступак комбиновања каљења и високог отпуштања назива се *побољшање*. Овим поступком добијају се добре механичке карактеристике: тврдоћа, затезна јачина, жилавост, пластичност и др.

### 3. КАЉЕЊЕ ЧЕЛИКА

Као што је већ наведено, каљење је вид термичке обраде којим се добија тврда и крта мартензитна структура, па каљени челици нису увек погодни за директну примену. Због тога се понекад захтева накнадни третман како би се добиле, пре свега, потребне механичке особине.

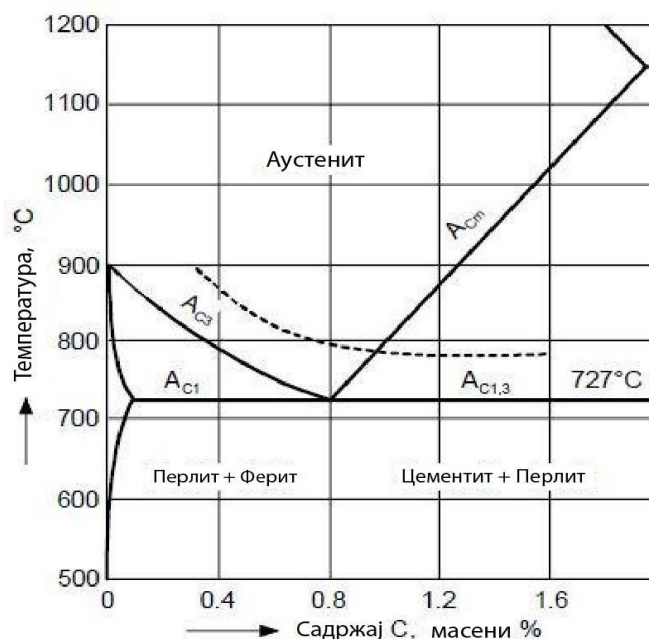
Како би се каљење успешно извело, потребно је обратити пажњу на више фактора, као што су: температура загревања, време прогревања, средина у којој се изводи загревање, брзине хлађења, својстава материјала, тј. прокаљивости, и др.

Како би се добила мартензитна структура, потребно је челик загрејати на температуру изнад  $A_{C3}$  за подеутектоидне челике (феритно-перлитног састава) или изнад температуре  $A_{C1,3}$  за надеутектоидне челике (перлитно-цементитног састава), па затим хладити брзином већом од критичне, како би се трансформација аустенита одиграла у мартензитној, а не перлитној области. У случају недовољно загрејаног челика, један део ферита остаје нетрансформисан у аустенит и то има лош утицај на тврдоћу челика после каљења. У случају загревања дела превише изнад  $A_{C3}$ , долази до пораста аустенитног зрна, а после каљења добија се веома крт игличасти мартензит и заостали аустенит

Критична брзина хлађења за добијање мартензита зависи од процентуалног садржаја угљеника у челику. Закаљиви челици са садржајем угљеника изнад 0.25% имају горњу критичну брзину хлађења приближно 140 до 250°C/s, а доњу око 40°C/s, при 550°C. Са порастом процентуалног удела угљеника који је растворен у аустениту, снижава се температура почетка мартензитне трансформације према изразу  $M_s = 550 - 360 \cdot \%C$ , при чему  $M_s$  представља температуру почетка мартензитне трансформације. Завршетак мартензитне трансформације ( $M_f$ ) се одвија на температури -50°C за еутектоидни челик (0.77% C). Та гранична температура опада са садржајем угљеника који је растворен у аустениту. Већина легирајућих елемената снижава критичну брзину хлађења и температуре  $M_s$  и  $M_f$ .

После каљења подеутектоидних челика добија се чиста мартензитна структура (понекад са заосталим аустенитом), а после каљења надеутектоидног челика, добија се мартензитна структура по којој су дисперговане честице цементита ( $Fe_3C$ ). Ако су ова зрна ситнија и правилније распоређена, добија се мартензит веће тврдоће.

На слици 3.1 су приказане потребне температуре загревања челика при каљењу.



Слика 3.1 Температуре загревања челика при каљењу [3]

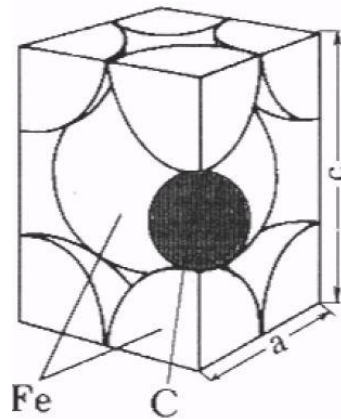
Са слике 3.1 се види да се подеутектоидни челици кале из чистог аустенитног, а наеутектоидни из аустенитно-цементитног подручја, при чему се претходно сфероидално жаре.

Брзо хлађење се остварује потапањем дела у воду или уље, док се још брже хлађење постиже у воденим растворима соли или база. Мало спорији поступак хлађења од претходно наведених је у кречном млеку. Убрзано хлађење се може остварити и прскањем делова воденим млазом (поступак који се користи при испитивању прокаљивости Џомини методом).

Суштина каљења јесте да се спречи дифузиона промена аустенита до температуре  $M_s$ , после које почиње промена механизмом клизања, која је карактеристична за мартензитну трансформацију. Тако се добија тетрагонална кристална решетка коју карактеришу велика тврдоћа, висока затезна јачина ( $R_m$ ), отпорност на хабање, као и напон на граници течења материјала ( $R_{p0.2}$ ), али се та структура одликује и лошим својствима дуктилности и жилавости.

Само угљеник растворен у аустенитној основи утиче на повећање тврдоће, у односу на угљеник у карбиду  $Fe_3C$  који утиче на повећање кртости.

На слици 3.2, приказана је тетрагонална мартензитна структура са атомима угљеника “уметнутим” између атома гвожђа.



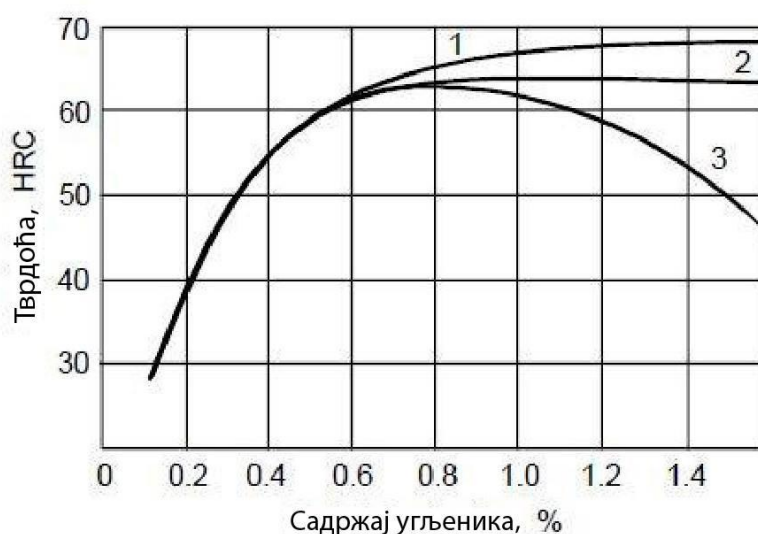
Слика 3.2 Кристална решетка мартензитне структуре [3]

Као што се са слике 3.2 види, мартензитна кристална решетка има параметар “с” већи од преосталих параметара ( $a = 0.2845 \text{ nm}$ ;  $c = 0.297 \text{ nm}$ ), при чему кристалографске осе остају ортогоналне.

Тврдоћа мартензита зависи од садржаја угљеника који је био растворен у аустениту пре настале трансформације, али и температуре каљења. Максимална тврдоћа (64 HRC) се добија при каљењу челика са 0.77% C. При каљењу надеутектоидних челика са загревањем изнад  $A_{cm}$ , јавља се велики удео нетрансформисаног аустенита. То доводи до смањивања тврдоће сразмерно порасту садржаја угљеника. Зато се ови челици кале са загревањем на  $30^\circ\text{C}$  изнад  $A_{c1.3}$ . У овом случају, тврдоћа не зависи од укупног садржаја угљеника у челику, већ само од удела раствореног у аустениту који је исти и за све надеутектоидне челика (0.77% C). Угљеник који се није растворио у аустениту је штетан (нарочито код делова који су оптерећени динамичким оптерећењима), јер је ниске тврдоће и на повишеним температурама се трансформише у цементит, што може да проузрокује димензијске губитке.

Време прогревања не сме бити превише дуго, јер може изазвати неповољан раст аустенитног зрна и разугљенисавање површинског слоја, али мора бити довољно дуго да би се достигла потребна температура по целом попречном пресеку дела и одвиле све фазне трансформације неопходне за даљи процес каљења. Ово време зависи од температуре до које се део загрева, садржаја угљеника и легирајућих елемената, величине и облика дела, начина смештања у пећ, врсте пећи и осталих фактора.

На слици 3.3 је показана зависност тврдоће мартензита од садржаја угљеника и температуре каљења. Крива (1) се односи на каљење подеутектоидних челика са температуре мало изнад  $A_{c3}$  са замрзавањем, крива (2) на каљење надеутектоидних челика са температуре  $A_{c1.3}$ , а крива (3) на каљење надеутектоидних челика са температуре изнад  $A_{cm}$ .



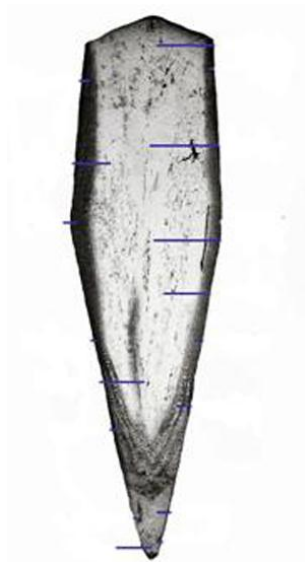
Слика 3.3 Тврдоћа мартензита у функцији садржаја угљеника [3]

Може се закључити да није неопходно калити надеутектоидне челике из потпуно аустенитног подручја, већ из подручја у коме још постоји нерастворен цементит. Пошто је цементит мало тврђи од мартензита, не би се остварио никакав позитиван утицај на тврдоћу ако би се он потпуно растворио у аустениту, па затим извело каљење. Поред тога, ако се челик загреје на тако високу температуру, долази до преображаја у грубљи аустенит, који би се после каљења претворио у непожељно груб мартензит (повишене кртости), пропраћен заосталим аустенитом и заосталим напонима.

Прогревање челика на температури са које се кали треба да буде довољно дуго да се по целом пресеку добије структура која одговара равнотежним условима (аустенитна). Мартензитна структура се може добити само и само из аустенитне, па следи да на температуре  $M_s$  и  $M_f$  нема утицаја укупан садржај угљеника у челику, већ само удео угљеника растворен у аустениту. Треба избегавати и предуго загревање челика, јер то може довести до појаве разугљенисавања (губљења угљеника у површинским слојевима дела) и непожељног пораста аустенитних зрна, што проузрокује настанак грубог мартензита и заосталог аустенита.

Потребна брзина хлађења (која треба да буде само нешто већа од критичне) се лако остварује на површина дела, али како се иде дубље у материјал, то постаје теже. Ова карактеристика зависи од садржаја компоненте С и легирајућих елемената, па се нискоугљенични челици могу закалити само по површини (максимално до неких 15 mm), а високоугљенични и легирани челици знатно дубље. Угљенични челици су закаљиви у води, легирани се могу калити и у уљу. Неки посебни легирани челици се могу закалити чак и на ваздуху. Ова особина челика се назива *прокаљивост*. У неким случајевима је потребно да се део прокали по целој запремини, а некада само по спољашњем слоју. Добрим знањем о прокаљивости челика служили су се

средњовековни мајстори израде хладног оружја (сл. 3.4). Користећи ово знање добијали су тврд спољашњи слој – сечиво, које је било могуће наоштрили и мекше језгро “срце” да би оружје имало преко потребну жилавост, како не би дошли до лома при ударном оптерећењу којем је било изложено.

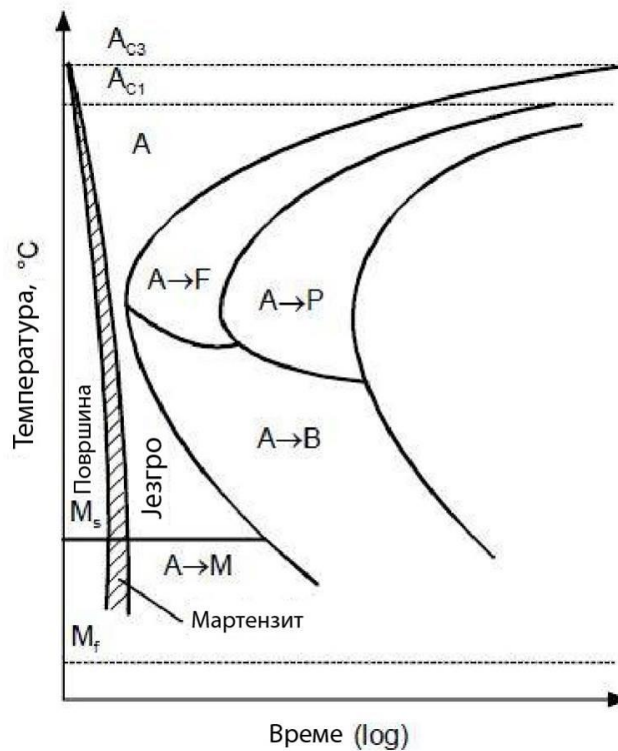


*Слика 3.4 Површински пресек оштрице мача јапанског средњовековног феудалног сталежа (самураја), тзв. катане - пример каљења само спољашњег слоја [11]*

Према томе, разликујемо запреминско и површинско каљење. Запреминско може бити континуално и степенасто мартензитно и изотермичко бејнитно. Ређе се могу срести и прекидно мартензитно, континуално бејнитно, таложно каљење и каљење са замрзавањем (у циљу трансформације заосталог аустенита у мартензит).

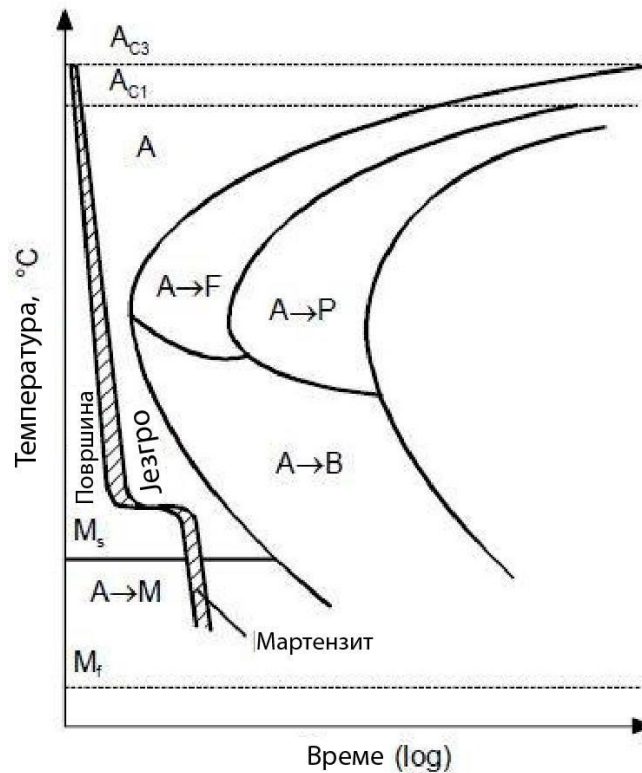
**Континуално каљење** (сл. 3.5) се изводи непрекидним хлађењем дела из аустенитног подручја до температуре испод почетка мартензитне промене. Као што је већ споменуто, брзина хлађења мора бити већа од критичне како би се аустенит већим делом или потпуно преобразио у мартензит. Хлађење се изводи у једном средству (уљу или води), све до собне температура. Како би се постигло равномерно каљење у једном средству, потребно је да се хлађени део креће кроз течност горе-доле или кружно. То се може постићи и циркулацијом течности уз помоћ посебних уређаја.

Недостатак каљења у једном средству јесте појава значајно изражених унутрашњих напона који могу довести до појаве и даљег ширења прслина. Ово се може избећи хлађењем у једном средству до близу почетка мартензитне трансформације, па затим даљим хлађењем у уљу или на ваздуху (споријом брзином) до собне температуре, што је одлика неких видова степенастог каљења.



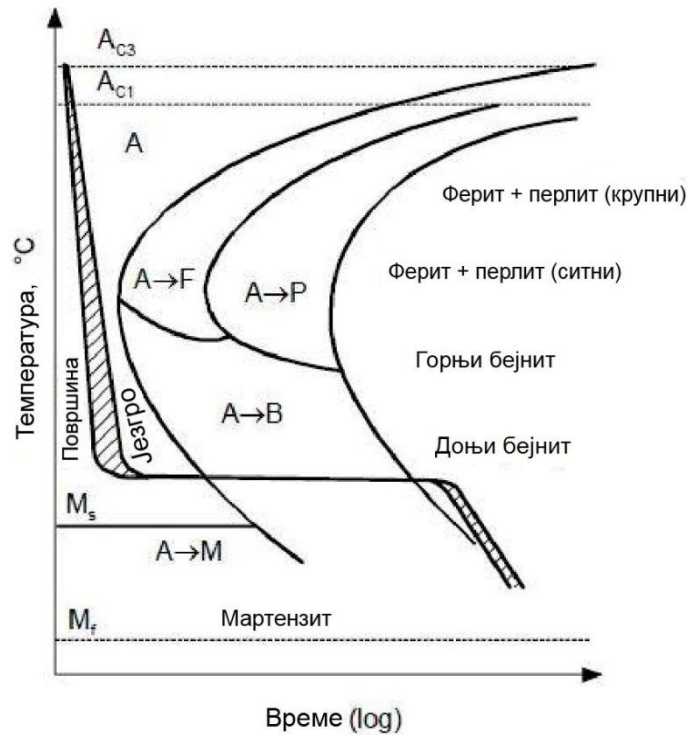
Слика 3.5 Дијаграм континуалног хлађења при мартензитном каљењу челика [1]

**Степенасто мартензитно каљење (мартемперинг)** (сл. 3.6) се примењује код делова од угљеничних челика танких попречних пресека (око 10 mm). Долази до промене брзине хлађења нешто изнад температуре  $M_s$  (око 300°C, у зависности од садржаја угљеника и легирајућих елемената). Део се убацује у каду са раствором соли константне температуре, како би се уједначила температура по целом пресеку. Не сме се превише задржати на овој температури, јер може доћи до дифузионе изотермичке промене, која одговара равнотежном стању. После тога, део се вади из каде и хлади на ваздуху до собне температуре. У овом периоду се може пластично деформисати у пресама или на бакарним плочама (бакар има одлична својства температурске проводности, па се хлађење не омета), у циљу исправљања облика (спречавања витоперења), а код добро прокаљивих челика и смањивања заосталих термичких и структурних напона, а са тим и могућности настанка прелина.



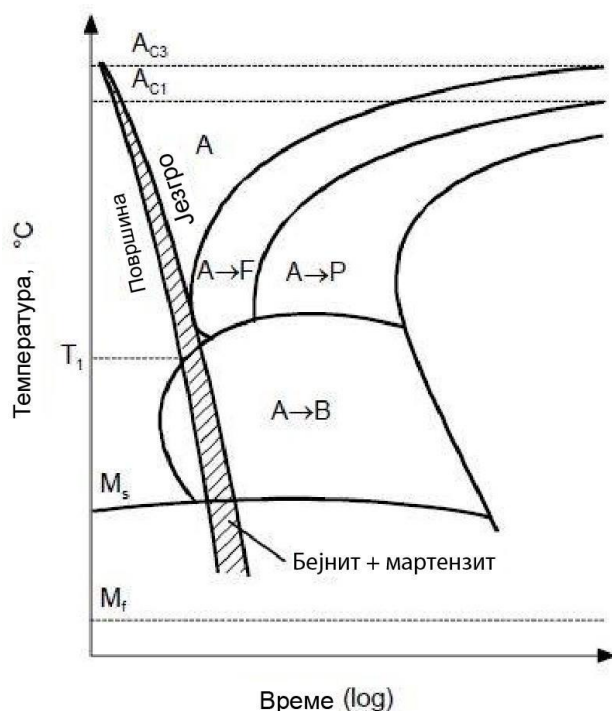
Слика 3.6 Дијаграм хлађења при степенастом мартензитном каљењу челика [1]

**Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг)** (сл. 3.7), тј. каљење са изотермичким преображајем потхлађеног аустенита. После довољног прогревања за настанак аустенита, део се уводи у купатило константне температуре (250 до 350°C) и задржава до потпуне промене аустенита у бејнитну структуру, тзв. *доњи бејнит*. После тога следи произвољно хлађење до собне температуре. Челик бејнитне струкуре је мекши од мартензита (тврдоће 40 до 58 HRC), али се одликује знатно већом пластичношћу и жилавошћу од мартензита. Овај вид каљења се примењује код делова малих попречних пресека, израђених од угљеничних и нисколегираних челика. Није погодно овако калити делове са већим пречницима, јер се због краћег времена инкубације у унутрашњим слојевима може јавити перлитна структура. Овај поступак каљења даје сличне механичке особине као и термичка обрада побољшања. О овом виду термичке обраде ће бити више речи у неком од наредних поглавља.



Слика 3.7 Дијаграм изотермичког бејнитног каљења челика [1]

**Континуално бејнитно каљење** (сл. 3.8) се заснива на загревању подеутектоидног челика на температуру изнад  $A_{c3}$ , потом прогревања на тој температури одређено време. После тога, део се хлади континуално брзином мало мањом од критичне. Код овог вида каљења крива хлађења сече криву почетка разлагања потхађеног аустенита у бејнит (при  $T > M_s$ ). После опадања температуре испод  $M_s$ , само се преостали део аустенита претвара у мартензит.



Слика 3.8 Дијаграм континуалог бејнитног каљења челика [1]

**Прекидно каљење** се изводи тако што се део загрева до одређене температуре, прогрева, па затим хлади у два расхладна средства. Прво се део потопи у воду док се не охлади на температуру од приближно 300°C. После тога, потапа се у уље или хлади на ваздуху до собне температуре. Овај вид степенастог каљења се може применити и за веће пресеке, зато што је брзина хлађења у води велика, па се за кратко време може изједначити температура по целом пресеку, а да се притом аустенит не трансформише у бејнит. Међутим, како би се овај поступак правилно извео, потребно је велико искуство калиоца или прецизни мерни уређаји, с обзором на то да је тешко уочити када је део охлађен на приближно 300°C, тј. када га је потребно извадити из воде. Овим поступком каљења могу се избећи деформације делова при каљењу, као и димензијске грешке и прслине.

**Таложно каљење (дисперзионо отврђавање).** Аустенитни челици и неки нежелезни метали могу се таложно калити, тј. дисперзионо отврђнути. Тај поступак се састоји из комбиновања операција *пресићења* и *вештачки изазваног старења*.

**Пресићење** је вид термичке обраде који се одвија тако што се део загреје на температуру 30 до 50°C изнад температуре граничне растворљивости, прогрева на тој температури, па затим брзо хлади до собне температуре. На овај начин се добијају боља својства пластичности (због прелаза двофазне структуре у једнофазну), а притом својства отпорности остају практично непромењена.

**Вештачко старење** се постиже тако што се претходно пресићен део загрева до температуре ниже од граничне растворљивости, прогрева на тој температури, па затим хлади. Тако долази до издвајања вишка састојака из пресићеног раствора, у облику

фазе високе дисперзије. Према томе, старење доводи до ојачања које се примећује по расту својстава отпорности и паду пластичности. Природно старење се одвија на околној температури у много дужем временском периоду.

**Каљење на ниским температурама** се изводи да би се евентуални заостали аустенит трансформисао у мартензит. То се постиже хлађењем дела до температуре од  $-30^{\circ}\text{C}$ , па и до  $-180^{\circ}\text{C}$ . Користи се код челика са садржајем угљеника изнад 0.5%, као и код легираних и неких конструкционих челика, јер је количина заосталог аустенита код нискоугљеничних челика незнатна. Количина заосталог аустенита, пре свега, зависи од садржаја угљеника, тј. њихов однос је у позитивној корелацији.

Хлађење испод  $0^{\circ}\text{C}$  није неопходно изводити директно из аустенитног подручја, већ се може прекинути на собној температури, па накнадно наставити. Међутим, предуго задржавање на собној температури може довести до стабилизације заосталог аустенита и умањења ефекта термичке обраде.

За хлађење са ових температура, користе се разна средства. Коришћењем  $\text{CO}_2$  у чврстом стању (тзв. суви лед), део се може охладити до температуре од  $-78^{\circ}\text{C}$ . За снижавање температуре до  $-180^{\circ}\text{C}$ , користе се течни ваздух и течни азот (тзв. криогена техника). Међитим, у већини случајева није потребно хладити челик испод  $-80^{\circ}\text{C}$ , јер је до те температуре сав заостали аустенит већ трансформисан.

Овим поступцима се повећава тврдоћа и постиже стабилизација структуре и одржање димензија дела. Такође се може спречити или одложити процес природног старења, ако је то у пракси потребно. Ипак, ови поступци нису превише заступљени због веома важног фактора – исплативости, као и захтева за накнадним отпуштањем ради смањења унутрашњих напона.

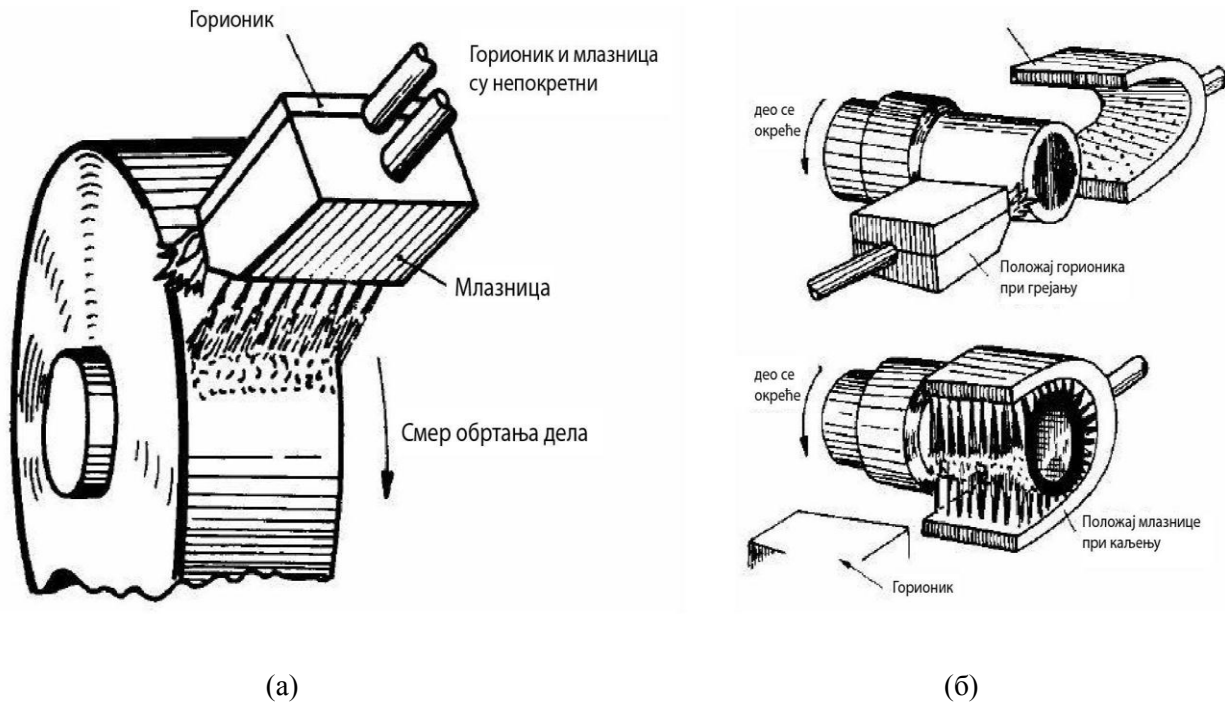
### 3.1 Начини каљења

Поред класичног загревања у пећима и старинских поступака загревања зарањањем челика у жар, са напретком технике, појавили су се нови начини загревања челика при каљењу и то уз помоћ горивог гаса или коришћења електричне енергије.

**Површинско пламено каљење** је вид каљења код кога се део загрева коришћењем пламена горионика са горивим гасом (ацетилен, светлећи гас, метан, пропан, бутан и др.), слично поступцима гасног заваривања. Температура која се постиже смешом ацетилена и кисеоника достиже и до  $3100^{\circ}\text{C}$ , уз помоћ метана  $2700^{\circ}\text{C}$ , смешом пропана и бутана достиже се температура од  $2650^{\circ}\text{C}$ , а коришћењем светлећег гаса  $2550^{\circ}\text{C}$ . Према томе, поступак загревања је доста бржи од класичних, а период прогревање краћи. Због тога не долази до превеликог раста аустенитних зрна, па се добија повољнији, ситнозрнасти мартензит. Међутим, због термичког хистерезиса, критичне температуре структурне промене су око  $150^{\circ}\text{C}$  изнад почетне вредности  $A_{c3}$ .

Овај поступак каљења је веома погодан за повећање брзине каљења, а са тим и продуктивности. То се постиже тако што се операције загревања и хлађења одвијају

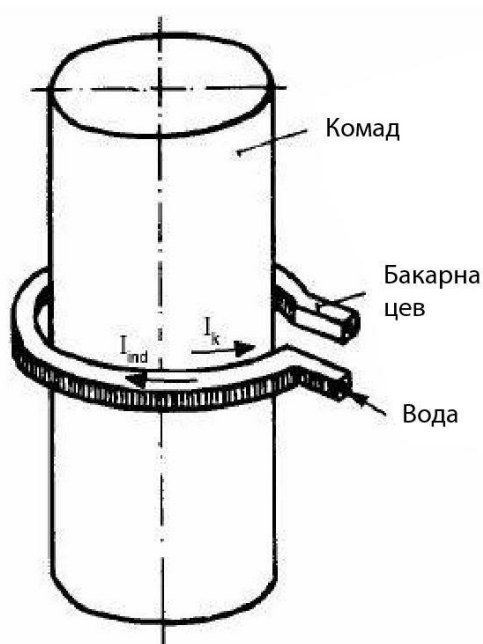
једна за другом (док се део или горионик и довод млаза расхладног средства крећу) и поступак се понавља док цела површина не буде закаљена. Овакав вид каљења се назива *поступно каљење* (сл. 3.9а). Још један вид каљења, тзв. *пламено каљење изједна* (сл. 3.9б), изводи се тако што се део или његова површина загрева пламеном, а затим хлади прскањем или у кади.



Слика 3.9 Површинско каљење пламеним гасом: (а) поступно и (б) изједна [1]

Ови видови каљења су нарочито погодни за велике делове релативно једноставног облика, као што су зупчаници, вратила, фелне аутомобила, железнички точкови, водећи делови машина и др. Исплативи су за мале серије, зато што горионици нису превише скупи. Користе се код челика са садржајем угљеника од 0.3 до 0.5%, а код једноставнијих димензија и до 0.6%. Поред тога, гасно се могу калити и сиво, нодуларно и темперовано ливено гвожђе са садржајем угљеника у металниј основи не већом од 0.85%, како не би дошло до појаве прелина.

**Индукционо површинско каљење** је поступак код кога се загревање остварује генерисањем струје кроз површину комада. После загревања следи хлађење прскањем или у кади. Остварен је помоћу бакарне цеви савијене у облику дела који се кали, кроз коју се пропушта електрична енергија, како би се део загрејао и вода у циљу хлађења (сл. 3.10).

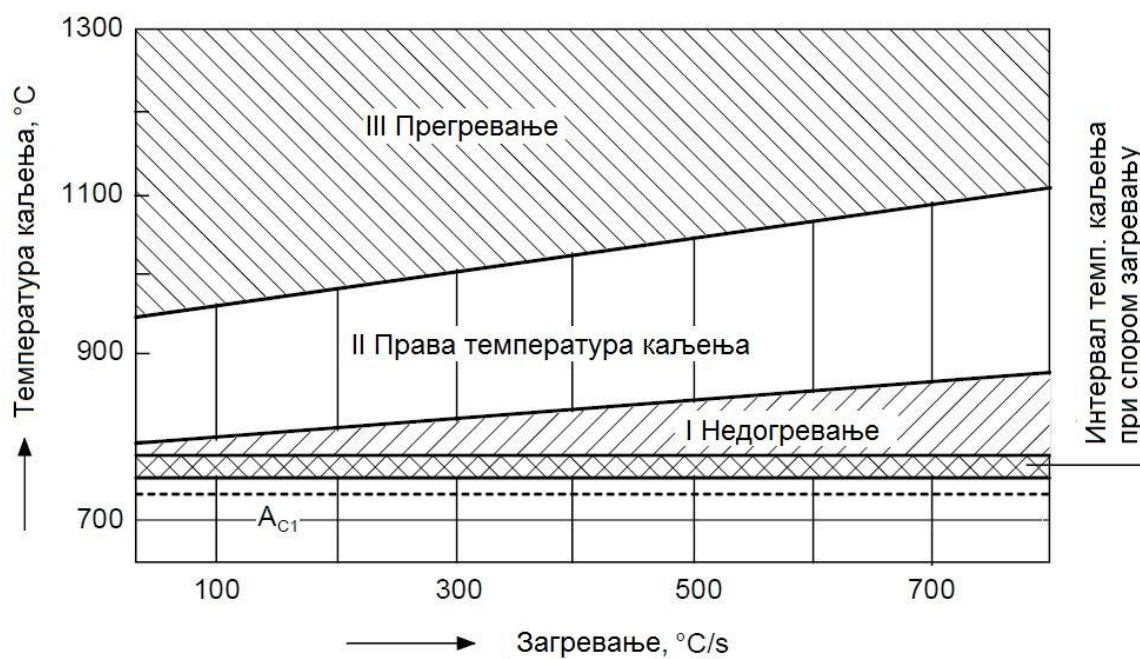


Слика 3.10 Површинско индукционо каљење [1]

Разликују се два вида индукционог каљења:

- загревањем и хлађењем целе површине одједном и
- загревањем и хлађењем само једног дела површине.

Да би се део правилно закалио, важно је прецизно одредити зависност брзине загревања и температуре каљења. Ова зависност је показана на слици 3.11.



Слика 3.11 Зависност брзине загревања и температуре каљења при површинском каљењу [1]

Овим поступком каљења добија се мартензит веће тврдоће и ударне жилавости и отпорности на заморно хабање, у односу на поступке са загревањем у пећима. Све је применљивији поступак, јер омогућава потпуну аутоматизацију процеса, па не захтева стручног калиоца за његово извођење.

Овај поступак каљења се користи за каљење коленастих вратила, ваљака, зупчаника завојних вретена, брегастих осовина, бургија, мачева моторних тестера, точкова кранова, зупчаних спојница итд. Међутим, ови поступци, су због великог утрошка енергије, применљиви само у серијској и масовној производњи.

### 3.2 Прокаљивост челика

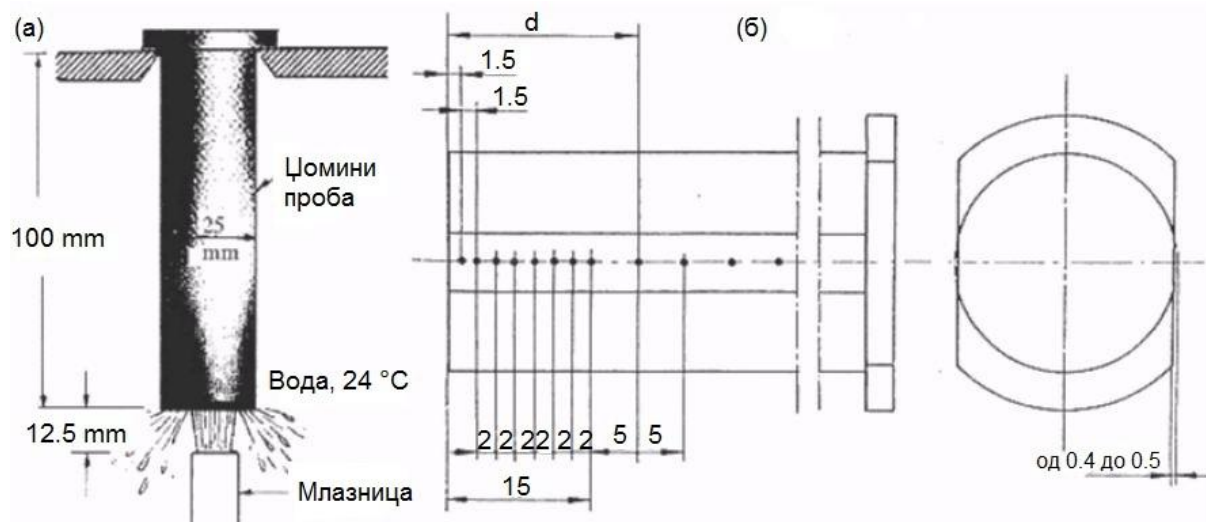
Способност челика да се каљењем добије слој мартензитне или мартензитно-труститне структуре (трустит – двофазна структура финог перлита који чине танке ламеле ферита и цементита, добијене потхлађивањем и изотермичким задржавањем челика на приближно 550°C) до одређене дубине, назива се прокаљивост. У зависности од попречног пресека дела и брзине хлађења, добија се различита структура од површине ка унутрашњости дела. С обзиром на то да се спољашња површина брже хлади од унутрашњости дела, у језгру дела ће се разлагањем аустенита добити ламеларна структура ферита и цементита (сорбит, трустит или перлит). Ако се и језгро охлади брзином већом од критичне, по целом пресеку ће се добити мартензит, тј. прокаљивост је потпуна. Ако је за закаљивање структуре потребна мања вредност брзине хлађења, значи да је прокаљивост челика већа и обрнуто.

За дубину до које је део закаљен се узима она на којој је настала структура “полумартензита” (50% мартензит + 50% трустит). Тврдоћа ове структуре зависи од садржаја угљеника. Са порастом стабилности потхлађеног аустенита, умањује се и потребна брзина хлађења, тј. повећава се прокаљивост. На ову особину челика позитивно утичу легирајући елементи: манган, хром, молибден, бор итд. Они делују на повећање стабилности потхлађеног аустенита. На повећање прокаљивости утичу и елементи који на високим температурама граде постојане карбиде (волфрам, титан, ванадијум и други), јер се они на повишеним температурама растварају. Недовољно високе температуре загревања и нерастворени карбиди смањују прокаљивост. Нискоугљенични челици имају веома лошу закаљивост и практично их је немогуће закалити на дубину већу од 15 mm. Повећање аустенитних зрна позитивно утиче на прокаљивост челика чак и до неколико пута. Према томе, прокаљивост челика зависи од температура загревања, величине аустенитних зрна, садржаја угљеника и легирајућих елемената.

**Испитивање прокаљивости чеоним каљењем (Џомини методом).** За челик је потребно имати директну повезаност између тврдоће и брзине хлађења, међутим та повезаност је увелико нелинеарна. За одређивање ове зависности, у пракси се користи стандардна метода за одређивање прокаљивости челика чеоном методом, тзв. Џомини метода. Код ове методе, сви параметри који могу утицати на тврдоћу по дубини челика

(осим хемијског састава), одржавају се константним (услови хлађења, димензије узорка и др.).

Цилиндричан узорак се равномерно загрева и прогрева у аустенитном подручју, а затим хлади млазом воде константне брзине истицања (сл. 3.12а). После хлађења до собне температуре, брусе се две наспрамне површине које су паралелне са осом узорка и на њима се мери тврдоћа. Тако се одређује тврдоћа узорка по дебљини до које је закаљен. Мерење тврдоће је по HRC скали и изводи се дуж осе на сваком пару брушених површина (сл. 3.12б).



Слика 3.12 Схематски приказ испитивања прокаљивости чеоним хлађењем (по Џоминију) [3]

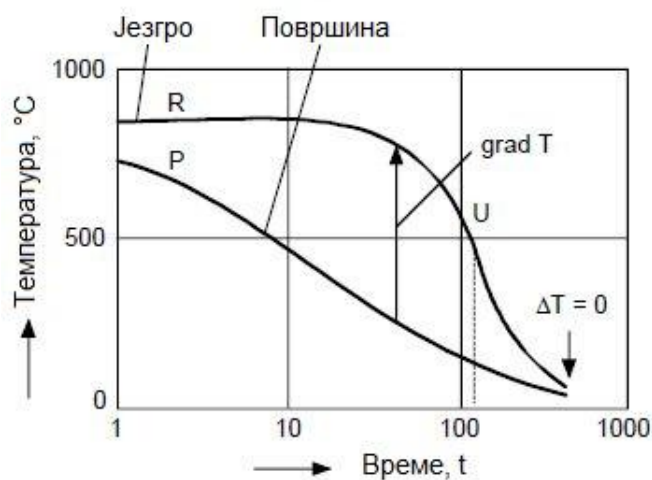
### 3.3 Грешке и сопствени напони при каљењу челика

Ако се не поштују одређена правила при загревању, прогревању и хлађењу, као и основни принципи каљења челика, врло лако може доћи до настанка грешака или сопствених напона у каљеном делу. Ови напони могу проузроковати деформисање, одступања од жељених димензија или настанак пукотина на површини, али и заостале напоне који се могу суперпонирати са радним и довести до каснијег лома дела. У току термичке обраде челика, појављују се напони који су променљивог смера и интензитета и називају се *прелазним* напонима. Напони који остају у делу и после обраде су заостали *сопствени* напони или *унутрашњи* напони.

Сопствени напони могу настати због неравномерног загревања и хлађења, тзв. *термички* напони, али и због структурних преображаја у еластичном подручју, тзв. *структурни* напони. Највећи сопствени напони се јављају баш код каљења, јер се поред термичких напона (због великих брзина хлађења), јављају и структурни (због аустенитно-мартензитне трансформације).

Термички напони су сразмерни градијенту температуре, тј. порасту температуре у правцу нормале на изотермичку површину ( $gradT = \frac{\partial T}{\partial n}$ ), (сл. 3.13). При чему се индуковани термички напон мења са променом температуре по обрасцу:  $\sigma = E\alpha\Delta T$ , где

су  $E$  – модул еластичности материјала,  $\alpha$  – коефицијент линеарног термичког ширења и  $\Delta T$  – разлика температуре по дубини попречног пресека.

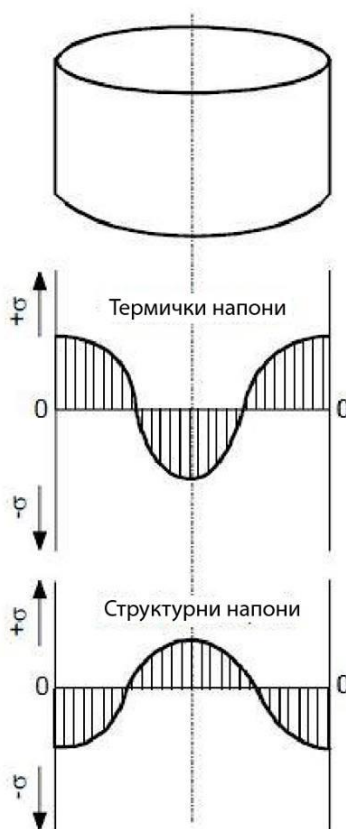


**Слика 3.13** Промена градијента при хлађењу ваљка пречника 100 мм у води [1]

Структурни напони настају због чињенице да се у већини случајева не може остварити иста структура по целом попречног пресека окаљеног дела. Свака од ових структура има различиту специфичну запремину, при чему мартензит важи за структуру са највећом специфичном запремином. Ако се претпостави да је до неке дубине попречног попречног пресека дела мартензитна структура, а од те дубине до краја трустит или перлит, може се закључити ће се на спољашњим зонама јавити термички напони притиска (унутрашња структура омета спољну да се шири), а у унутрашњим напони затезања.

Суперпонирањем термичких и структурних напона добија се стварни распоред и интензитет укупних унутрашњих (заосталих) напона.

На слици 3.14 је приказана расподела термичких и структурних напона по површини попречног пресека дела.



**Слика 3.14** Расподела термичких и структурних напона у цилиндричном закаљеном делу [1]

Унутрашњи напони, у зависности од расподеле по попречном пресеку, могу довести до појаве различитих видова деформација (промене запремине, витоперења тањих делова, кривљења профила итд.), а у неким случајевима и до разарања делова. Код крупнозрне структуре, могу се јавити велики заостали напони због увећане концентрације напрезања по површини зрна (и ако су крупнија зрна наизглед повољнија, јер им је критична брзина хлађења нижа, а самим тим нижи и термички напони). Међутим, због великих заосталих напона, укупни напони су ипак већи.

Слична напрезања се могу уочити и при загревању дела, само што им је знак супротан, па се у спољашњим зонама јављају термички напони затезања, а у унутрашњим напони притиска.

## 4. ОТПУШТАЊЕ И ПОБОЉШАЊЕ ЧЕЛИКА

### 4.1 Отпуштање

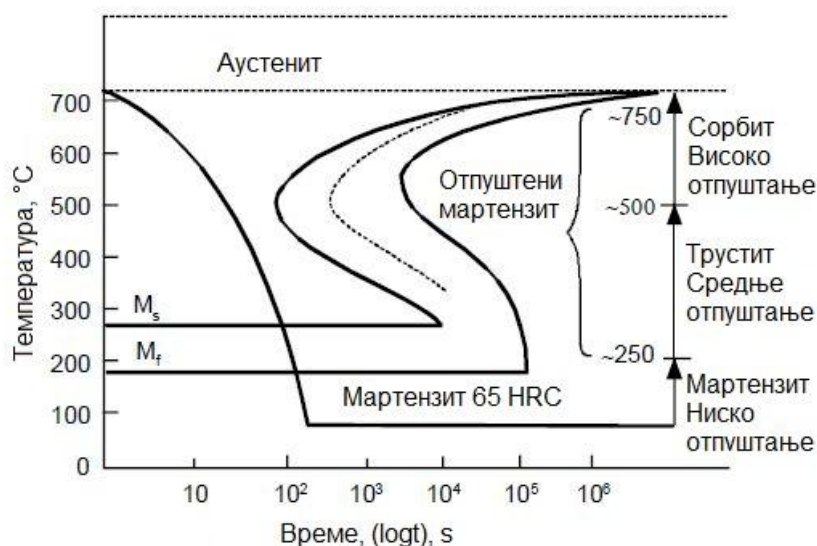
Као што је већ више пута споменуто, каљењем се добија крta и тврда мартензитна структура, неповољна за практичну примену. Због тога се окаљени делови у већини случајева подвргавају накнадној термичкој обради која се назива *отпуштање*. Сврха отпуштања јесте да се смање заостали унутрашњи напони и кртост челика. То подразумева побољшање жилавости и истегљивости, а при том незнатно смањење добрих својстава мартензитне структуре (јачине и тврдоће).

Термичка обрада отпуштања се остварује тако што се челик загрева до температуре ниже од  $A_{C1}$ , прогрева одређено време на тој температури, а затим споро хлади. Овим поступцима се нестабилна струкура закаљеног дела трансформише у стабилнију (отпуштену) структуру. Кретање атома се изводи интерстицијском дифузијом која је карактеристична за равнотежне структурне промене.

У зависности од температуре на коју се челик загрева разликујемо три врсте отпуштања:

- **Ниско отпуштање** подразумева загревање дела до  $250^{\circ}\text{C}$ , прогревање 1 до 2.5  $h$  (у неким случајевима до 40  $h$ ) и затим лагано хлађење на ваздуху. Долази до трансформације тетрагоналног мартензита у кубни, који је мање крт. Ову трансформацију карактерише незнатно повећање жилавости, без битнијег смањења тврдоће, јачине и отпорности на хабање. У случају постојања заосталог аустенита, он се трансформише у мартензит и доводи до незнатног повећања запремине. Окаљени челик са садржајем угљеника од 0.6 до 1.3% после отпуштања има тврдоћу од 58 до 63 HRC. Ниском отпуштању се подвргавају поједини алати за резање, мерни инструменти и делови који су претходно били изложени хемијско-термичкој обради (цементацији, калајисању, карбонитрирању итд.)
- **Средње отпуштање** се изводи загревањем окаљеног челика на температуру од  $350$  до  $500^{\circ}\text{C}$ , држањем одређено време на датој температури, а затим хлађењем у води. Овако се део угљеника истискује из мартензитне структуре. Он се после тога издваја на површини зрна у виду субмикроскопски ситних цементитних честица, тако се образује *труститна структура*. Њу карактеришу јачина и напон течења исти (слични) као после каљења, али притом повећана граница еластичности. Средње отпуштени челик има тврдоћу од 40 до 50 HRC, као и повећана својства жилавости.
- **Високо отпуштање** се изводи загревањем челика на температуру од  $500^{\circ}\text{C}$  до  $A_{C1}$  и држањем од 1 до 6  $h$ , у зависности од димензије дела. Овако долази до укрупњавања цементитних ламела, карактеристичних за *сорбитну структуру*. Тако се постиже најбољи однос између јачине и жилавости.

Ова три начина отпустања, као и структуре које се тако добијају, приказани су на слици 4.1.



**Слика 4.1** Три вида отпустања после каљења, приказана на дијаграму континуалног хлађења челика [1]

Треба споменути да су својства добијена отпустањем у функцији температуре и времена прогревања. То значи да се могу добити исте карактеристике и структура ако се део дуже прогрева на ниској или краће на високој температури.

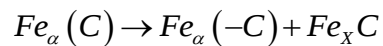
## 4.2 Промена мартензита при отпустању угљеничних челика

Мартензит је пресићен чврст раствор са вишком слободне енергије и као такав, у стабилно стање може прећи само излучивањем вишка угљеника из раствора у виду карбида, што у ствари представља дифузиони процес који се не може остварити на ниским температурама, већ само дужим задржавањем (споријим хлађењем) на вишим температурама. Према томе, мартензит је на собној температури веома стабилна фаза, али довођењем топлоте, дифузија се знатно олакшава. Процесом отпустања, утиче се на смањење или уклањање микронапрезања (односи се на структурне промене при настајању мартензита) и макронапрезања (настаје због температурског градијента услед брзог хлађења при каљењу).

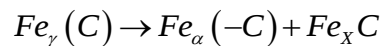
Свакој температури отпустања одговара одређено стање челика. Ова стања се постижу у релативно кратким временским периодима и мало се мењају у току даљег отпустања. Поједина стања се постепено мењају са порастом температуре отпустања, међутим, постоје уски температурски интервала у којима су промене знатне. У зависности од температуре загревања разликујемо четири фазе промене мартензита при отпустању.

**Разлагање мартензита (прва фаза промене при отпустању).** До приближно 80°C, мартензит не подлеже никаквим променама. Прве промене се појављују тек у температурском распону од 80 до 200°C (150°C). Њих карактерише излучивање вишка

угљеника из чврстог раствора у виду субмикроскопских честица карбида (дебљине неколико атомских слојева). Карбид који се излучује је променљивог састава (од  $Fe_2C$  до  $Fe_3C$ ) и густо спаковане хексагоналне кристалне решетке. Ови карбиди се најлакше излучују по границама мартензитних зрна и местима са великим бројем нагомиланих грешака. Резултат ових промена јесте делимичан губитак запремине дела, који настаје због губљења тетрагоналности мартензитне кристалне решетке, а са тим и опадање притискајућих напона који делују на аустенитна зрна, као и укупних унутрашњих напона кристалне решетке, који имају ефекат слабљења структуре. Прва трансформација при отпуштању представља се преко једначине [2]:

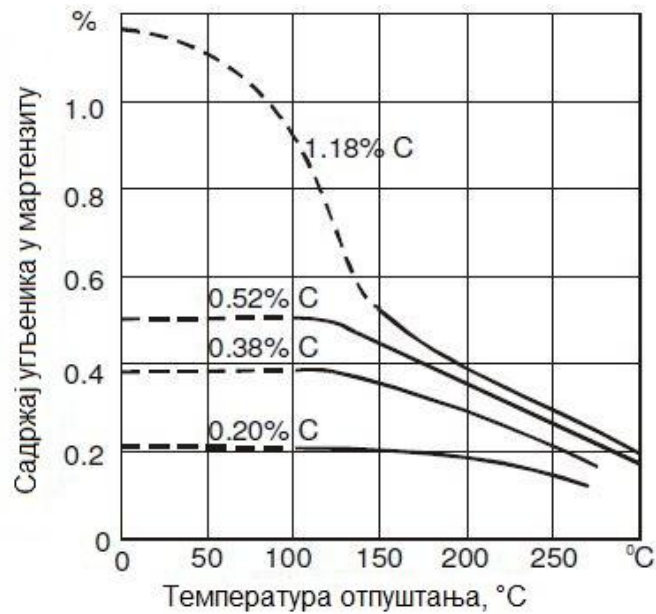


**Трансформација заосталог аустенита (друга фаза промене).** Друга фаза разлагања мартензита траје при загревању од 200 до 300°C (по неким изворима и до 350°C). У овој фази се наставља издвајање карбида, до те мере да при крају промене у раствору остане свега 0.2% C. Долази и до даљег снижавања притискајућих напона на кристалним зрнима заосталог аустенита. Захваљујући опадању ових напона, у другој фази се одвија даља промена заосталог аустенита у мартензит (или доњи бејнит), започета још при температурама од 150 до 180°C. У овој фази доминантан утицај има управо трансформација заосталог аустенита, јер утиче и на повећање специфичне запремине челика. Продукт ове трансформације јесте смеша пресићеног  $\alpha$ -чврстог раствора и карбида гвожђа и представљен је једначином [2]:



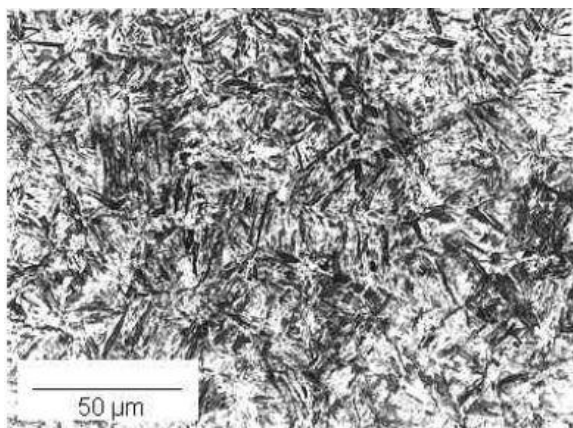
По карактеру трансформације и природи насталих фаза, овај процес је веома сличан бејнитном преображају потхлађеног аустенита.

На слици 4.2, приказан је утицај температуре на садржај угљеника у отпуштеном мартензиту на температурама мањим од 300°C.

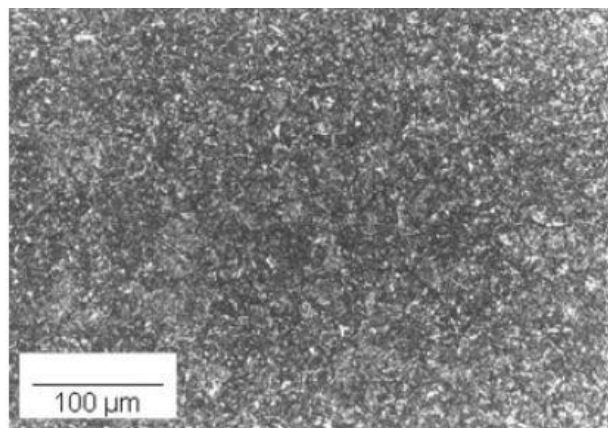


Слика 4.2 Утицај температуре на садржај угљеника у отпуштеном мартензиту [12]

Због насталих промена у прве две фазе добијена је двофазна структура делимично пресићеног чврстог раствора угљеника у  $\alpha$ -Fe и већ поменутих карбида. Ова структура се назива *отпуштеним мартензитом*. Он је под микроскопским снимком веома сличан обичном мартензиту, осим што има тамнију основу (због промене заосталог аустенита у регуларни мартензит) и светлије карбидне иглице (због мањег садржаја угљеника у раствору) (сл. 4.3). Тврдоћа отпуштеног мартензита је мања од тврдоће регуларног и износи од 500 до 600 HV, а зависи од температуре загревања, састава челика и споменутих процеса издвајања карбида праћених смањењем унутрашњих напона, као и од удела аустенита који се трансформисао у мартензит (повећава тврдоћу).



(а)



(б)

Слика 4.3 Микроскопски снимак структуре регуларног (а) и отпуштеног (б) мартензита [13]

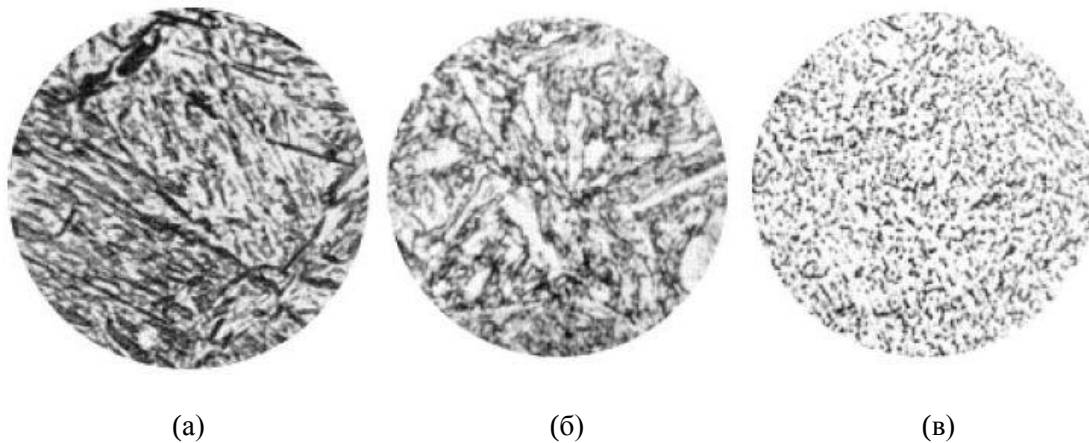
**Уклањање заосталих напона и трансформација карбида (трећа фаза).** У трећој фази отпуштања, при загревању од 300 до 400°C, долази до даљег излучивања карбида

и њиховог преображаја у субмикроскопске честице цементита, као и директног стварања клица цементита. После ових процеса долази до скоро потпуног губитка тетрагоналности мартензита и губитка пресићења чврстог раствора. Наиме, на температури од  $400^{\circ}\text{C}$ , постиже се равнотежни садржај угљеника. То значи да је се мартензит, скоро у потпуности, преобразио у смешу ферита и цементита. Изглед карбида се од ламеларног трансформише у нодуларни (величине приближно  $0.3\ \mu\text{m}$ ), а као резултат ових процеса, добија се структура средње отпуштеног мартензита (тзв. *отпуштеног трустита*), који се састоји од веома ситних лоптица цементита у феритној основи; према томе, дошло је до промене стања карбида, тј. потпуног преовладавања цементита. Упоредо са насталом трансформацијом, потпуно се отклањају заостали напони који су се појавили при настанку мартензита, а у овој фази долази до поновног смањења запремине дела.

**Укрупњавање карбида (четврта фаза).** У четвртој фази која одговара температури од  $400^{\circ}\text{C}$  до  $A_{C1}$  долази до коагулације (груписања) претходно насталих лоптица цементита. Оне се међусобно повезују и образују веће лоптице (реда величине до  $30 \cdot 10^{-5}\ \text{mm}$ ). На температурама изнад  $600^{\circ}\text{C}$  цементит се излучује као микроскопски и праћен је порастом зрна ферита.

Последње две фазе преображаја доводе до образовања двофазне структуре, мешавине ферита и цементита са дисперзијом која се смањује са порастом температуре. Продукти разлагања мартензита имају сфероидно излучен цементит у феритној основи (у односу на перлит и бејнит код којих је ламеларан, односно плочаст). Ова структура се назива *отпуштени сорбит*. Тврдоћа ове структуре зависи од дисперзије цементита и широког је опсега (од 200 до 500 НВ). Сорбит је структура добијена загревањем мартензита на  $650$  до  $680^{\circ}\text{C}$  и лаганим хлађењем (тврдоће око 300 НВ). Структура која се добија загревањем изнад  $680^{\circ}\text{C}$  се назива лоптастим цементитом, тј. сферидитом или зрнастим перлитом (тврдоће 200 до 300 НВ). Загревањем челика изнад  $A_{C1}$  долази до трансформације лоптастог цементита у аустенит.

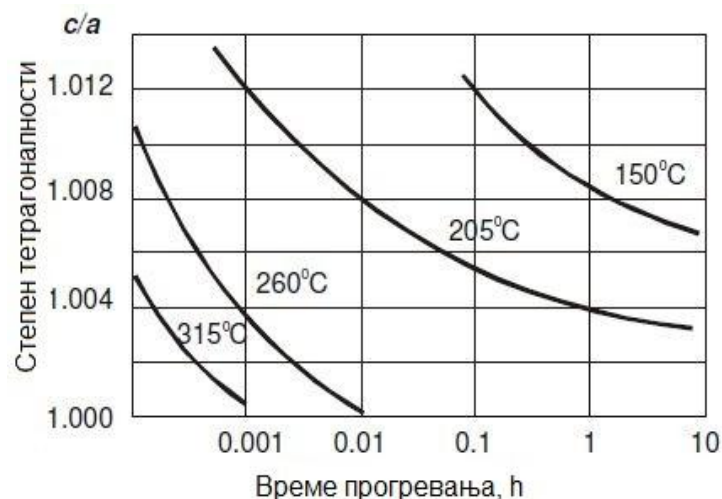
На слици 4.4 приказана је промена структуре при различитим видовима отпуштања мартензита.



**Слика 4.4** Структуре регуларног мартензита (а), трустита (б) и сорбита (в) [13]

Због запреминских разлика између мартензита и аустенита, у току трансформације мартензита долази до промене димензија челика (линеарних димензија). При томе, због излучивања угљеника из пресићеног раствора, долази до смањења, а због преображаја заосталог аустенита у мартензит, до повећања специфичне запремине.

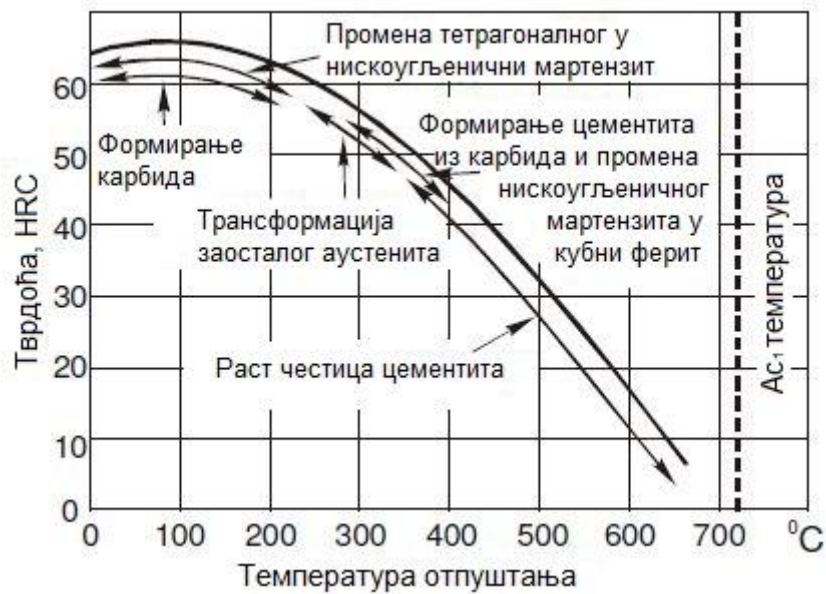
У пракси су сви ови преображаји континуални, чак долази и до њихових преклапања, а температуре преображаје нису тачне, већ приближне, јер зависе како од примеса, тако и од спољашњих услова у којима се термичка обрада изводи. Такође, на ове процесе веома утиче и време прогревања (исти ефекат се може постићи дугим прогревањем на нижим, као и краткотрајним на вишим температурама). На слици 4.5, приказана је зависност тетрагоналности мартензита ( $c/a$ , при чему је “с” издужени параметар тетрагоналне кристалне рашетке), од температуре и времена прогревања.



**Слика 4.5** Утицај температуре и времена прогревања на степен тетрагоналности кристалне решетке мартензита при отпустању [12]

Са порастом температуре прогревања долази и до пада тврдоће и јачине на кидање, па се нисколегирани алатни челици жаре на температурама које не прелазе 250°C, како би задржали потребне механичке карактеристике, од којих се пре свих издваја отпорност на хабање.

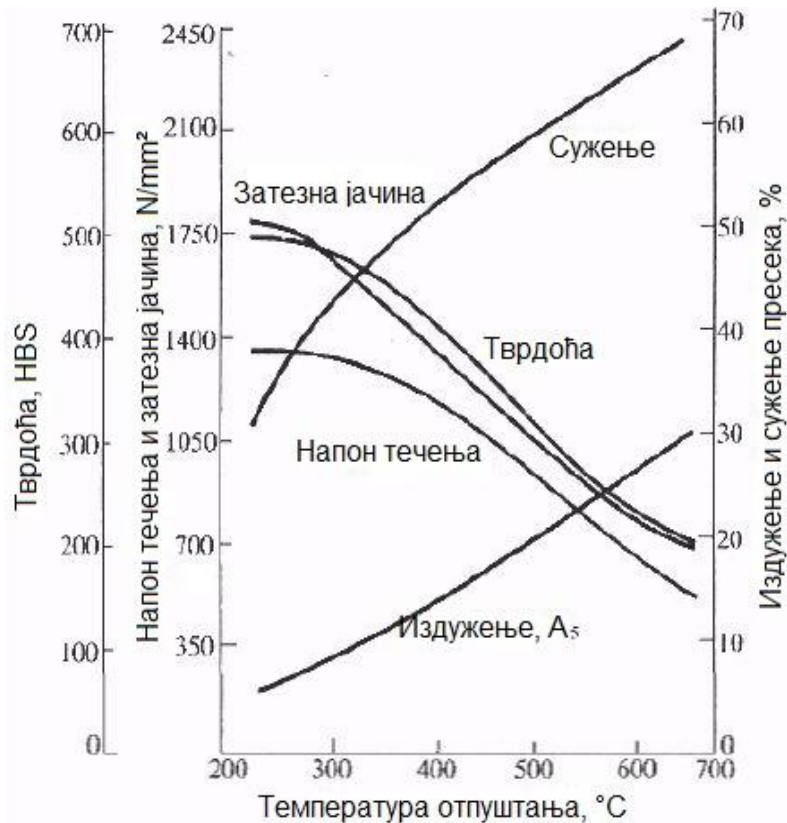
На слици 4.6 приказана је промена тврдоће и структуре челика при отпуштању.



Слика 4.6 Промена тврдоће и структуре при отпуштању закаљеног челика [12]

Као што је већ наведено, структуре које се добијају разлагањем мартензита су *сорбит* и *трустит*. Међутим, овако настале структуре немају иста својства и унутрашњу грађу као *сорбит* и *трустит* који настају при изотермичкој трансформацији аустенита. Разлике настају због другачије груписаног цементита. Кугличаст цементит који настаје отпуштањем мартензита знатно побољшава својства пластичности и жилавости, а притом нема велики утицај на тврдоћу и јачину коју поседују структуре са ламеларним цементитом (карактеристичним за сорбит и трустит који су добијени изотермичком трансформацијом аустенита).

На слици 4.7, приказане су промене својстава угљеничног челика при проласку кроз наведене фазе отпуштања.



Слика 4.7 Утицај температуре отпустања на својства угљеничног челика Č 1730 [3]

### 4.3 Промена мартензита при отпустању легираних челика

Легирајући елементи у челику имају велики утицај на температурски интервал мартензитних промена, као и на продукте тих промена. Они утичу на челик тако да се мења кинетика аустенитне промене при хлађењу, али доводе и до кашњења појединих промена које при отпустању настају. Већина легирајућих елемената (изузетак је  $Co$ ) помера криву почетка промене аустенита (на дијаграму континуалног хлађења) удесно, што директно утиче на смањење критичне брзине хлађења која је потребна да би се челик окалио. Карбидотворни елементи проузрокују раздвајање перлитног и бејнитног преображаја, па се због тога јавља температурски интервал повишене стабилности аустенита. Већина легирајућих елемената снижава температуру почетка мартензитне трансформације ( $M_s$ ). Такав утицај имају  $Mn$ ,  $Mo$ ,  $Cr$ ,  $Ni$  и  $Cu$ , силицијум практично не утиче на ту температуру, док  $Al$  и  $Co$  имају обрнут ефекат, тј. подижу  $M_s$ .

При отпустању легираних челика поједини процеси се померају ка вишим температурама; нпр. разлагање мартензита, коагулација карбида, као и трансформација заосталог аустенита. Поједини легирајући елементи подижу температуру мартензитне промене, као нпр.  $Ti$ ,  $V$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$  и  $Si$ , док нпр.  $Cr$ ,  $Mn$  и  $Si$  подижу температуру аустенитне промене. Коагулација карбида код челика легираних са  $Cr$ ,  $W$  и  $Si$ , одвија се на температури око  $450^{\circ}C$ , а код челика са  $Mo$  и  $V$ , та температура је подигнута на приближно  $550^{\circ}C$ . Наиме, још је уочено да без обзира на састав челика, при бржем загревању, температуре појединих трансформација померају се навише. Легирајући

елементи чија карбидотворност је испред гвожђа, везују угљеник који је излучен из мартензита и тако граде сложене карбиде различитих температура растварања у аустениту. Због ове појаве процес разлагања карбида на температурама испод  $400^{\circ}\text{C}$  се одвија делимично као код угљеничних челика, док се атоми гвожђа у појединим карбидима замењују атомима легирајућих елемената.

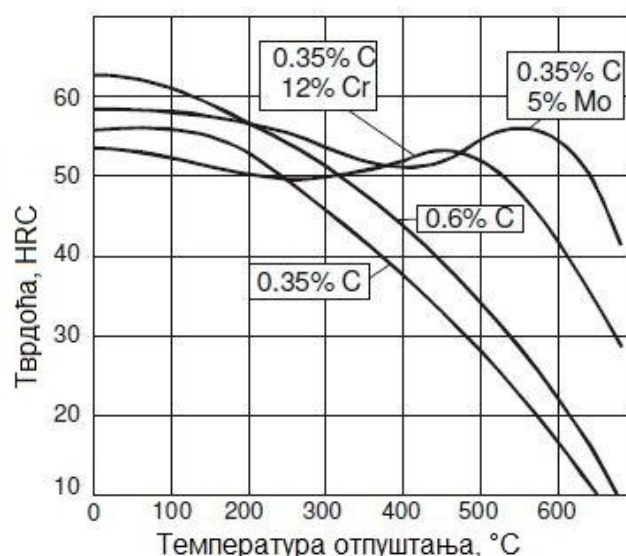
Разлике у карактеру промена угљеничних и легираних челика нарочито настају изнад  $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$  (четврти стадијум преображаја), зато што је цементит на тим температурама нестабилан. Дифузија гвожђа и карбидотворних елемената настаје на температурама изнад  $400^{\circ}\text{C}$ , док је на нижим температурама највећим делом присутна дифузија угљеника (излучују се карбиди слични цементиту, нпр.  $\text{Fe}_2\text{C}$ ). Ови процеси трају све док се не постигне равнотежни састав карбида.

Легирани карбиди настају за време отпуштања као резултат промене комплексних карбида  $(\text{Fe}, \text{M})_3\text{C}$ , према два различита механизма. Код првог механизма, нова фаза расте на рачун полазног карбида, док се код другог механизма карбид разлаже, а уместо њега формира легирани карбид. Међутим, челици легирани елементима чија је склоност ка образовању карбида мања од склоности гвожђа, функционишу другачије. Наиме, ови елементи на вишим температурама дифундују из претходно насталих карбида (насталих при брзом хлађењу), у феритну основу челика.

На одређеним температурама и при погодном саставу челика, може доћи до трансформације једних карбида у друге. У појединим случајевима долази и до растварања карбида цементитног типа и издвајања специјалних легираних карбида. Ова појава се уочава тек на довољно високим температурама за постизање велике покретљивости атома угљеника и легирајућих елемената. Тада долази до издвајања поменутих карбида у веома дисперзном стању (расути су по металној основи челика). Код челика легираних  $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{W}$  или  $\text{Ti}$ , издвајање легираних карбида доводи до пораста тврдоће у области температура отпуштања од  $500$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Ова појава је названа *секундарна тврдоћа*. То значи да челик задржава високу тврдоћу, без обзира на коагулацију претходно издвојених карбида. На слици 4.8, приказане су промене тврдоће појединих легираних челика у зависности од температуре отпуштања.

Важно је поменути да код легираних челика долази до издвајања аустенита у температурском интервалу од  $450$  до  $500^{\circ}\text{C}$ , у коме се и специјални карбиди издвајају из мартензита. При том долази и до издвајања специјалних карбида из аустенита, после чега се он при хлађењу трансформише у мартензит. Због тога се може рећи да се отврдњавање изазвано издвајањем ових карбида повећава са трансформацијом заосталог аустенита. Потпуна трансформација аустенита у мартензит завршава се тек после поновљеног поступка отпуштања.

Треба указати на то да се после веома дугог отпуштања легираних челика на температурама блиским  $A_{\text{C1}}$ , карбиди гвожђа могу разложити уз издвајање графита. Овај процес одговара равнотежном систему  $\text{Fe}-\text{C}$ .

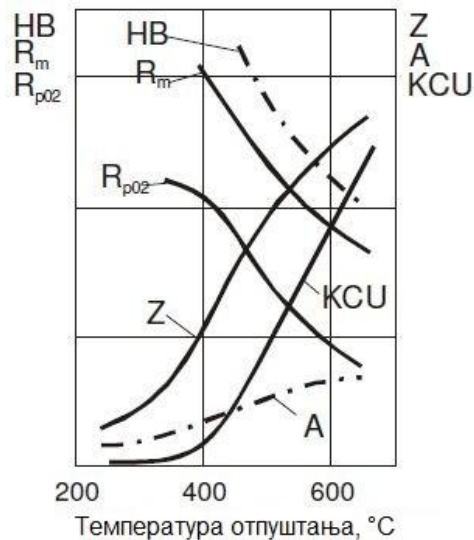


Слика 4.8 Промена тврдоће легираних челика у зависности од температуре [12]

Као што је већ споменуто, разлагање мартензита при отпуштању утиче, како на структурне, тако и на механичке особине челика. Порастом температуре преко  $500^{\circ}\text{C}$ , видно се смањује тврдоћа, јачина на кидање и напон течења, док при том расту издужење и сужење (контракција). Ово се објашњава смањењем удела угљеника у  $\alpha$  – чврстом раствору, нестанком физичке повезаности између карбида и  $\alpha$  – фазе и појавом опорављања челика, а после тога рекристализације и пораста карбида.

Легирани челици, а нарочито они који садрже карбидотворне елементе, имају већу тврдоћу од угљеничних челика после жарења на истој температури. Ово се дешава због кашњења мартензитног преображаја, као и формирања комплексних (легираних) карбида. Челици легирани великим количинама *Cr*, *Mo*, *V* и *W* (челици за рад на топло), чак могу добити на тврдоћи када се жаре на температурама од  $500$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Ово својство се јавља због уграђивања честица специјалних карбида у мартензит. Ови карбиди показују велику отпорност према пластичном деформисању.

На слици 4.9, приказана је зависност механичких особина легираних челика од температуре отпуштања.



**Слика 4.9** Механичке особине легираних челика у зависности од температуре отпуштања челика [12]

#### 4.4 Побољшање

Као што је претходно споменуто, побољшање представља комбинован поступак каљења и високог отпуштања. Овом комбинованом термичком обрадом се добијају висока својства напона течења и затезне јачине, издужења и ударне жилавости. После каљења, део има висока својства тврдоће и напона течења, а ниску пластичност и жилавост. Према томе, побољшањем се остварују добра својства и каљења и отпуштања. У одељку SRPS стандарда о означавању челика (SRPS EN 10027–1:2015) се чак издваја посебна врста челика, као челици за побољшање (поједини угљенични и нисколегирани челици).

Високим отпуштањем на 530 до 680°C после каљења, смањују се или потпуно уклањају заостали унутрашњи напони и структурне нехомогености, а мартензитна структура прелази у сорбитну. Пораст температуре отпуштања је праћен падом тврдоће, напона течења и затезне јачине, а растом издужења и жилавости. Сорбит добијен после побољшања има боља механичка својства од оног који се добија после каљења. Са слике 4.10 се види да је површина испод криве напон-деформација код побољшања знатно већа од површина пре и после каљења, што значи да је вредност жилавости после побољшања такође осетно већа.



**Слика 4.10** Дијаграм напон-деформација (издужење) пре каљења, после каљења и после побољшања [3]

Побољшањем се постиже најбољи однос између чврстоће и жилавости, умањује осетљивост на концентрацију напона и повећава енергија потребна за настанак и ширење прслина, али опада отпорност на хабање због смањене тврдоће дела.

Термичка обрада побољшања се изводи у железарама на лимовима, шипкама, отковцима и деловима који подлежу машинској обради резањем, како би се тврдоћа смањила и делови постали погоднији за обраду, а притом задржали добра својстава јачине и пластичности.

С обзиром на то да је процес отпуштања после каљења дуготрајан, лако се могу регулисати параметри при загревању и хлађењу, па се са сигурношћу могу добити жељени резултати, насупротив брзом хлађењу присутном код каљења.

#### 4.5 Отпусна кртост

Неповољна особина која се може појавити при отпуштању легираних челика (који су легирани *Mn* и *Cr*, тј. *Cr-Mn* и *Cr-Ni*), при којој се нагло повећава кртост челика, а смањују својства жилавости и пластичности назива се *отпусна кртост* челика.

Термичка обрада отпуштања челика после каљења је веома важна, готово неопходна, како би радни предмет могао да изводи предвиђену функцију у задатим експлоатационим условима. Према томе, важно је посветити пажњу добром одабиру режима термичке обраде, као и загревању и хлађењу које тај режим захтева. То се постиже уз помоћ одговарајуће литературе, али и искуствених података који су се кроз практичне примере показали као неопходни.

Појава отпусне кртости се уочава при хлађењу споменутих челика кроз температурске интервале 250-400°C и 500-550°C и праћена је непожељним губитком повољних својстава која су добијена претходним термичком обрадом. Отпусна кртост

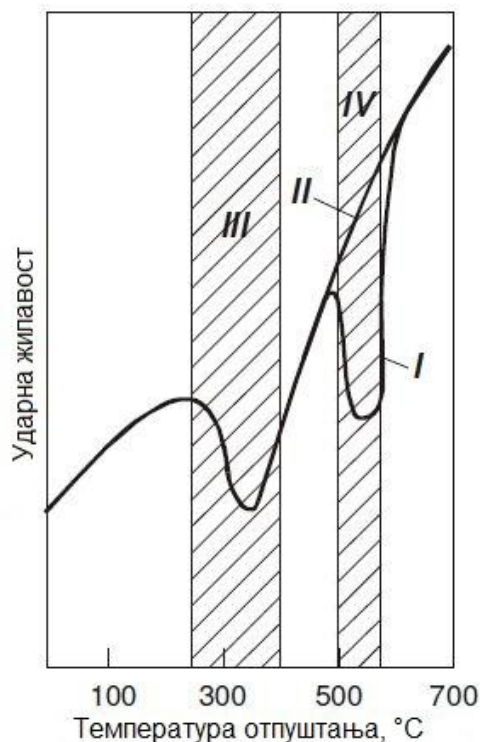
челика се појављује због тродимензионалног напонског стања које настаје при неуниформисаном разлагању мартензита. Јавља се када се легирани челици после загревања до температуре отпуштања, споро хладе (у пећу) кроз споменуте температурске интервале. Узрок повећања кртости се уочава у повећаној могућности дифузије атома. Због повећане могућности дифузионих процеса, долази до издвајања и сегрегације примеса по границама металних зрна, што умањује њихову међусобну повезаност. Ова појава доводи до пада ударне жилавости челика, уз пораст тврдоће, са незнатном променом јачине. Запажају се две врсте отпусне кртости код легираних челика.

Прва врста кртости је названа *неповратном* или *иреверзибилном*, тј. кртошћу првог реда. Она се појављује у температурном интервалу од 250 до 400°C. Ова кртост је неповратне природе. То значи да се поновним загревањем на исту температуру, ударна жилавост челика неће вратити на првобитну вредност. Кртост овог типа се може отклонити само загревањем изнад 400°C, али то доводи и до пада позитивних карактеристика добијених каљењем. Ако се после тога део поново загреје у критичан температурски опсег, овај вид кртости се неће поново појавити. Разлог настанка ове врсте кртости проналази се у издвајању карбида при разлагању мартензита и заосталог аустенита, али и у трансформацији нискотемпературних карбида у цементит.

Друга врста кртости је названа *повратном* или *реверзибилном*, тј. кртошћу другог реда. Запажена је код спорог хлађења челика који су претходно загрејани на 500-550 °C (или изнад ове температуре) и дуго прогревани на овој температури. Појављује се само после каљења, па узрок њене појаве треба повезати са процесима који се одвијају при разлагању мартензита. Ова врста кртости доводи до великог смањења ударне жилавости и повећања склоности челика ка настајању хладних прелина. На сву срећу, ова врста кртости се лако може избећи брзим хлађењем (у води), кроз поменути температурски опсег. После тога, добија се влакнаст прелом који је карактеристичан за жилаве челике, у односу на кристалан прелом, карактеристичан за крте материјале. Међутим, ако се понови споро хлађење кроз критичан температурски опсег, ова врста кртости ће се поново појавити, отуда и назив *повратна кртост*. Ако је кртост овог типа већ настала, њено отклањање се постиже брзим хлађењем са температуре из интервала 600-650°C, што је праћено мањим падом тврдоће и затезне јачине, претходно добијених каљењем. Овај вид кртости се појављује код челика са повећаним садржајем *P*, *Cr* или *Mn* и *Si*. Такође се појављује и када су *Cr* и *Ni* или *Cr* и *Mn*, заједно додати челику. Додатак волфрама (од 0.5 до 0.7%), знатно смањује склоност ка отпусној кртости легираних челика.

Претпоставља се да је узрок отпусне кртости повезан са дифузијом растворених елемената на границама металних зрна  $\alpha$  – чврстог раствора или издвајањем секундарних фаза из ферита (фосфиди, нитриди, карбиди и сл.), што доводи до засићења површинских слојева зрна. Утврђено је да је издвајање фосфора по границама металних зрна главни узрочник настанка отпусне кртости, јер смањује рад потребан за појављивање *интеркристалних* прелина, тј. повећава склоност челика ка кртом лому. Повећан садржај силицијума и мангана на границама зрна поспешују

сегрегацију фосфора, тако да се смањењем садржаја  $Si$ ,  $Mn$  и  $P$  смањује и склоност ових челика ка отпусној кртости. Међутим, смањен садржај  $Mn$  може имати други неповољан утицај. Наиме, манган је веома отпоран на хабање и повећава јачину и жилавост челика (уз незнатно смањење пластичности), па је код неких алатних челика практично неопходан. Због тога се прибегава другим начинима смањења склоности ка отпусној кртости. Један од начина смањења склоности ка овој појави јесте додавање  $B$  и  $Nb$  у малим количинама (око 0.0003%). Тако се повећава јачина кохезионих сила између зрна, што умањује утицај сегрегације фосфора на механичке карактеристике челика. На слици 4.11, приказана је зависност ударне жилавости од температуре загревања и одговарајуће брзине хлађења.



**Слика 4.11** Зависност ударне жилавости челика од температуре отпуштања и брзине хлађења; I – споро хлађење, II – брзо хлађење, III - температурни интервал неповратне кртости, IV - температурни интервал повратне кртости [12]

Када се упореде микроструктуре жилавог челика и оног који је подлегао отпусној кртости, не примећује се скоро никакава разлика. Међутим, када се експериментално измере вредности ударне жилавости ових челика, примећује се да се оне разликују и до неколико пута. Челик са 0.27%  $C$ , 1.15%  $Mn$  и 0.75%  $Cr$ , који се после каљења у уљу са 860°C, отпушта 1 h на 650°C и поново хладу у уљу до собне температуре, има ударну жилавост од  $\rho = 210 \text{ J/cm}^2$ , сматра се за жилав челик. Ако се исти челик после отпуштања на 650°C хлади у пећи (до 40 h), добиће се челик са ударном жилавошћу од само  $\rho = 70 \text{ J/cm}^2$ . У другом случају је наступила појава отпусне кртости.

Употребом разних врста средстава за нагризање, могуће је уочити разлику између жилавих челика и челика који су подлегли отпусној кртости. Према G. Riedrichu,

челици који су пали под утицај отпусне кртости, после нагризања раствором калијум-перманганата у калијум-хидроксиду и осветљењем у тамном пољу, показују светле преципитате на границама зрна, док код жилавих челика ове појаве нема. Нагризањем челика зефиран-хлоридом, челици са отпусном кртошћу показују изразито црну мрежу по границама металних зрна, које такође нема код жилавих челика. Раствор ксилол-пикринске киселине са 10% етил-алкохола, такође показује да ли је челик подлегао отпусној кртости. Брушени узорак се потапа у раствор и држи 10 до 60 *min*, затим се испира алкохолом и полира 1 до 3 *min*. Осветљењем у тамном пољу, челик са отпусном кртошћу показује изразито тамну полигоналну мрежу по површини. Жилав челик и после овог испитивања не показује никакве промене под микроскопом.

Појава отпусне кртости код челика може се спречити технолошким мерама. Оне подразумевају брзо хлађење кроз опсег температура у коме је челик склон ка њеном настајању (500-550°C). Ова мера се примењује како би се спречила дифузија атома, тј. како би структурне промене настале механизмима клизања. Металуршка мера спречавања настанка отпусне кртости јесте легирање челика молибденом (до 0.6%), волфрамом (до 1.5%) и ниобијумом. Ови елементи успоравају сегрегацију по површинама металних зрна. Супротно њима, угљеник и фосфор повећавају склоност челика ка појави отпусне кртости. Негативан утицај фосфора почиње са веома малим садржајем (око 0,005% *P*). Фосфор има изражену склоност ка појави сегрегације. То говори и чињеница да се карбиди који су издвојени из кртог челика много богатију фосфором, од карбида из челика са нормалном жилавошћу. Пад жалавости због утицаја фосфора ће се понови испољити ако се челик накнадно загрева изнад критичне области и лагано хлади. Пошто је смањивање садржаја фосфора испод 0.005% у пракси веома тешко, много чешће се приступа већ споменутим методама превентивног деловања на отпусну кртост. Легирањем претходно споменутог челика са 0.2% молибдена и излагањем овог челика дугим хлађењу, добија се жилав челик са ударном жилавошћу од  $p = 180 \text{ J/cm}^2$ , и ако он поново показује тамну мрежу по границама зрна, као да је подлегао отпусној кртости.

Осетљивост на отпусну кртост се утврђује испитивањем челика на ударну жилавост у широком распону температура и одређивање температуре на којој жилав лом прелази у крт. Уочава се да склоност челика ка отпусној кртости пре свега зависи од његовог хемијског састава, начина производње и металуршке прераде, а на крају и од начина термичке обраде.

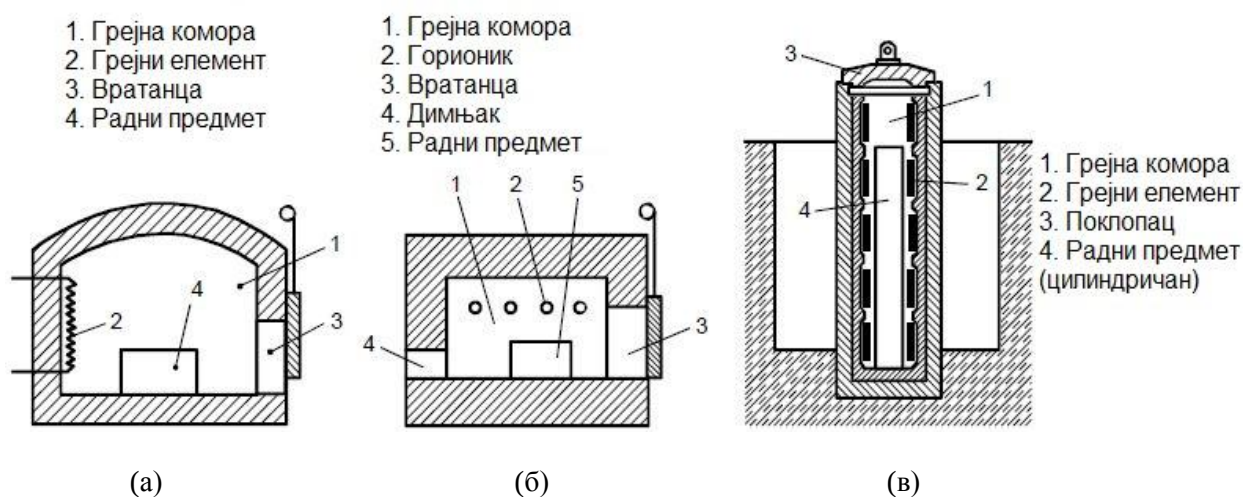
## 5. УРЕЂАЈИ И СРЕДСТВА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ И ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ ЧЕЛИКА

Да би термичка обрада челика (или обојених метала) била могућа, потребно је имати одређене пећи, купатила, специјална хемијска средства и уређаје за мерење и контролу температуре. Уз помоћ свега наведеног, постиже се загревање и хлађење на потребну температуру и потребним брзинама, за остваривање конкретне термичке обраде.

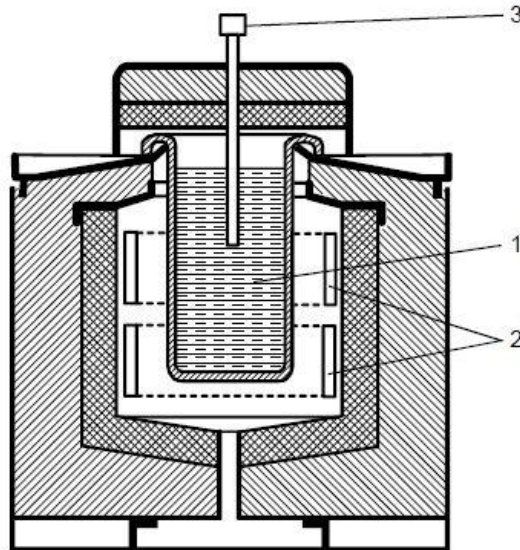
### 5.1 Загревање челика

Загревање челика при термичкој обради се остварује у специјалним пећима. Њихов рад се заснива на загревању електричним отпором (ефектом  $R \cdot I^2$ ) или индукцијом, као и сагоревањем гасовитих, течних или чврстих горива, а у неким случајевима и у вакуумским пећима. Начин предаје топлоте при загревању може бити *конвекцијом* (преко флуида – гаса или течности) или *зрачењем*. Пећи које користе чврста горива (угаљ) имају тзв. *ростове*, тј. решетке на којима се гориво сагорева, док пећи на течна и гасовита горива имају специјалне уређаје за распршивање горива, тзв. *горионике*.

У зависности од конструкције, ове пећи се деле на: коморне, јамске, дубинске, ротационе, нагибне, проточне, комбиноване итд. У употреби су највише: јамске, куполне, сона и метална купатила. На слици 5.1 су приказани примери једнокоморне (а), двокоморне (б) и јамске пећи (в), а на слици 5.2 изглед металног купатила.



Слика 5.1 Примери пећи за загревање челика [1]



Слика 5.2 Пример металног купатила са позицијама; 1 – течни метал, 2 – грејачи, 3 – додирни термометар [1]

Загревање у овим пећима је брзо, а регулација температуре веома тачна (нарочито код металних купатила) и изводи се преко разних врста термометара. У зависности од намене, пећи за загревање челика могу бити специјалне или универзалне.

Код коморних пећи, делови се могу загревати *директно* (продукти сагоревања су у директном контакту са делом који се загрева) или *индиректно* (део је смештен у затвореној комори која се споља загрева под дејством продуката сагоревања). Ове пећи се често конструишу као двокоморне, при чему се у једној комори врши предгревање, а у другој даље загревање.

Код електричних пећи, потребна топлота се добија преко електричног лука који је успостављен преко дела који се загрева или магнетне индукције која се остварује у комори са делом. При индукционом загревању, на површини комада се генерише струја ( $I_k$ ), која је исте фреквенције, али супротног знака од струје која протиче кроз индуктор ( $I_{ind}$ ). Код електричних пећи се, у циљу постизања равномернијег и бржег загревања, често прибегава присилној циркулацији топлоте кроз комору, која се постиже помоћу вентилатора.

Делови се могу загревати и у течној средини и то најчешће у металним или соним купатилима. У соним купатилима је најчешће растопљена нека врста соли, а у металним се загревање постиже посредством течног метала, нпр. олова ( $Pb$ ). Загревање (топљење) метала или соли се најчешће остварује електричном енергијом, а ређе посредством пламена. У металним и соним купатилима се загревају мањи делови једноставних димензија, као што су поједини алати од бзрезног челика. Температурски опсег загревања у соним кадама је од 150 до 750°C, а у оловним купатилима од 330 до 850°C.

## 5. Уређаји и средства за загревање и хлађење при термичкој обради челика

Један од главних проблема при загревању челика јесте оксидација, тј. образовање оксидне коре на површини дела, када део дође у додир са ваздухом или осталим активним гасовима који се налазе у атмосфери унутрашњости пећи. Ова појава се спречава испуњавањем атмосфере инертним гасовима (*Ar*, *He* и др.), загревањем у соним или металним купатилима (нема додира челика са ваздухом), коришћењем електричних пећи (појава штетних гасова је умањена) или загревањем у вакуумским пећима. Гасови у атмосфери пећи такође могу довести до штетне појаве разугљенисавања површинских слојева челика или супротног ефекта наугљенисавања спољашних површина дела. Сагоревање у пећи такође може довести и до смањења запремине дела до 0.5% у виду губитка материјала због испаравања појединих састојака.

### 5.2 Хлађење челика

За хлађење челика се најчешће примењују вода, уље и ваздух, а понекад и хладне плоче. У зависности од садржаја угљеника и легирајућих елемената у челику, користе се тачно одређена средства у зависности од њихове могућности хлађења. Као што је већ познато, челици са малим садржајем угљеника и неких легирајућих елемената, имају велику критичну брзину хлађења, па је у циљу добијања мартензита неопходно хлађење у води (брзо хлађење), док се код високоугљеничних и легираних челика закаљивање може постићи у уљу, па чак и на ваздуху (тзв. природно каљиви или мартензитни челици).

Средство за хлађење се често бира и у односу на димензије и облик делова. Према томе, мањи и једноставни делови се могу хладити у уљу, а већи и сложенији захтевају воду или водени раствор, у циљу равномерног каљења унутрашњости дела.

**Табела 5.1** Брзине хлађења челика у различитим условима [1]

| 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% <i>NaOH</i> у <i>H<sub>2</sub>O</i> при 18°C | 1200                                          | 300       |
| Раствор 10% <i>NaCl</i> у <i>H<sub>2</sub>O</i> при 18°C | 1100                                          | 200       |
| Емулзија 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        |

## 5. Уређаји и средства за загревање и хлађење при термичкој обради челика

У табели 5.1, приказане су брзине хлађења челика у различитим условима хлађења који се, пре свега односе на средство у коме се хлађење изводи, али и на температурски опсег хлађења.

Из претходне табеле се види да се најбрже хлађење постиже хлађењем у раствору каустичне соде ( $NaOH$ ) у води. Међутим, мана овог средства је што се у температурном опсегу од 350 до 250°C постиже велика брзина хлађења, која проузрокује високе вредности заосталих термичких напона. Још се види да уљна купатила хладе до четири пута спорије у опсегу 650 до 550°C, а чак и до 10 пута спорије у опсегу 350 до 250°C (опсег приближан мартензитној промени,  $M_s - M_f$ ) у односу на хлађење у води.

Како ће челик бити окаљен у појединим средствима зависи пре свега од термичке проводности, специфичне топлоте, топлоте испаравања, количине растворених гасова и вискозитета средства за хлађење.

Најефикасније закаљивање се постиже прскањем воденим млазом који, уједно брже хлади од мирне воде, а уједно и преводи настале парне мехурове у капљице које такође поспешују хлађење. Ови штетни мехурови (или парни филм) се такође могу отклонити релативним кретањем дела кроз воду или водени раствор. Уља за хлађење се могу разликовати по хемијском саставу, а са тим и брзини хлађења. Обично се користе минерална уља са евентуалним додатком масних уља.

Код прекидног каљења, користе се сона и метална купатила. Она омогућавају хлађење до потребне температуре за одвијање тражене структурне промене, задржавање на тој температури док се структурне промене не заврше, па затим хлађење неким другим средством до собне температуре.

Бакарне плоче такође могу служити за хлађење, при чему се оне стављају на део који се хлади, а кроз њих пропушта вода. Користе се код танких делова у циљу исправљања, тј. спречавања појаве витоперења лимова. Овај поступак хлађења се користи код већ споменутог степенастог мартензитног каљења (тзв. мартемперинга).

## **6. ПРИМЕРИ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ ОТПУШТАЊА НА РЕАЛНИМ РАДНИМ ДЕЛОВИМА**

У овом поглављу биће детаљно описани поједини практични примери термичке обраде челика, са акцентом на променама механичких особина и структурним променама које су уочене после подвргавања челика термичкој обради побољшања. Пре свега су образложена основна својства челика (хемијска, физичка и др.), а затим термичка обрада којој је радни део изложен, као и промене које настају у току извођења изабране термичке обраде. После свега наведеног, испитан је квалитет изведене термичке обраде.

### **6.1 Термичка обрада зупчаника израђеног од челика Č1531 (C45)**

Зупчаници су машински елементи који служе за пренос снаге и обртног момента са погонских на извршне делове радног система. Рад им се заснива на механичком спрезању зубаца више зупчаника, при обртном кретању вратила на којима су причвршћени. Њихов рад подразумева појаву динамичког оптерећења које је праћено интензивним заморним, адхезивним и абразивним хабањем. Из тог разлога, у циљу продужења радног века, зупчаници морају бити подвргнути одређеном виду термичке обраде, како би се повећала носивост зуба, отпорност на динамичка оптерећења, као и отпорност на хабање.

За израду зупчаника се користе следеће технологије:

- технологија резања (глодање, рендисање, провлачење, електроерозиона обрада),
- технологија хладног обликовања (утискивање профила зуба обликовањем на топло) или
- технологија ливења (најчешће SL i ČL).

Технолошки поступак производње зупчаника пластичним обликовањем подразумева следеће операције:

- одсецање шипкастог полуфабриката,
- евентуална термичка обрада – нормализација или меко жарење (уколико материјал већ није испоручен у таквом стању),
- израда зупчаника обликовањем на топло,
- накнадна механичка обрада на тачну меру,
- термичка обрада побољшања (каљење + отпуштање),
- завршно брушењем и
- контрола методама без разарања.

### 6.1.1 Избор материјала зупчаника и потребна својства

Неопходна својства за правилан рад зупчаника су:

- висока и равномерна тврдоћа,
- висока јачина ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ ),
- одговарајућа ударна жилавост,
- отпорност на хабање,
- хомогеност и одсуство неметалних укључака и др.

Ови захтеви се могу постићи на више начина, тј. употребом различитих материјала. Међутим, мора се обратити пажња како на потребна својства, тако и на исплативост. У обзир треба узети и одговорност дела, али и могућност израде. Наиме, средњеугљенични челици (0.25-0.60% C) могу задовољити потребне услове, али не са истом поузданошћу као легирани, међутим, легирани челици су знатно скупљи. Такође се користе и нискоугљенични челици претходно подвргнути хемијско-термичкој обради (цементацији или нитрирању).

Средњеугљенични челици се могу термички обрађивати каљењем, јер им је садржај угљеника ограничен на 0.6%, што је сасвим довољно да се добију жељени ефекти. Каљењем се постиже задржавање веће количине угљеника у површинским слојевима, што утиче на пораст тврдоће до одређене дубине. Челици из ове групе који се користе за израду зупчаника су: Č1330, Č1430, Č1530, Č1531 и највише Č1730.

Легирани челици за израду зупчаника садрже манган и силицијум (1.2-1.6% *Mn-Si*), хром и силицијум (1-1.5% *Cr-Si*), као и хром и никл (0.6-1.5% *Cr* и 1-3.5% *Ni*). У ову групу спадају: Č4120, Č5420, Č4320, Č4720.

Челици намењени хемијско-термичкој обради се цементирају или нитрирају:

- Нисколегирани челици за цементацију имају ограничен садржај угљеника на  $C < 0.25\%$ , а легирани садрже *Cr*, *Cr-Mn*, *Cr-Mo* и *Cr-Ni*.
- Челици за нитрирање (Č4531, Č4739) постижу површинску тврдоћу од 900 до 950 HV, помоћу фино диспергованих нитрида *Al*, *Cr* и *Mo*. Не захтевају накнадну термичку обраду, али је неопходно претходно побољшање. Садржај угљеника је ограничен на 0.45% да би се спречило образовање карбида хрома и молибдена, јер они имају мању тврдоћу од нитрида.

Из претходно наведеног се може закључити да се тежи да изабрани материјал задовољи тражена својства, а да притом цена буде на разумном нивоу и поступак израде буде практично изводљив.

### 6.1.2 Физичка, механичка, технолошка и структурна својства челика Č1531

Овај челик спада у групу квалитетних средњеугљеничних челика намењених за побољшање. Садржи 0.42-0.50% C, уз примесе силицијума и мангана, као и одређени садржај нечистоћа (таб. 6.1).

**Табела 6.1** Хемијски састав компоненти, примеса и нечистоћа у Č1531 [5]

| Ознака челика | C, %      | Si, %     | Mn, %     | P, % max. | S, % max. |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Č1531 (C45)   | 0.42-0.50 | 0.15-0.35 | 0.50-0.80 | 0.045     | 0.045     |

Карактеристике и својства изабраног челика:

**Прокаљивост.** Тврдоћа после каљења код ових челика достиже 58 HRC. Међутим, већ на удаљености од 5-6 mm, тврдоћа почиње да опада, према томе, прокаљивост није добра.

**Заварљивост.** Може се указати да овај челик није добро заварљив због великог садржаја угљеника ( $C = 0.42-0.50\%$ ). Међутим, његова заварљивост се може побољшати применом појединих технолошких мера.

**Отпусна кртост.** Нису склони ка отпусној кртости, јер не садрже елементе као што су Cr, W, V и Mo, па није неопходно предузимати било какве посебне мере у циљу њеног спречавања.

**Кртост на сниженим температурама.** Може се приметити знатан пад ударне жилавости овог челика при паду температуре испод 0°C. Зато није препоручљиво користити га на температурама нижим од -20°C.

**Осетљивост на зарезе и микропрслине.** Склоност ка образовању штетних микропрслина расте са порастом затезне јачине. Из тог разлога треба користити одговарајућа конструкциона решења (избегавање оштрих прелаза, малих радијуса на ивицама итд.). Осетљивост се може смањити површинским ваљањем, пескарањем притискивањем и сл.

**Отпорност на хабање.** Нарочито је изражена код површински каљених делова, а може се повећати и нитрирањем у соним купатилима. Утицај површинског каљења се смањује побољшањем челика.

Овај челик се користи у нормализованом, каљеном или побољшаном стању за израду: зупчаника, осовина, чаура, вратила и др.

У табели 6.2 су приказане су основне физичке особине овог челика:

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

**Табела 6.2** Основне физичке особине [5]

| Физичка својства            |                                | При температури, °C |        |        |        |        |      |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|------|
|                             |                                | -40                 | +20    | +100   | +200   | +300   | +400 |
| Модул еластичности          | MPa                            | 212000              | 210000 | 205000 | 193000 | 185000 | ---  |
| Модул смицања               | MPa                            | 82000               | 81000  | 76000  | 74000  | 71000  | ---  |
| Густина                     | kg/dm <sup>3</sup>             | ---                 | 7.85   | ---    | ---    | ---    | ---  |
| Топлотна проводност         | W/mK                           | ---                 | 52.3   | 50.2   | 46.1   | ---    | 41.9 |
| Специфична топлота          | J/kgK                          | ---                 | 460.5  | 502.4  | 544.3  | 586.1  | ---  |
| Специфични електрични отпор | $\Omega \text{ cm} \cdot 10^4$ | ---                 | 0.122  | ---    | ---    | ---    | ---  |

Механичке особине челика приказане су у табели 4.3:

**Табела 6.3** Механичке особине у побољшаном стању [5]

| Димензије, mm | Напон течења $R_{p0.2}$ , MPa | Затезна јачина $R_m$ , MPa | Издужење $A_5$ , % | Сужење $Z$ , % |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|
| до 16         | 480                           | 700-850                    | 14                 | 30             |
| од 16 до 40   | 410                           | 660-810                    | 16                 | 35             |
| од 40 до 100  | 375                           | 620-770                    | 17                 | 40             |

Да би се део од овог челика лакше обрадио, он се претходно нормализује, а после обраде, следи побољшање. У табели 6.4 су дате механичке особине у нормализованом стању:

**Табела 6.4** Механичке особине у нормализованом стању [5]

| Димензије, mm | Напон течења $R_{p0.2}$ , MPa | Затезна јачина $R_m$ , MPa | Издужење $A_5$ , % |
|---------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------|
| 16-100        | 335                           | 590-740                    | 17                 |

Због динамичког (цикличног) оптерећења којем су зупчаници изложени, долази до пада својстава отпорности материјала. Према томе, важно је одредити трајна механичка својства при динамичком оптерећењу, тј. динамичку чврстоћу или трајну

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

динамичку издржљивост. У табели 6.5 дате су орјентационе вредности динамичке издржљивости овог челика у побољшаном стању:

**Табела 6.5** Трајна динамичка чврстоћа челика [5]

| Затезна јачина $R_m$ , МПа | Динамичка издржљивост на савијање, МПа | Динамичка издржљивост на притисак, МПа | Динамичка издржљивост на увијање (торзију), МПа |
|----------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 780                        | 380                                    | 305                                    | 225                                             |
| 690                        | 335                                    | 265                                    | 195                                             |
| 590                        | 285                                    | 225                                    | 165                                             |

### 6.1.3 Избор термичке обраде

Како би челик био употребљив и како би се максимално искористиле његове предности, практично је неопходна његова термичка обрада. Уколико се она правилно изведе, могу се знатно поправити својства челика. Челик  $\check{C}1531$  (C45) је намењен побољшању, али се прво изводи нормализација или меко жарење. Када се део изради, подлеже побољшању (каљење + високо отпуштање). У табели 6.6 дати су видови термичке обраде којима се овај челик подвргава.

**Табела 6.6** Видови термичке обраде [5]

| Челик                 | Температура, °C |               |               |              |           |              |
|-----------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|-----------|--------------|
|                       | Меко жарање     | Нормализација | Каљење у води | Каљење у уљу | Отпуштање | Тврдоћа, HRC |
| $\check{C}1531$ (C45) | 650-700         | 840-870       | 820-850       | 830-860      | 530-670   | 58           |

Тврдоћа челика у нормализованом стању (пре почетка израде зупчаника) износи 190 НВ. Термичка обрада после израде зупчаника треба да омогући добијање високе тврдоће по површини, а жилаво језгро (сл. 6.1). Висока тврдоћа по површини обезбеђује отпорност на хабање, а жилаво језгро ублажава ударна оптерећења. Тако се добија висока постојаност челика, а са тим и дужи радни век зупчаника.



Површински слој

*Слика 6.1 Термички обрађен зупчаник (каљење или хемијско-термичка обрада) [5]*

Из табеле 6.6 се види да се каљење изводи са температура од 820 до 860°C. Добијена структура је мартезитна. Накнадна термичка обрада повећава жилавост при чему се особине површинских слојева незнатно мењају.

#### **6.1.4 Параметри и технологија термичке обраде**

Када се организује постројење, уређаји и средства за загревање и хлађење, број комада у серији итд., преостаје да се изабере и пропише одговарајућа технологија термичке обраде. Термичка обрада зупчаника се састоји из побољшања, па онда накнадног површинског каљења у циљу добијања високе површинске тврдоће и задовољавајуће жилавости језгра. Ако параметри термичке обраде нису добро изабрани, може доћи до неједнакости површинске тврдоће, смањења ударне жилавости и отпорности на хабање, појаве кртости и др.

**Температура загревања** је температура до које се део загрева, на којој се прогрева и са које се кали. Ова температура мора бити у аустенитном подручју да би се прогревањем добио аустенит, јер се мартензит може добити само из аустенита. Према томе, ова температура се још назива и температура аустенитизације. Ако температура није одговарајућа (недовољно загрејан део), то се одражава на успешност термичке обраде (пре свега на тврдоћу). Температура аустенитизације се бира према препорукама, а зависи од врсте челика, намене, структуре итд. Као што је већ споменуто (таб. 6.6), за Č1531 препорука је да температура аустенитизације буде опсегу од 820 до 860°C.

**Време загревања и прогревања** представља време потребно да радни део достигне потребну температуру по целој запремини. За средњеугљеничне челике (Č1531), потребно је 2 до 5 минута по милиметру дебљине дела. Немогуће је са апсолутном тачношћу прорачунати ово време, али се користе формуле за израчунавање са занемарљивом грешком. Према приближним прорачунима време загревања

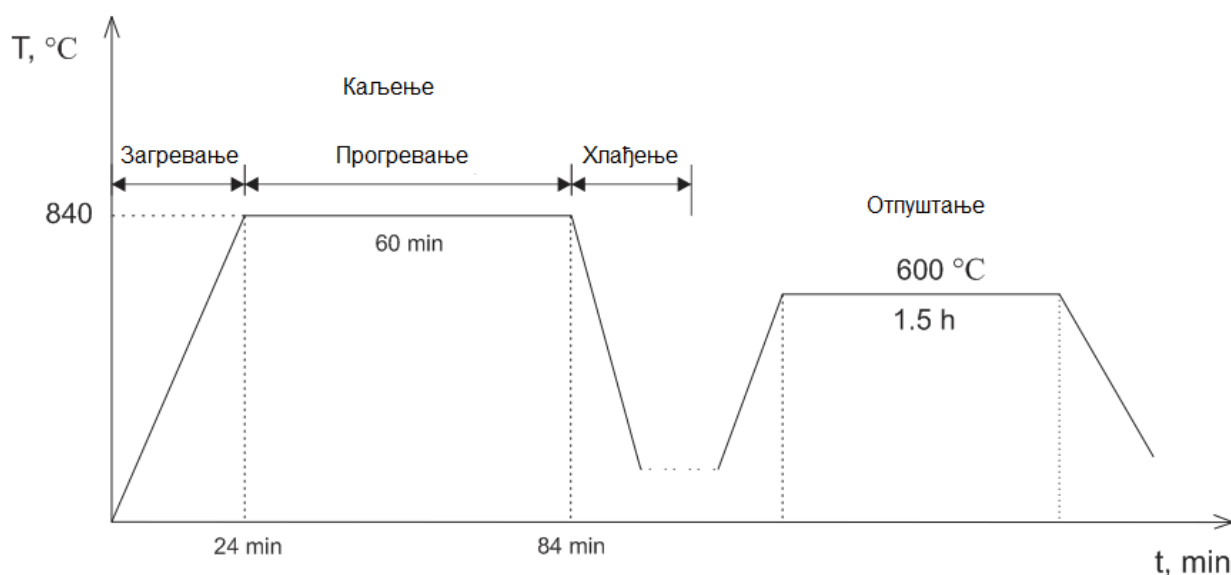
## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

цилиндричних делова у коморној пећи на температурску вредност од  $840^{\circ}\text{C}$  износи око 70 минута.

**Каљење** се остварује тако што се зупчаник убацује у пећ загрејану на температуру која је нешто већа од температуре аустенитизације за одговарајући челик (око  $1000^{\circ}\text{C}$ ), при чему се она касније снижава на прорачунату вредност. На овај начин се смањује време загревања, могућност појаве оксидације, декарбурације и раста зрна. Израчунато време подразумева време загревања, али и време прогревања, како би се по целом пресеку зупчаника добила аустенитна структура. После загревања следи каљење у води које траје око 1 min. Критична брзина хлађења се може прочитати са дијаграма континуалног хлађења (*КН* дијаграма) и мора бити таква да се у температурском интервалу од  $840$  до  $450^{\circ}\text{C}$  онемогући настајање других структура, осим мартензитне. Уколико је брзина хлађења мања од критичне, доћи ће до настанка бејнитне структуре, која није пожељна при каљењу.

**Отпуштање** се изводи одмах после каљења како би се остварило побољшање. У питању је високо отпуштање, према томе, температура са које се челик отпушта је  $600^{\circ}\text{C}$  (узета из температурског интервала који је дат у табели 6.6). Време отпуштања зависи од димензија зупчаника. Параметри отпуштања треба да буду такви да омогуће смањење унутрашњих напона, хомогенизацију структуре, повећање пластичности и трансформацију мартезита насталог каљењем, а са тим и образовање стабилне структуре (бејнита). После загревања пећ се искључује, а део остаје у њој и тако хлади до собне температуре. Делови се не смеју хладити на ваздуху, јер може доћи до површинске оксидације.

На слици 6.2 дат је дијаграм конкретне термичке обраде:



Слика 6.2 Дијаграм термичке обраде [5]

**Средства за загревање и хлађење.** Користе се коморне пећи са максималном температуром загревања од  $1500^{\circ}\text{C}$ . Комора је израђена од ватросталног нерђајућег

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

челика, а димензије пећи су према наруџбини купца (сл. 6.3). Цена пећи зависи од димензија и конструкције и креће се од 10.000 до 50.000 €. Цело постројење за извођење ове термичке обраде кошта око 150.000 до 200.000 €. [5]



*Слика 6.3 Изглед пећи [5]*

Хлађење се изводи у кадама са водом. Као расхладно средство, користи се вода која у себи садржи 10% растворене соли NaOH, чиме се побољшава моћ хлађења. На дну каде се налази уређај за остваривање струјања воде – пропелер, уколико је потребно интензивније хлађење. Струјање расхладног средства поспешује хлађење, јер се загрејано расхладно средство одводи у зону са nižом температуром и ту хлади, а на његово место долази расхладно средство које још није било у директном контакту са загрејаним челиком. Димензије каде су  $1500 \times 1500 \times 1200 \text{ mm}$ , а она је напуњена до висине од око  $1000 \text{ mm}$ , при чему је запремина каде  $2.25 \text{ m}^3$  [5].

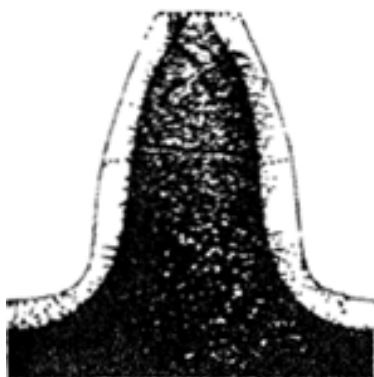
### 6.1.5 Испитивање квалитета изведене термичке обраде

Ако је део термички обрађен, а технологија правилно изабрана, не мора да значи да је процес успешно изведен. Правилност изведене термичке обраде зависи од много фактора. Грешке које настану могу бити у виду: недовољне и неравномерне тврдоће, димензијског одступања, појави пукотина услед заосталих напона итд. Све ово је последица недовољне температуре загревања, пребрзог или преспорог хлађења, оксидације и др. Настале грешке могу бити на површини, али и у унутрашњости дела. Испитивање квалитета изведене термичке обраде обухвата низ механичких испитивања у циљу добијања потпуне слике о ефектима термичке обраде.

**Металлографска испитивања** спадају у методе контроле узорака са разарањем. Наиме, из дела се одсеца узорак који подлеже разним испитивањима у циљу утврђивања структуре материјала, расподеле тврдог слоја и сл. Могу бити *макроскопска* и *микроскопска*.

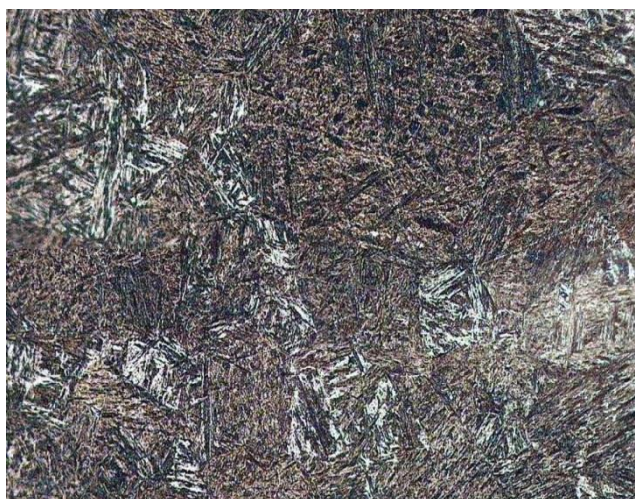
## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

*Макроскопска* испитивања се заснивају на испитивању узорка голим оком или лупом са увећањем до 20 пута. Део се прво бруси и полира, а затим се нагриза специјалним хемијским средствима, што обезбеђује бољу видљивост. Овом методом могу се разликовати тврда и мека зона, као и њихов распоред, затим дубина отвореног слоја и његов положај на површини зупчаника. На слици 6.4 приказан је металографски избрусак на коме се јасно виде тврда (спољашња – светла) и мека (унутрашња – тамна) зона.



**Слика 6.4** Металографски избрусак (увећање 20×) [5]

*Микроскопска* испитивања се заснивају на истом принципу, само што се део посматра под микроскопом, са увећањем од 200 до 500 пута. Овим поступком постаје видљива микроструктура материјала. Према томе, могу се детаљно анализирати структуре настале после каљења и отпуштања (сл. 6.5). Такође, овом поступком се може анализирати и величина зрна која се упоређује са стандардизованим класама величине, па се може закључити да ли је дошло до прегревања или чак прегоривања челика.



**Слика 6.5** Микроструктура окаљеног челика (увећање 500×) [5]

## 6.2 Термичка обрада челика Č4730

У овом поглављу биће описан избор најповољнијег режима термичке обраде челика Č4730, приказан на дијаграму изотермичког разлагања аустенита (IRA дијаграм). Прописаним режимом термичке обраде, обрађују се плоче дебљине 20 mm. [6]

### 6.2.1 Подаци о материјалу - Č4730 (25CrMo425)

Челик Č4730 спада у нисколегиране конструкционе челике за побољшање. Садржај угљеника није већи од 0.3%, а главни легирајући елементи су хром и молибден. У табели 6.7 дат је хемијски састав овог челика:

**Табела 6.7** Хемијски састав [6]

| Легирајући елементи | C    | Si      | Mn   | Cr   | Mo   | P     | S     | Остали |
|---------------------|------|---------|------|------|------|-------|-------|--------|
| Садржај, %          | 0.25 | до 0.40 | 0.75 | 1.05 | 0.23 | 0.035 | 0.040 | 0.00   |

У табели 6.8 дате су упоредне ознаке овог челика у неким од важнијих стандарда:

**Табела 6.8** Ознаке челика Č4730 у другим стандардима [6]

| SRPS Србија | Железара равне (Словенија) | DIN (Немачка) | EN        | AISI (САД) | AFNOR (Француска) | GOST (Русија) | SS (Шведска) |
|-------------|----------------------------|---------------|-----------|------------|-------------------|---------------|--------------|
| Č4730       | 722                        | 25CrMo4       | 25CrMo425 | 4130       | 30CD4             | 30ChM         | 2233         |

Овај челик је намењен за израду високооптерећених делова за рад у статичким и динамичким условима са ударним оптерећењем. Користи се код: возила, мотора и машина, вратила, турбина, ланаца итд. Одликују га повољне механичке особине, које се још могу поправити термичком обрадом (побољшањем).

У табели 6.9, дати су основни подаци о општим и технолошким карактеристикама челика Č4730:

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

**Табела 6.9** Опште и технолошке карактеристике челика Č4730 [6]

| Опште карактеристике  |          | Технолошке карактеристике |    |
|-----------------------|----------|---------------------------|----|
| Отпорност на корозију | Добра    | Обрадив резањем           | ДА |
| Механичке особине     | Просечне | Обрадив на аутоматима     |    |
| Ковност               | Добра    | Ковање на топло           |    |
| Заварљивост           | Одлична  | Деформабилан на хладно    |    |
| Обрадивост            | Добра    | Хладно искивање           |    |

У табели 6.10 дате су основне физичке особине овог челика:

**Табела 6.10** Физичке особине челика Č4730 [6]

| Челик | Густина, $g/cm^3$ | Термичка проводљивост, $W/mK$ | Поасонов коефицијент | Специфична топлота, $J/kgK$ | Температура топљења, $^{\circ}C$ |
|-------|-------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| Č4730 | 7.85              | 42.7                          | 0.29                 | 477                         | 1432                             |

У табели 6.11 дате су механичке особине овог челика у зависности од стања испоруке:

**Табела 6.11** Механичке особине челика Č4730 у зависности од стања испоруке [6]

| Термичка обрада                  | Затезна јачина, $MPa$ | Напон течења, $MPa$ | Модул еластичности, $MPa$ | Издужење, % | Суужење, % | Тврдоћа |     | Енергија лома, $J$ |
|----------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------|-------------|------------|---------|-----|--------------------|
|                                  |                       |                     |                           |             |            | HB      | HRC |                    |
| Нормализација ( $870^{\circ}C$ ) | 670                   | 435                 | 205000                    | 25.2        | 60         | 197     | 19  | 87                 |
| Жарење ( $865^{\circ}C$ )        | 560                   | 360                 | 205000                    | 28.2        | 56         | 156     | 13  | 62                 |

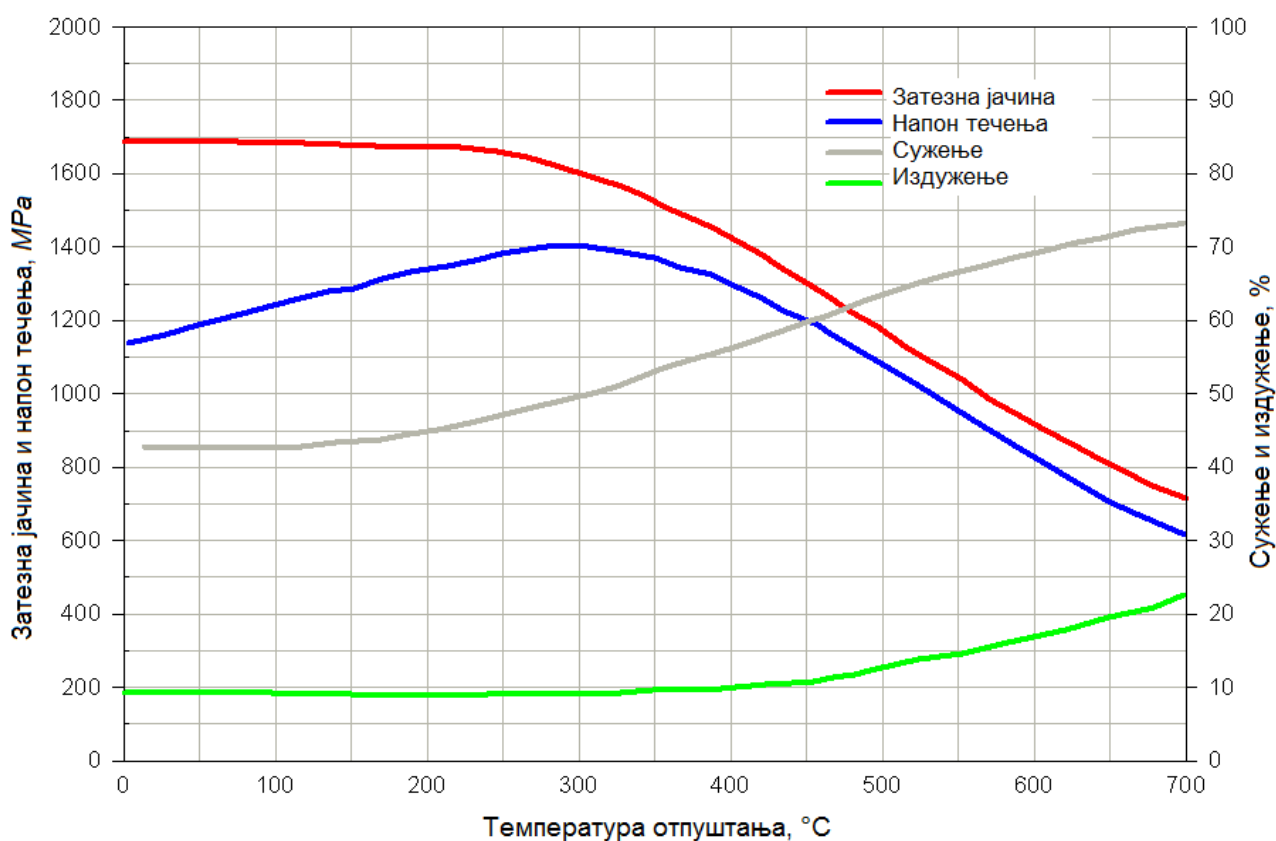
После каљења и отпуштања (побољшања) овог челика, уочен је раст јачине, али и пад својстава пластичности и жилавости. Ако се правилно пропише режим термичке обраде овог челика, добиће се карактеристике дате у табели 6.12:

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

**Табела 6.12** Механичке особине челика  $\check{C}4730$  у побољшаном стању [6]

| Дебљина,<br><i>mm</i> | Затезна<br>јачина,<br><i>MPa</i> | Напон<br>течења,<br><i>MPa</i> | Модул<br>еластичности,<br><i>MPa</i> | Издужење,<br>% | Сужење,<br>% | Енергија лома,<br><i>J</i> |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------------|----------------------------|
| до 16                 | 900-1100                         | 700                            | 210000                               | 12             | 50           | 50                         |
| 17-40                 | 800-950                          | 600                            |                                      | 14             | 55           | 55                         |
| 41-100                | 700-850                          | 450                            |                                      |                | 60           | 55                         |
| 101-160               | 650-800                          | 400                            |                                      |                | 60           | 55                         |

Тврдоћа овог челика после побољшања износи око 212 НВ. Поред наведених механичких особина челика  $\check{C}4730$  (таб. 6.11 и 6.12), дата је и њихова зависност од температуре, тј. промена механичких особина при побољшању овог челика (сл. 6.6).

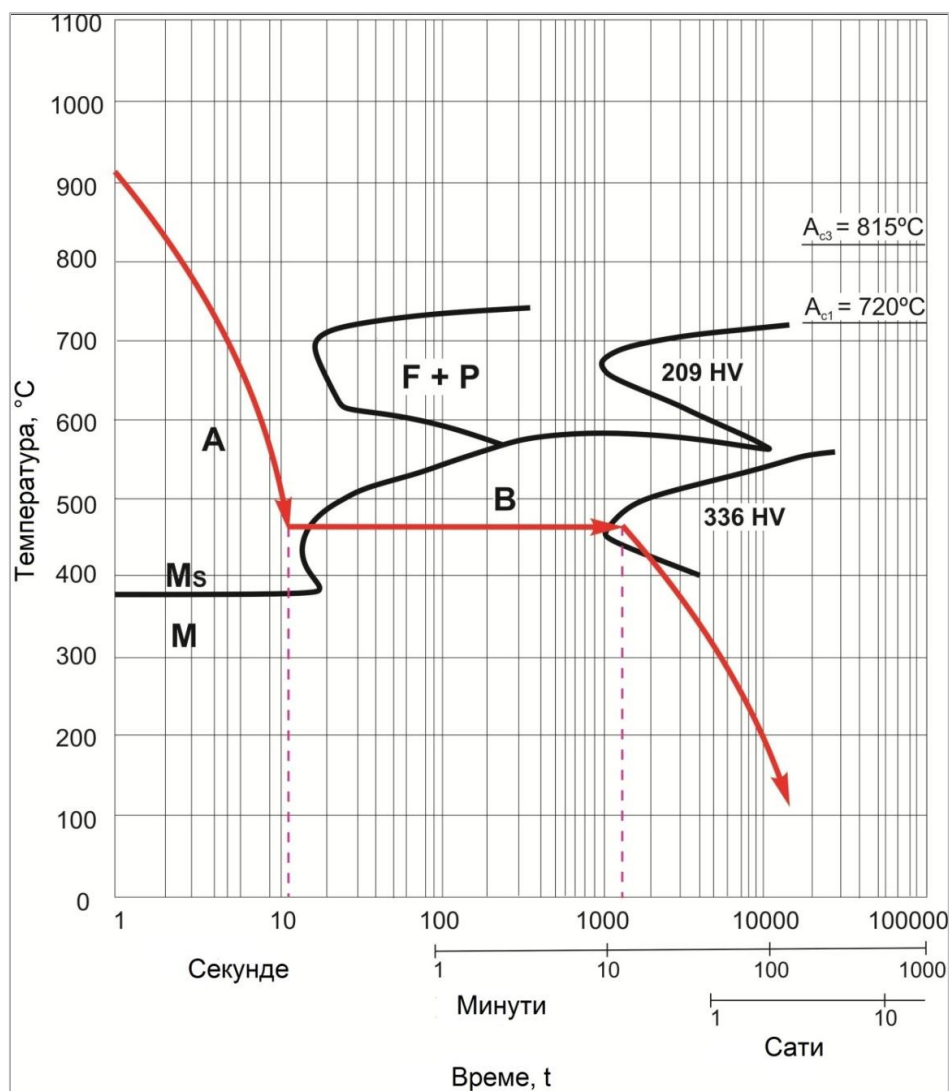


**Слика 6.6** Зависност механичких особина од температуре отпуштања [6]

### 6.2.2 Режим термичке обраде челика Š4730 на основу IRA дијаграма

Најповољнији режим термичке обраде изведен је на основу IRA дијаграма за изабрани челик. Термичка обрада се изводи у циљу постизања најповољнијег односа својстава јачине и пластичности.

Оптимални режим термичке обраде подразумева изотермичко бејнитно каљење и затим отпуштање са одређене температуре. Термичка обрада се састоји из загревања овог челика до аустенитног подручја (око 900°C), каљења у води до температуре бејнитног преображаја (450 до 500°C), прогревања на тој температури (у посебним купатилима константне температуре) док сав аустенит не буде трансформисан у бејнит и хлађења на мирном ваздуху до собне температуре. После тога се изводи отпуштање са температуре од 540°C. Прописани режим термичке обраде, дат је на дијаграму (сл. 6.7), на коме је црвеном бојом означен ток ове термичке обраде.



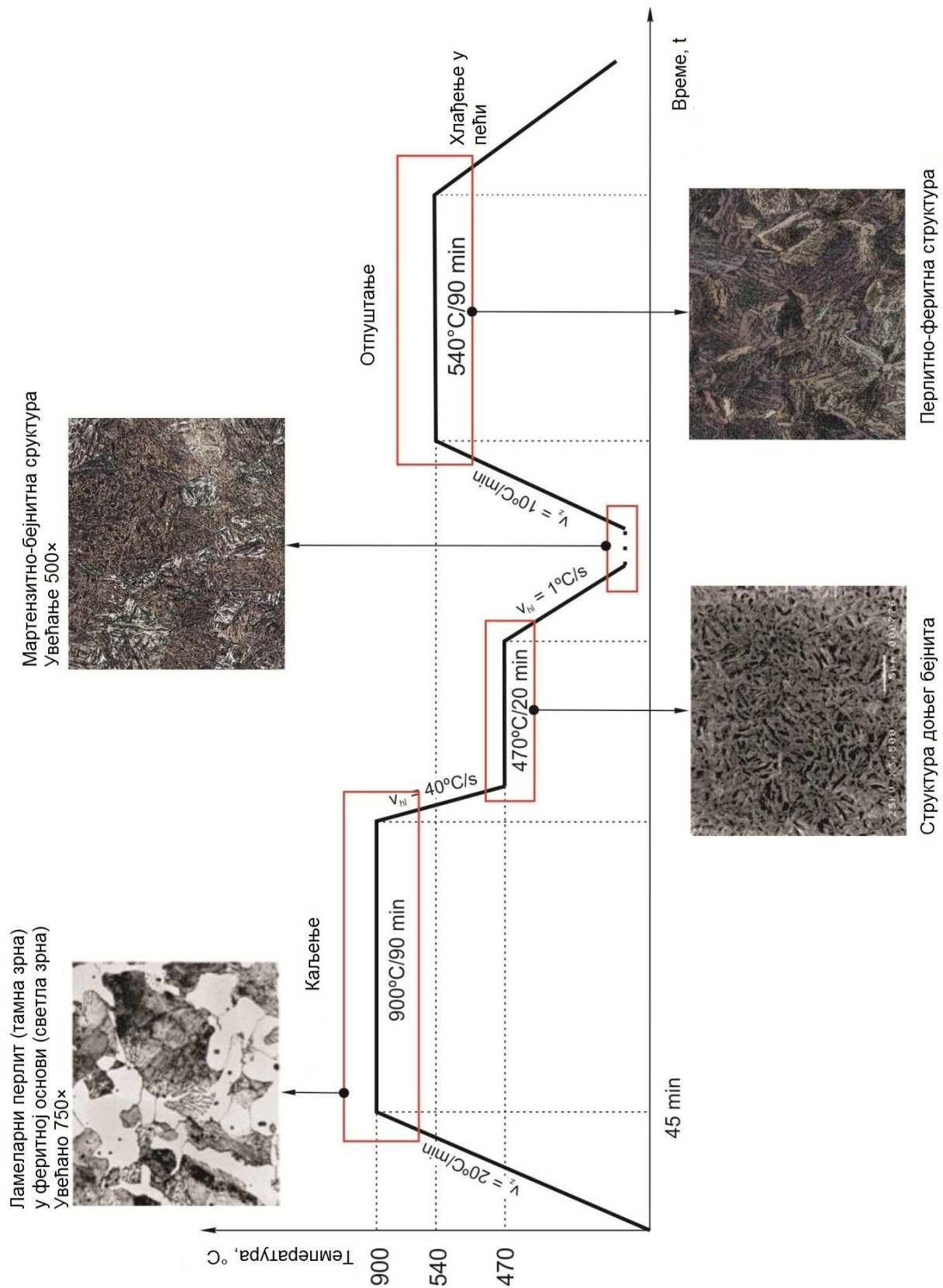
**Слика 6.7** Дијаграм изотермичког разлагања аустенита за челик Š4730 са уртаним режимом термичке обраде – изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг) [6]

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

Са IRA дијаграма за овај челик, може се видети да је период инкубације нешто већи од 10 секунди, а да температура почетка мартезитне трансформације налази испод 400°C.

Слика 6.8 показује ток целокупног режима термичке обраде челика Š4730 (каљење и отпуштање), као и брзине појединих загревања и хлађења у току остваривања овог режима побољшања. Уз дијаграм су такође изложене и структуре овог челика на неким од важнијих температурама, у току термичке обраде.

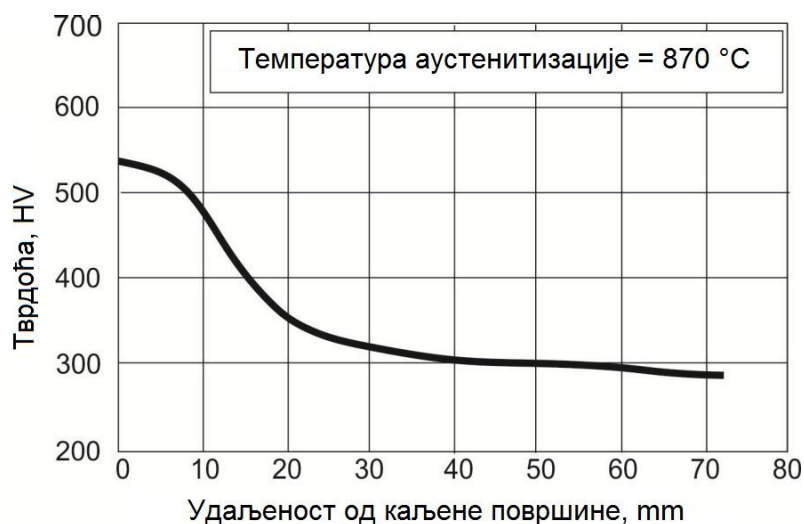
## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима



Слика 6.8 Оптималан режим термичке обраде челика Č4730, са микроструктурама на неким од важнијих температура за овај режим термичке обраде [6]

### 6.2.3 Карактеристике челика после изведене термичке обраде

После изведене термичке обраде и испитаних механичких карактеристика, проверена је и прокаљивост овог челика. На слици 6.9, приказани су резултати добијени испитивањем прокаљивости Цомини методом (видети поглавље 3.2).



*Слика 6.9 Прокаљивост челика Š4730 [6]*

Поред добијених вредности механичких карактеристика (таб. 6.12), постоје и одређене препоруке везане за очекиване механичке карактеристике у зависности од режима термичке обраде овог челика. Препоруке везане за статичку и динамичку отпорност челика Š4730 и његове способности деформације, дате су у табелама 6.13 и 6.14. У табели 6.15 приказана је промена напона течења, отпорности на пузање, модула еластичности и модула клизања у зависности од температуре.

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

**Табела 6.13** Особине челика Č4730 у зависности од средства за каљење и температуре отпуштања [6]

| Температура отпуштања, °C          | Затезна јачина, МПа | Напон течења, МПа | Издужење, % | Суужење, % | Тврдоћа, НВ | Енергија лома, J |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------|------------|-------------|------------------|
| Каљење у води са 870°C и отпуштање |                     |                   |             |            |             |                  |
| 205                                | 1765                | 1520              | 10          | 33         | 475         | 18               |
| 260                                | 1670                | 1430              | 11.5        | 37         | 455         | 14               |
| 315                                | 1570                | 1340              | 13          | 41         | 425         | 14               |
| 370                                | 1475                | 1250              | 15          | 45         | 400         | 20               |
| 425                                | 1380                | 1170              | 16.5        | 49         | 375         | 34               |
| 540                                | 1170                | 1000              | 20          | 56         | 325         | 81               |
| 650                                | 965                 | 830               | 22          | 63         | 270         | 135              |
| Каљење у уљу са 860°C и отпуштање  |                     |                   |             |            |             |                  |
| 205                                | 1550                | 1340              | 11          | 38         | 450         | -                |
| 260                                | 1500                | 1275              | 11.5        | 40         | 440         | -                |
| 315                                | 1420                | 1210              | 12.5        | 43         | 418         | -                |
| 370                                | 1320                | 1120              | 14.5        | 48         | 385         | -                |
| 425                                | 1230                | 1030              | 16.5        | 54         | 360         | -                |
| 540                                | 1030                | 840               | 20          | 60         | 305         | -                |
| 650                                | 830                 | 670               | 24          | 67         | 250         | -                |

**Табела 6.14** Особине челика Č4730 у зависности од типа динамичког оптерећења и величине узорка [6]

| Челик | Дебљина/пречник комада, mm | Динамичка чврстоћа при различитим оптерећењима, МПа |                   |         |
|-------|----------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------|---------|
|       |                            | Савијање                                            | Затезање-притисак | Увијање |
| Č4730 | do 16                      | 480                                                 | 380               | 290     |
|       | 16 – 40                    | 440                                                 | 350               | 260     |
|       | 40 – 100                   | 390                                                 | 310               | 230     |
|       | 100 – 250                  | 340                                                 | 270               | 200     |

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

**Табела 6.15** Промена напона течења, грањеце пузања, модула еластичности и модула клизања челика Š4730 у зависности од температуре [6]

| Карактеристик<br>е челика            | Температура испитивања, °C |        |        |        |     |        |     |     |
|--------------------------------------|----------------------------|--------|--------|--------|-----|--------|-----|-----|
|                                      | 20                         | 100    | 200    | 300    | 350 | 400    | 450 | 500 |
| Напон течења,<br><i>МПа</i>          | 450                        | 430    | 400    | 360    | 340 | -      | -   | -   |
| Граница<br>пузања, <i>МПа</i>        | -                          | -      | -      | -      | -   | 38     | 18  | 8   |
| Модул<br>еластичности,<br><i>МПа</i> | 205000                     | 205000 | 195000 | 185000 | -   | 175000 | -   | -   |
| Модул<br>клизања, <i>МПа</i>         | 81000                      | 79000  | 75000  | 71000  | -   | 67000  | -   | -   |

Ако се анализира микроструктура челика Š4730 у току термичке обраде, може се закључити да се изотермичким бејнитним каљењем добија структура доњег бејнита, а да се непосредно после тога, хлађењем до собне температуре појављује незнатна количина мартензита. Мартензит у овом случају нема забележеног неповољног дејства, јер ће са средњим отпуштањем које следи после каљења, заједно са бејнитом прећи у стабилније фазе. Наиме, после отпуштања овог челика, постиже се структура ситнозрног перлита (тамна зрна) уз присуство ферита (светлија зрна).

### 6.3 Утицај отпуштања на механичке особине и отпусна кртост челика за рад на топло

У овој глави биће речи о посебним челицима који се примењују у условима рада на топло (са посебном пажњом посвећеном челику Š5742). Ови челици се користе за извршне делове ковачких преса и чекића, алате за ваљање на топло, ливење под притиском и др. Неопходно им је да поседује добре механичке особине (жилавост, чврстоћа и тврдоћа), али и својства термопостојаности и ватроотпорности.

#### 6.3.1 Челици за рад на топло

Поред наведених особина челици за рад на топло се карактериши и високом отпорношћу на интензивно трење и хабање, добром топлотном проводљивошћу, малим коефицијентом линеарног ширења, добром прокаљивошћу, високом отпорношћу према настајању површинских прелина при загревању и хлађењу, као и постојаношћу према разугљенисавању и оксидацији. Веома је важно да се код ових челика спречи штетна

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

појава отпусне кртости, јер су методе њеног уклањања теже применљиве код масивних алата.

Реч је о челицима који морају радити на температурама од приближно 600°C, а притом бити изложени великим статичким притисцима, као и ударним оптерећењима. Користе се средњеугљенични алатни челици (0.3 до 0.6% C) за рад на топло, легирани Cr, W, V и Mo. Ови челици се деле у две основне групе на основу хемијског састава и вида термичке обраде којем су подвргнути.

*Прва група* се односи на челике за израду матрица за ковачке пресе, делова преса за истискивање нежелезних метала и кокила за ливење нежелезних метала. Делови израђени од ове врсте челика су најчешће у дужем контакту са загрејаним металом, јер раде под дејством статичких оптерећења. То доводи до интензивног загревања радних површина. Ови челици садрже Cr, W и Mo и око 0.3% C (нпр. Š4751 по SRPS стандарду, тј. X27CrMoV51 по EN стандарду). Склони су ка настајању врућих прслина због мале топлотне проводности легирајућих елемената.

*У другу групу* спадају челици намењени за ковачке калупе (ударне делове ковачких чекића). Они су изложени претежно ударним оптерећењима, па су због тога у релативно кратком временском периоду у директном контакту са загрејаним металом. Овакви услови рада од њих захтевају већу тврдоћу и бољу пластичност од челика из претходне групе, добру прокаљивост, као и способност да одрже потребну тврдоћу и на високим температурама. Ове захтеве испуњавају челици легирани Cr, Ni и Mo, и са садржајем угљеника од приближно 0.4%. Типичан представник ове групе јесте челик ознаке Š5742 по SRPS-у (55CrMo8 по EN стандарду), намењен за ковачке матрице. Потребну прокаљивост ових челика обезбеђују Mn, Cr, V и Mo, уз мали додатак бора.

Термичка обрада ковачких алата може представљати проблем, јер може изазвати површинско разугљенисавање. Ова појава доводи до пада тврдоће спољашњег слоја, која је неопходна за практичну примену ових челика. После вишеструког прекивања блокова ковачких челика, они подлежу потпуном жарењу на 850 до 880°C, затим хлађењу у пећи до приближно 300-400°C, а после тога на ваздуху до собне температуре. На овај начин се уједначавају својства материјала, уситњавају метална зрна и отклањају заостали напони. Код мањих алата прво се извршава механичка, па затим термичка обрада, док је код већих алата обрнуто.

Загревање ковачких алата мора бити споро и поступно. Код великих алата, температуру аустенитизације треба увећати за одређену вредност, како би се челик трансформисао у аустенит по целом попречном пресеку. Хлађење при каљењу мањих и сложенијих алата се обично изводи у соним купатилима, тј. степенасто. Алати средње величине хладе се у уљу до око 200°C, па затим на ваздуху, док се велики алати хладе воденом паром и струјањем компримованог ваздуха. Отпуштање је важно извести одмах после каљења и то са температуре која зависи од величине ковачког алата, а препоручује се вредност која је за нијансу већа од радних температура, како касније у току рада не би дошло до промене својстава челика.

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

Главни представници челика за рад на топло су челик Č4751 (X38CrMoV51 по DIN стандарду) или тзв. UТОРМо1 и челик Č5742 (56NiCrMoV7 по DIN стандарду), тј. UТОР 55. Ређе се употребљавају и Č6450 (X30WCrV41), тј. UТОР 1, Č6453 (X30WCrV93), односно UТОР SPEC. и др. Хемијски састав, механичке особине и микроструктура челика Č5742 и Č4751, дате су у табелама 6.16 и 6.17:

**Табела 6.16** Хемијски састав и упоредне ознаке челика Č5742 и Č4751 [12]

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

**Табела 6.17** Механичке особине и микроструктура челика Č5742 и Č4751 [12]

| Редни бр. | Ознака по SRPS-у | Меко жарење |                   |                      | Отпуштање |       |                      | Температура прегревања | Микро-структура   |
|-----------|------------------|-------------|-------------------|----------------------|-----------|-------|----------------------|------------------------|-------------------|
|           |                  | t, °C       | HV <sub>max</sub> | R <sub>m</sub> , МПа | t, °C     | HRC   | R <sub>m</sub> , МПа |                        |                   |
| 1.        | Č5742            | 670-700     | 250               | 850                  | 400-700   | 50-30 | 1700-1100            | ≈ 300                  | М + В (међуфазна) |
| 2.        | Č4751            | 800-830     | 250               | 850                  | 550-700   | 50-30 | 1700-1100            | ≈ 300                  | М + В (међуфазна) |

Пораст вредности термичке проводности челика Č5742 сразмеран је порасту температуре отпуштања до око 350°C. Међутим, на вишим температурама, уочен је пад термичке проводности. Вредност коефицијента линеарног ширења овог челика сразмерна је порасту температуре отпуштања, чак и на високим температурама.

При каљењу челика Č4751 са температуре од 1000 до 1030°C у раствору уља и воде, добија се тврдоћа површинског слоја вредности 54 HRC, при том је затезна јачина  $R_m = 1910 \text{ МПа}$ .

При каљењу челика Č5742, најчешће се користе се два режима каљења:

- Први подразумева температуру загревања од 830 до 870°C и хлађење у уљу. Овим режимом се добија тврдоћа од 58 HRC, а затезна јачина  $R_m = 2200 \text{ МПа}$ .
- Други подразумева температуру загревања од 860 до 900°C, а затим хлађењу у води до собне температуре. Овим режимом се добија тврдоћа од 56 HRC, док је затезна јачина  $R_m = 2050 \text{ МПа}$ .

Отпуштање челика Č4751, изводи се тако што се део загрева на температуру од 550 до 700°C, после чега следи одговарајући режим хлађења. Овако се смањује тврдоћа на вредност од 30–50 HRC и затезна јачина на  $R_m = 1100–1700 \text{ MPa}$ , али повећавају жилавост и пластичност дела.

Код челика Č5742, отпуштање се изводи са температуре од 400 до 700°C. Тврдоћа и затезна јачина опадају на сличан опсег вредности као код челика Č4751, притом је поново уочен пораст жилавости и пластичности. Добијена структура после отпуштања ова два челика је делом мартензитна (спољашњи слојеви, при чему дубина зависи од прокаљивости), а делом бејнитна (унутрашњи слојеви, тј. језгро).

### 6.3.2 Утицај отпуштања на механичке особине и отпусна кртост челика Č5742

Утицај отпуштања на механичке особине челика за рад на топло зависи, како од легирајућих елемената, тако и од режима загревања и хлађења. Наиме, термичка обрада има различити утицај на легирајуће елементе. Тај утицај зависи од појединих својстава тих елемената. Нпр. карбидотворни елементи ће при загревању градити специјалне карбиде са гвожђем, што може утицати на побољшање механичких особина челика (тврдоће, чврстоће), али и на настанак непожељних појава које могу утицати на целовитост металне структуре, појављивање места високе концентracије напона, тј. на пораст осетљивости на ударну жилавост и повећану склоност ка хабању материјала. Из тог разлога је веома важно добро изабрати режим отпуштања легираних челика.

Структурне промене које прате отпуштање челика Č5742 изазивају одређене промене особина, које зависе од времена и температуре загревања. Као што је већ познато, полазна (мартензитна) структура се под дејством термичке обраде претвара у неки вид феритно-карбидне смеше (перлит, бејнит, трустит или сорбит) мање тврдоће, али бољих својстава жилавости и пластичности. Овај пад тврдоће, као и температура његовог настанка, зависи од садржаја легирајућих елемената, али највише од садржаја угљеника. Код челика са 0.15% C, никакав пад тврдоће се не појављује до температуре од 200°C. Пад тврдоће изнад ове температуре настаје због ограниченог издвајања карбида. Узрок томе јесте ниска могућност дифузије легирајућих елемената у кристалну рашетку мартензита, као и висока температура почетка мартензитне промене, која омогућава почетак отпуштања још за време хлађења при каљењу челика. Код челика са 0.4% C (Č5742), долази до пада тврдоће због смањења тетрагоналности кристалне решетке, али та појава се компензује издвајањем дисперзних карбида који доводе до повећања тврдоће. Према томе, пад тврдоће је незнатан. Код челика са 0.8 и 1.4% C при отпуштању на ниским температурама, највећи утицај на пораст тврдоће има издвајање карбида. Код челика са 1.4% C на пораст тврдоће при ниском отпуштању утиче и разлагање заосталог аустенита. Преображај нискотемпературних карбида у цементит доводи до пада тврдоће код свих угљеничних челика при средњем и високом отпуштању.

## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

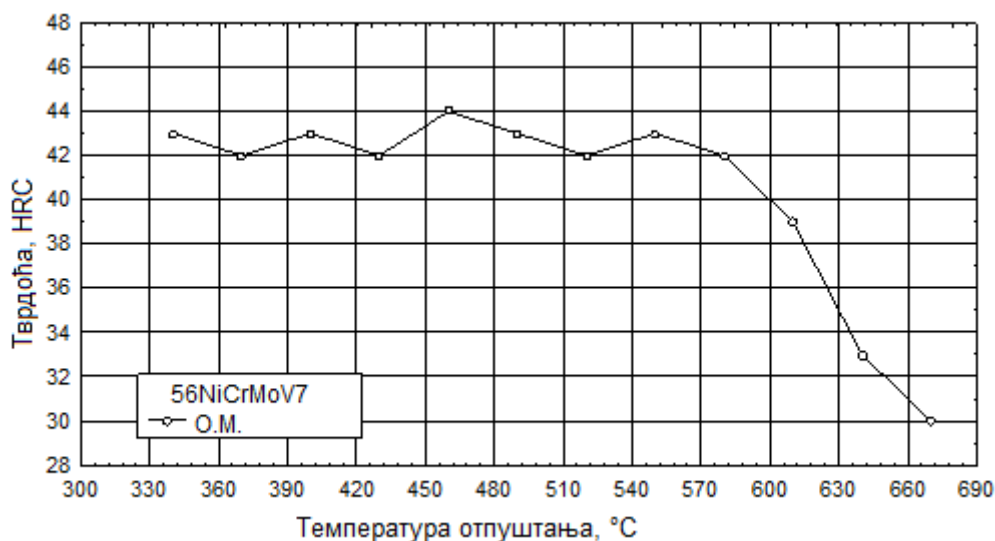
На структурне промене делују температура отпуштања, време загревања, али и својства материјала. Према томе, промена тврдоће се може пратити преко следећег параметра:

$$P = T \cdot (\log t + c),$$

код кога је  $T$  – апсолутна температура отпуштања, а  $t$  – време отпуштања. Коефицијент ( $c$ ) зависи од садржаја угљеника у челику и претходне обраде.

Код челика легираних елементима који граде специјалне карбиде ( $Cr$ ,  $Ni$ ,  $V$ ) – челик Č5742, уочава се ометано издвајање угљеника из мартензита, па се висока тврдоћа задржава све до температуре отпуштања од  $500^{\circ}\text{C}$ . При отпуштању на вишим температурама, долази до појаве специјалних карбида у веома дисперзном стању. Такође долази и до издвајања карбида из заосталог аустенита. Ово доводи до појаве *секундарне тврдоће*.

На слици 6.10 је дат дијаграм промене тврдоће у зависности од температуре отпуштања за челик Č5742 (56NiCrMoV7 по DIN стандарду). На овом дијаграму је уочен и пораст тврдоће при температури око  $450^{\circ}\text{C}$ , што значи да је челик подлегао штетној појави – отпусној кртости.



Слика 6.10 Дијаграм зависности тврдоће од температуре отпуштања за челик Č5742

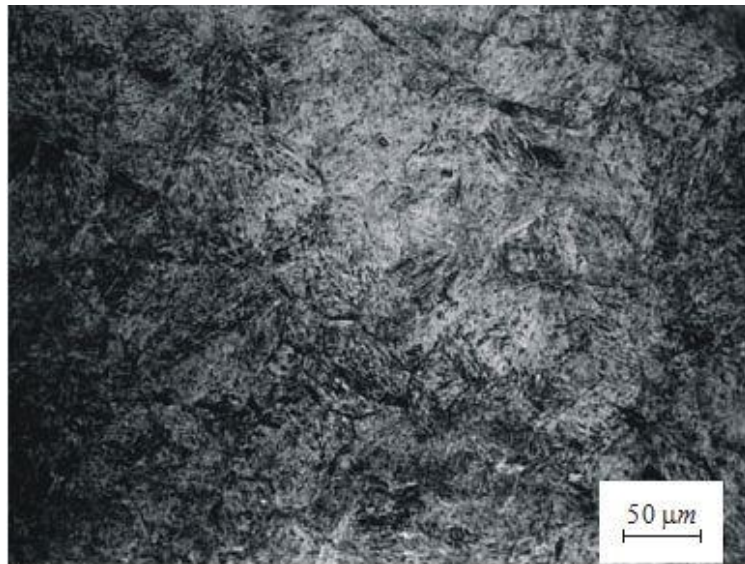
За примену челика Č5742 код ковачких алата потребна је велика тврдоћа и чврстоћа, уз мање повећање пластичности и жилавости, у односу на закаљен челик, па се овај челик отпушта на ниским температурама (до  $250^{\circ}\text{C}$ ). Према томе, у зависности од потребних механичких особина челика, одређује се режим отпуштања којем ће бити подвргнут после каљења.

Границе развлачења, пропорционалности и еластичности после каљења имају веома ниске вредности. Међутим, са порастом температуре отпуштања до  $300^{\circ}\text{C}$  уочен

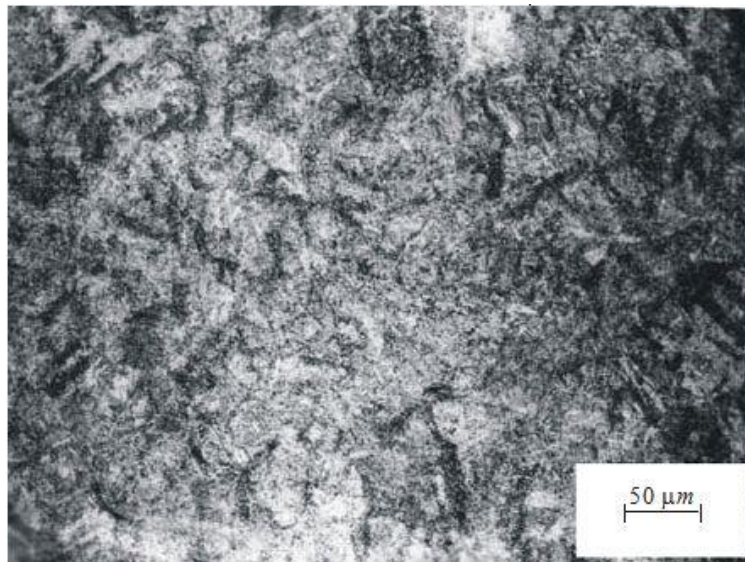
## 6. Примери термичке обраде отпуштања на реалним радним деловима

је њихов раст, а после ове температуре пад њихових вредности. Према томе, челици од којих се захтевају повољне вредности ових особина се подвргавају ниском отпуштању.

Ако се после термичке обраде побољшања челик Š5742 подвргне микроскопском испитивању, могу се уочити разлике у структурама овог челика у зависности од дубине слоја који се испитује. Спољашњи слојеви имају структуру отпуштеног мартензита, тврдоће око 600 HV (сл. 6.11), док су унутрашњи слојеви претежно сорбитне структуре тврдоће око 250 до 300 HV (сл. 6.12).



*Слика 6.11 Структура спољашњих слојева челика Š5742 после термичке обраде побољшања (отпуштени мартензит) [12]*



*Слика 6.12 Структура унутрашњих слојева “језгра” челика Š5742 после термичке обраде побољшања (претежно сорбит)*

## 7. ЗАКЉУЧАК

Термичка обрада је веома значајна, практично незаобилазна у многим индустријским гранама. Као таква, захтева велико посвећивање пажње у циљу њеног правилног извођења. Врло је важно правилно изабрати режим термичке обраде у зависности од: хемијских и структурних карактеристика челика, услова и могућности извођења одабране врсте термичке обраде, стручности кадра, намене производа, радних услова, али и исплативости самог процеса.

Значај термичке обраде је веома велик, јер хемијске, механичке и физичке особине метала које се добијају овом поступцима су незаменљиве у појединим радним условима. Према томе, са даљим напретком науке и технологије усавршавају се и унапређују разни видови термичке обраде металних материјала.

Значај поступака каљења и отпуштања челика регистрован је још од древних времена. Међутим, у новије доба, због потребе за развојем челика повишене јачине, као и алатних материјала, порасла је потреба за овим поступцима. Понекад се примењују обични поступци термичке обраде (жарење, каљење и отпуштање), понекад поступци хемијско-термичке обраде (цементација, нитрирање и др.), а најчешће се користи комбинација наведених. На тај начин се добијају најповољније излазне карактеристике (механичке, физичке, хемијске, технолошке и др.) за све сложеније индустријске захтеве.

Због могућности остваривања супростављених особина (нпр. велике тврдоће и повољне жилавости), поступак термичке обраде побољшања, довео је до развоја нових констукционих челика. Наиме, применом тих челика са изузетним механичким особинама, знатно се може олакшати конструкција, скратити време израде, смањити утрошак додатног материјала и др. Кад је реч о алатним челицима, погодним избором термичке обраде, реалним радним деловима се осетно продужава постојаности, било да је реч о алатима за резање, ливење, пластичну прераду метала и др.

Нажалост, термичка обрада понекад може бити штетна и опасна по здравље радника. Да би се осигурао безбедан рад у оваквим постројењима, неопходно је предузети одговарајуће мере хигијенско-техничке заштите. Посебно треба обратити пажњу на транспорт високо загрејаних полуфабриката (уложака) у процесу производње. Мере заштите у калионицама морају бити на задовољавајућем нивоу. Зато је важно обратити пажњу на законске прописе везане за хигијенско-техничку заштиту. Треба обратити пажњу на правилно проветравање просторије, смањивање удела штетних гасова (*CO* и др.), смањивање отровних пара (цинка, олова итд.). Затим, поред тога треба пажљиво руковати пећима, избегавати примену запаљивих гасова који експлозивно сагоревају, не уносити лако запаљива материје у калионице, користити специјална заштитна средства (ватросталне рукавице, заштитне маске и др.).

У овом раду је детаљно изложено до каквих хемијских и структурних промена долази при отпуштању угљеничних и легираних челика, што је праћено и променом

најважнијих механичких особина. При отпуштању појединих легираних челика, долази до штетне појаве отпусне кртости (пораст секундарне тврдоће, али и пад ударне жилавости), коју је неопходно избећи како би се добиле повољне механичке особине. У раду су наведени начини спречавања ове штетне појаве, коју је у неким случајевима могуће отклонити без неповољног утицаја на остале механичке особине. Међутим, у неким случајевима, њено отклањање са собом повлачи и губитак повољних механичких својстава добијених претходном термичком обрадом.

Без обзира на стални развој неметалних материјала (композита, пластика, гума и др.), улога челика је и даље незаменљива у готово свим индустријским гранама, па бих на овом месту цитирао свог предметног наставника и ментора овог рада, који је на својим предавањима често истицао следећу реченицу: “Челик је био, остао и још задуго остаће главни конструкциони материјал!”.

## 8. Литература

- [1] Јовановић, М., Лазић, В., Адамовић, Д., Ратковић, Н.: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.
- [2] Видојевић, Н.: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд 1973.
- [3] Ђорђевић, В.: *Машински материјали*, Машински факултет у београду, 2000.
- [4] Шуман, Х.: *Металографија*, Технолошко-металуршки факултет, Београд 1989. (превод).
- [5] Арсић, Д.: *Термичка обрада зупчаника мењача путничког возила*, семинарски рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2013.
- [6] Арсић, Д.: *Фазне промене у металним системима*, пројектни задатак, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2014.
- [7] ASM Metals Handbook Volume 4 – Heat Treating, ASM Internacional, 2002.
- [8] ASM Metals Handbook Volume 9 – Metallography And Microstructure, ASM Internacional, 2002.
- [9] Прокић, Р., Поповић, О.: *Машински материјали*, Универзитетски уџбеник, Машински факултет у Београду, 2012.
- [10] Callister, W., Rethwisch, D.: *Materials Science and Engineering*, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, USA, 2009.
- [11] Morimoto, M., *Colorado School of Mines*, June 14<sup>th</sup>, 2004.
- [12] Лазић, В.: *Оптимизација процеса наваривања са аспекта триболошких карактеристика навара и заосталих напона*, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2001.
- [13] Јовановић, М., Лазић, В.: *Машински материјали – 8. предавање – Термичка обрада челика*, Крагујевац, школска 2010-2011.