

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Филип Г. Димитријевић

**Избор најпогоднијег режима термичке
обrade легираних челика за побољшање
завршни рад**

Крагујевац, 2016

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 86/2013

Филип Г. Димитријевић

**Избор најпогоднијег режима термичке
обrade легираних челика за побољшање
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:

- да преглед основних режима термичке обраде и да укаже на њен значај.
- да преглед легираних челика за побољшање и укаже на област њихове примене.
- на примеру два челика изведе и покаже најпогоднији режим термичке обраде.

Препоручена литература:

[1] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, рукопис књиге, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.

[2] В. Ђорђевић: *Машински материјали*, Машински факултет у Београду, Београд, 2000.

[3] Н. Видојевић: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет у Београду, Београд, 1973.

Крагујевац, 2016.

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Садржај

1. Увод	1
2. Термичка обрада челика	2
2.1 Врсте термичке обраде челика	4
2.1.1 Жарење челика	5
2.1.2 Каљење челика	8
2.1.3 Отпуштање	10
2.1.4 Термомеханичка обрада (ТМО) и реаустенитизација	11
2.1.5 Хемијско - термичка обрада (ХТО)	12
3. Челици за побољшање	16
3.1 Уводне напомене о челику	16
3.2 Легирани челици	17
3.3 Челици за побољшање	17
4. Термичка обрада побољшања	23
4.1 Термичка обрада каљењем	23
4.1.1 Средства за загревање	24
4.1.2 Средства за хлађење при каљењу	26
4.1.3 Одређивање моћи хлађења	27
4.1.4 Утицај стања површина, облика и величине челичних делова на постигнуту брзину хлађења при каљењу	27
4.2 Дубина каљења челика	28
4.2.1 Методе одређивања дубине каљења	29
4.3 Појава унутрашњих напона при каљењу	33
4.4 Начини каљења	35
4.4.1 Континуално (обично) мартензитно каљење	35
4.4.2 Степенасто (прекидно) мартензитно каљење (мартемперинг)	35
4.4.3 Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг)	36
4.4.4 Континуално бејнитно каљење	37
4.4.5 Прекидно каљење	38
4.4.6 Таложно каљење	38
4.4.7 Каљење на ниским температурама	39
4.4.8 Површинско каљење	40
4.5 Грешке при каљењу	43
4.6 Отпуштање	46
4.6.1 Отпусна кртост	46

4.6.2 Мартензитна промена при отпуштању легираних челика	49
5. Примери извођења термичке обраде побољшања	50
5.1 Термичка обрада челика Č4730 (25CrMo425)	50
5.1.1 Подаци о материјалу Č4730 (25CrMo425)	50
5.1.2 Оптималан режим термичке обраде челика Č4730 на основу IRA дијаграма	52
5.2 Термичка обрада челика Č1530 (C45)	57
5.2.1 Подаци о материјалу Č1530 (C45)	57
5.2.2 Оптималан режим термичке обраде челика Č1530 на основу IRA дијаграма	59
6. Закључак	61
7. Литература	62

Резиме

Предмет овог рада јесте термичка обрада и њена примена код легираних челика за побољшање. У раду је истакнуто колико је правилан избор режима термичке обраде важан и до којих промена долази њеном применом. Детаљно су објашњени процеси извођења поступака термичке обраде, као и утицај који имају на легиране челике за побољшање. На крају је приказан и одабир најпогоднијег режима термичке обраде одређених легираних челика за побољшање.

Кључне речи: термичка обрада, отпуштање, побољшање, легирани челици.

Abstract

Subject of this paper is heat treatment and its application on alloyed Q + T steels. There are information about how choice of optimal heat treatment regime is important as well as information about transformations occurring inside material during heat treatment. Various types of heat treatment are explained in details, and its influence on alloyed Q + T steels. The paper gives procedure for selecting optimal heat treatment of specific Q + T steels.

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

1. Увод

Метали и легуре представљају основне техничке материјале захваљујући својим погодним механичким и физичким особинама од којих се нарочито истичу: отпорност према дејству спољашњих сила, способност деформисања - уобличавање и добра топлотна и електрична проводљивост. Међутим, стални развој технике захтева даље побољшање особина метала и легура, при чему се најчешће мисли на повећање затезне чврстоће (односно границе развлачења и динамичке чврстоће) и тврдоће, мада се све више намеће и захтев за металима и легурама који поседују специјалне особине.

Термичком обрадом могу се знатно побољшати све механичке особине, а нарочито најважније од њих као што су напон течења и динамичка чврстоћа према којима се и одређују вредности допуштених радних напрезања. Што су напон течења и динамичка чврстоћа веће, то су допуштена напрезања већа, па се пресек, односно тежина појединих делова машина и конструкција може смањити. На овај начин се постиже двострука корист: побољшава се квалитет и продужава век трајања конструкције, док се истовремено врши уштеда на материјалу.

Термичка обрада је данас један од врло важних елемената технолошког процеса у великом броју металуршких предузећа, машиноградњи, индустрији мотора, производњи алата... Тако се, на пример, термички обрађују милиони тона челика у виду лимова, шина, бандажа, цеви и жица, сви одговорни делови машина подлежу термичкој обради, а целокупна производња кугличних лежаја пролази кроз термичку обраду. Нарочити значај има термичка обрада алата од чијег квалитета зависи производност машина алатки.

Термичка обрада налази примену у побољшању особина ливеног гвожђа, челичног лива и заварених конструкција. Термичка обрада легура на бази нежелезних метала, као што су алуминијум, магнезијум, никл и други, обухвата такође велики број продуката и видно побољшава њихове особине. Међутим, треба нагласити да се термичком обрадом не побољшавају само механичке особине, већ се у многим случајевима она примењује и за побољшање физичких и физичко-хемијских својстава метала и легура: коерцитивне силе челика за перманентне магнете, магнетне пермеабилности меког магнетног материјала, отпорности на корозију нерђајућих челика, ватроотпорности челика предвиђених за рад у условима повишених температура и др.

У оквиру рада су објашњени различити видови термичке обраде, како теоријски, тако и на конкретним примерима.

2. Термичка обрада челика

Својства и понашање метала и легура у производним процесима и у току експлоатације зависе од састава, структуре, начина прераде и термичке обраде којој могу бити подвргнути. Важна механичка својства као што су затезна чврстоћа, напон течења, тврдоћа, жилавост и пластичност могу се побољшати на следеће начине:

- изработом монокристала (масивни монокристали, вискери),
- легирањем,
- хладном обрадом (вучење, ковање, извлачење...) и
- термичком обрадом (загревањем, прогревањем, хлађењем на различитим брзинама) [1].

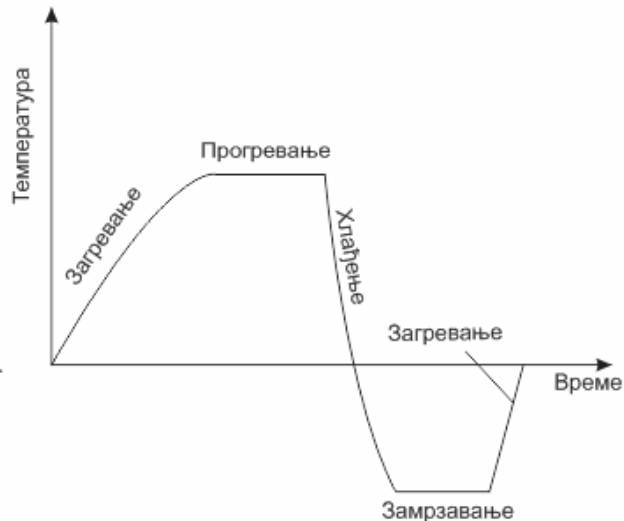
Термичка обрада се дефинише као операција или комбинација операција које се састоје из загревања и хлађења метала и легура у чврстом стању на начин који треба да осигура постизање одређених структурних промена, односно промена особина.

Тешко је утврдити када се први пут почело са применом термичке обраде у циљу побољшања особина метала. Према неким подацима термичка обрада челика стара је колико и његова израда и коришћење. Међутим, веома дуг развојни пут термичка обрада метала морала је да прође да би се из чистог занатства издигла до модерне технологије. Тако је изучавање структура и особина метала и легура довело тек крајем XIX века до развоја Физичке металургије која се може сматрати основом практичне термичке обраде. Захваљујући даљем великом напретку и развоју Физичке металургије данас се могу са сигурношћу предсказати могући начини термичке обраде, односно побољшања одређених особина свих метала и легура на основу закона који су утврђени на неким добро познатим системима метала.

Термичка обрада је технолошки процес који се састоји из загревања метала до одређене температуре, задржавања на тој температури и хлађења до собне температуре (слика 2.1). Понекад се у циљу трансформације заосталог аустенита, наставља са хлађењем испод 0°C, део се задржава на ниској температури („замрзава“) и поново загрева до собне температуре (слика 2.2) [1].



Слика 2.1 Ток термичке обраде



Слика 2.2 Ток термичке обраде са хлађењем испод 0°C

Да би могла да се изазове промена особина легура које се пред извођење термичке обраде налазе у стању структурне равнотеже неопходно је да при загревању ових легура долази до фазне трансформације (преображаја), тј. до одређене реакције у чврстом стању. Како се већина трансформација не одиграва тренутно, већ захтева за своје потпуно обављање одређено време, то се сада кроз промену услова хлађења може обезбедити:

- да се процеси преображаја развијају у већем или мањем степену,
- да се потпуно спрече и
- да се јаве нови механизми трансформација.

У зависности од трансформације и степена њеног развитка мењаће се и особине легура, јер су оне тесно повезане са структуром.

Ако полазно стање метала и легура карактерише структурна неравнотежа изазвана претходном термичком или механичком обрадом, то се загревањем убрзавају дифузиони процеси (покретљивост атома), па се као резултат загревања, односно термичке обраде, метал приближава равнотежном стању и мења своје особине. У овом случају термичка обрада је могућа и ако се при загревању, према равнотежном дијаграму стања у легури не јавља промена фаза.

Може се закључити да термичка обрада челика представља одређено удаљавање од стања које даје равнотежни метастабилни дијаграм стања (Fe-Fe₃C), односно приближавање равнотежи.

Могућа је и таква термичка обрада код које при држању на одговарајућој температури долази до засићења површина метала или легуре другом компонентом која са основним металом гради чврсти раствор, односно интермедијатну фазу, чиме се битно мењају особине у површинском слоју метала или легуре [2].

Пре детаљнијег разматрања појединих врста термичке обраде челика, неопходно је дати ознаке и дефиниције преображајних температура (тачака) које су битне за избор процесних параметара термичке обраде челика (табела 2.1) [3].

Табела 2.1 Критичне температуре термичке обраде челика [3]

ОЗНАКА	ДЕФИНИЦИЈА
A_0	Температура ($T=210^{\circ}\text{C}$) при којој магнетични Fe_3C прелази у немагнетични.
A_{C1}	Температура почетка еутектоидне промене ферита и цементита у аустенит при загревању.
A_{C3}	Температура завршетка промене ферита у аустенит при загревању подеутектоидних челика.
A_{Cm}	Температура завршетка растварања секундарног цементита у аустениту при загревању надеутектоидних челика
A_{r1}	Температура завршетка еутектоидне промене аустенита у ферит и цементит при хлађењу.
A_{r3}	Температура почетка промене аустенита у ферит при хлађењу подеутектоидних челика.
A_{rCm}	Температура почетка издвајања секундарног цементита из аустенита при хлађењу надеутектоидних челика.
M_s, M_f	Температуре почетка, односно завршетка мартензитне промене.
B_s, B_f	Температуре почетка, односно завршетка бејнитне промене.

2.1 Врсте термичке обраде челика

Сви данас примењивани начини термичке обраде могу се разврстати на:

- жарење (дифузионо, нормализационо, меко, потпуно, рекристализационо, за попуштање напона),
- каљење (запреминско или потпуно, површинско),
- отпуштање (ниско, средње, високо),
- термомеханичку обраду (ТМО) и реаустенитизацију и
- хемијско - термичку обраду (ХТО).

2.1.1 Жарење челика

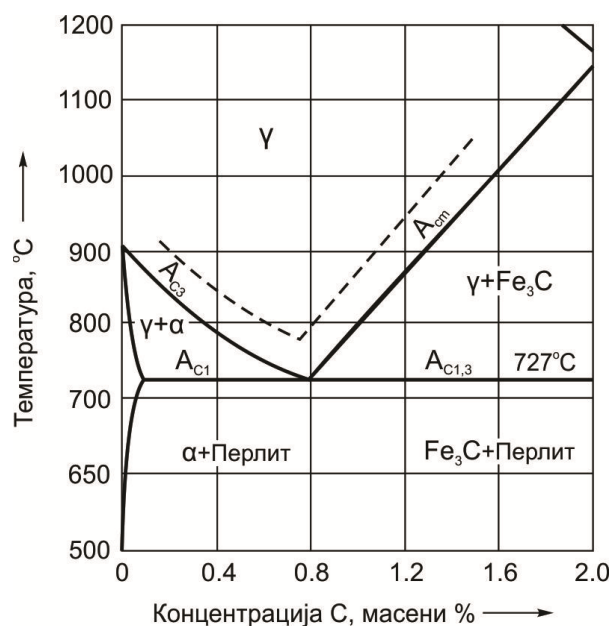
Жарење је вид термичке обраде која почиње загревањем радних предмета до одређених повишених температура, држања на тој температури, а завршава се спорим хлађењем (најчешће у пећи). Тиме се мање-више успоставља структурна равнотежа која је поремећена неком врстом претходне термичке обраде (механичке обраде или заваривања). После жарења добиће се перлитно-феритна, перлитна или перлитно-цементитна структура (зависно од састава челика). Уједно се смањује тврдоћа, а повећавају истегљивост и жилавост. Железаре испоручују челик углавном у жареном стању, међутим у току даље прераде железарских полупроизвода често је потребно и додатно жарење.

Циљеви жарења могу бити различити: да се поправи обрадивост челика резањем или деформацијом, да се хомогенизује неуједначена структура, уклоне унутрашњи напони, смањи тврдоћа итд.

Поједине врсте жарења разликују се према температури загревања и прогревања, режиму хлађења и циља који треба остварити. Понекад се методе жарења деле на поступке са фазним променама (дифузионо, нормализационо, меко и потпуно жарење) и поступке без фазних промена (рекристализационо жарење, жарење ради попуштања напона).

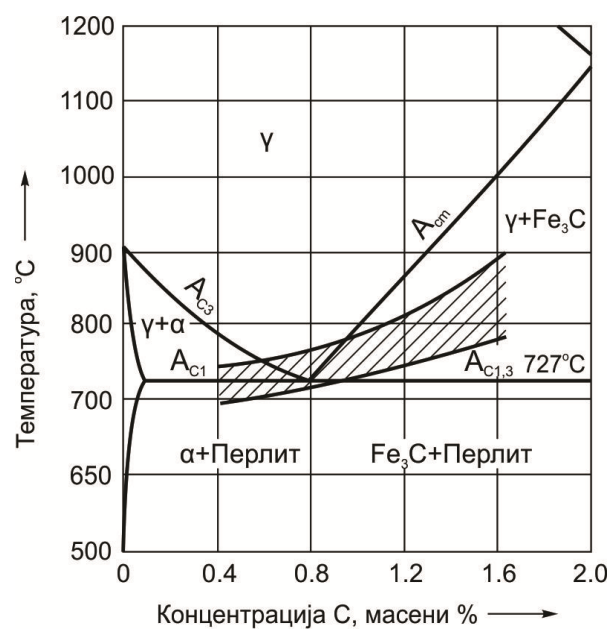
Дифузионо (хомогенизационо) жарење заснива се на загревању челика до високо аустенитног подручја, чак близу солидус линије, дуготрајном прогревању на тој температури и спором хлађењу; примењује се углавном за челичне одливке или инготе да би се смањила неједнородност хемијског састава изазвана микросегрегацијом и делимично ликвацијом. Овом термичком обрадом се поправља микроструктура која уместо разгранате постаје хомогена, али зрно остаје крупно због дуготрајног држања на високој температури. Како би се добила ситнозрнаста структура челични одливци се подвргавају нормализацији. Код железарских полупроизвода-ингота намењених за даљу прераду у топлој ваљационици, није потребна посебна термичка обрада, јер се они при вишеструком топлом ваљању (на $\sim 1200^{\circ}\text{C}$), спонтано дифузионо жаре.

Нормализационо жарење (нормализација) (слика 2.3) се састоји из загревања челика до око 55°C изнад горње критичне температуре A_{C3} за подеутектоидне, односно изнад A_{Cm} за наеутектоидне челике, затим прогревања при тој температури и хлађења на мирном ваздуху. Циљ нормализације је да се добије равномерна и ситнозрнаста структура. Ређе се нормализују високоугљенични челици који су склони ка порасту зрна; температура загревања се тада ограничава до тачке A_{Cm} или чак нешто ниже. Задње ограничење уводи се због велике склоности ка закаљивању високоугљеничних и легираних челика, чак и при хлађењу на ваздуху. Ако се то догоди, неопходно је накнадно високо отпуштање. Углавном се нормализују ваљациони производи, челични одливци, отковци и заварени спојеви од дебелих челичних делова рђаве заварљивости. Масивни челични одливци, као што су железарски ваљци, после нормализације се високо отпуштају.



Слика 2.3 Температура загревања за нормализацију челика [3]

Меко жарење (слика 2.4) изводи се углавном код делова од високоугљеничних челика, који се загревају и прогревају неколико десетина сати око доње критичне температуре (A_{C1}) и затим споро хладе. Као резултат ове обраде добија се структура мекшег-зрнастог (лоптастог) цементита, уместо тврђег ламеларног. Побољшава се обрадивост резањем, нарочито отковака од високоугљеничних и легираних челика, јер при резању ламеларног перлита, стругарски нож пресеца тврде ламеле цементита (Fe_3C), а код глобуларног размиче зрна и сече мекшу феритну основу. Такође се меко жаре надеутектоидни челици пре каљења, да би се ламеларни цементит превео у жилавији, глобуларни облик.



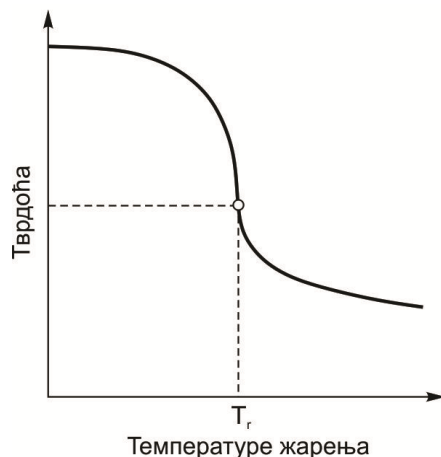
Слика 2.4 Температурска област загревања за меко жарење [3]

Потпуно жарење се заснива на загревању челика до аустенитног подручја, око $30-50^{\circ}\text{C}$ изнад тачке A_{C3} за подеутектоидне и изнад A_{Cm} за надеутектоидне, затим прогревању на одабраној температури и најзад веома спором хлађењу у пећи у интервалу фазних промена (A_{C3} , $A_{Cm} - A_{C1,3}$). Даље хлађење од A_{C1} до собне температуре може бити на ваздуху. Сврха потпуног жарења јесте уситњавање зрна, отклањање штетне Видманштетенове структуре, уједначавање структуре, као и смањење сопствених напона, тако да третирани челик постане мекши и ковнији. Овако се жаре нискоугљенични челични лимови ради припреме за дубоко извлачење и за побољшање машинске обрадивости високоугљеничних челика.

Варијанта потпуног жарења је **изотермичко жарење** намењено за неке легиране челике који би при непрекидном хлађењу са температуре изнад A_{C3} постали сувише тврди. Зато се радни предмет загрева $0-50^{\circ}\text{C}$ изнад горње критичне температуре, затим брзо хлади до нешто изнад 550°C , задржава при тој температури до завршетка перлитне промене и најзад хлади на ваздуху.

У изотермичко жарење сврстава се и тзв. *патентирање жица* које се изводи загревањем на $900-1100^{\circ}\text{C}$, затим брзим хлађењем до приближно 550°C , па жарењем на ситан перлит, и најзад вучењем на хладно при $T < 550^{\circ}\text{C}$.

Рекристализационо жарење се заснива на загревању хладно деформисаног предмета до изнад температуре рекристализације, задржавању на тој температури и хлађењу произвољном брзином. Температура рекристализације (T_r) метала и легура зависи пре свега од њихове температуре топљења (T_t , K). За технички чисте метале, рекристализациона температура приближно износи $T_r \approx 0.4 \cdot T_t$, а за легуре типа чврстог раствора $T_r \approx 0.6 \cdot T_t$ нискоугљенични челици имају $T_r \approx 650^{\circ}\text{C}$. Температура рекристализације најлакше се може одредити мерењем тврдоће на низу узорка претходно незнатно деформисаних на хладно (око 5-15%) и потом вештачки старених око 2 h на различитим температурама. Резултати мерења приказују се у облику дијаграма на слици 2.5. Превојна тачка на овој кривој дефинише температуру рекристализације (T_r). У пракси мале деформације настају већ при исправљању или савијању плоча и профила.



Слика 2.5 Одређивање температуре рекристализације

Рекристализационо жарење, тзв. процесно жарење често се користи као међуоперација при вишеструком ваљању или вучењу на хладно. Рекристализационо жарење је краткотрајно код танких пресека, а веома дуго код дебелих пресека, јер се тражи једнолико прогревање и рекристализација по целој дебљини радног предмета.

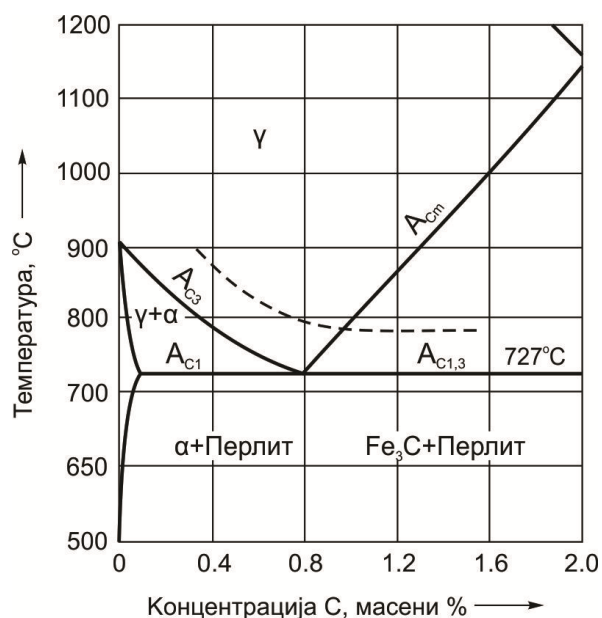
Жарење за отпуштање напона доводи до смањења сопствених напона који настају у току прераде метала, а не дејством спољашњих сила и момената. Ниво заосталих сопствених напона у одливцима може бити толики да се одливак преломи чак и при непажљивој манипулацији у току транспорта. Заостали напони код заварених спојева могу створити прсине на хладно или трајне деформације (кривљење, витоперење). Код неких делова који раде у корозивним срединама, заостали напони убрзавају напонску корозију. У сваком случају корисно је отпуштање које се остварује лаганим загревањем радног предмета не изнад тачке A_{C1} ($A_{C1,3}$), задржавањем при тој температури и још споријим хлађењем него при загревању како би се спречило индуковање нових термичких напона. Заостали напони смањују се тако што еластичне деформације прелазе у пластичне $\varepsilon_{el} \rightarrow \varepsilon_{pl}$.

Челичне одливке и одливке од ливеног гвожђа треба жарити ради отпуштања напона при температури 500-600°C, а заварене спојеве при температури око 650°C, уз веома споро загревање и прогревање сразмерно дебљини (2-5 min по mm дебљине), а хладити два пута спорије од загревања.

После хладне пластичне деформације челични предмети се жаре на 250-300°C (испод температуре рекристализације) да се не пониште позитивни ефекти хладне прераде: повећање тврдоће, својства отпорности, отпорност на хабање и слично. Дугим задржавањем при релативно ниској температури жарења (100-150°C) неће се отклонити заостали напони, већ ће се само снизити на ниво који не угрожава радни предмет у експлоатацији. Понекад се при температури од 150°C изводи тзв. *стабилизационо отпуштање*. Углавном код мерних и контролних алата да би се постигла неопходна димензионална стабилност. Спонтано или сезонско отпуштање настаје дужим држањем одливака на отвореном простору. На овај начин се уравнотежавају унутрашњи напони. Промене при дуготрајном држању одливака на отвореном простору понекад се називају дозревање или природно старење [3].

2.1.2 Каљење челика

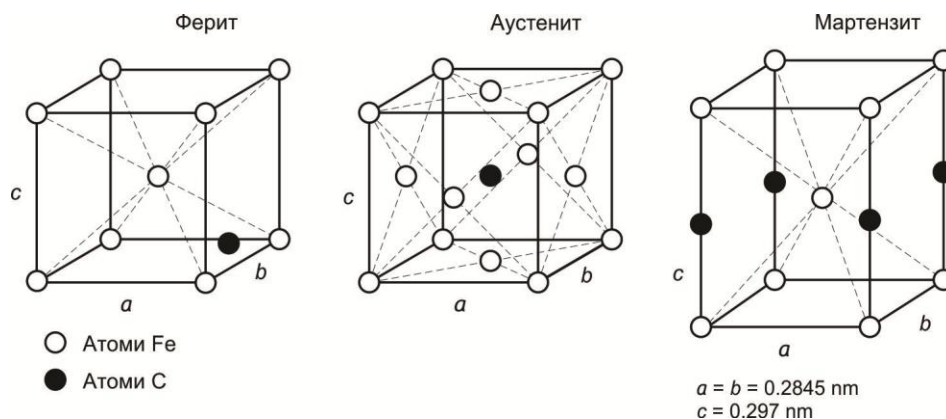
Каљење челика је термичка обрада која се изводи загревањем радног предмета изнад температуре A_{C3} , за подеутектоидне и $A_{C1,3}$ за надеутектоидне челике (слика 2.6), прогревањем на тој температури и хлађењем брзином већом од критичне. Код закаљивих угљеничних челика ($C > 0.25\%$) горња критична брзина хлађења је око 140-250°C/s, а доња око 40°C/s при 550°C. Са порастом садржаја угљеника раствореног у аустениту опада критична брзина хлађења и снижава се температура почетка мартензитне трансформације према изразу $M_s = 550 - 360\% \cdot C$.



Слика 2.6 Температура загревања за каљење челика (----) [3]

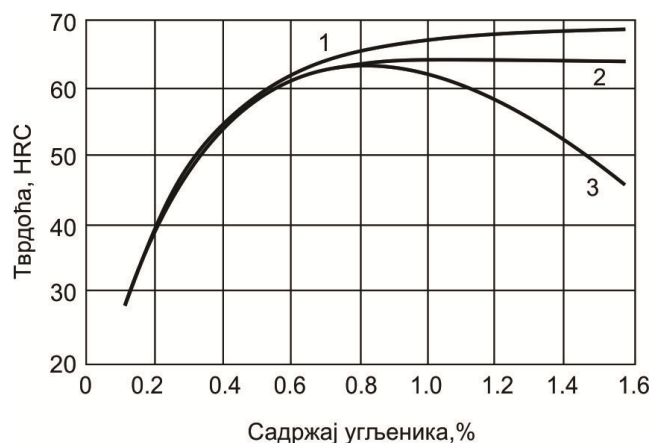
Код већине челика брзина хлађења потребна за каљење постиже се потапањем предмета у воду или уље. Веће брзине хлађења него у води остварују се у воденим растворима соли или база, а нешто мања брзина у кречном млеку. Изузетно велике брзине хлађења постижу се прскањем делова воденим млазевима, а веома мале брзине постижу се хлађењем на мирном ваздуху или ваздушној струји.

Суштина каљења челика јесте да се потхлађивањем аустенита спречи његова дифузиона промена до M_s - температуре, испод које настаје промена механизмом клизања, тзв. мартензитна трансформација. Као резултат каљења добија се тетрагонални мартензит-структура која се одликује великом тврдоћом и високим својствима отпорности ($R_{0.2}$, R_m), али ниским вредностима дуктилности и жилавости. Због тога што се кубна решетка аустенита трансформише механизмом клизања (а не дифузијом као у равнотежним условима), долази до деформације кубне у тетрагоналну кристалну решетку. Кристалографске осе остају ортогоналне, с тим што су два параметра (a) и (b) исте дужине, док је трећи параметар (c) у правцу осе z издужен, јер су у том правцу смештени атоми угљеника (слика 2.7).



Слика 2.7 Кристалне решетке чврстих раствора: ферита, аустенита и мартензита [3]

Тврдоћа мартензита зависи од садржаја угљеника раствореног у аустениту који после каљења прелази у мартензит.



Слика 2.8 Тврдоћа мартензита у функцији % C и температуре каљења (1- замрзавање, 2- каљење са $T > A_{C1,3}$, 3- каљење са температуром $T > A_{Cm}$) [3]

Максимална тврдоћа мартензита од око 64 HRC добија се при 0.70% C раствореног у аустениту. Даље повећање садржаја угљеника у аустениту незнатно утиче на пораст тврдоће чак и после „замрзавања“ (крива 1). У стварности када се надеутектоидни челици кале са температуре изнад A_{Cm} појавиће се знатна количина заосталог аустенита, што доводи до опадања тврдоће (крива 3). Ако се исти челици кале из аустенитно-цементитног подручја ($A_{C1,3} + 30^{\circ}\text{C}$), тврдоћа неће зависити од укупног садржаја угљеника у челику, већ само од процента угљеника раствореног у аустениту, који остаје исти за све надеутектоидне челике (0.70% C, крива 2). Аустенит заостао после каљења је непожељна фаза, посебно код алатних челика, јер има малу тврдоћу и распада се на повишеним температурама у цементит, што је праћено променом димензија [3].

Врсте каљења:

- потпуно (запреминско) каљење: мартензитно (континуално и степенасто) и бејнитно (изотермичко и континуално) и
- површинско каљење: пламено и индукционо.

Више речи о поступцима каљења биће у Глави 4, где се детаљније разматра термичка обрада побољшања.

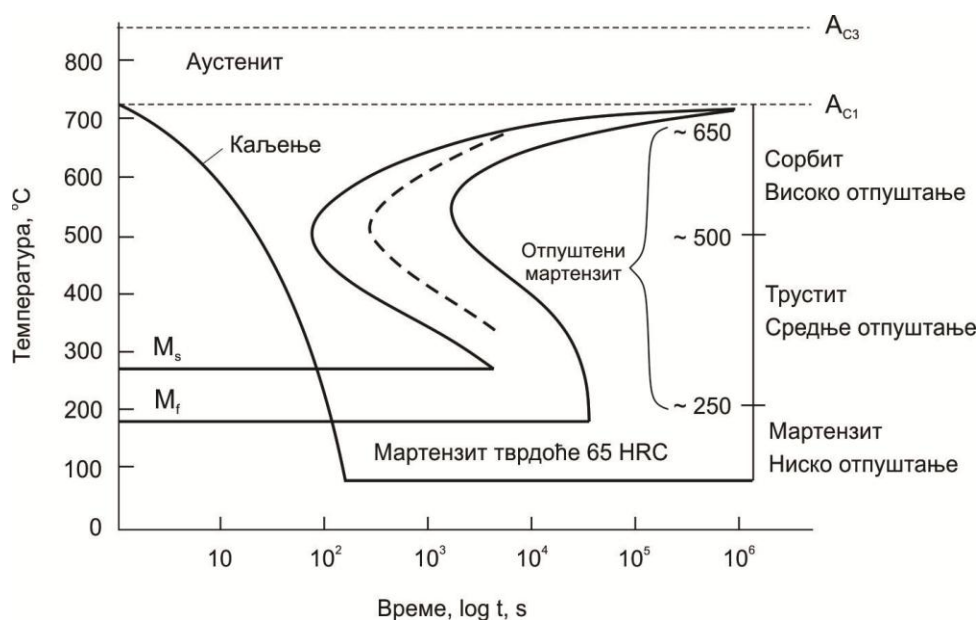
2.1.3 Отпуштање

Термичка обрада која се састоји у загревању челичног радног предмета до температуре испод A_{C1} , држању на тој температури одређено време, а затим спором хлађењу зове се **отпуштање**. Формирање стабилних фаза настаје разлагањем мартензита и заосталог аустенита у структуре које се састоје из ферита и цементита код угљеничних челика, или из међуфазне-карбидне структуре код легираних челика.

Ови структурни састојци се разлажу дифузијом, а њена брзина је одређена температуром и временом загревања. Од наведених структурних састојака челика, при загревању, прво почиње разлагање мартензита.

Мартензит, као презасићен чврст раствор са вишком слободне енергије, може прећи у равнотежно стање излучивањем вишка угљеника из чврстог раствора што је у ствари дифузиони процес који настаје тек на повишеној температури. Из тог разлога мартензит је на собној температури стабилан састојак (тетрагонални мартензит). Међутим, довођењем топлоте убрзава се дифузија и прелазак дела мартензита у равнотежно стање, тј. у стабилну фазу - цементит.

На слици 2.9 шематски је приказано каљење и отпуштање угљеничног еутектоидног челика (0.77% C).



Слика 2.9 Каљење и отпуштање приказано у КН дијаграму [3]

Више речи о поступцима отпуштања биће у Глави 4, где се детаљније разматра термичка обрада побољшања.

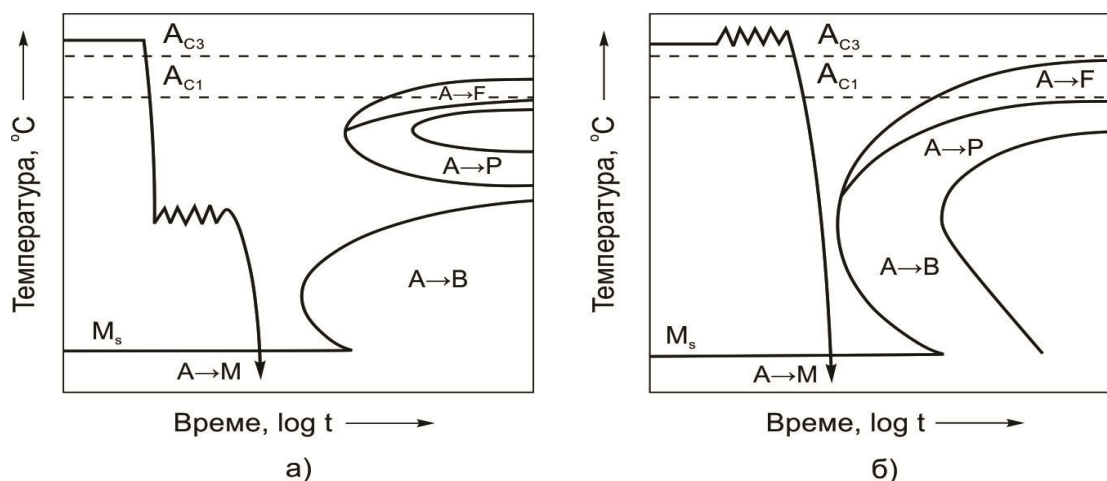
2.1.4 Термомеханичка обрада (ТМО) и реаустенитизација

Термомеханичка обрада (ТМО)

Последњих година у неким индустријски развијеним земљама знатна пажња се посвећује изради нисколегираних и средњелегираних конструкционих челика, тзв. термомеханички обрађених челика (ТМО). Данас се производе две врсте ТМО челика: високотемпературски и нискотемпературски [1].

Нискотемпературска ТМО (слика 2.10) се заснива на аустенитизацији челика изнад температуре A_{C3} , затим хлађењу критичном брзином до области метастабилног аустенита (500-600°C), где се челик ваља, затим кали и по потреби ниско отпушта. После овакве ТМО челик може да достигне јачину на кидање до око 3000 МПа.

Високотемпературска ТМО (слика 2.11) почиње загревањем и прогревањем изнад A_{C3} , наставља се ваљањем при тој температури, а затим следи потхлађивање, односно мартензитна трансформација и евентуално ниско отпуштање. На крају се постиже јачина 2500 MPa.



Слика 2.10 Шема нискотемпературске термомеханичке обраде (НТМО)[3]

Слика 2.11 Шема високотемпературске термомеханичке обраде (ВТМО)[3]

Реаустенитизација

Реаустенитизација тј. двоструко каљење не припада ни у ТМО, нити у обичну термичку обраду. То је релативно нова термичка обрада високоугљеничних челика. Машински део, који је претходно окаљен са уобичајене температуре, накнадно се загрева до нешто више температуре и опет кали. У току загревања један део угљеника дифундује на границе зрна и образује фини цементит, а други део (око 0.30% C) остаје растворен у аустениту. После каљења структура ће бити мартензит са 0.30% C и фини цементит, што представља најбољу комбинацију својстава отпорности (R_m , $R_{0.2}$) и својстава деформације (A и Z) [3].

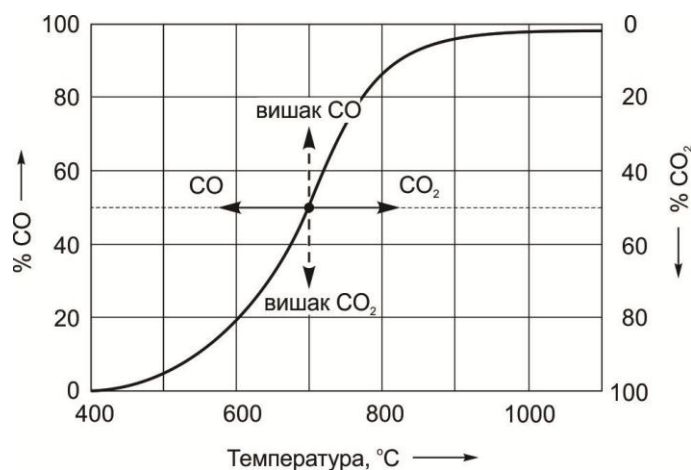
2.1.5 Хемијско - термичка обрада (ХТО)

У пракси се често тражи велика тврдоћа и чврстина површинских слојева радног предмета, а истовремено и довољна жилавост језгра. Каљени делови испуњавају захтеве у погледу тврдоће, али у целини остају крти; отпуштањем се повећава жилавост, али опада тврдоћа и јачина. Захтев за високу тврдоћу површине и истовремено жилаво језгро, може се остварити било површинским каљењем или процесима који се заједнички називају хемијско-термичка обрада. Хемијско-термичка обрада се састоји из дифузионог засићења неким хемијским елементима да би се промениле хемијске, физичке и механичке особине површинских слојева челичних предмета, углавном тврдоћа и чврстина. Методи хемијско-термичке обраде (ХТО) се разврставају према томе да ли се тражене особине постижу само дифузијом (нитрирање) или и накнадном термичком обрадом обогачених површина угљеником или азотом (цементација, нитрирање, нитроцементација).

Хемијско-термичкој обради припадају:

- цементација,
- нитрирање,
- цијанизација и карбонитрирање и
- остали начини површинске заштите и отврдњавања (алитирање, силицирање, хромирање, борирање).

Цементација је најраспрострањенији и најстарији начин хемијско-термичке обраде којом се угљенични, нисколегирани и високолегирани челици са ниским садржајем угљеника (око 0.25%) површински засићују угљеником. Температура за апсорпцију угљеника је изнад A_{C3} (900-950°C), што одговара аустенитној структури челика. Потребно је да се у површинским слојевима радног предмета добије 0.80-1.0% C. Одмах после површинског обогаћивања угљеником на дубини 0.10-3.0 mm брзином око 0.1 mm/h, радни предмет се кали и ниско отпушта. Цементација се може извести у *чврстим*, *течним* и *гасовитим* срединама богатим угљеником. Из које год средине потицао угљеник, он мора бити у стању настајања. Такав угљеник се углавном ослобађа при додиру угљен-моноксида (CO) са усијаним гвожђем или разлагањем угљоводоника - метана (CH₄). Ако смеша CO₂ и CO при одређеној температури у цементационој посуди садржи довољно ослобођеног угљеника, онда ће удели CO₂ и CO у равнотежном стању зависити само од температуре, што је и приказано на Будуаровој (*Boudouard*) кривој (слика 2.12). Тако су на пример на око 700°C у смеши готово исти удели CO и CO₂. На $T > 700^\circ\text{C}$ преовлађује удео CO, а испод 700°C више је CO₂; на температурама које дају више угљен-моноксида него угљен-диоксида ослобађа се насцентни угљеник, па ће се површински слојеви челика обогаћивати угљеником. Из овог разлога, температура цементације се бира од 800-850°C. Супротно томе, ако се цементација изводи испод 700°C у смеши преовлађује CO₂ па ће уместо апсорпције угљеника настати адсорпција, тј. разугљенисавање (дифузија угљеника из челика у атмосферу пећи). Није повољна ни превисока температура цементације, па би се тада угљеник сувише брзо издвајао и образовао чађ на површинама радних предмета.



Слика 2.12 Равнотежни садржаји CO и CO₂ у смеши C + CO₂ у зависности од температуре 400-1200°C (Будуарова крива)

Нитрирање је вид ХТО који се заснива на дифузионом засићењу површинских слојева челика азотом, па се они обогаћују високодиспергованим тврдим нитридами легирајућих елемената. Разликују се тврдо и антикорозивно нитрирање; тврдо, при 600-850°C, а антикорозивно при 500-590°C.

Према средству из којег потиче азот разликују се:

- нитрирање у гасовитој средини атомног азота, ослобођеног из азотних једињења која се распадају на температурама нитрирања,
- нитрирање у купатилу (тенифер поступак) и
- јонско нитрирање.

Цијанизација и карбонитрирање - Ова два вида хемијско-термичке обраде, разликују се од осталих по томе што у површинске слојеве челика истовремено дифундују насцентни угљеник и насцентни азот.

Цијанизација се одвија у течном купатилу, тј. у истопљеним цијанидним солима: NaCN, KCN, Ca(CN)₂ и др.

Резни алати од брзорезних челика, као и ковачки и пресерски алати од високохромних челика се третирају при ~ 550°C у току 10-30 min, а добија се тврдоћа 900-950 HB на дубини од 0.05 mm. Такође се цијанизацији подвргавају и делови од угљеничних конструкционих челика при 780°C, који добијају тврдоћу (58-62) HRC или 900-950 HB. Цијанизирају се делови мотора више класе: рукавци коленастих вратила, брегасте осовине, стабла вентила, цилиндарске кошуљице, брызгальке дизел мотора, као и вретена машина алатки, екструдери, матрице за пресовање пластике, контролни прибори и др. Цијанизација је слична цементацији, али захваљујући азоту који је аустенитизатор, процес се одвија на нижој температури, а завршна термичка обрада је знатно једноставнија него после цементације (довољно је жарење, уместо каљења и ниског отпуштања).

Карбонитрирање је дифузно уношење угљеника и азота у површинске слојеве челика с тим што се уноси више азота него при цијанизацији. Радну средину чине дисоцирани амонијак (NH₃) и угљоводоници (CH₄). Процесна температура је око 600°C, на површини се ствара отворен слој од 40 μm, испод којег је слој ферита обогаћен азотом на дубини ~ 1 mm.

Остали начини површинске заштите и отврђавања - Поред наведених видова ХТО, у примени је и дифузна метализација тј. увођење одговарајућих метала у површинске слојеве челика и ливених гвожђа да би се повећала отпорност на хабање, корозију и др.

У наставку су објашњене поједине методе којима се то постиже:

Алитурање је обогаћивање површинских слојева са Al, с циљем да се повећа отпорност на оксидацију (до око 900°C) и на корозију у морској води.

Силицирање је обогаћивање површинских слојева силицијумом у циљу боље корозивне отпорности у морској води и јаким неорганским киселинама HNO₃, H₂SO₄, HCl.

Тврдо хромирање је обогаћивање површинских слојева хромом, који повећава површинску тврдоћу, отпорност на хабање, ватросталност и корозивну отпорност у морској води и HNO_3 . Тврдо се хромирају, не само челични делови, већ и алуминијумски клипови и цилиндри малих двотактних мотора.

Борирање је обогаћивање површинских слојева бором ослобођеног електролизом боракса ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) при $930\text{--}950^\circ\text{C}$. Дубина отврднутог слоја је $0.10\text{--}0.20\text{ mm}$, а тврдоћа достиже $1800\text{--}2000\text{ HB}$. Борирањем се постиже висока отпорност на хабање и корозију, што је битно за опрему у петрохемији.

3. Челици за побољшање

3.1 Уводне напомене о челику

Челици су легуре гвожђа и угљеника (фина механичка смеша ферита и цементита) и других елемената. Челици представљају најчешће коришћену групу машинских материјала. У новије време познато је неколико хиљада разних врста челика, које се користе у готово свим областима машинске технике.

Добијање челика се своди на рафинацију гвожђа добијеног у високој пећи и додавању феро-легура. Гвожђе за прераду у челик садржи до 4% С, 1.4% Si, 1.5% Mn, 0.25% P и 0.12% S. Стога се у процесу добијање челика садржаји ових елемената свде на захтеване вредности. Растопљено гвожђе прерађује се у челик у:

- Сименс-Мартеновој пећи (пламени поступак),
- у електропећи (претапањем) и
- у Бесемеровом или Томасовом конвертору.

Челици могу да се поделе према:

- хемијском саставу (угљенични челици, легирани челици),
- намени (конструкциони челици, алатни челици, челици са посебним својствима),
- структури (подеутектоидни, еутектоидни, надеутектоидни, ледебуритни, аустенитни и мартензитни),
- начину добијања (Томасов, Бесемеров, Сименс-Мартенов и електро-челик),
- квалитету:
 - челици обичног квалитета (угљенични) са садржајем сумпора до 0.06% и фосфора до 0.07%,
 - квалитетни челици (угљенични и легирани) са садржајем сумпора 0.035-0.04% и фосфора 0.035-0.04%,
 - висококвалитетни челици (легирани) са садржајем сумпора до 0.025% и фосфора до 0.025%,
 - племенити челици (легирани) са садржајем сумпора до 0.015% и фосфора до 0.015%.
- облику и стању полупроизвода (ваљани, вучени, ковани, ливени, брушени, пресовани и љуштени [4]).

3.2 Легирани челици

Легирани челици осим угљеника (и примеса) садрже и друге легирајуће елементе, који се додају ради побољшања захтеваних својства. Легирани челици се деле према броју, садржају и врсти легирајућих елемената.

Према броју легирајућих елемената, челици се деле на једноструко и вишеструко легиране.

Према укупном садржају легирајућих елемената, челици се деле на:

- нисколегиране - до 5% легирајућих елемената и
- високолегиране - више од 5% легирајућих елемената.

Нисколегирани челици имају исту структуру и сличне особине као угљенични (нелегирани) челици. Неке њихове особине побољшавају легирајући елементи у зависности од врсте и количине. Главне предности нисколегираних челика у односу на угљеничне су већа жилавост при истој чврстоћи, виши напон течења, већа чврстоћа на повишеним температурама и мања склоност ка стварању прелина.

Високолегирани челици имају, по правилу, специјална својства која немају угљенични и нисколегирани челици, као што су ватроотпорност, отпорност према хабању, способност резања при црвеном усијању и корозивна постојаност. Осим тога, неки високолегирани челици имају специфичне електричне и магнетне особине или мали коефицијент линеарног ширења.

Према врсти легирајућих елемената, разликује се више група челика, који се називају према легирајућим елементима: Cr-Ni, Cr, Ni, Mo, Cr-Mo-V, Mn, V, Si челици.

3.3 Челици за побољшање

Машински елементи изложени јаким променљивим и ударним оптерећењима израђују се од угљеничних и нисколегираних челика који се термичким третманом доводе до потребних и жељених својстава.

Побољшање је процес термичке обраде који се састоји од каљења и високог отпуштања и њиме се постиже повећање својства чврстоће, посебно границе течења уз знатно високе вредности ударне жилавости, чиме се конструкционим деловима обезбеђује поуздан и дуготрајан рад у експлоатацији.

Према хемијском саставу челици за побољшање могу бити угљенични и легирани манганом, хромом, молибденом, ванадијумом и никлом.

Угљенични челици за побољшање примењују се како у побољшаном, тако и у нормализованом стању, док се легирани челици искључиво примењују у побољшаном стању [5].

Угљенични челици за побољшање су челици са садржајем угљеника 0.3 - 0.5%. Ови челици се употребљавају за израду делова пресека до 100 mm, имају малу склоност ка образовању прелина, али су осетљиви на зарезе. За израду конструкционих делова који су

мање оптерећени употребљавају се челици Č1330¹, Č1430, а за оптерећеније делове Č1530, Č1531, Č1580, Č16301, Č16302, Č16303, Č1630, Č1631, Č1680, Č1730, Č1731, Č1780 (коленаста вратила, брегасте осовине, осовинице клипова, завртњи, зупчаници).

Легирани челици за побољшање - за израду делова већег попречног пресека до 250 mm, употребљавају се челици легирани хромом, никлом, молибденом и ванадијумом. Хром-челици Č41301, Č41302, Č4132 и Č41321 су погодни за израду делова релативно малих димензија (осовина, мањих вратила, клинова, полуга и навртки), челици Č41331, Č4130, Č4180 имају повишену чврстоћу и употребљавају се за одговорније делове (коленаста вратила, осовине, зупчанике, завртње), а челици Č4131, Č4181, Č4134, Č4184 се користе за делове изложене хабању, али без већих ударних оптерећења (велики зупчаници и вратила). Хром-никл-молибден челици (Č5430, Č5431 и Č5432) имају високу вредност затезне чврстоће и напона течења, добру жилавост и високу вредност динамичке чврстоће, па се користе за израду делова који су јако оптерећени наизменично променљивим оптерећењима [4].

Према садржају сумпора челици за побољшање деле се на:

- челике са ограниченом горњом границом садржаја сумпора и
- челике са ограниченом и горњом и доњом границом садржаја сумпора код којих је побољшана обрадивост скидањем струготине.

Међу свим, горе поменутим челицима, могу се приметити следеће појединости:

- да се угљенични челици међу собом разликују по садржају угљеника односно према чистоћи;
- да се мангански челици међу собом разликују према садржају мангана и угљеника;
- да се хром челици међу собом разликују према садржају хрома и угљеника;
- да се хром-молибденски челици међу собом разликују према садржају хрома, молибдена и угљеника;
- да се код хром-ванадијум челика запажа повећан садржај мангана чиме се постиже повећање прокаљивости док ванадијум спречава раст аустенитног зрна;
- да се никл-хром челици разликују према садржају хрома и никла;
- да са порастом садржаја угљеника у челику расте његова тврдоћа како у меко жареном тако и у термички обрађеном стању.

Технолог одређује начин и технологију израде, самим тим је и он одговоран и даје гаранције својстава, а не конструктор. Челици за побољшање искључиво се примењују у термички обрађеном стању па је неопходно познавање основних параметара термичке

¹ У раду су приказане ознаке челика по старом JUS стандарду будући да су оне још у употреби у нашој земљи и окружењу. За два анализирана челика у Глави 5 су приказане и ознаке по важећем стандарду EN 10027-1.

обраде. Како би конструктор могао да одреди својства чврстоће која може да очекује од примењеног челика потребне су му оријентационе вредности тврдоће. Врло често конструктору за правилан избор врсте челика су неопходни и подаци о понашању материјала при ударним оптерећењима и динамичком дејству променљивих оптерећења.

Угљенични челици за побољшање могу се испоручивати у меко жареном стању, термички обрађеном стању на одређену чврстоћу тј. најбољу обрадљивост и у нормализованом стању. Велики број захтева који се могу поставити пред челике за побољшање вероватно је главни разлог што се развио велики број ових челика, па је изведена њихова типизација. Прво треба проверити могућност употребе најјефтинијих, нелегираних челика, па ако прорачуни или разматрања главних својстава доведу до закључка да нелегирани челик не одговара, онда треба потражити одговарајући легирани челик, водећи рачуна о цени. Важну улогу има и димензија комада који треба обрадити како би се постигла могућност униформног побољшања по пресеку.

У даљем тексту је објашњено како поједини елементи утичу на особине челика.

Угљеник је најважнији елемент у гвожђу и стално је присутан у свим његовим легурама, јер је он у ствари компонента у легурама гвожђа. Чак су и мале количине угљеника довољне да се особине гвожђа значајно промене. Угљеник има веома велики утицај на све технички важне особине челика: повећава напон течења и затезну чврстоћу, тврдоћу, отпорност на хабање, снижава жилавост, контракцију, способност извлачења, способност за деформацију у топлотом и хладном стању, хемијску отпорност. Са гвожђем се једини и гради карбид Fe_3C (цементит) који са другим карбидима гради сложене карбиде. Сложени карбиди имају битан утицај на квалитет алатних челика и челика за котрљајне лежаче. Поред тога, садржај угљеника битно утиче на могућност примене разних врста термичке обраде.

Фосфор повећава затезну чврстоћу и тврдоћу челика, а смањује његово издужење и контракцију. Не утиче битно на способност обраде и прераде у топлотом стању, али смањује способност деформације у хладном стању. Пожељно је да садржај фосфора у челику буде испод 0.04%, изузев код челика за обраду на аутоматима, јер при таквој обради челика са садржајем 0.1 - 0.4% фосфора добијају се веома чисти навоји.

Сумпор не утиче битно на затезну чврстоћу, али снижава границу еластичности и контракцију. При садржају преко 0.2% изазива кртост при загревању до црвеног усијања. Код челика за обраду на аутоматима који имају много сумпора, делује слично фосфору, тј. даје крту струготину, која се ломи у кратке комаде. Код челика који се подвргавају деформацији у врућем стању, пожељно је да садржај сумпора буде испод 0.04%.

Силицијум има велики афинитет према кисеонику. Зато се употребљава као дезоксидационо средство. Повећава тврдоћу и затезну чврстоћу, али смањује издужење и контракцију челика. Због тога је његов садржај у челику, који се подвргава деформацији у хладном стању, ограничен. Додаје се у већим количинама челицима од којих се траже добре електричне и магнетне особине. Подиже критичне преображајне тачке челика, повећава прокаљивост, смањује критичну брзину хлађења и отежава дифузију угљеника код цементације. Нарочито је значајна његова примена код челика за опруге.

Манган ублажава штетни утицај сумпора у погледу кртости при црвеном усијању. До 1.5% само незнатно утиче на затезну чврстоћу челика, али повећава његову тврдоћу и жилавост и смањује издужење и контракцију. Због великог афинитета према кисеонику употребљава се као дезоксидационо средство и стални је пратилац угљеника у челику. Повећава прокаљивост и смањује критичну брзину хлађења. Додаје се челицима са посебним физичким и хемијским особинама, нерђајућим челицима, као и челицима од којих се захтева велика отпорност на хабање. Снижава температуре преображајних тачака челика, повећава осетљивост перлитних челика на брзину хлађења. Челици са високим садржајем мангана осетљиви су на прегревање због склоности ка брзом расту зрна код виших температура. Доводи до стварања сложених карбида.

Бакар до 0.2% не утиче на механичке и технолошке особине челика. Преко 0.6% бакра у челику осетно смањује његову способност за заваривање, а око 1% бакра у челику повећава отпорност на корозију, посебно у морској води. Садржај бакра преко 0.3% може да доведе до стварања површинских прелина приликом прераде на топло, нарочито ако је челик дуже држан у загрејаним пећима.

Берилијум спада у групу лаких метала. У последње време добија све већи значај као легирајући елемент челика. Легиран заједно са багром даје челик који се користи за опруге сатова, који је вишеструко отпорнији на превијање него уобичајени опружни челици. Челици легирани берилијумом приликом удара не варниче, па се користе у просторијама у којима постоји опасност од експлозије. Легуре берилијума и никла са гвожђем веома су тврде и отпорне на корозију. Берилијум се највише користи за легуре, од којих се израђују хируршки инструменти.

Бор снижава затезну чврстоћу и повећава пластичност метала код топле прераде челика на топло. Повећава отпорност на старење, посебно аустенитних челика. Помера температуре преображајних тачака ка нижим вредностима.

Олово, заједно са сумпором, повећава способност обраде челика скидањем струготине. Као легирајући елемент користи се обично у количинама 0.20-0.30%. Пошто су оловне паре отровне (токсичне), треба пажљиво руковати оловом приликом легирања.

Церијум се данас најчешће користи као додатак челику за побољшање ради повећања способности прераде на топло, а много ређе као легирајући елемент.

Цирконијум се додаје неким племенитим челицима у циљу отклањања штетног утицаја кисеоника, азота и сумпора.

Никл снижава критичну брзину хлађења и тиме повећава прокаљивост челика. Због тога су никлови челици погодни за израду великих делова, који се подвргавају побољшању. Смањује кртост челика код ниских температура и повећава жилавост, а не утиче на тврдоћу челика. Користи се за легирање у већим количинама код челика од којих се траже посебне физичке или хемијске особине (нерђајући, немагнетични, ватроотпорни челици итд.).

Хром је карбидотворни елемент и учествује у формирању специјалних карбида, повисује тачке преображаја челика, смањује брзину $\gamma \rightarrow \alpha$ трансформације, а тиме омогућава потхлађење аустенита и смањује критичну брзину хлађења. Знатно повећава

прокаљивост челика. Доводи до кртости после отпуштања, а чак и у малим количинама заваривање угљеничних челика чини отежаним. Користи се за постизање посебних физичких и хемијских особина (код нерђајућих, ватроотпорних, магнетичних челика итд.).

Ванадијум је карбидотворни елемент, те учествује у стварању сложених карбида. Даје ситнозрну структуру и делује као јако дезоксидационо средство. Одстрањује гасове из челика. Не утиче на критичну брзину хлађења и прокаљивост челика. Повећава отпорност на хабање и негативно утиче на способност заваривања.

Алуминијум се, због високог афинитета према кисеонику, користи као дезоксидационо средство. Смањује прокаљивост и повећава кртост челика. Користи се за легирање у челицима за нитрирање јер омогућава стварање тврдих нитрида у површинском слоју. У већим количинама негативно утиче на заварљивост челика. Повећава отпорност на старење. У мањим количинама потпомаже стварање ситнозрне структуре.

Волфрам се користи као легирајући елемент код израде алатних челика. Пошто се, углавном, у челику налази везан у облик карбида, незнатно утиче на критичну брзину хлађења и прокаљивост. При загревању челика на високим температурама волфрамови карбиди спречавају раст зрна, те волфрам смањује осетљивост челика на прегревање. Смањује осетљивост челика на кртост после отпуштања.

Молибден је један од најјачих карбидотворних елемената. Знатно смањује критичну брзину хлађења и повећава прокаљивост. Такав утицај долази нарочито до изражаја у присуству хрома, никла и мангана. Повећава напон течења, затезну чврстоћу и тврдоћу челика, смањује осетљивост челика на кртост после отпуштања. Повећава тачке преображаја код ниских садржаја угљеника у челику.

Титан се, због великог афинитета према кисеонику користи као дезоксидационо средство. Спречава раст зрна и осетљивост на прегревање. Најјачи је карбидотворни елемент. Због тога смањује количину активног угљеника који учествује у процесу каљења, јер титанови карбиди не прелазе у аустенит. Посебно је важан његов значај у погледу стабилизације структуре код аустенитних високолегираних челика легираним никлом и хромом.

Кобалт подиже тачке преображаја челика. Повећава напон течења и затезну чврстоћу, отпорност према хабању и механичка својства на повишеним температурама. Проширује гама-подручје. Користи се као додатак алатним челицима и тврдим металима.

Кисеоник смањује затезну чврстоћу челика и неповољно утиче на термичку обраду. Доводи до стварања неметалних једињења и гасних мехурова у челику.

Водоник потпомаже стварање гасних шупљина и мехурова у челику. Повећава прокаљивост челика и дејствује слично хрому и мангану.

Азот повећава затезну чврстоћу и тврдоћу челика; смањује његово издужење и контракцију. Главни је узрок старења челика. Смањује способност хладне деформације челика.

Тантал се раствара у γ -Fe до 6.5%, а у α -Fe 0.20%. Ствара веома постојане карбиде и повећава прокаљивост. Слично ниобијуму, сужава гама-подручје. Има већи афинитет према кисеонику него ниобијум. Додаје се заједно са ниобијумом конструкционим челицима са ниским садржајем угљеника, при чему се побољшавају жилавост и затезна чврстоћа услед смањења примарног зрна.

Селен се додаје искључиво због побољшања обрадивости челика. Најчешће се користи код нерђајућих челика, који су тешко обрадиви због високе жилавости (због аустенитне структуре). Међутим, селен нема битног утицаја на физичка и механичка својства челика.

Ниобијум има велики афинитет према угљенику и при томе ствара веома стабилне карбиде. Доводи до повећања затезне чврстоће, напона течења, ударне жилавости, отпорности на пузање. Ниобијум сужава гама-подручје челика, смањује прокаљивост, олакшава фазне преображаје због везивања угљеника и побољшава способност заваривања.

Калај се јавља као нечистоћа у челику искључиво из додатака са старим гвожђем, јер руде гвожђа не садрже калај. Овај елемент сужава гама-подручје, повећава напон течења и затезну чврстоћу, као и осетљивост при преради на топло. Код уобичајених нелегираних конструкционих челика може да се толерише до 0.15% калаја. Пошто негативно утиче на способност прераде у топлом стању, код легираних челика за ковање садржај калаја треба да буде што нижи. Према томе, калај је један од непожељних пратећих елемената челика, чији садржај треба да је што нижи.

Арсен код легираних челика ствара арсениде разних легирајућих метала. Они повећавају затезну чврстоћу и напон течења, али истовремено смањују способност деформације, ударну жилавост и способност за заваривање [6].

4. Термичка обрада побољшања

Као што је већ речено, комбиновани поступак термичке обраде челика, који се састоји из каљења и високог отпуштања, који има за циљ постизање високе вредности напона течења и високе вредности жилавости назива се **побољшање**.

4.1 Термичка обрада каљењем

Дакле, као што је већ речено, циљ каљења јесте добијање мартензитне структуре која даје челику велику тврдоћу.

Међутим, док је код каљења алатних челика основни захтев повећање тврдоће, то се од конструкционих челика пре свега захтева висока вредност напона течења, што се постиже отпуштањем после каљења. Некада је постизање високе површинске тврдоће основни циљ каљења конструкционих делова, као што су, на пример, осовине и зупчаници, јер се на тај начин поред високе отпорности на хабање обезбеђују и добра жилавост и динамичка чврстоћа челика. Постизање високе површинске тврдоће остварује се специјалним начином површинског каљења или каљењем после претходно извршене хемијско-термичке обраде. Циљ каљења може да буде и побољшање неких физичких особина, као на пример коерцитивне силе трајних магнета која у случају мартензитне структуре показује високе вредности.

За успешно извођење каљења неопходно је правилно изабрати:

- температуру каљења,
- време загревања, односно време држања на температури каљења и
- брзину хлађења, односно средство за хлађење.

Код **легираних челика** температура каљења се бира према положају критичних тачака, при чему важи правило као и за угљеничне челике:

$$T_{\text{каљења}} = A_{C3} + (30 - 50^{\circ}\text{C}) \text{ - за подеутектоидне челике}$$

$$T_{\text{каљења}} = A_{C1} + (30 - 50^{\circ}\text{C}) \text{ - за надеутектоидне челике}$$

Избор температуре каљења када је дат интервал каљења врши се у зависности од средства за хлађење при каљењу и димензија и облика челичних делова. Што средство за каљење показује већи интензитет хлађења, то је температура каљења нижа. Челични делови великих димензија и једноставног облика кале се по правилу са виших температура, док се ниже температуре каљења користе за челичне делове мање величине и сложенијег облика [2].

Време задржавања на температури каљења одређује се из услова да се у целом пресеку добије равнотежна структура. Предуга аустенитизација је штетна како због пораста зрна, тако и због губитка угљеника из површинских слојева челика, тј. због разугљенисавања [3].

Време загревања и држања пред каљење угљеничних челика, у зависности од попречног пресека комада и грејне средине, може се одабрати на основу података датих у табели 4.1.

Табела 4.1 Време загревања и држања пред каљење угљеничних челика [2]

Величина попречног пресека комада у mm	Време загревања и држања пред каљење, min			
	пламена пећ		растоп соли	
	загревање	држање	загревање	држање
25	20	5	7	3
50	40	10	17	8
75	60	15	24	12
100	80	20	33	17
125	100	25	40	40
150	120	30	50	25
175	140	35	55	30
200	160	40	65	35

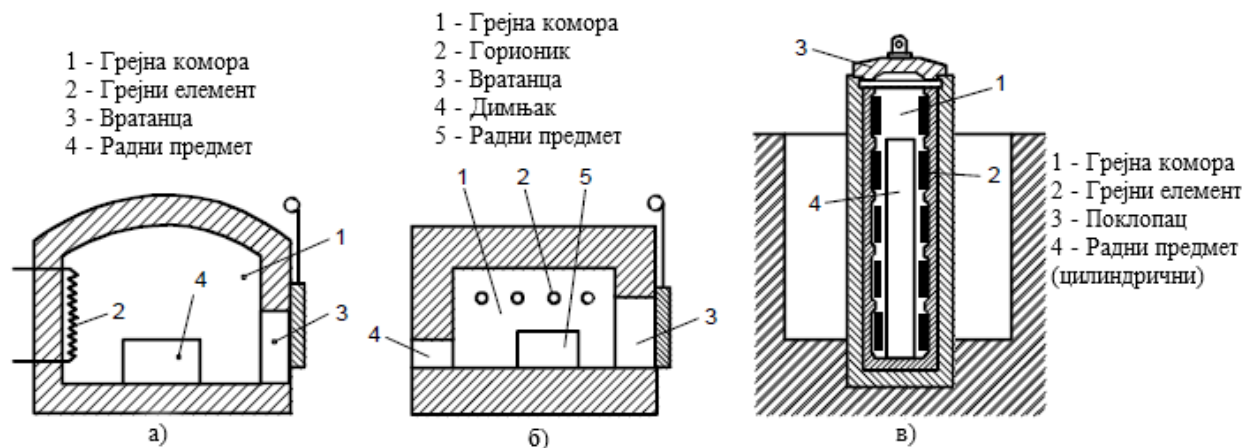
При томе је температура пећи за 10 - 30°C виша од захтеване температуре каљења. Када се ради о **легираним челицима** време се продужава за 25 - 40%.

4.1.1 Средства за загревање

За термичку обраду челика највише се употребљавају специјалне металуршке пећи. Оне се могу загревати електричним отпором-ефектом $R \cdot I^2$ или индукцијом, или пак сагоревањем чврстих, течних и гасовитих горива. Код пећи на горива топлота се предаје радним предметима конвекцијом (струјањем врелих гасова) или зрачењем. Загревање се у неким случајевима обавља и у вакумским пећима, где се топлота предаје само зрачењем. Пећи на чврста горива имају решетке (ростове) на којима сагорева чврсто гориво (ћумур, угаљ), а пећи на течна и гасовита горива опремљене су посебним млазницама за распршивање горива.

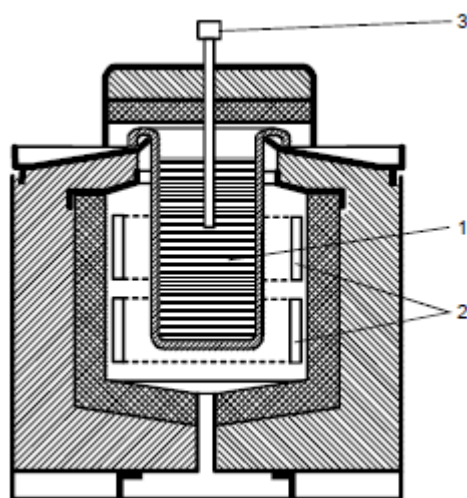
Пећи се деле на:

- коморне (слика 4.1а, б),
- јамске (слика 4.1в) и
- сона и метална купатила (слика 4.2).



Слика 4.1 Шема једнокоморне (а) и двокоморне (б) пећи, као и вертикални пресек јамске пећи (в)

Према намени, тј. да ли пећи служе за загревање различитих или само сличних делова, оне могу бити *универзалне* и *специјалне*. Код **коморних** пећи делови се могу загревати директно - продукти сагоревања долазе у непосредан додир са њима или индиректно - делови су смештени у затвореној комори тзв. "муфолној" пећи, која се споља греје топлим гасом. Често се једна комора користи за предгревање, а друга за завршно загревање. Да би се код **електричних** пећи постигло што равномерније и брже загревање, често се уграђује вентилатор за принудну циркулацију ваздуха у комори. Такође се у индустрији доста користи и индукционо загревање. Радни предмети се могу загревати и у течном медијуму. За то се користе тзв. „купатила“ (или „купке“) у којима је растопљена нека со (сона купатила) или метал, као што је на пример олово (метална купатила). Соне пећи се најчешће загревају електричном струјом (ређе пламеном) да би се прецизније контролисала задата температура за предвиђену термичку обраду челика. Купатила се користе за ТО ситнијих делова, најчешће алата од брзорезних челика. Загревање у течним средствима је брзо, а регулисање температуре прецизно. Температурски интервал загревања у соном купатилу је у границама 150-750°C, а у оловном купатилу 330-850°C.



Слика 4.2 Метално купатило: 1 - течан метал, 2 - грејачи, 3 - термометар

4.1.2 Средства за хлађење при каљењу

Да би се постигла мартензитна структура, што је и циљ каљења, неопходно је применити такву брзину хлађења из подручја аустенита, односно карбидно - аустенитног подручја, која је већа од критичне брзине хлађења датог челика. **Критична брзина хлађења** зависи пре свега од састава челика и стања аустенита, одакле произлази закључак да се различити челици у циљу постизања мартензитне структуре морају различито интензивно хладити.

Стварна, тј. постигнута брзина хлађења при каљењу зависи од:

- специфичне топлоте и топлотне проводљивости челика,
- величине, облика и стања површине челичног комада који се кали и
- моћи хлађења средства за каљење.

Како специфична топлота и топлотна проводљивост (термичка проводност) челика зависе од његовог састава и практично не могу да се мењају, а величина и облик комада су унапред дати, највећи утицај на брзину хлађења при каљењу има избор погодног средства за каљење. Одговарајуће средство за каљење бира се на основу критичне брзине хлађења. Идеално средство за каљење било би оно које би омогућавало с једне стране максималну брзину хлађења у интервалу температура перлитне области ($650 - 400^{\circ}\text{C}$), јер је овде стабилност аустенита најмања, а с друге стране минималну брзину хлађења у мартензитној области, пошто је стварање мартензита праћено појавом напрезања, а она могу да се суперпонирају са термичким напрезањима, па се на тај начин стварање пукотина олакшава. У пракси се примењују различита средства за каљење која се по својим физичким особинама међусобно јако разликују.

Разликују се: *споро, нормално и брзо* хлађење. Споро хлађење се обавља у затвореној пећи, нормално на ваздуху, а брзо хлађење у води, минералном уљу, између бакарних плоча и др. Брзо хлађење је нарочито важно при каљењу челика, јер је за трансформацију аустенита у мартензит, неопходна брзина хлађења већа од критичне брзине хлађења за дати челик ($v_h > v_{kr}$). Критична брзина хлађења (v_{kr}) је она брзина која омогућава трансформацију аустенита у мартензит.

Вода се употребљава за каљење угљеничних и нисколегираних челика. Кад се изводи површинско каљење расхладно средство увек је вода, јер се на површини стварају притисни површински напони, а не опасни затежући.

Машинско уље - хлади 3-4 пута спорије од воде, а у интервалу M_s - M_f чак десет пута. Најбоље је уље вискозитета 4.5°E при 50°C (најповољније 40 - 60°C). Понекад се иде на комбиновано хлађење: вода + уље. Остварује се велика брзина хлађења при $T > 300^{\circ}\text{C}$ (H_2O), а мања у еластичној области, где постоји опасност од великих термичких напона.

Металне и соне купке - од металних купки углавном се употребљава растопљено олово, а од соних $50\% \text{NaNO}_3 + 50\% \text{KNO}_3$ (калај се ретко користи - лепи се!). Примењују се углавном за степенасто каљење (мартемперинг, аустемперинг) (највише за зупчанике).

Плоче, челичне или бакарне служе за хлађење под пресом зупчастих венаца, плоча и других витких делова, да се спречи њихово деформисање, нарочито витоперење. Брзина хлађења бакарних плоча износи 60°C/s , а челичних 35°C/s [3].

Ваздух може да служи за каљење самозакаљивих (1% C, око 18% Cr) и брзорезних (1.2% C, до 18% W) челика.

Функција средства за каљење је одузимање топлоте од закаљеног челичног комада. Способност једне средине да одузима топлоту од метала назива се **моћ хлађења**. Моћ хлађења течног средства за каљење зависи од: количине средства за каљење, његове специфичне топлоте, топлотне проводљивости, вискозитета, температуре кључања, латентне топлоте испаравања и почетне температуре. Количина течности за хлађење при каљењу и њена специфична топлота одређују количину топлоте коју је средство за хлађење у стању да прими у себе за дато повећање температуре. Вискозитет утиче на способност течења течности, а тиме и на њену способност преношења топлоте конвекцијом. Температура кључања одређује моменат када ће течност прелазити у парно стање и као таква створити мехуриће на површини метала који отежавају његово даље хлађење.

4.1.3 Одређивање моћи хлађења

За одређивање моћи хлађења неког средства за каљење користи се најчешће поступак по *Engler-Rose*-у са сребрном куглом. Суштина поступка је у томе што се претходно до 800°C загрејана сребрна кугла ($\varnothing 20\text{ mm}$), у чијем је центру заварен термоелемент, хлади у испитиваном средству (запремине $V = 1$ литар), при чему се истовремено снима крива хлађења, температура - време.

За време хлађења сребрне кугле течност се покреће брзином од 25 cm/s . Постоји и врло једноставан уређај по *Meinhardt*-у код кога се уместо сребрне кугле користи тело у облику крушке израђено од меког челика. Ако се аустенитизација не изводи у растопу соли већ у ваздуху, односно гасној средини, то пробно тело се израђује од нерђајућег челика. Температура пробног тела се преноси преко термопара који је постављен у његовом средишту до милivolтметра који се налази на тзв. глави за мерење. Ту је уграђен и часовник са показивањем у секундама. Пробно тело и мерна глава стоје у чврстој вези тако да је манипулација једноставна. Како се температура не региструје, већ читава у погодним временским интервалима, то је тачност ове методе знатно мања од тачности методе по *Engler - Rose*-у [2].

4.1.4 Утицај стања површина, облика и величине челичних делова на постигнуту брзину хлађења при каљењу

Постигнута брзина хлађења при каљењу зависи и од стања површине комада који се кале. Неравнине на површини потпомажу задржавању парних мехурића и на тај начин отежавају хлађење без обзира што је неравна површина већа у односу на глатку површину. Слој коварине на површини челичних комада успорава одвођење топлоте те отежава хлађење, при чему тај ефекат зависи од дебљине слоја коварине и њених особина. Међутим, при коришћењу средстава за каљење код којих је испаравање интензивно (вода) слој коварине може да има и позитивно дејство, јер он омета стварање постојаног парног слоја и доприноси брзом раскидању овог слоја, па се температурска област брзог хлађења

помера ка вишим температурама. Који ће од ова два супротна утицаја коварине на моћ хлађења средстава за каљење бити одлучујући зависи од дебљине слоја коварине и њене топлотне проводљивости, а тиме и од односа садржаја топлоте комада који се кали и његове површине.

Постигнута брзина хлађења при осталим једнаким условима зависи и од димензија комада који се кале. Тако је брзина хлађења геометријски сличних тела (ваљак) обрнуто пропорционална пречнику степенованом коефицијентом „ n “, $\left(\frac{1}{D}\right)^n$. При томе „ n “ карактерише моћ хлађења средине у којој се хлађење врши и лежи између 1 за бесконачно споро и 2 за бесконачно брзо хлађење. Уместо $\left(\frac{1}{D}\right)^n$ може се узети и (површина/запремина) при чему површина представља меру одвођења топлоте, а запремина меру топлоте која се мора одвести [2].

4.2 Дубина каљења челика

Мартензитна трансформација настаје при хлађењу брзином већом од критичне. Неопходна брзина хлађења постиже се на површини челичног комада, али идући ка његовом језгру на одређеној дубини брзина хлађења постаје мања од критичне. То је уочено код угљеничних челика који се плитко закаљују, што значи да се потпуно прокаљују само танки пресеци (може се прокалити цилиндар максималног пречника $\varnothing 16\text{ mm}$), док се легирани челици закаљују на знатно већем пресеку. Особина разних челика да се плиће или дубље закаљују назива се **прокаљивост**. У неким случајевима захтева се прокаљивање по целом пресеку комада (запреминско каљење), а понекад је пожељнија велика тврдоћа површинских слојева, а жилавије језгро (површинско каљење) [3].

Закаљена зона се лако запажа на прелому или при нагризању припремљене површине на месту прелома по различитој боји у поређењу са жилавим централним делом пресека. Сем тога, дубина простирања закаљене зоне може да се одреди и мерењем тврдоће.

Фактори који утичу на критичну брзину хлађења, односно постојаност аустенита, су следећи: састав челика, нарочито садржај легирајућих елемената; степен хомогености аустенита, величина аустенитног зрна и температура аустенитизације; присуство нерастворених карбида и присуство неметалних укључака; начин израде челика и његова претходна обрада. Уопштено се може рећи да сви фактори који смањују критичну брзину хлађења челика обезбеђују добијање мартензита на већој дубини пресека челичних комада. Од набројаних фактора на дубину каљења највећи утицај показује садржај легирајућих елемената. Додатак легирајућих елемената смањује критичну брзину хлађења, те доводи до повећања дубине закаљене зоне чак и када се ради о деловима већег пресека или мање оштром хлађењу, као на пример у уљу или на ваздуху.

Теоријски би било исправно под дубином каљења подразумевати зону са потпуно мартензитном структуром, при експерименталном испитивању наишло се на тешкоће, јер присуство до 10% финог перлита не показује утицај на измерену тврдоћу. Стога је договором узето да се под дубином каљења (прокаљивост) сматра растојање од површине до слоја са полумартензитном структуром, тј. структуром која се састоји из 50% мартензита и 50% финог перлита и бејнита. Пошто тврдоћа мартензита практично зависи

само од садржаја угљеника, то је и тврдоћа полумартензитне зоне функција процента угљеника, па се дубина каљења може врло лако одредити мерењем тврдоће. Ни микроскопско одређивање полумартензитне зоне не представља веће тешкоће.

Дубина каљења се никако не сме повезивати са тврдоћом постигнутом при каљењу, тј. тврдоћом мартензита. Тако док тврдоћа мартензита скоро искључиво зависи од садржаја угљеника у челику, то одлучујући утицај на дубину каљења показују присутни легирајући елементи. Постигнута висока тврдоћа при каљењу, према томе, не мора да буде повезана са знатним отврдњавањем у дубину (случај угљеничних челика) и обратно, и при мањој тврдоћи може се постићи велика дубина каљења.

Отврдњавање у дубину представља врло важну технолошку карактеристику челика од чије величине зависи могућност примене неког челика у одређене сврхе.

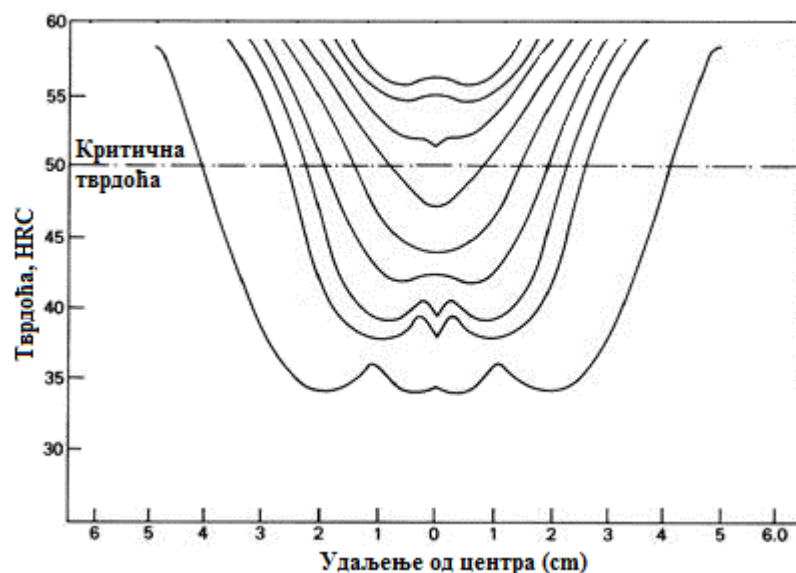
У случају потпуне прокаљивости особине закаљеног челика су једнаке по целом пресеку, док се код каљења на ограничену дубину особине челика мењају почев од површине до центра челичног комада.

4.2.1 Методе одређивања дубине каљења

За одређивање дубине каљења користе се следеће методе:

- метода по Гросману (*Grossmann*),
- метода чеоног каљења по Џоминију (*Jominy*) и
- рачунска метода.

Метода по Гросману - *Grossmann*, *Asimov* и *Urban* разрадили су методу квантитативног одређивања дубине каљења која се базира на мерењу тврдоће по попречном пресеку закаљеног челичног штапа. После каљења у одређеном средству за каљење већег броја челичних штапова различитог пречника и мерења тврдоће по попречном пресеку штапова може да се издвоји један штап у чијем ће се центру достићи тврдоћа која одговара тврдоћи 50% мартензита испитиваног челика (слика 4.3). Ова тврдоћа се назива критична тврдоћа, а пречник штапа у чијем се центру постигла критична тврдоћа назива се критични пречник D_K , односно D_H . Да би се искључио утицај средства за каљење и да би се резултати добијени при каљењу у срединама са различитим интензитетом каљења могли сводити један на други, уведен је појам идеалног критичног пречника D_I , односно D_∞ , преко кога се различити челици могу међусобно упоређивати. Под идеалним критичним пречником подразумева се пречник код кога се у условима идеално брзог хлађења постиже у центру структура са 50% мартензита. Средство за каљење које би било у стању да тренутно охлади загрејану површину пробе до собне температуре представљало би идеално средство за каљење, а његова карактеристика би била бесконачно велика јачина хлађења, односно $H=\infty$. Практично се хлађење у води или сланој води са интензивном циркулацијом приближава идеалном хлађењу. Реална средства за каљење имају H -вредности од 0.02 до 10, дате у табели 4.2.



Слика 4.3 Приказ одређивања дубине каљења по Гросману

Табела 4.2 Вредности средстава за каљење (Н) [2]

Начин хлађења	Моћ хлађења различитих средстава за хлађење, Н			
	ваздух	уље	вода	слана вода
Не креће се ни узорак ни средство за каљење	0.02	0.30	1.0	2.2
Узорак се умерено покреће	/	0.4-0.6	1.5-3.0	/
Узорак се јако покреће	/	0.6-0.8	3.0-6.0	7.5
Средство за хлађење интензивно циркулише	/	1.0-1.7	6.0-12.0	/

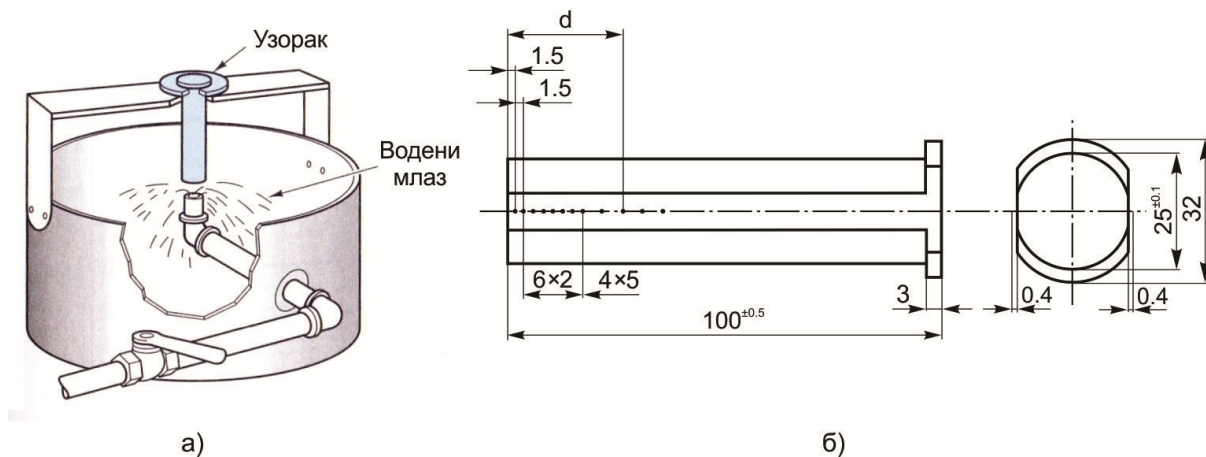
Увођење општег појма-моћи хлађења средства за каљење Н-није сасвим коректно пошто одвођење топлоте, а тиме и сама Н-вредност зависе од температуре. На интензитет хлађења утичу осим тога и облик и димензије дела. Одавде произлази да се при свим рачунањима Н-вредности могу добити само оријентациони подаци који се морају проверити експериментом.

Метода по Гросману даје могућност одређивања моћи хлађења средства за каљење и критичног пречника; на основу добијених вредности за Н и D_K може се графичким путем одредити D_f .

Пошто одређивање критичног пречника по Гросмановој методи захтева већи број узорака и самим тим и дуготрајнија испитивања, то је много једноставнији метод чеоног каљења по Џоминију.

Метода по Џоминију

Одређивање дубине каљења по Џоминију (слика 4.4) стандардизована је метода (SRPS C.A2.051:1985), а састоји се од цилиндричног узорка одређених димензија који је загрејан на температуру каљења (при загревању се примењује одговарајућа заштита од оксидације и декарбурације) и преноси се на држач уређаја за чеоно каљење, при чему вертикални млаз воде удара на чело узорка. При чеоном каљењу највећа брзина хлађења постиже се на самом челу узорка, а са удаљењем од чела хлађење постаје све мање интензивно. Брзине хлађења на различитим удаљењима од чела пробе одређене су експерименталним путем, па су унапред познате пошто се испитивање изводи увек под истим условима. Дејство млаза воде траје одређено време након чега се узорак потапа у воду. Чеоно закаљена епрувета се бруси на дубину 0.4 mm дуж две наспрамне изводнице при чему се добија површина налегања и површина на којој се мери тврдоћа Роквел методом. Мерење тврдоће започиње на 2 mm од чеоне површине и врши се по правилу на свака 2 mm у првих 8 мерења, после тога се међусобно растојање осталих тачака мерења повећава на 4 mm. Резултати мерења уносе се у дијаграм тврдоће у HRC јединицама при чему се добијају специфичне Џоминијеве криве расподеле тврдоће дуж узорка. На добијеној кривој расподеле тврдоће налази се растојање од чела на коме постигнута тврдоћа одговара тврдоћи 50% мартензита. То је тзв. Џомини растојање које служи као мера дубине каљења челика и на основу тога се пореде различити челици.



Слика 4.4 Шематски приказ прокаљивости чеоним хлађењем по методи Џомини
(а-принципска шема испитивања прокаљивости, б-мерење тврдоће на окаљеном узорку)

Рачунска метода

Критичну брзину хлађења челика у основи одређују садржај угљеника и збир легирајућих елемената као и величина аустенитног зрна на температури каљења, па је способност каљења по дубини обрнуто пропорционална критичној брзини хлађења и може грубо израчунати помоћу података о хемијском саставу и величини аустенитног зрна челика.

Идеални критични пречник који је мера за способност каљења по дубини израчунава се множењем основног пречника D_c , који зависи од садржаја угљеника и величине зрна, мултипликационим факторима специфичним за поједине легирајуће елементе:

$$D_I = D_c \cdot F_{Mn} \cdot F_{Cr} \cdot F_{Mo} \cdot F_{Si} \cdot F_{Ni}$$

За легиране челике основни пречник D_c одређује се помоћу зависности датих у табели 4.3.

Табела 4.3 Вредности пречника D_c за легиране челике [2]

Величина зрна по ASTM-у	D_c за	
	Каљење на перлитну структуру	Каљење на бејнитну структуру
1	$13.90 \sqrt{C}$	$12.50 \sqrt{C}$
2	$12.80 \sqrt{C}$	
3	$11.80 \sqrt{C}$	
4	$10.95 \sqrt{C}$	
5	$10.15 \sqrt{C}$	
6	$9.40 \sqrt{C}$	
7	$8.65 \sqrt{C}$	
8	$7.95 \sqrt{C}$	
9	$7.30 \sqrt{C}$	
10	$6.75 \sqrt{C}$	

* садржај угљеника у %

Мултипликациони фактори којима треба помножити основни пречник D_c могу се за уобичајене легирајуће елементе одредити из посебних дијаграма [2]. У присуству више легирајућих елемената у челику утицај је много сложенији па се рачунским путем може добити само груба представа о идеалном критичном пречнику.

Идеална критична дебљина челичне плоче (L_I) која се у одређеном средству може потпуно закалити (50% мартензита у средини плоче), преко израчунате вредности за D_I се лако може доћи до дебљине челичног радног дела у облику плоче.

$D_I = 1.75 L_I$ - за мале пречнике (до 25 mm)

$D_I = 1.377 L_I$ - за веће пречнике

4.3 Појава унутрашњих напона при каљењу

Хлађење челичних делова при каљењу је веома неравномерно: површина се хлади врло брзо, док се унутрашњи слојеви хладе знатно мањом брзином. Разлика у брзини хлађења површине и унутрашњих слојева зависи углавном од састава челика, његових димензија и облика и средства за каљење. Тако, што је мања топлотна проводљивост челика, што су димензије комада веће и што је интензивније средство за каљење ова разлика постаје већа.

Услед неравномерног хлађења спољних и унутрашњих слојева по попречном пресеку дела ствара се температурски градијент који условљава неравномерност запреминских промена: површински слојеви се услед бржег хлађења више скупљају од унутрашњих. Скупљање површинских слојева ометају унутрашњи слојеви тако да при брзом хлађењу долази до појаве напрезања на затезање на површини и напрезања на притисак у унутрашњим слојевима. Када се површина потпуно охлади унутрашњи слојеви се још увек скупљају, али њихово скупљање је отежано јер га спољни, потпуно охлађени слој омета. Услед овога ће напрезање у спољним и унутрашњим слојевима променити знак, па ће се по завршеном хлађењу на површини јавити напрезања на притисак, а у унутрашњости напрезања на затезање. Напрезања изазвана појавом температурског градијента по пресеку комада називају се термички напони.

Када при брзом хлађењу челика долази и до одређених структурних промена, то се поред топлотних, јављају и тзв. структурни напони. Узрок појаве структурних напона код челика лежи у:

- различитој специфичној запремини аустенита и продуката његовог разлагања, као и различитом коефицијенту линеарног ширења појединих конституената структуре; (познато је да мартензит поседује највећу специфичну запремину, а аустенит најмању; коефицијент линеарног ширења аустенита је највећи);
- несинхроним протицању структурних трансформација у површинским и унутрашњим слојевима челика.

На основу расподеле напона при каљењу може се закључити:

- да су унутрашњи напони максимални не после потпуно завршеног хлађења, већ у моменту када у унутрашњим слојевима долази до мартензитне трансформације;
- максимални напони су напони на затезање који и изазивају појаву прслина.

Ако унутрашњи напони прекораче вредност напона течења долази до пластичне деформације, тј. кривљења, односно витоперења комада. Како је код челика са више од 0.4% С пластичност у моменту одвијања мартензитне трансформације веома ниска, то се обично унутрашњи напони не могу уклонити путем пластичне деформације, па уколико ови напони локално прекораче вредност затезне чврстоће неизбежна је појава прслина [2].

Унутрашњи напони при каљењу зависе од:

- брзине хлађења: хлађење у уљу проузрокује 4 пута мање подужне напоне у поређењу са хлађењем у води, а хлађење на ваздуху 4 пута мање напоне у поређењу са уљем;
- састава челика, тј. од неких његових физичких особина: што је топлотна проводљивост челика мања, а коефицијент линеарног ширења већи, то су унутрашња напрезања већа;
- величина зрна: што је зрно веће, то су и напрезања већа, па су у вези са тим крупнозрни челици веома осетљиви на појаву прслина и витоперења при каљењу;
- величине попречног пресека и облика комада који се кале: што је попречни пресек дела већи, а облик сложенији, већа су унутрашња напрезања после каљења.

Из изложеног произлази да се закаљени челик захваљујући брзом хлађењу и структурним трансформацијама налази у напрегнутом стању. Постојање унутрашњих напона различите величине и знака по пресеку неког челичног комада има за последицу неједнако понашање појединих слојева под дејством спољашњег оптерећења. Ако заостали напони сачињавају напрезања на затезање, то ће у случају да се споља приложи напрезања истог знака, затезна чврстоћа бити мања од номиналне за испитивани челик. Супротно томе, заостала напрезања на притисак подижу вредност затезне чврстоће јер се један део споља приложених напрезања на затезање поништава са присутним напрезањима на притисак. Знатна унутрашња напрезања која се јављају после каљења морају бити отклоњена како не би изазвала изненадни и превремени лом челичних делова у раду.

Отпуштање челика представља неопходно и ефикасно средство за смањење напрезања заосталих после каљења. При отпуштању долази до повећања пластичности, што ствара могућност за прелазак еластичних деформација у пластичне, чиме се смањује величина унутрашњих напрезања; до структурних трансформација праћених запреминским променама што такође води ка смањењу напрезања. Међутим, неравномерно загревање и хлађење при отпуштању могу да изазову нове напоне; тако, хлађење у води челика са 0.2% C, отпуштеног на 650°C, ствара напоне једнаке напонима изазваним каљењем.

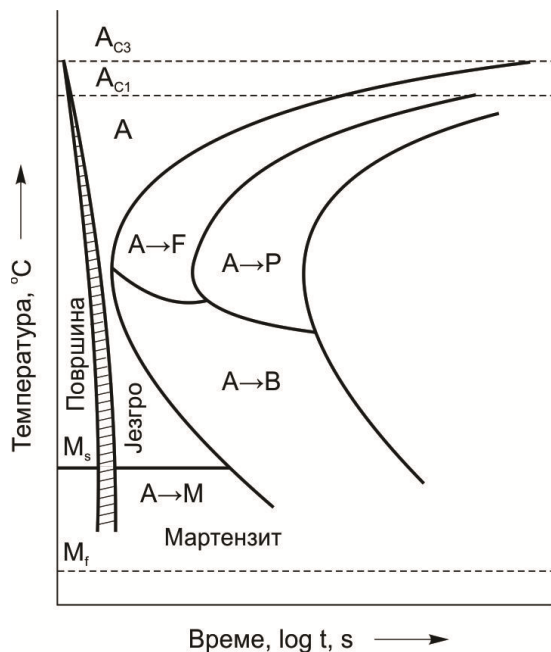
У другим случајевима, изузев каљења, када је циљ уклањање унутрашњих напона иде се на тзв. жарење ради уклањања унутрашњих напона [2].

4.4 Начини каљења

У наставку су описане различите врсте каљења.

4.4.1 Континуално (обично) мартензитно каљење

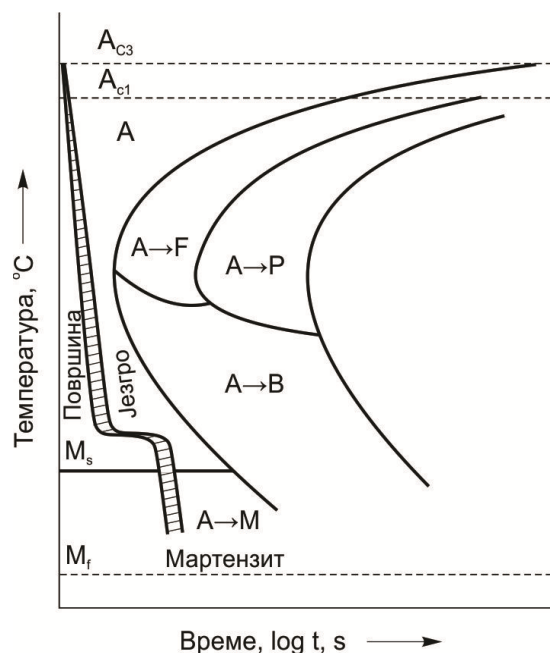
Овакво каљење се изводи непрекидним хлађењем радног комада из аустенитног подручја до температуре испод мартензитне промене M_s . Брзина хлађења се бира тако да се спречи дифузиона промена аустенита све до температуре мартензитног преображаја, где он потпуно или делимично прелази у мартензит (слика 4.5).



Слика 4.5 Мартензитно каљење-континуално [3]

4.4.2 Степенасто (прекидно) мартензитно каљење (мартемперинг)

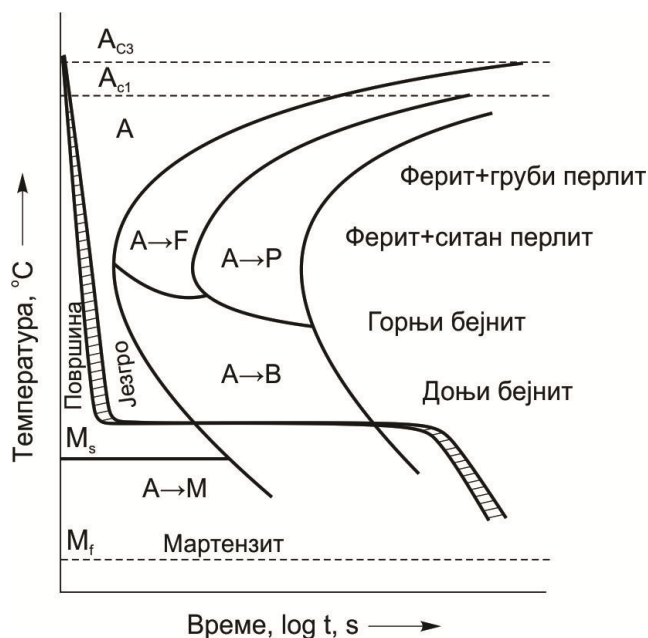
Примењује се код угљеничних челика танких пресека (10-12 *mm*) или малих пречника 8-10 *mm*. Суштина је у промени брзине хлађења на температури нешто изнад M_s . Као посредно средство за хлађење користи се растоп соли константне температуре. У ствари део се убацује у каду температуре нешто изнад M_s , ту се хлади и задржава до изравнања температуре по целом пресеку, али не предуго јер могу почети дифузионе изотермичке промене. Кад се део извади из купатила, хлади се у другом расхладном средству нпр. ваздуху. Пошто у току фазних промена опадају својства отпорности, а расте пластичност, делови се тада могу исправљати нпр. завршним хлађењем под пресом, односно бакарним плочама (слика 4.6). На овај се начин код добро прокаљивих челика смањују заостали структурни напони, а елиминишу термички напони. Овај начин каљења није погодан за дебеле пресеке и слабо прокаљиве челике, јер може доћи до трансформације аустенита у бејнит или перлит, ако се предмет благовремено не извади из соног купатила [3].



Слика 4.6 Мартензитно каљење-степенасто [3]

4.4.3 Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг)

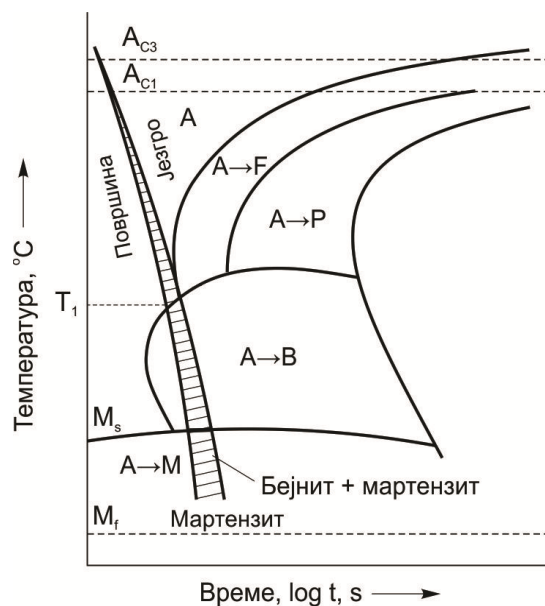
Прецизније се назива каљење са изотермичким преображајем потхлађеног аустенита. Део се после аустенитизације убацује у купатило константне температуре (250-350°C) и у њему задржава све до потпуног преображаја потхлађеног аустенита у бејнит. После тога наставља се хлађење произвољном брзином, било у води, уљу или на ваздуху. Челик бејнитне структуре има мању тврдоћу (40-58 HRC) од мартензитне, али је знатно дуктилнији (пластичнији) и жилавији од челика закаљеног на мартензит и отпуштеног на исту тврдоћу. Изотермички се кале углавном делови малих пресека, израђени од угљеничних и нисколегираних челика. Код делова већих пресека, због кратког времена инкубације, у средишним слојевима потхлађени аустенит се може трансформисати у фини перлит (око 550°C) тј. изнад B_s -температуре (слика 4.7).



Слика 4.7 Бејнитно каљење: изотермичко (аустемперинг) [3]

4.4.4 Континуално бејнитно каљење

Састоји се из загревања подеутектоидног челика до температуре изнад тачке A_{C3} , прогревања при тој температури и затим континуалног хлађења брзином нешто мањом од критичне. То значи да ће линија хлађења пресећи криву почетка разлагања потхлађеног аустенита на температури $T > M_s$. У овим условима почиње да се излучује бејнит, а када температура опадне до M_s , преостали део аустенита се преображава у мартензит. Овај вид каљења могућ је једино за неке челике чији КН-дијаграм има истурено колено као на слици 4.8.



Слика 4.8 Бејнитно каљење-континуално [3]

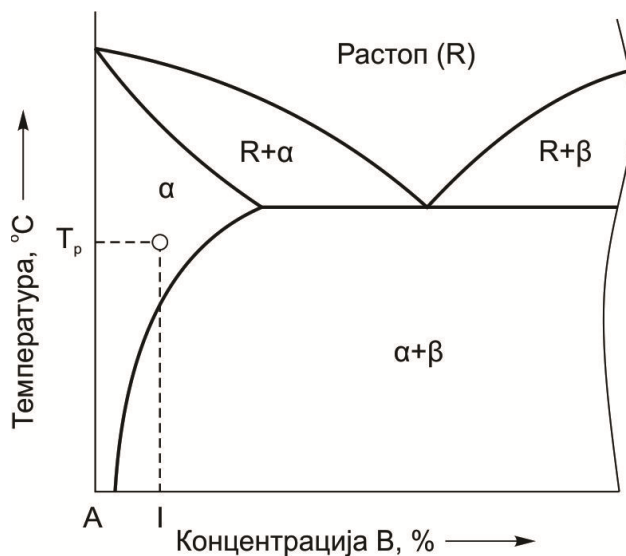
4.4.5 Прекидно каљење

Изводи се загревањем радног предмета до температуре аустенитизације, па његовим хлађењем у два расхладна средства; најпре у води док се не охлади до око 300°C , а затим до 20°C у уљу или на ваздуху. Ово је варијанта степенастог каљења која се може применити и за веће пресеке, пошто је брзина хлађења у води велика па се за кратко време изједначава температура и код великих пресека, а да не наступи бејнитна промена. Сам поступак каљења захтева велико искуство и умешаност калиоца и пажљив рад, с обзиром да је тешко проценити тренутак када је предмет већ потхлађен до 300°C . Прекидним каљењем деформације делова при каљењу свде се на минимум, спречавају се прсине и димензијске грешке.

4.4.6 Таложно каљење

Назива се још и преципитационо или дисперзионо отврдњавање. Дисперзионо отврдњавање настаје код метала који немају алотропске модификације већ само променљиву растворљивост у чврстом стању (аустенитни челици, нежелезни метали). При дисперзионом отврдњавању долази до повезивања технолошких операција: презасићење и вештачко старење.

Презасићење настаје загревањем легуре до температуре $30-50^{\circ}\text{C}$ изнад солвус линије (граничне растворљивости-температура T_p за легуру I на слици 4.9); у току прогревања на T_p друга фаза β се раствара, па се добија хомогена α -фаза. За пример се може узети терцијарни цементит код подеутектоидних угљеничних челика, који се загревањем изнад солвус линије раствара у α -фериту; притом се $R_{p0.2}$ и R_m незнатно мењају, али расту својства пластичности услед преласка двофазне ($\alpha + \beta$) структуре у монофазну (α). Наглим хлађењем са T_p до собне температуре задржава се чврст раствор (тачка I).



Слика 4.9 Равнотежни дијаграм са ограниченом растворљивошћу елемента В у елементу А [3]

Старење, у овом случају вештачко, се састоји у загревању претходно презасићене легуре I до температуре испод граничне растворљивости, држању на тој температури и хлађењу. У току старења долази до излучивања вишка састојка из чврстог раствора (тзв. сегрегата), у облику високодисперговане фазе. Старење доводи до ојачања које се испољава порастом својстава отпорности и смањењем својстава пластичности. Ако се легура дуже остави на температури околине, одвијаће се природно старење. Старење може бити и непожељан процес, као нпр. код лимова за дубоко извлачење или котловских лимова, јер доводи до пада својстава пластичности и пораста кртости. Исто тако, код заварених спојева излучивање нитрида гвожђа (Fe_2N и Fe_4N) по границама металних зрна (природно старење) изазива пад истегљивости и жилавости, тј. својстава пластичности [3].

4.4.7 Каљење на ниским температурама

При каљењу неких челика, сав аустенит се не преображава у мартензит, већ се јавља заостали аустенит. Тако је нпр. код еутектоидних челика температура завршетка промене аустенита у мартензит око -50°C , па би за потпуну трансформацију аустенита следовало потхлађивање од -30 до -60°C . Допунска обрада челика не мора бити директно из аустенитне области, већ се радни предмет може охладити до собне температуре, па накнадно испод 0°C . Субнулти третман се изводи само понекад, ако је неопходна велика тврдоћа и стабилна структура, а успут се смањују унутрашњи напони и склоност ка природном старењу. На овај начин се обрађују мерни алати, од којих се тражи димензионална стабилност одржива за све време коришћења алата.

Термичка обрада на сниженим температурама ограничава се на челике који садрже $\text{C} > 0.50\%$, јер је заостали аустенит у нискоугљеничним челицима незнатан. Поред високоугљеничних челика, овако се обрађују и лежирани алатни челици, а такође и неки конструкциони (нарочито лежирани челици за цементацију у циљу повећања тврдоће цементираног слоја после каљења).

За потхлађивање до -78°C може се употребити „суви лед“ тј. CO_2 у чврстом стању, а за још ниже температуре до око -180°C течни ваздух или течни азот. Узимајући у обзир да за већину челика температура краја мартензитног преображаја M_f није испод -80°C , може се углавном користити суви лед.

При термичкој обради челика на температурама испод нуле повећава се количина мартензита у структури, што доводи до:

- повећања тврдоће и
- стабилизације запремине и димензија.

У табели 4.4 приказане су особине структурних састојака система Fe-C.

Табела 4.4 Особине структурних састојака система Fe-C [3]

Састојци, ознака	Густина, g/cm^3	R_m , MPa	A_5 , %	Тврдоћа, HB
Гвожђе, Fe	7.874	295	50	50-60
Ферит, α	7.86	295	40	80
Аустенит, γ	8.06	740	50	200
Цементит, C_m	7.66	295	0	900
Графит, G_r	2.22	19.5	0	< 1
Перлит, P	7.85	740	8	200
Ледебурит, L	-	-	-	450
Перлит-ситни, P	-	940	-	250
Бејнит, B	-	1285	20	400
Мартензит, M	7.74	1485	0	700

4.4.8 Површинско каљење

Површинско каљење је термичка обрада којом се закаљују само површински слојеви комада, док његово језгро задржава почетну структуру. Тако се добија велика површинска тврдоћа уз велику жилавост и мању тврдоћу језгра што је пожељно код делова од којих се траже следеће особине:

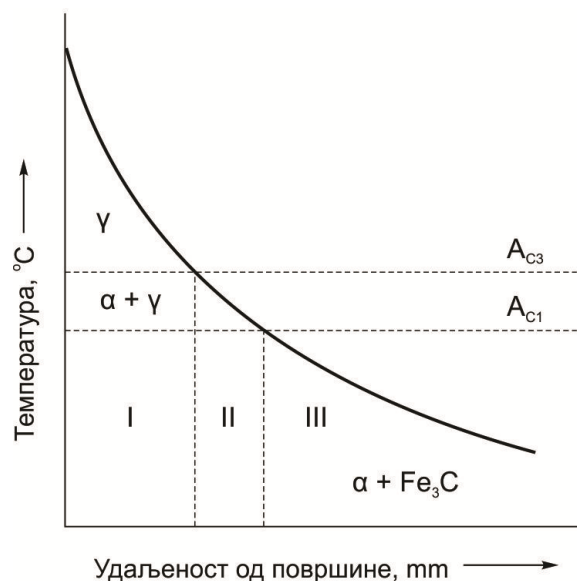
- велика отпорност на хабање,
- повећана отпорност на ударно оптерећење и
- висока отпорност на замор при цикличним оптерећењима

У пракси се користе следећи видови површинског каљења:

- пламено површинско каљење,
- индукционо површинско каљење и
- напредне технологије (ласерско, електронски снап, високофреквентно).

4.4.8.1 Пламено површинско каљење

Изводи се углавном помоћу редукујућег окси-ацетиленског пламена. При загревању температура и тврдоћа опадају по дубини комада (слика 4.10).



Слика 4.10 Расподела температуре и тврдоће на различитим удаљеностима од каљене површине [1]

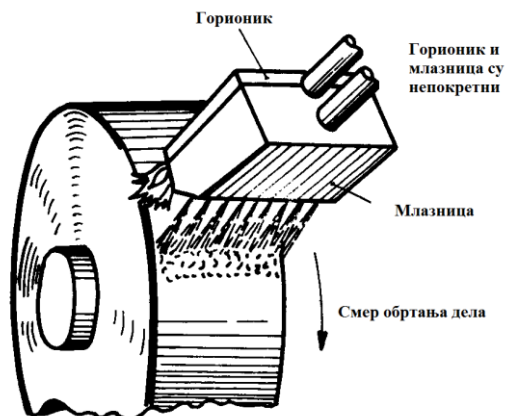
Зона I $\rightarrow T > A_{C3} \Rightarrow M$

Зона II $\rightarrow A_{C1} < T < A_{C3} \Rightarrow M + P$

Зона III $\rightarrow A_{C1} < T \Rightarrow F + P$

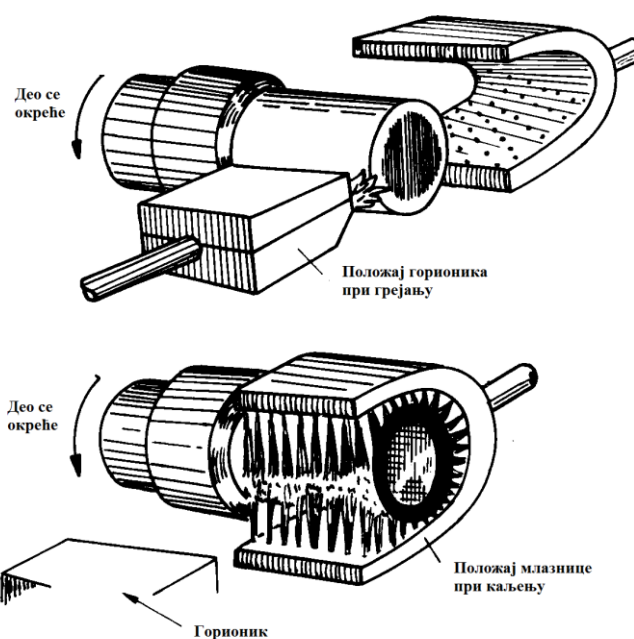
Углавном се површински кале челици са 0.3-0.5% C (Ћ1330, Ћ1430, Ћ1530). Површински се кале и легирани челици као и ливена гвожђа са $C = 0.25-0.50\%$. Сиви лив, нодуларни лив и црни темпер лив се површински кале, ако је садржај угљеника у матрици 0.25 до 0.85%. Ако је у металној матрици виши садржај угљеника, онда он доводи до стварања прслина каљења, па се одливак после каљења ниско отпушта на $\approx 150^\circ C$.

Поступно каљење - загревање површине делова до температуре каљења и хлађење одвијају се поступно један део површине за другим, тако да се све своди на понављање истих елементарних операција. Релативна брзина горионика је 50-500 mm/min. Код равних плоча горионик се креће праволинијски, а за њим водена млазница под углом од $15-45^\circ$ у односу на каљену површину. Код великих ваљкастих површина горионик и распршивач су непомицни, а радни део се обрће (слика 4.11). На граничној дубини где се завршава каљени слој ствара се меки венац, слично као у подеоној равни код одливка или отковка.



Слика 4.11 Пример површинског каљења цилиндричне површине-поступно каљење [1]

Каљење изједна - површина целог комада или њен део се загрева до температуре каљења, а затим се комад хлади у кади или прскањем (слика 4.12). При томе горнионик и предмет могу бити у миру или у релативном кретању.

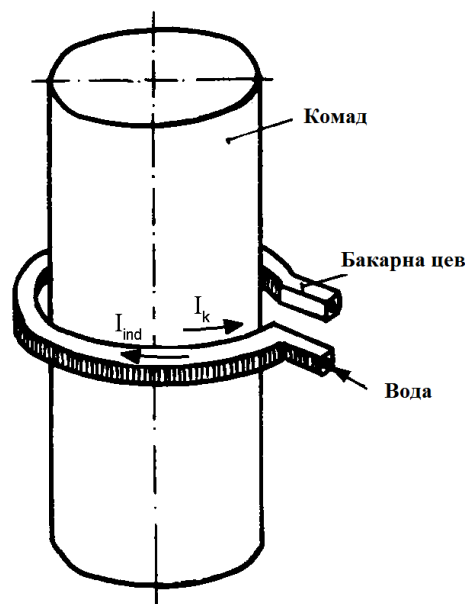


Слика 4.12 Пример површинског каљења цилиндричне површине-каљење изједна [1]

4.4.8.2 Индукционо површинско каљење

Загревање се изводи уношењем челичног дела у брзо променљиво електромагнетно поље (слика 4.13). У њему се индукују вртложне наизменичне струје, исте фреквенције као и побудна струја (f). Обично се кале челици са 0.4-0.5% C, а каљењем се добија тврдоћа

55-60 HRC. Дубина загревања остварује се ефектом RI^2 . Индукционим каљењем повећава се отпорност на хабање и динамичка издржљивост јер, заостали напони притиска спречавају ширење површинских микропрелина. Индукционо се кале: коленаста вратила, брегасте осовине, зупчаници, ваљци, вођице стругова, зупчасте спојнице.



Слика 4.13 Индуктор за површинско индукционо каљење [1]

4.4.8.3 Напредне технологије

Одликује их брзо загревање што доводи до самокаљења. Загревање може бити изведено ласерским зрацима, електронским снопом, високофреквентно ($f > 300 \text{ kHz}$).

4.5 Грешке при каљењу

Грешке настале услед каљења могу се поделити у две групе:

- заостали напони и деформације и
- недовољно загревање, кратко прогревање, прегоривање, разугљенисавање и оксидација.

Заостали напони и деформације су повезани - ако постоји могућност деформисања дела заостали напони су мањи и обрнуто. То значи да се у масивним (дебелим) деловима јављају заостали напони, а у танким настаје велико деформисање (јављају се пластичне видљиве деформације). Постоје термички и структурни напони (слика 4.14). За време хлађења настају прелазни термички напони који се мењају у току времена хлађења, а кад се део охлади делују само заостали напони. Прелазни термички напони у еласто-пластичној области се мењају по закону:

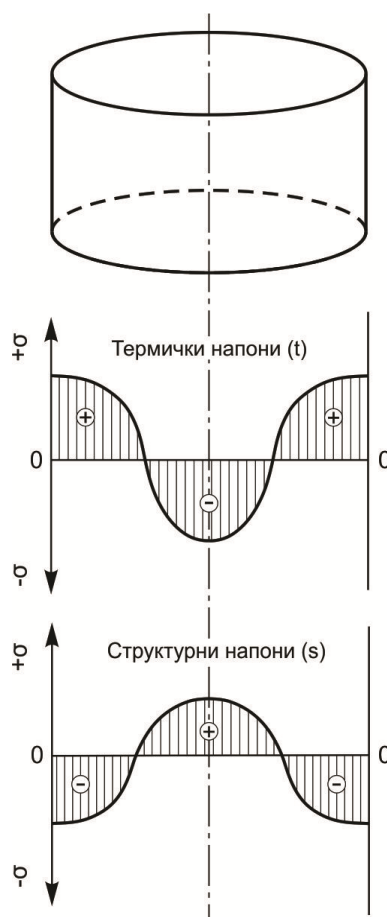
$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \text{MPa},$$

где је:

E -модул еластичности, MPa ($\sigma = E \cdot \varepsilon$, ε -термичка деформација)

α -коэффициент линеарног ширења, m/mK ,

ΔT -разлика температура, $^{\circ}\text{C}$.



Слика 4.14 Шема расподеле термичких и структурних напона у каљеном челичном ваљку [1]

Појаву структурних напона треба довести у везу са чињеницом да се у низу случајева не може остварити истоветна структура по читавом пресеку окаљеног дела. Са друге стране, свака од могућих структура има сопствену специфичну запремину.

Ако се замисли да је, на пример, мартензитна структура остварена само до неке дубине, а да су зоне испод овог слоја са неком од структура перлитног типа, онда је јасно да ће се у спољним зонама појавити напони притиска (унутрашњи делови материјала ометају спољне у тежњи да заузму већу запремину), а у унутрашњим напони затезања.

Структурни напони настају због трансформације аустенита у мартензит у еластичном подручју ($T < 300^{\circ}\text{C}$). Мартензит има 5% већу запремину од перлита.

Степенасто (мартемперинг) и изотермичко (аустемперинг) каљење смањују заостале напоне јер се промена одвија после изједначавања температуре по пресеку у еласто-пластичној области.

Без обзира на ово одвојено разматрање узрока појаве унутрашњих напона, они се суперпонирају и у коначном резултату се добија јединствен стварни распоред, као и величина заосталих напона.

Заостали напони су штетни и могу да доведу до:

- витоперења плоча (танких), кривљења;
- прскања у току самог каљења (кад је $\sigma > R_m$ или када се машинском обрадом поремети равнотежно стање) [1].

Недовољно загревање, $T_k < A_{C3}$ па је почетна структура: $\alpha + \gamma \xrightarrow{\text{Каљење}} \alpha + M$ ($\alpha \rightarrow 80 \text{ НВ}$ - меке зоне). Грешка се отклања поновним загревањем + каљењем.

Прегревање се јавља при загревању на температури $T \gg A_{C3}$ или због предугог држања, при чему се добија грубозрнасти (крупнозрнасти) аустенит. При брзом хлађењу у температурској области ($A_{C3}-A_{C1}$) настаје неповољна Видманштетендова структура и крт мартензит. Грешка се може отклонити нормализационим жарењем и поновним каљењем.

Прегоривање настаје при $T_k \approx T_s$ (солидус температура), при чему се издваја оксид гвожђа - FeO по границама зрна што је непоправљива грешка (повећана кртост).

Неравномерно загревање и хлађење у појединим тачкама пресека челичних комада и неједнако ширење и скупљање и неравномерно одвијање структурних трансформација доводи до неравномерне расподеле унутрашњих напона који изазивају кривљење, тј. витоперење комада.

Оксидација и разугљенисавање. На $T > 600^\circ \text{C}$ интензивно се ствара FeO на површини-неповратан губитак. Разугљенисавање: $C + O_2 = CO_2$ настаје феритна структура у површинским слојевима и смањује се тврдоћа и отпорност на хабање.

4.6 Отпуштање

Већ је поменуто да у мартензитној структури настају знатни унутрашњи напони, па се увек после каљења изводи накнадно загревање и споро хлађење тзв. отпуштање напона. Примера ради, код окаљеног челика са 0.30% С, после отпуштања на 550°C заостали напони се смањују са 600 на 80 МПа.

Брзина хлађења после загревања и прогревања доста утиче на заостале напоне; пад унутрашњих напона при загревању често се зове *попуштање напона*. Супротно томе, брзо хлађење у води са 600°C ствара нове заостале термичке напоне [3].

У наставку је детаљније објашњено отпуштање, као и појаве до којих долази услед отпуштања.

4.6.1 Отпусна кртост

При отпуштању неких челика легираних са Cr-Mn или Cr-Ni, запажена је штетна појава тзв. **отпусна кртост** која је последица пораста тврдоће, а пада жилавости и истегљивости. Самим тим, треба избегавати отпуштање са температуре на којој се ово дешава. Ако се ипак отпуштање изводи са виших температура препоручује се хлађење великом брзином кроз критичну област да се спречи дифузија као битан фактор отпусне кртости, а потом хлађење малом брзином до собне температуре.

За неке класе челика пад жилавости може се уочити и на металографским снимцима по задебљању граница зрна. Металуршка мера која спречава отпусну кртост је легирање алатних челика молибденом (до 0.60%), волфрамом (до 1.5%), као и ниобијумом. Ови елементи делују позитивно, јер спречавају сегрегацију, која је узрочник отпусне кртости. Насупрот томе, угљеник и фосфор доприносе отпусној кртости. Претпоставља се да негативно дејство фосфора почиње већ и код сасвим малих садржаја (око 0.005% Р), јер је он склон ка сегрегацији. Пад жилавости ће се поново појавити при накнадном загревању изнад критичне температурске области и спорим хлађењем које ће потом уследити. Утврђено је да се сегрегацијом фосфора по границама металних зрна повећава склоност ка кртом лому. Легирајући елементи Si и Mn поспешују сегрегацију фосфора, па ће свако смањење садржаја Р, Mn и Si допринети да се склоност ка отпусној кртости умањи. У пракси је тешко и скупо произвести челике са само 0.015% Р, док би велико смањење Mn имало друге неповољне последице. Сегрегација Р се спречава увођењем Мо и микросадржаја В (0.003%) и Nb који се излучују по границама зрна и повећавају њихову кохезиону јачину чиме се надокнађује штетно деловање фосфора.

Осетљивост челика према отпусној кртости може се проценити испитивањем ударне жилавости у широком температурском дијапазону, као и утврђивањем прелазне температуре из жилавог у крт лом. Склоност различитих врста челика према отпусној кртости зависи у највећој мери од њиховог хемијског састава, начина производње и металуршке прераде [3].

4.6.1.1 Отпусна кртост легираних челика

Отпуштање неких легираних челика (при 250-400°C и 500-550°C) доводи до смањења ударне жилавости - отпусна кртост. Две врсте отпусне кртости се могу запазити код легираних челика. Прва врста кртости названа неповратном (иреверзибилном) кртошћу

првог реда, настаје при отпуштању у интервалу 250 до 400°C. Битна одлика овог типа кртости је неповратна природа, тј. чињеница да поновно жарење при истој температури неће повећати жилавост; ова врста кртости се може елиминисати загревањем до температуре изнад 400°C. Овим се међутим смањује тврдоћа. Накнадно загревање у опсегу 250 до 400°C неће смањити ударну жилавост. Стање кртости настаје услед тродимензионалног напонског стања насталог при неуниформном разлагању мартензита; добија се прелом карактеристичан за крти интеркристални лом.

Други облик кртости назван повратном (реверзибилном) кртошћу другог реда запажен је код неких легираних челика који се споро хладе (у пећи или на ваздуху) пошто су жарени при 500 до 550°C или су сувише држани на температури у овом интервалу. Отпусна кртост ове врсте нагло (драстично) смањује ударну жилавост и што је веома важно доводи до опасности од појаве хладних прслина. Рад потребан да се иницира прслина и нарочито рад потребан за њено ширење се смањује код челика који су у стању отпусне кртости. Овај тип отпусне кртости може бити спречен брзим хлађењем („каљењем“) нпр. у води са температуре жарења. После брзог хлађења са температуре 500-650°C добија се влакнасти прелом типичан за жилави лом (дуктилно стање), док се после спорог хлађења добија кристални прелом карактеристичан за крти лом.

Суштинска одлика кртости другог реда је њена реверзибилност. Кртост услед спорог хлађења са 500-550°C може бити елиминисана понављањем операције жарења са 600-650°C после чега следи брзо хлађење. Она се може опет јавити при жарењу на 500-550°C уз одређено време држања. Кртост другог реда се најпре запажа код челика који имају повећан садржај Р или Мп, Si или Cr, или када су Cr и Ni или Мп заједно додати челику. Додатак Мо или W челику у малим количинама (0.2-0.3% Мо или 0.5-0.7% W) знатно редукује његову тенденцију ка отпусној кртости.

Узрок отпусне кртости другог реда највероватније је повезан са дифузијом растворених елемената на границе зрна и засићењем површинских слојева зрна овим елементима, без преципитације вишка финално диспергованих фаза (карбида, нитрида, фосфида). Обогаћивање граница зрна фосфором има нарочито неповољан утицај јер се тиме смањује рад потребан за стварање прслине између зрна. Неки истраживачи повезују кртост другог реда са преципитацијом диспергованих фаза карбида, нитрида, фосфида и др., из α - чврстог раствора на границе зрна [1].

Режим отпуштања (температура и време) зависи од захтеваних особина. Према температури отпуштања разликује се ниско, средње и високо отпуштање.

Ниско отпуштање изводи се при температури 150-250°C и времену 1-45 h, при чему тетрагонални мартензит прелази у кубни. Сопствени напони настали при каљењу опадају уз незнатно побољшање пластичности и одржавање високе тврдоће, јачине и отпорности на хабање. Углавном се користи за алате, опруге, контролнике. Исто тако, ниско се отпуштају делови после површинског каљења, цементације, цијанизације или карбонитрирања.

Средње отпуштање изводи се прогревањем (2 min/mm) при 350-500°C и затим хлађењем у води. Тиме јачина и напон течења остају исти као и после каљења, али расте граница еластичности, отпорност на релаксацију и динамичка издржљивост (због појаве

спољашњих притискујућих напона при хлађењу у води). Зато се на овај начин отпуштају делови као што су опруге (лиснате, завојне), полуге за балансирање, матрице и сл.

Високо отпуштање изводи се на температури изнад 500°C , али испод критичне температуре A_{C1} . Циљ је да се постигну најбоља својства дуктилности и жилавости. Каљење и високо отпуштање заједно се називају побољшање. У поређењу са челиком у нормализованом или жареном стању, каљење праћено високим отпуштањем доводи до истовременог повећања јачине и напона течења, истегљивости, сужења и нарочито ударне жилавости.

Термичка обрада побољшањем изводи се у железарама на производима као што су плоче, шипке, отковци, као и на предметима који се машински обрађују да би се пре обраде резањем смањила тврдоћа.

У табели 4.5 приказане су упоредне карактеристике челика после жарења, каљења и отпуштања.

Табела 4.5 Упоредне карактеристике челика после жарења, каљења и отпуштања [3]

Термичка обрада	R_m , MPa	R_p , MPa	A_5 , %	Z , %	KCV, J/cm ²
Жарење на 880°C	550	350	20	52	90
Каљење у води са 880°C и отпуштање при 300°C	1100	700	12	35	30
Исто са отпуштањем при 600°C	620	430	22	55	140

Дакле, као што је већ речено, каљење започиње аустенитизацијом челика и потоњим хлађењем брзином већом од критичне. Накнадним отпуштањем мартензита добија се повољнија структура, коју у основи карактерише феритна и цементитна фаза. С обзиром на то да отпуштање дуго траје (више сати) процес се може водити како је то унапред предвиђено, што омогућава да се добију очекивани резултати; сличне резултате било би неупоредиво теже добити регулисаним хлађењем челика из аустенитног подручја, јер хлађење кратко траје (реда величине у минутима). Дакле, тражене механичке особине много је лакше добити побољшањем, него хлађењем различитим брзинама из аустенитне области. Осим тога, код структура отпуштања цементит има знатно повољнији облик, него цементит добијен различитим брзинама хлађења мањим од критичне.

При средњем отпуштању ($350-500^{\circ}\text{C}$), цементит се формира дифузијом угљеника, па је резултат процеса у функцији температуре и времена отпуштања; то значи да се исти учинак може постићи избором више температуре и краћег времена и обрнуто. Прихватљива су и економски оправдана времена од 0.5-2 h, па се овом времену

прилагођава температура отпуштања. Заједнички учинак температуре и времена на тврдоћу угљеничних челика може се проценити помоћу израза:

$$P = T(M + \log t),$$

где је:

T - апсолутна температура отпуштања (у границама 570-920K),

M = 15.6 - 5.6% C,

t - време отпуштања (1-24 h) и

C - садржај угљеника у челику.

Одабрана температура отпуштања се најпрецизније може одржавати ако се процес одвија у соном или оловном купатилу, као и у кади са загрејаним машинским уљем. Нешто теже је регулисање температуре отпуштања у индустријским пећима [3].

4.6.2 Мартензитна промена при отпуштању легираних челика

Легирајући елементи такође утичу како на температурски интервал преображаја мартензита (M_s - M_f), тако и на настале продукте. Мења се кинетика аустенитне трансформације при хлађењу после наваривања и долази до отпуштања. Сви легирајући елементи, осим кобалта, померају удесно криву почетка промене аустенита, смањујући тиме критичну брзину хлађења при каљењу. Неки карбидотворни елементи доводе до раздвајања перлитног и бејнитног преображаја, тако да се јавља температурски интервал изузетне стабилности аустенита. Већина легирајућих елемената снижава температуру почетка мартензитне трансформације (M_s). То се пре свега односи на Mn, а затим Mo, Cr, Ni и Cu. Силицијум у принципу не утиче на температуру M_s , док Al и Co подижу ту температуру.

У току отпуштања легираних челика померају се ка вишим температурама следећи процеси: разлагање мартензита, коагулација карбида, као и распад заосталог аустенита. Најјаче задржавају промену мартензита Ti, V, Cr, Mo, W и Si, а температуру промене аустенита подижу Cr, Mn и Si. Коагулација карбида код легираних челика који садрже Cr, W и Si се одвија при температури око 450°C, а код челика легираних са Mo и V при температури око 550°C.

Легирајући елементи који су по карбидотворности испред гвожђа везују угљеник излучен из мартензита и граде специјалне карбиде различитих температура растварања у аустениту. Разлике у променама при отпуштању угљеничних и легираних челика изразитије се испољавају изнад 400-450°C, јер је цементит у тим условима нестабилан. На нижим температурама могућа је само дифузија угљеника (излучује се ε карбид). Дифузија гвожђа и других елемената који омогућују образовање карбида настаје управо изнад 400°C.

5. Примери извођења термичке обраде побољшања

5.1 Термичка обрада челика Č4730 (25CrMo425)

У наставку ће детаљно бити описан поступак избора најповољнијег режима термичке обраде челика Č4730 на основу дијаграма изотермичког распада аустенита (IRA). Прописаним режимом термичке обраде се обрађују плоче дебљине 20 mm.

5.1.1 Подаци о материјалу Č4730 (25CrMo425)

Челик Č4730 спада у групу конструкционих нисколегираних челика за побољшање. Садржај угљеника је ограничен на 0.30%, а као легирајући елементи са највећим уделом присутни су хром и молибден. Хемијски састав овог челика је дат у табели 5.1.

Табела 5.1 Хемијски састав челика Č4730

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

Ознака челика Č4730 је ознака по домаћем SRPS стандарду. У табели 5.2 је дат преглед ознака у најкоришћенијим стандардима.

Табела 5.2 Ознаке челика у другим стандардима

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

Челик Č4730 је намењен изради високооптерећених статичких конструкција и динамичких конструкција које раде у условима ударних оптерећења. Примарне области примене су: возила, мотори и машине, вратила, турбине и компоненте турбина, ланци итд. Одликују га повољне механичке особине које се могу поправити термичком обрадом - побољшањем. У табелама 5.3 до 5.5 су дати основни подаци везани за обрадивост различитим технологијама и термофизичке и механичке особине овог челика [7].

Табела 5.3 Опште и технолошке карактеристике челика Č4730

Опште карактеристике		Технолошке карактеристике	
Отпорност на корозију	добра	Обрадив резањем	да
Механичке особине	просечне	Обрада на аутоматима	да
Ковност	добра	Ковање на топло	да
Заварљивост	одлична	Деформисање на хладно	да
Обрадивост	добра	Хладно искивање	да

Табела 5.4 Термофизичке особине челика Č4730

Челик	Густина, g/cm^3	Термичка проводност, W/mK	Поасонов коэффициент	Специфична топлота, J/kgK	Тачка топљења, $^{\circ}C$
Č4730	7.85	42.7	0.29	477	1432

Табела 5.5 Механичке особине челика Č4730 у зависности од стања испоруке

Термичка обрада	Затезна чврстоћа, MPa	Напон течења, MPa	Модул еластичности, MPa	Издужење, %	Сужење, %	Тврдоћа		Енергија лома, J
						HB	HRC	
Нормализација (870°C)	670	435	205000	25.2	60	197	19	87
Жарење (865°C)	560	360	205000	28.2	56	156	13	62

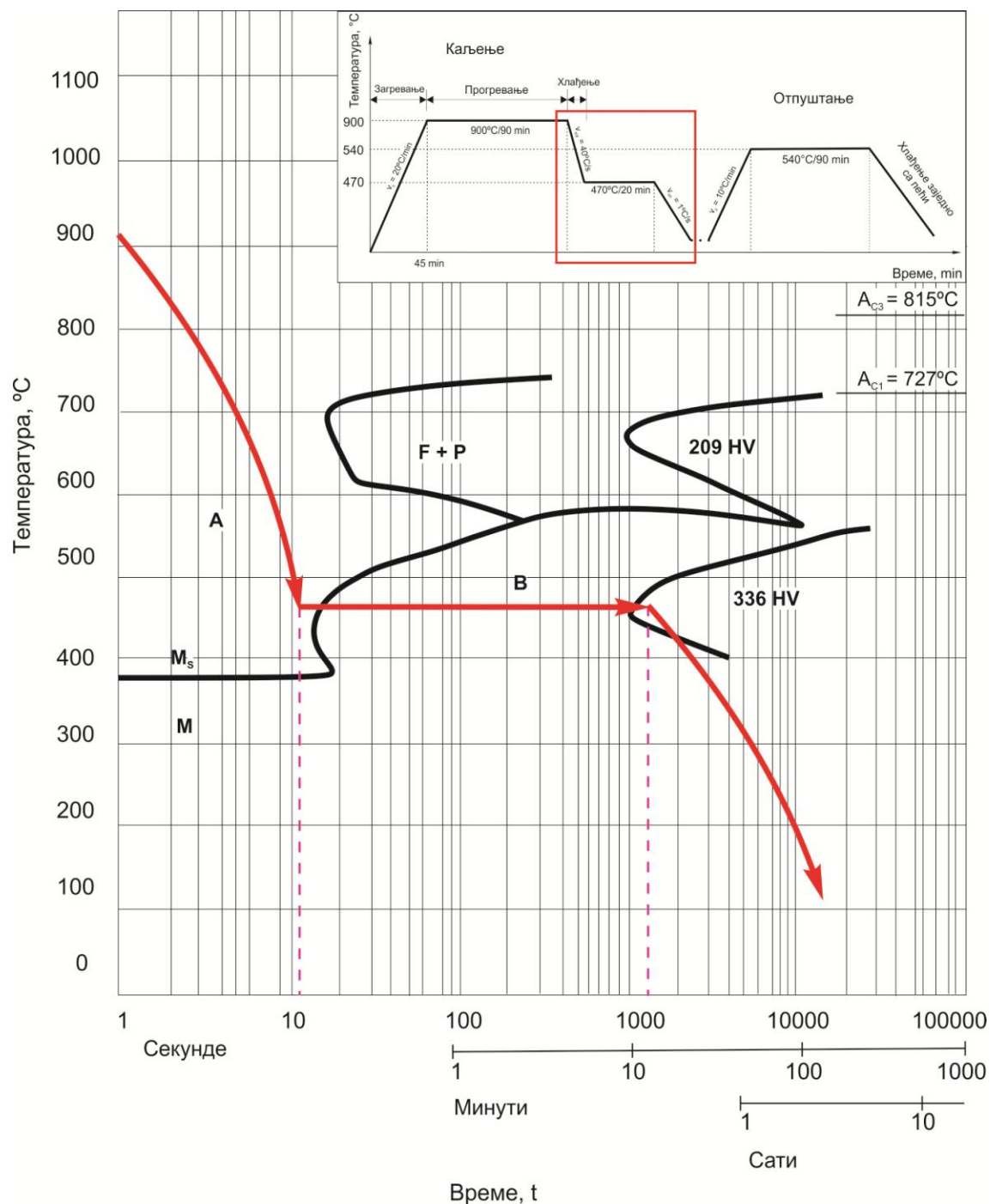
Побољшањем овог челика (каљење + отпуштање) долази до пораста његове јачине, али и до малог пада пластичности. Прописивањем оптималног режима термичке обраде могу се постићи вредности механичких карактеристика приказаних у табели 5.6.

Табела 5.6 Механичке особине челика Č4730 у побољшаном стању

Дебљина, <i>mm</i>	Затезна чврстоћа, <i>MPa</i>	Напон течења, <i>MPa</i>	Модул еластичности, <i>MPa</i>	Издужење, %	Сужење, %	Енергија лома, <i>J</i>	Тврдоћа, HB
до 16	900-1100	700	210000	12	50	50	≈ 212
17-40	800-950	600		14	55	55	
41-100	700-850	450			60	55	
101-160	650-800	400			60	55	

5.1.2 Оптималан режим термичке обраде челика Č4730 на основу IRA дијаграма

Избор најповољнијег режима термичке обраде разматраног челика је изведен на основу IRA дијаграма за разматрани челик, а циљ термичке обраде је постизање најповољнијих вредности својстава јачине и пластичности. Прописани оптималан режим термичке обраде подразумева бејнитно каљење челика и затим отпуштање на одређену температуру. Термичка обрада се састоји у загревању челика до аустенитног подручја ($\approx 900^{\circ}\text{C}$), каљења у води до температуре бејнитне трансформације ($\approx 450 - 500^{\circ}\text{C}$), држања на тој температури док се сав аустенит не трансформише у бејнит, затим хлађења на мирном ваздуху и на крају отпуштања на температуру од 540°C . Прописан режим термичке обраде је на дијаграму на слици 5.1 уцртан црвеном бојом. На слици се такође може видети и дијаграм тока термичке обраде. Са IRA дијаграма се може утврдити да је период инкубације нешто већи од 10 секунди и да M_s -температура (температура настанка мартензита) лежи нешто испод 400°C .



Слика 5.1 Дијаграм бејнитног каљења за челик $\check{C}4730$ [7]

Побољшањем предложеним режимом термичке обраде долази до пораста јачине третираног челика, али се својства пластичности не смањују у већој мери. Механичке карактеристике челика $\check{C}4730$ после каљења и отпуштања су дате у табели 5.7.

Табела 5.7 Механичке особине челика *Š4730* у побољшаном стању

Пречник/дебљина узорка, <i>mm</i>	Затезна јачина, <i>MPa</i>	Напон течења, <i>MPa</i>	Модул еластичности, <i>MPa</i>	Модул клизања, <i>MPa</i>	Издужење, %	Сужење, %	Тврдоћа, HВ
25	1040	880	210000	81000	18	55	307
50	740	570			20	58	223
75	710	540			22	60	217

Анализом резултата може се уочити изразит пораст својстава отпорности челика за узорак пречника или дебљине 25 *mm*. Истовремено, пад својстава пластичности и пораст тврдоће је занемарљив што указује на то да је прописан режим термичке обраде оптималан. На узорцима пречника 50 и 75 *mm* је уочена промена механичких карактеристика, али су вредности много ниже.

Поред конкретних резултата приказаних у табели 5.7, постоје и одређене препоруке везане за очекиване механичке карактеристике у зависности од термичке обраде овог челика. Такве препоруке везане за статичку и динамичку отпорност челика *Š4730*, и његове способности деформације су дате у табелама 5.8 и 5.9. Такође, у табели 5.10 је приказана промена напона течења, отпорности на пузање, модула еластичности и модула клизања у зависности од температуре.

Табела 5.8 Особине челика *Š4730* у зависности од средства за каљење и температуре отпуштања

Температура отпуштања, °C	Затезна јачина, MPa	Напон течења, MPa	Издужење, %	Сужење, %	Тврдоћа, HВ	Енергија лома, J
Каљено у води са 870°C и отпуштено на 540°C						
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
Каљено у уљу са 860°C и отпуштено на 540°C						
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 5.9 Особине челика $\check{C}4730$ у зависности од типа динамичког оптерећења и величине узорка

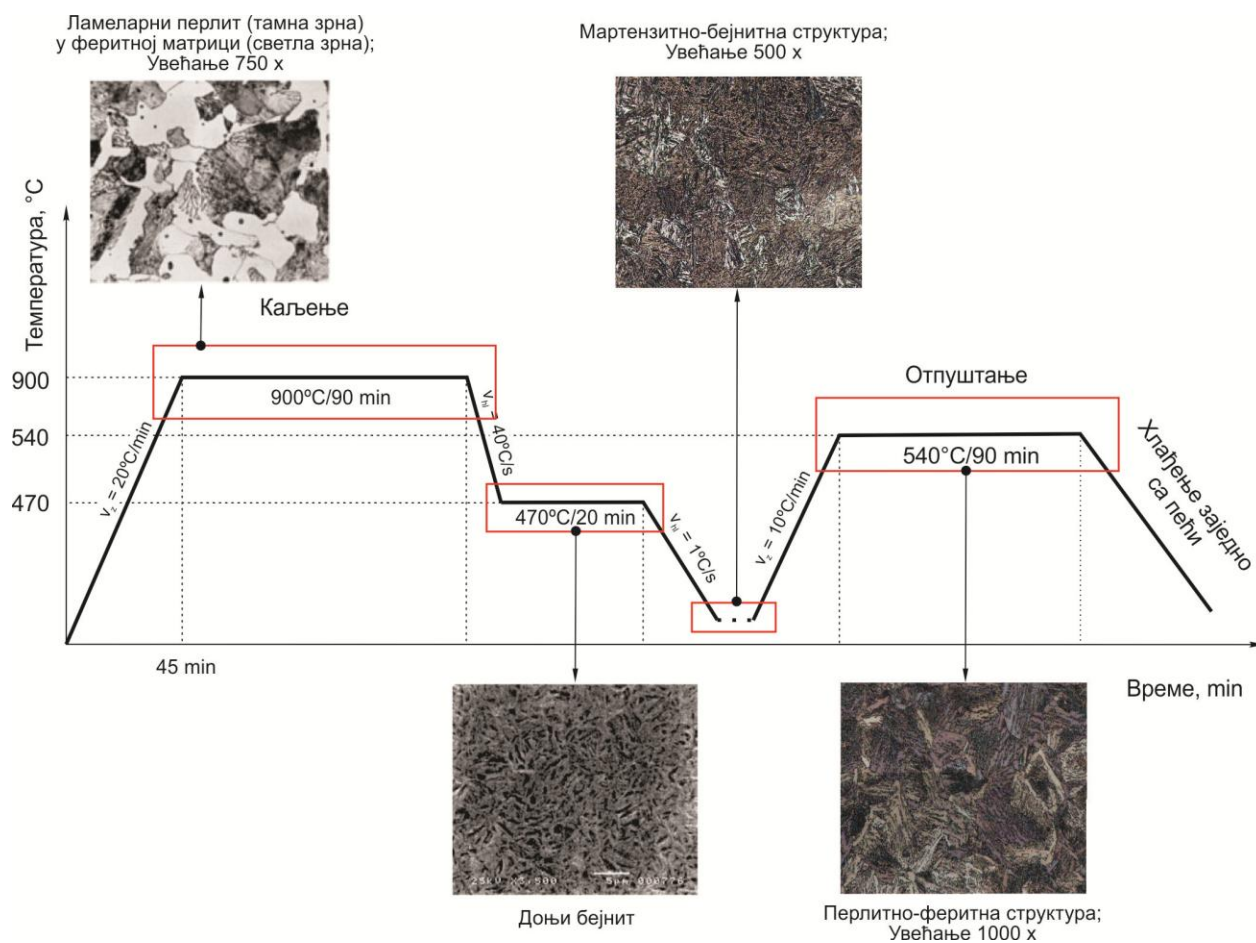
Челик	Дебљина/пречник комада, mm	Динамичка чврстоћа при различитим оптерећењима, MPa		
		Савијање	Затезање-притисак	Увијање
$\check{C}4730$	до 16	480	380	290
	16 - 40	440	350	260
	40 - 100	390	310	230
	100 - 250	340	270	200

Табела 5.10 Промена напона течења, граница пузања, модула еластичности и модула клизања челика $\check{C}4730$ са температуром

Карактеристике челика	Температура испитивања, $^{\circ}C$							
	20	100	200	300	350	400	450	500
Напон течења, MPa	450	430	400	360	340	-	-	-
Граница пузања, MPa	-	-	-	-	-	38	18	8
Модул еластичности, MPa	205000	205000	195000	185000	-	175000	-	-
Модул клизања, MPa	81000	79000	75000	71000	-	67000	-	-

Поред горе наведених испитивања карактеристика челика, изведено је и испитивање микроструктуре. Структуре су испитане на четири узорка, тј. на четири карактеристична места за прописан режим термичке обраде (слика 5.2).

Анализа микроструктура је показала да се изотермичким бејнитним каљењем добија структура доњег бејнита, а да затим хлађењем долази до појаве мале количине мартензита. Мартензит у овом случају нема неповољну улогу јер после каљења следи средње отпуштање па ће мартензит и бејнит прећи у стабилније фазе. На крају, отпуштањем се постиже структура ситнозрнастог перлита (тамна зрна) уз присуство ферита (светла зрна).



Слика 5.2 Микроструктуре челика Č4730 за време термичке обраде прописаним режимом [7]

5.2 Термичка обрада челика Č1530 (C45)

У овом делу је приказан поступак избора најпогоднијег режима термичке обраде челика Č1530 на основу дијаграма изотермичког распада аустенита (IRA). Прописаним режимом термичке обраде се обрађују плоче дебљине/пречника 15 mm.

5.2.1 Подаци о материјалу Č1530 (C45)

Челик Č1530 спада у групу средњеугљеничних челика. У табели 5.11 дат је хемијски састав овог челика.

Табела 5.11 Хемијски састав челика Č1530

Легирајући елементи	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Садржај, %	0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.25	≤ 0.25

Ознака челика Č1530 је по домаћем SRPS стандарду. У табели 5.12 је дат преглед ознака у још неким стандардима.

Табела 5.12 Ознаке челика у другим стандардима

SRPS (Србија)	ГОСТ (Русија)	AISI (САД)	NF (Француска)	DIN (Немачка)	JIS (Јапан)
Č1530	45	1045	C45	C45	S45C

Челик Č1530 спада у групу средњеугљеничних челика. Користи се када је потребна већа јачина и тврдоћа него у ваљаном стању Може се обрађивати резањем, брушењем и полирањем. Овај челик се подвргава побољшању (каљењу и отпуштању) и користи се за ковање, израду завртњева, вратила, осовина, ножева, чекића, бургија за дрво, фелни и др.

У даљем раду су показане термофизичке (табела 5.13), као и механичке особине челика Č1530 после нормализације (табела 5.14).

Табела 5.13 Термофизичке особине челика Č1530

Челик	Густина, g/cm^3	Топлотна проводљивост, W/mK	Поасонов коефицијент	Специфична топлота, J/kgK	Тачка топљења, $^{\circ}C$
Č1530	7.85	25	0.29	460	1510

Табела 5.14 Механичке особине челика Č1530 после нормализације

Пречник, mm	<16
Дебљина, mm	<16
Напон течења, MPa	min. 340
Затезна чврстоћа, MPa	min. 620
Издужење, %	min. 14

У табели 5.15 приказане су критичне температуре и температуре при којима се одвијају одређени процеси.

Табела 5.15 Приказ критичних температура и температура одређених процеса

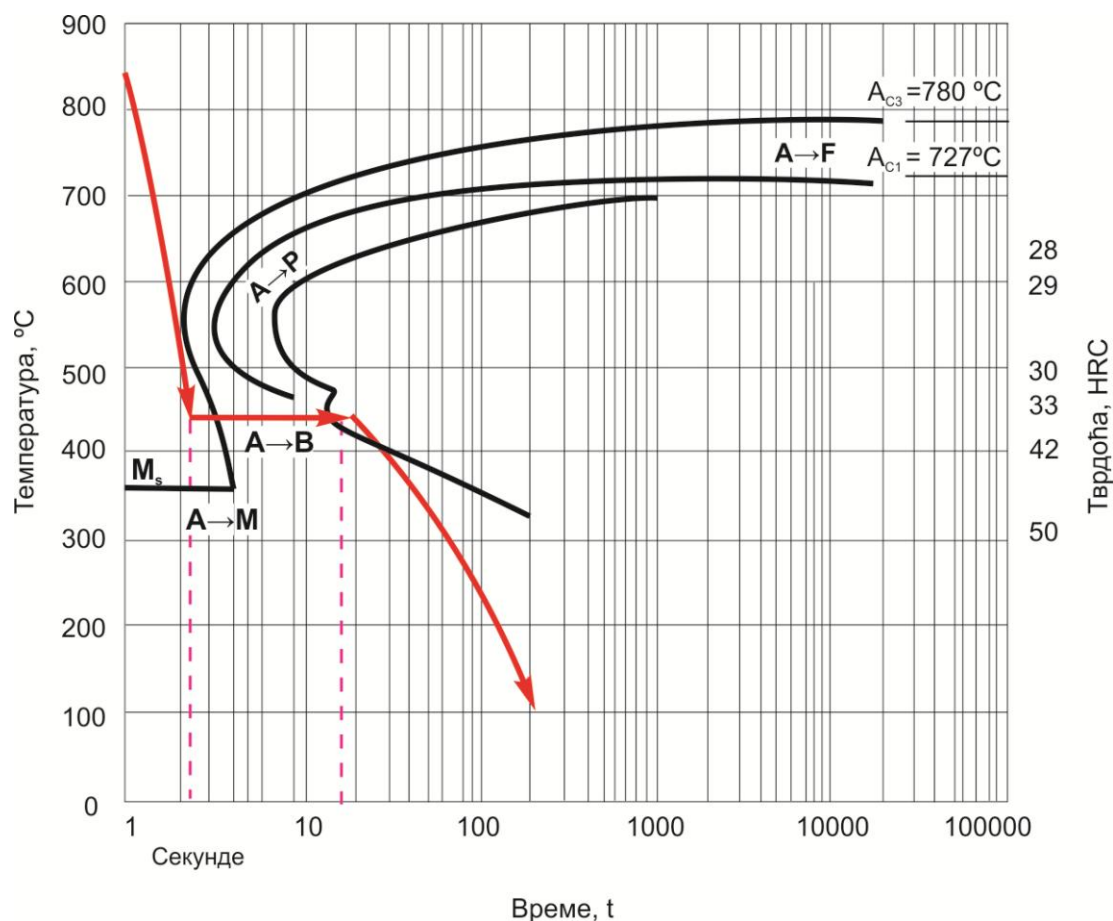
Критичне температуре, °C				Температуре процеса, °C		
A _{C1}	A _{C3}	A _{r1}	A _{r3}	Нормализација	Каљење	Отпуштање
727	780	682	751	840-880	820-860	560-660

5.2.2 Оптималан режим термичке обраде челика Š1530 на основу IRA дијаграма

Режим термичке обраде је одређен за челик Š1530 састава датом у табели 5.16. Избор најповољнијег режима термичке обраде разматраног челика је изведен на основу IRA дијаграма за разматрани челик (слика 5.3). Прописаним режимом термичке обраде се обрађују плоче дебљине 15 mm.

Табела 5.16 Хемијски састав челика Š1530

Елемент	C	Si	Mn	Cr	V
Садржај, %	0.44	0.22	0.66	0.15	0.02

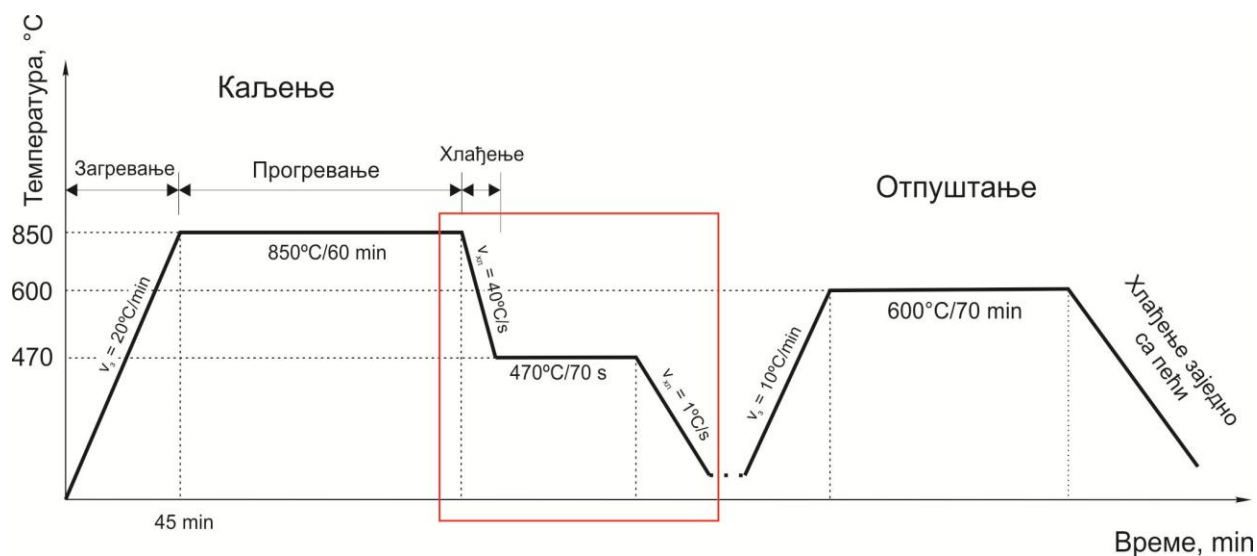


Слика 5.3 Дијаграм бејнитног каљења за челик Š1530

Прописани оптималан режим термичке обраде подразумева бејнитно каљење челика и затим отпуштање на одређену температуру. Прописан режим термичке обраде је на дијаграму на слици 5.3 уцртан црвеном бојом.

На слици 5.4 приказан је оптимални режим термичке обраде челика Š1530. Режим термичке обраде се састоји од загревања које траје 45 минута, брзином $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ до температуре 850°C , прогревања на тој температури у трајању од 60 минута, затим хлађења брзином $40^{\circ}\text{C}/\text{s}$ до температуре бејнитне трансформације (470°C), држања на тој температури док се сав аустенит не трансформише у бејнит (70 секунди), потом се хлађење до собне температуре одвија на мирном ваздуху брзином $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$. Каљење се одвијало у води.

Загревање до температуре отпуштања (600°C) се одвија брзином $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Део се на температури отпуштања држи 70 минута и потом хлади заједно са пећи.



Слика 5.4 Оптималан режим термичке обраде челика Š1530

У табели 5.17 приказане су механичке особине челика Š1530 после побољшања.

Табела 5.17 Механичке особине челика Š1530 после побољшања (каљења и отпуштања)

Дебљина/пречник, mm	<16
Напон течења, MPa	min. 490
Затезна чврстоћа, MPa	min. 700-850
Издужење, %	min. 14
Сужење, %	min. 35

6. Закључак

Термичка обрада челика је веома важан процес и од великог је значаја при обради челика. Применом термичке обраде побољшавају се особине челика као што су: напон течења, затезна чврстоћа, тврдоћа и др. Избор термичке обраде зависи од услова експлоатације машинског дела, самим тим то одређује и које особине челик треба да поседује.

Челици за побољшање могу бити угљенични и легирани. Угљенични челици за побољшање примењују се како у побољшаном, тако и у нормализованом стању, док се легирани челици искључиво примењују у побољшаном стању. Користе се за израду елемената који се користе у тешким условима рада (јака променљива и ударна оптерећења). Оно што им омогућава рад у таквим условима јесте термичка обрада побољшањем која се састоји из каљења и високог отпуштања и доводи до значајног повећања затезне чврстоће и напона течења, уз задржавање повољне истегљивости.

Каљењем се добија мартензитна структура која челику обезбеђује велику тврдоћу. Међутим, код челика код којих се захтева, пре свега велика вредност напона течења, после каљења такви челици се подвргавају отпуштању зато што је мартензит сувише крт и такви елементи не смеју да се уграде у машине које раде под великим оптерећењима. Отпусна кртост представља штетну појаву при отпуштању неких легираних челика и она је последица пораста тврдоће, што прати и пад жилавости и истегљивости. Међутим, код термичке обраде легираних челика треба водити рачуна да не дође до појаве отпусне кртости. Легирањем челика молибденом и волфрамом спречава се појава отпусне кртости.

Циљ рада је био да се покаже како термичка обрада побољшањем утиче на челике тј. како се мењају механичке особине челика. У раду је одређен најповољнији режим термичке обраде за два челика и тиме на конкретним примерима показано све што је раније теоријски било споменуто у раду. Како би било могуће одредити режим најповољније термичке обраде потребно је познавати карактеристике и особине материјала.

У раду је показано да челик Č4730 треба прогревати на температури од 900°C 2-5 min/mm дебљине, а затим хладити до 470°C и држати на тој температури док се сав аустенит у потпуности не трансформише у бејнит. После каљења се изводи отпуштање на температури 540°C , држи се на тој температури 90 минута и потом споро хлади. Челик Č1530 се прогрева на температури 850°C под истим условом као и Č4730 , после прогревања се хлади до 470°C и задржава на тој температури до краја трансформације. Отпуштање се одвија на температури од 600°C и држању на тој температури 70 минута. Хлађење се одвија споро, заједно са пећи. Циљ одређивања оптималног режима термичке обраде за оба челика је био да се повећају вредности затезне чврстоће и напона течења, што је успешно остварено у оба случаја.

7. Литература

- [1] М. Јовановић, В. Лазић: *Рукопис предавања – Машински материјали*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, школска 2015/2016.
- [2] Н. Видојевић: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет у Београду, Београд, 1973.
- [3] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, рукопис књиге, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
- [4] http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/6-MM_ho.pdf (приступљено октобра 2016.)
- [5] В. Ђукић: *Метални материјали*, Машински факултет у Београду, Београд, 1989.
- [6] <http://www.celici.rs/O%20celiku/01-c.htm> (приступљено октобра 2016.)
- [7] Д. Арсић: *Фазне промене у металним системима*, семинарски рад, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2014.