

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 396/2016

Филип Г. Димитријевић

**Избор најповољнијег режима термичке
обrade челичног лива G42CrMo4
и челика 42CrMo4**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да детаљно обради и опише:

- најважније врсте и режиме термичке обраде, као и да укаже на њихов значај и утицај на механичке особине;
- највише примењиване легиране челике и челичне ливове за побољшање и укаже на област њихове примене;
- режим термичке обраде нормализације и побољшања на примеру челичног лива и челика 42CrMo4 и одабере најпогодније режиме 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, 2020.

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
2.1.6	Термичка обрада побољшања.....	15
2.2	Дубина каљења челика.....	16
2.2.1	Методe одређивања дубине каљења	17
2.3	Начини каљења	21
2.3.1	Континуално (обично) мартензитно каљење	21
2.3.2	Степенасто (прекидно) мартензитно каљење (мартемперинг).....	21
2.3.3	Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг).....	22
2.3.4	Континуално бејнитно каљење.....	23
2.3.5	Прекидно каљење.....	24
2.3.6	Таложно каљење	24
2.3.7	Каљење на ниским температурама.....	25
2.3.8	Површинско каљење.....	26
2.4	Отпуштање	29
2.4.1	Промена мартензита у току отпуштања угљеничних челика.....	31
2.4.2	Мартензитна промена при отпуштању легираних челика	34
2.4.3	Отпусна кртост легираних челика.....	35
3.	Пећи и расхладна средства за термичку обраду	38
3.1	Средства за загревање	38
3.2	Средства за хлађење при каљењу	41
3.2.1	Одређивање моћи хлађења.....	42
3.2.2	Утицај стања површина, облика и величине челичних делова на постигнуту брзину хлађења при каљењу	42
4.	Сопствени напони и грешке при каљењу	44
4.1	Грешке при каљењу.....	44
4.2	Појава унутрашњих напона при каљењу	46

5.	Основни појмови о челичним ливовима и челицима за побољшање и њихово ливење у пешчаним калупима	50
5.1	Челици за побољшање	50
5.1.1	Уводне напомене о челицима	50
5.1.2	Легирани челици	51
5.1.3	Челици за побољшање	51
5.2	Челични ливови	53
5.3	Уводне напомене о ливењу.....	54
5.3.1	Ливачке особине метала.....	56
5.3.2	Пешчани калупи.....	59
5.4	Преглед ливачких грешака	61
5.4.1	Разврставање грешака	61
5.5	Поправка одливака са грешкама	63
6.	Испитивање челичног одливка GČ4732 и челика Č4732 у нормализованом и побољшаном стању	65
6.1	Карактеристике испитиваног материјала.....	65
6.2	Термичка обрада побољшања	68
6.3	Дорада оштећених одливака заваривањем/наваривањем	72
6.4	Термичка обрада испод нуле (тзв. "субнулти третман")	76
6.4.1	Пресовање челичних рукаваца	76
6.4.2	Пресовање бронзаних чаура	80
7.	Закључак	82
8.	Литература.....	83

Предговор

Желео бих најпре да се захвалим ментору овог рада проф. др Вукићу Лазићу на неизмерној и искреној подршци и помоћи без које израда овог рада не би била могућа у овом облику.

Такође, захвалио бих се проф. др Србиславу Александровићу на указаној и несебичној помоћи при лабораторијском испитивању узорака, као и изради графичких приказа добијених резултата.

Захвалност дугујем и докторанду, асистенту Душану Арсићу на техничкој помоћи.

Захвалност дугујем и фирми "ДЛС Специјални Системи" која ми је омогућила извођење обимног експерименталног дела приказаног у овом раду и тиме допринела надам се његовом квалитету.

Најзад, захвалност дугујем својој породици која ми је одувек била највећа подршка.

У Крагујевцу, 05.07.2020.

Филип Димитријевић

Резиме

Предмет овог рада јесте термичка обрада и њена примена код легираних челика и челичних ливова за побољшање. У раду је истакнут значај правилног избора режима термичке обраде, као и промене које настају њеном применом. Детаљно су објашњени процеси извођења поступака термичке обраде, као и утицај који имају на легиране челике за побољшање. Првенствено се мисли на измену својстава и фазне промене које се одвијају у чврстом стању. Оне доводе до промене структуре и најважнијих механичких карактеристика. На крају рада је приказан и избор најпогоднијег режима термичке обраде челичног лива G42CrMo4 и челика 42CrMo4.

Кључне речи: термичка обрада, отпуштање, побољшање, легирани челици, челични ливови, ливење.

Abstract

Subject of this paper is heat treatment and its application on alloyed Q + T steels and steel castings. 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 detail and its influence on alloyed Q + T steels. -Primarily the change of properties and physical changes occurring in solid state are considered, both of which are leading to structural changes and modifications of crucial mechanical characteristics. The paper gives procedure for selecting optimal heat treatment of steel cast G42CrMo4 and alloyed Q+T steel 42CrMo4.

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

1. Увод

Метали и легуре представљају најважније 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, као и могућност рециклаже. Међутим, стални развој технике захтева даље побољшање особина метала и легура, при чему се најчешће мисли на повећање затезне јачине (односно напона течења и динамичке издржљивости) и тврдоће, мада се све више намеће и потреба за металима и легурама који поседују специјалне особине, као што су рад на повишеним и сниженим темпратурама.

Термичком обрадом могу се знатно побољшати све механичке особине, а нарочито најважније од њих као што су напон течења и динамичка издржљивост према којима се и одређују вредности допуштених радних напрезања. Што су напон течења и динамичка издржљивост веће, то су и 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 у материјалу.

Термичка обрада је данас један од врло важних елемената технолошког процеса у великом броју металуршких предузећа, машиноградњи, индустрији мотора, производњи алата и тсл. 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 лежајева подвргава се процесу термичке обраде. 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 метали и њихове легуре, обухвата такође велики број производа 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 особина 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 овог мастер рада су објашњени најважнији видови термичке обраде, како теоријски, тако и на конкретним примерима.

2. Термичка обрада челика

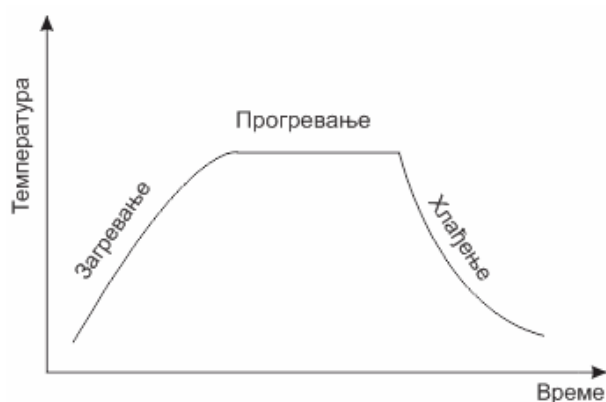
Својства и понашање метала и легура у производним процесима и у току експлоатације зависе од састава, структуре, начина прераде и термичке обраде којој могу бити подвргнути. Важна механичка својства, као што су затезна јачина, напон течења, тврдоћа, жилавост и пластичност могу се побољшати на следеће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

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

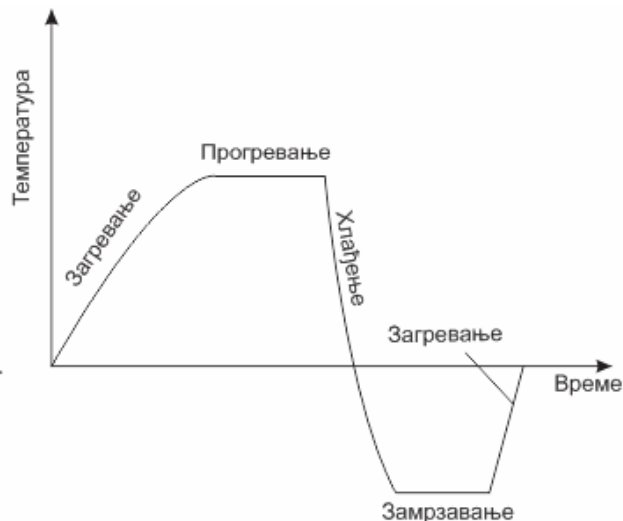
Термичка обрада се дефинише као операција или комбинација операција које се састоје из загревања и хлађења метала и легура у чврстом стању на начин који треба да осигура постизање одређених структурних промена, односно промена особина.

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 његово добијање и примена. 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 почело крајем XIX века што је довело до великог напретка у измени својстава метала и легура. Научна дисциплина Физичка металургија се може сматрати основом развоја и примене 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 и легура (фазни дијаграми, правило полуге, Гибсово правило фаза, Фикови закони дифузије и тсл.).

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" или тзв. субнулти третман) и поново загрева до собне температуре (слика 2.2).



Слика 2.1 Ток термичке обраде



Слика 2.2 Ток термичке обраде са хлађењем испод 0°C

Да би могла да се изазове промена почетне структуре метала/легура која је пре извођења термичке обраде била у стању равнотеже, при загревању ових легура долази до фазне трансформације, тј. преображаја у чврстом стању. Како се већина трансформација не одвија тренутно, већ је потребно одређено време, то се кроз регулисане услове хлађења може обезбедити:

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

У зависности од трансформације и брзине промена 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 велико одступање од стања које даје равнотежни метастабилни дијаграм стања (Fe-Fe₃C). Разлог је у брзини тих промена при загревању и посебно при хлађењу. Те промене није могуће пратити према равнотежном дијаграму, већ помоћу одговарајућих трансформационих дијаграма (тзв. ARA/KN односно IRA/TTT дијаграми).

Могућа је и таква термичка обрада код које при држању на одговарајућој температури долази до засићења површина метала или легура другом компонентом која са основним

металом гради чврсти раствор, односно интермедијатну фазу, чиме се битно мењају особине у површинском слоју метала или легуре.

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).

Табела 2.1 Критичне температуре термичке обраде челика

ОЗНАКА	ДЕФИНИЦИЈА
A ₀	Температура (T=210°C) при којој магнетични Fe ₃ C прелази у немагнетични.
A _{C1}	Температура почетка еутектоидне промене ферита и цементита у аустенит при загревању.
A _{C3}	Температура завршетка промене ферита у аустенит при загревању подеутектоидних челика.
A _{Cm}	Температура завршетка растварања секундарног цементита у аустениту при загревању надеутектоидних челика
A _{r1}	Температура завршетка еутектоидне промене аустенита у ферит и цементит при хлађењу.
A _{r3}	Температура почетка промене аустенита у ферит при хлађењу подеутектоидних челика.
A _{rCm}	Температура почетка издвајања секундарног цементита из аустенита при хлађењу надеутектоидних челика.
M _s , M _f	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

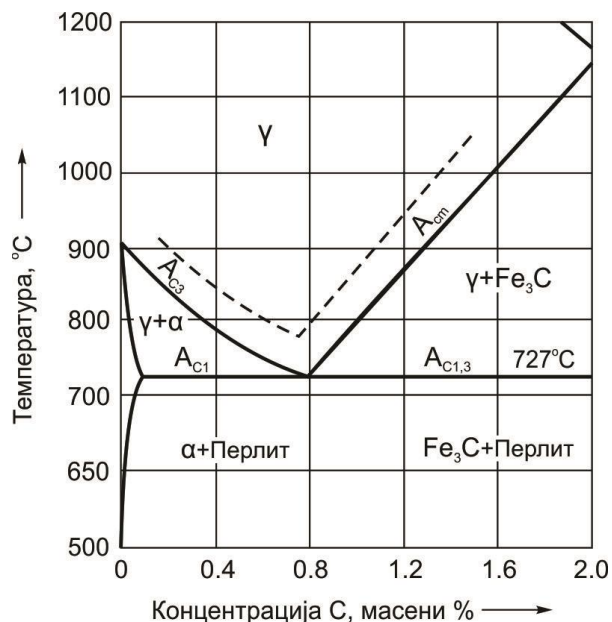
Жарење је вид термичке обраде која почиње загревањем радних предмета до одређених повишених температура, држања на тој температури, а завршава се спорим хлађењем (најчешће у пећи). Тиме се мање-више успоставља структурна равнотежа која је поремећена неком врстом претходне термичке обраде (механичке обраде 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).

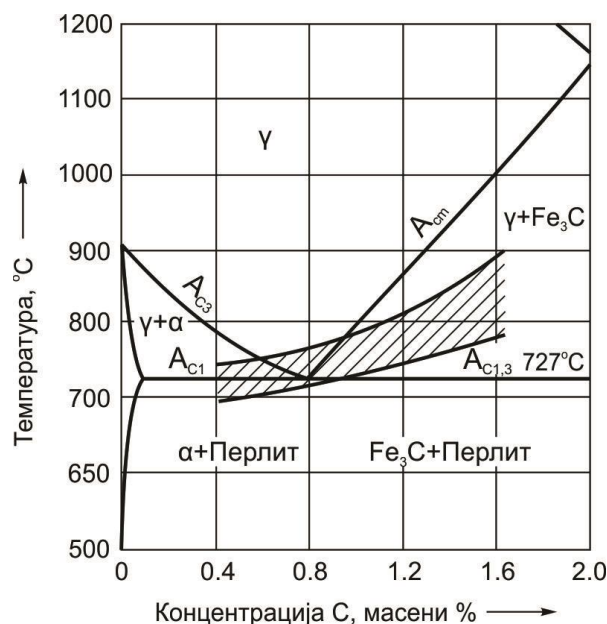
Дифузионо (хомогенизационо) жарење заснива се на загревању челика до високо аустенитног подручја, чак близу солидус линије, дуготрајном прогревању на тој температури и спором хлађењу; примењује се углавном за челичне одливке или инготе да би се смањила неједнородност хемијског састава изазвана микросегрегацијом 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 ваљаоници, није потребна посебна термичка обрада, јер се они при вишеструком топлом ваљању (на $\approx 1200^{\circ}\text{C}$), 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 надеутектоидне 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 ваљаонички 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

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.



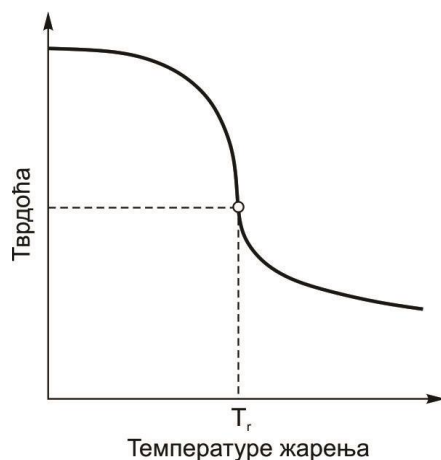
Слика 2.4 Температурска област загревања за меко жарење

Потпуно жарење се заснива на загревању челика до аустенитног подручја, око 30-50°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°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°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 узорака 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 дебелини радног предмета.

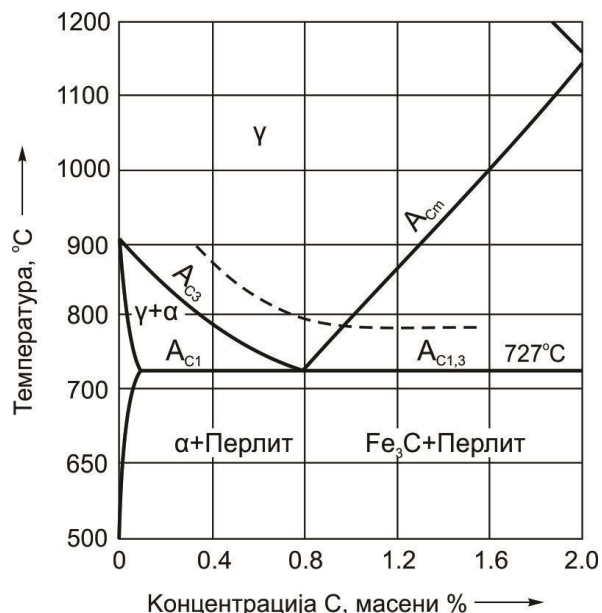
Жарење за отпуштање напона доводи до смањења сопствених напона који настају у току прераде метала, а не дејством спољашњих сила и момената. Ниво заосталих сопствених напона у одливцима може бити толики да се одливак преломи чак и при непажљивој манипулацији у току транспорта. Заостали напони код заварених спојева могу створити прслине 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 у циљу отпуштања напона при температури 500-600°C, а заварене спојеве при температури око 650°C, уз веома споро загревање и прогревање сразмерно дебелини (2-5 min по mm дебелине), а хладити два пута спорије од загревања.

После хладне пластичне прераде 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 у потпуности 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.

2.1.2 Каљење челика

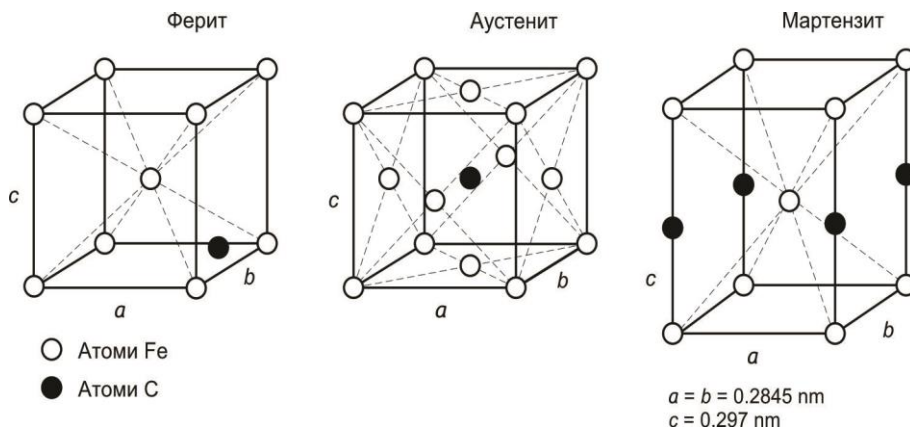
Каљење челика је термичка обрада која се изводи загревањем радног предмета изнад температуре A_{C3} , за подеутектоидне и $A_{C1,3}$ за надеутектоидне челике (слика 2.6), прогревањем на тој температури и хлађењем брзином већом од критичне. Код закаљивих угљеничних челика ($C > 0.25\%$) горња критична 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 (----)

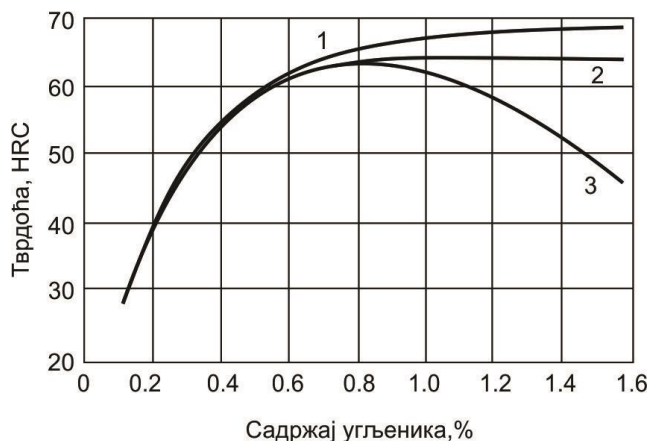
Код већине челика брзина хлађења потребна за каљење постиже се потапањем предмета у воду или уље. Веће брзине хлађења него у води остварују се у воденим растворима соли или база, а нешто мања брзина у кречном млеку. Изузетно велике брзине хлађења постижу се прскањем делова воденим млазевима, а веома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

Тврдоћа мартензита зависи од садржаја угљеника раствореног у аустениту који после каљења прелази у мартензит (слика 2.8).



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

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.

Каљење може бити:

- 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 делу термичке обраде који се односи на побољшање.

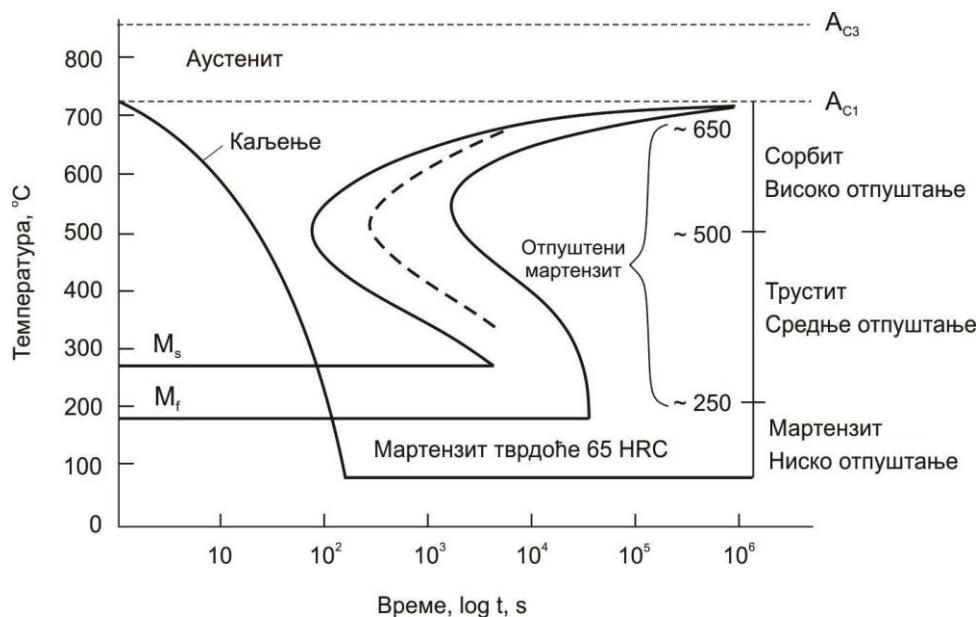
2.1.3 Отпуштање

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 (код угљеничних челика).

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

Ближа објашњења о поступцима отпуштања биће у делу термичке обраде побољшања.

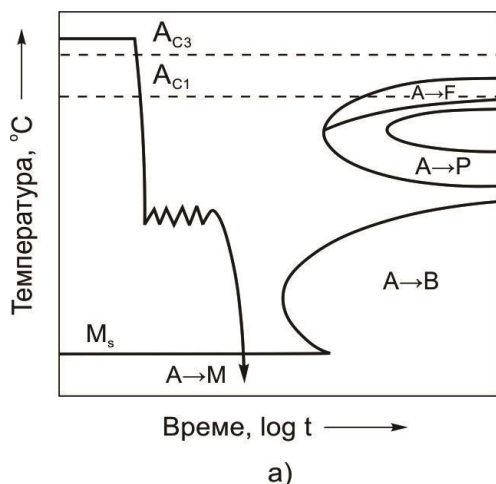
2.1.4 Термомеханичка обрада (ТМО) и реаустенитизација

Термомеханичка обрада (ТМО)

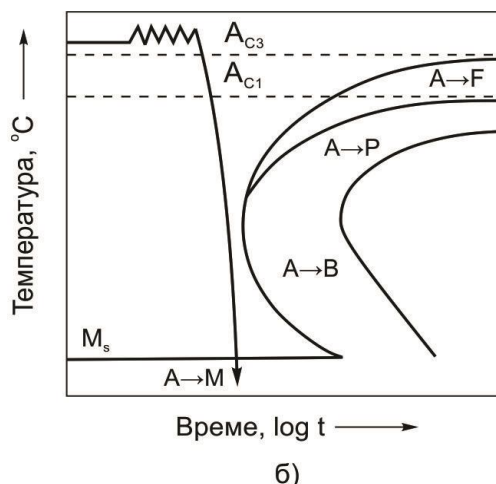
Последњих година у неким индустријски развијеним земљама знатна пажња се посвећује изради нисколегираних и средњелегираних конструкционих челика, тзв. термомеханички обрађених челика (ТМО). Данас се производе две врсте ТМО челика: високотемпературски и нискотемпературски.

Нискотемпературска ТМО (слика 2.10) се заснива на аустенитизацији челика изнад температуре $A_{с3}$, 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 $A_{с3}$, наставља се ваљањем при тој температури, а затим следи потхлађивање, односно мартензитна трансформација и евентуално ниско отпуштање. На крају се постиже јачина од чак невероватних 2500 МПа.



Слика 2.10 Шема
нискотемпературске
термомеханичке обраде (НТМО)



Слика 2.11 Шема
високотемпературске
термомеханичке обраде (ВТМО)

Реаустенинизација

Реаустенинизација 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).

2.1.5 Хемијско - термичка обрада (ХТО)

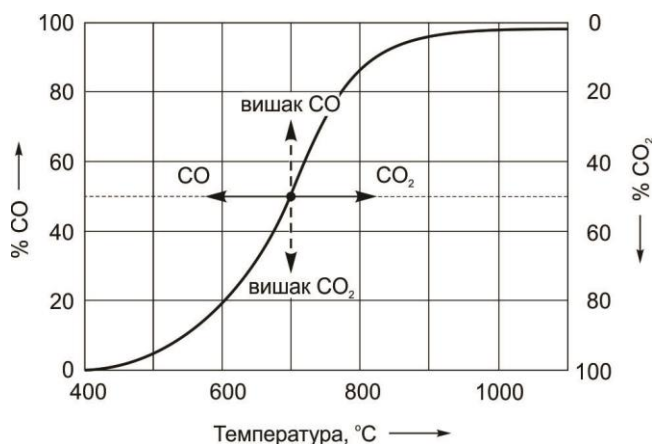
У пракси се често тражи велика тврдоћа и чврстина површинских слојева радног предмета, а истовремено и довољна жилавост језгра. Каљени делови испуњавају захтеве у погледу тврдоће, али у целини остају крти; отпуштањем се повећава жилавост, али опада тврдоћа и јачина. Захтев за високу тврдоћу површине 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 обогаћених 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 $A_{с3}$ (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 нитридима 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, бризгальке 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 отворнут слој од 40 μm, испод којег је слој ферита обогаћен азотом на дубини ~ 1 mm.

Остали начини површинске заштите и отврдњавања - 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:

Алитирање 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 HNO₃. 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 (Na₂B₄O₇) при 930-950°C. Дубина отворнутог слоја је 0.10-0.20 mm, а тврдоћа

достиге 1800-2000 НВ. Борирањем се постиже висока отпорност на хабање и корозију, што је битно за опрему у петрохемији.

2.1.6 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**.

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 издржљивост 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.

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.

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 2.2.

Табела 2.2 Време загревања и прогревања угљеничних челика

Величина попречног пресека радног дела у mm^2	Време загревања и прогревања при каљењу, min			
	пламена пећ		растоп соли	
	загревање	прогревање	загревање	прогревање
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%.

2.2 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).

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 дужином 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 дужином 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.

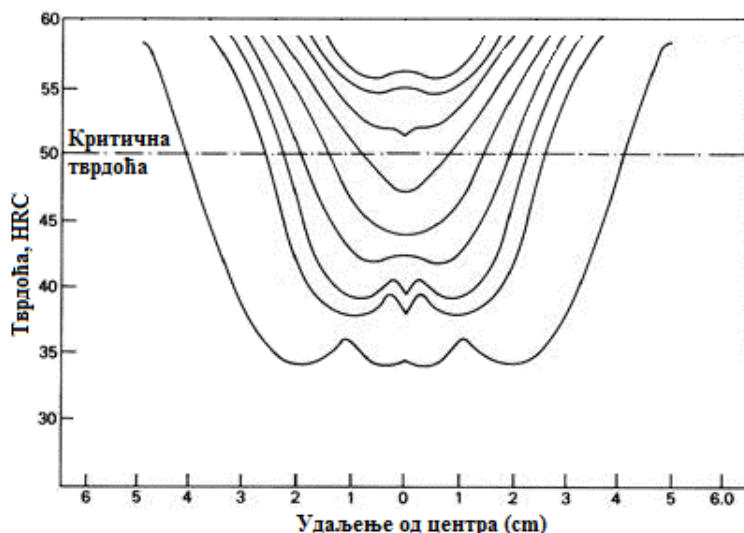
2.2.1 Методе одређивања дубине каљења

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 2.13). Ова тврдоћа се назива критична тврдоћа, а пречник штапа у чијем се центру постигла критична тврдоћа назива се критични пречник D_k , односно D_n . 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 моћ хлађења, односно $H=\infty$. Практично се хлађење у води или сланој води са интензивном циркулацијом приближава идеалном хлађењу. Реална средства за каљење имају вредности H од 0.02 до 12 (дате у табели 2.3).



Слика 2.13 Приказ одређивања дубине каљења по Гросману

Табела 2.3 Вредности средстава за каљење (H)

Начин хлађења	Моћ хлађења различитих средстава за хлађење, H			
	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 H -није сасвим коректно пошто одвођење топлоте, а тиме и сама H -вредност зависе од температуре. На интензитет хлађења утичу осим тога и облик и димензије дела. Одавде произлази да се при свим

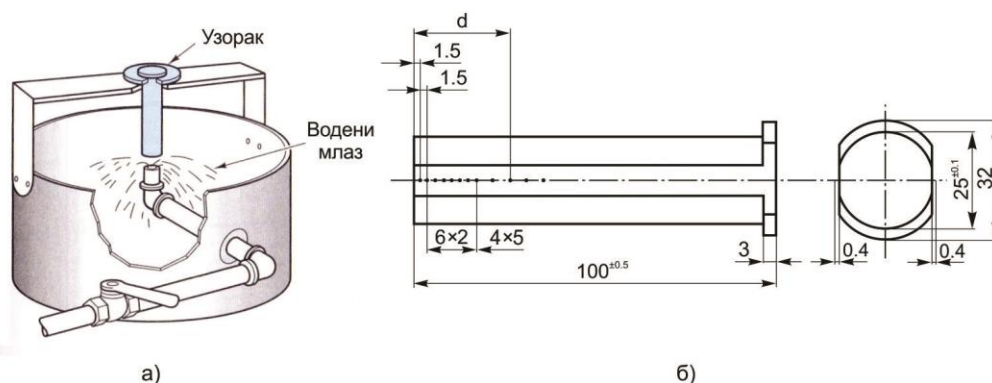
прорачунима H-вредности могу добити само оријентациони подаци који се морају проверити експериментом.

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

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 2.14) 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 закаљени узорак 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 изводи 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 2.14 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:

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

За легиране челике основни пречник D_c одређује се помоћу зависности датих у табели 2.4.

Табела 2.4 Вредности пречника D_c за легиране челике

Величина зрна по ASTM-у	Вредности 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. 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.

$$D_I = 1.75 L_I - \text{за мале пречнике (до 25 mm)}$$

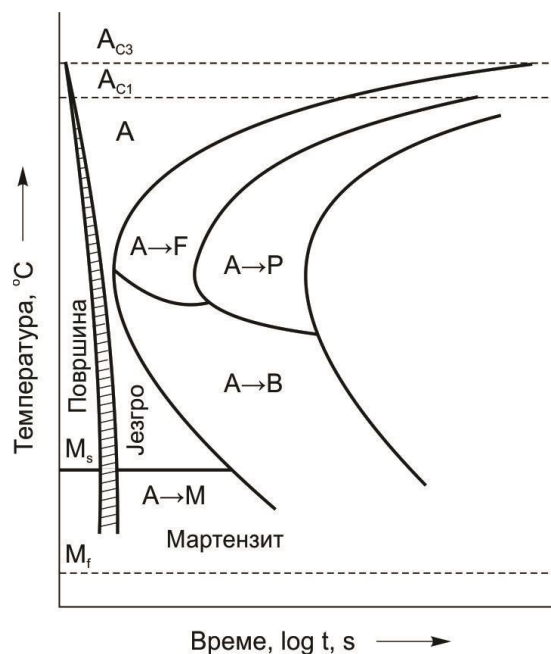
$$D_I = 1.377 L_I - \text{за веће пречнике}$$

2.3 Начини каљења

У наставку су описане најважније врсте каљења.

2.3.1 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 2.15).

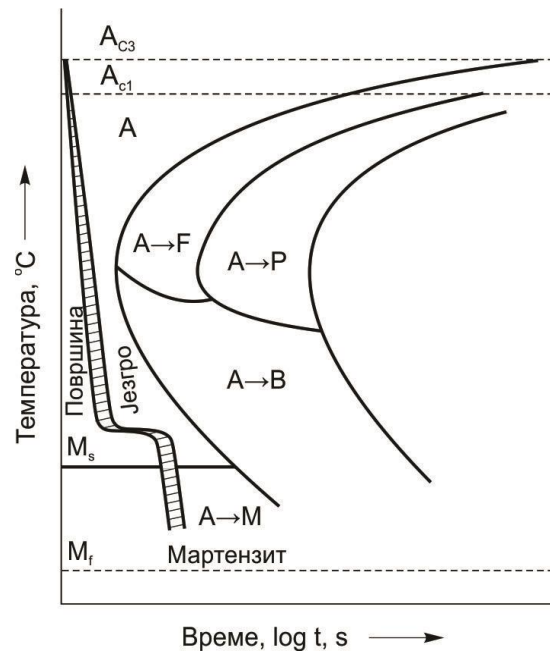


Слика 2.15 Мартензитно каљење-континуално

2.3.2 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 2.16). На овај се начин код добро прокаљивих челика смањују заостали

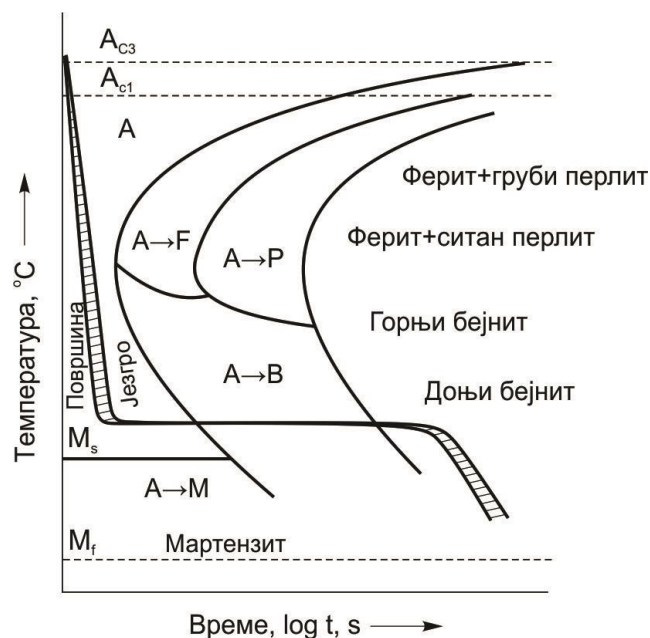
структурни напони, а елиминишу термички напони. Овај начин каљења није погодан за дебеле пресеке и слабо прокаљиве челике, јер може доћи до трансформације аустенита у бејнит или перлит, ако се радни предмет благовремено не извади из соног купатила.



Слика 2.16 Мартензитно каљење-степенасто

2.3.3 Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг)

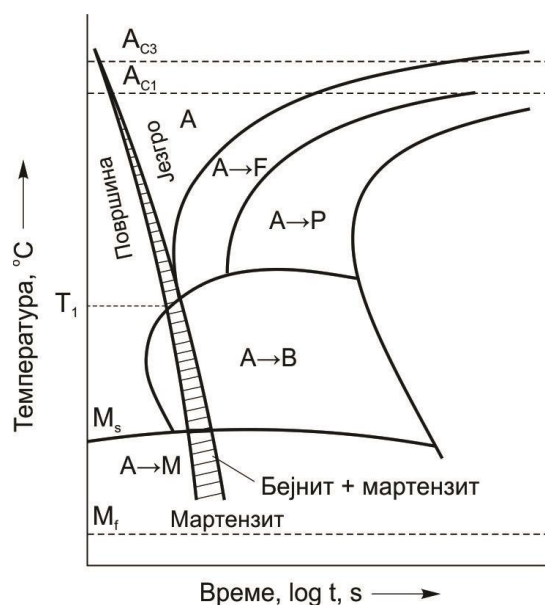
Прецизније се назива каљење са изотермичким преображајем потхлађеног аустенита. Део се после аустенитизације убацује у купатило константне температуре (250-350°C) и у њему задржава све до потпуног преображаја потхлађеног аустенита у бејнит. После тога наставља се хлађење произвољном брзином, било у води, 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 средишњим слојевима потхлађени аустенит се може трансформисати у фини перлит (око 550°C) тј. изнад B_s-температуре (слика 2.17).



Слика 2.17 Бејнитно каљење: изотермичко (аустемперинг)

2.3.4 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 2.18.



Слика 2.18 Бејнитно каљење-континуално

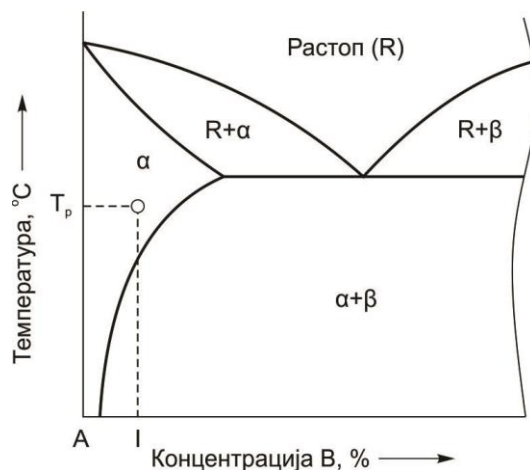
2.3.5 Прекидно каљење

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 димензионална одступања.

2.3.6 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 2.19); 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 2.19 Равнотежни дијаграм са ограниченом растворљивошћу елемента В у елементу А

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.

2.3.7 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 је 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 легирани алатни челици, а такође и неки конструкциони (нарочито легирани 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 2.5 приказане су особине структурних састојака система Fe-C.

Табела 2.5 Особине структурних састојака система Fe-C

Састојци, ознака	Густина, g/cm^3	R_m , МПа	A ₅ , %	Тврдоћа, НВ
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

2.3.8 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:

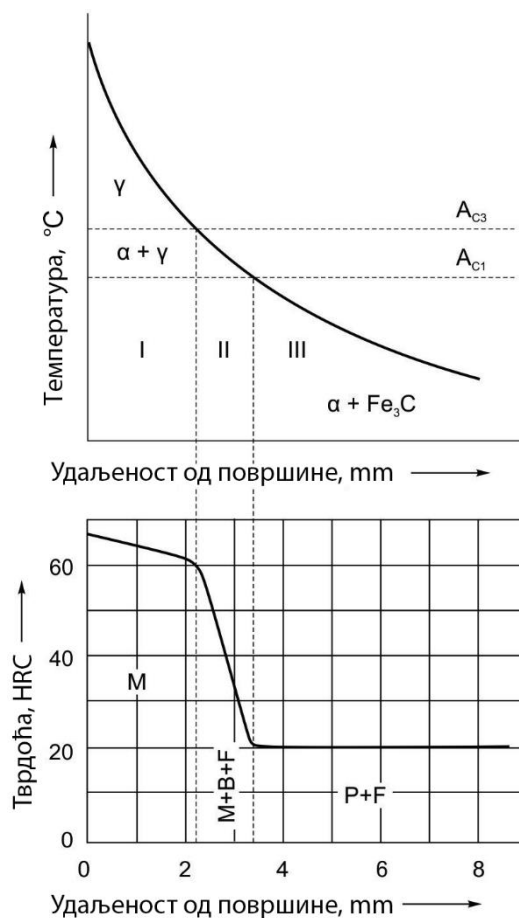
- велика отпорност на хабање,
- повећана отпорност на ударно оптерећење и
- висока отпорност на замор при цикличним оптерећењима.

У пракси се користе следећи видови површинског каљења:

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

2.3.8.1 Пламено површинско каљење

Изводи се углавном помоћу редукујућег окси-ацетиленског пламена. При загревању температура и тврдоћа опадају по дубини комада (слика 2.20).



Слика 2.20 Расподела температуре и тврдоће на различитим удаљеностима од каљене површине

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

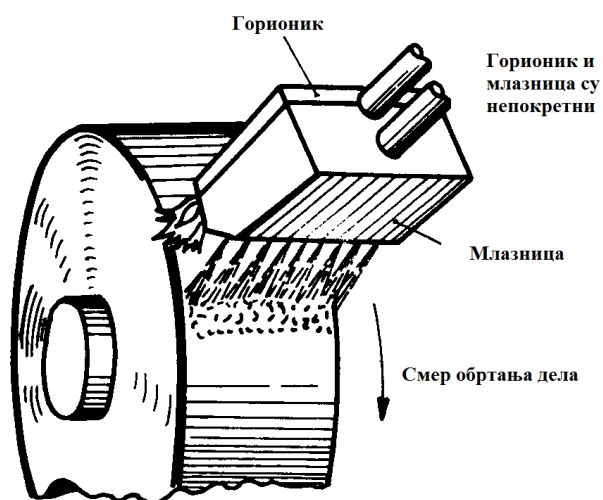
Зона II $\rightarrow A_{C1} < T < A_{C3} \Rightarrow M + P$

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

Углавном се површински кале челици са 0.30-0.50% 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 $\approx 150^\circ C$.

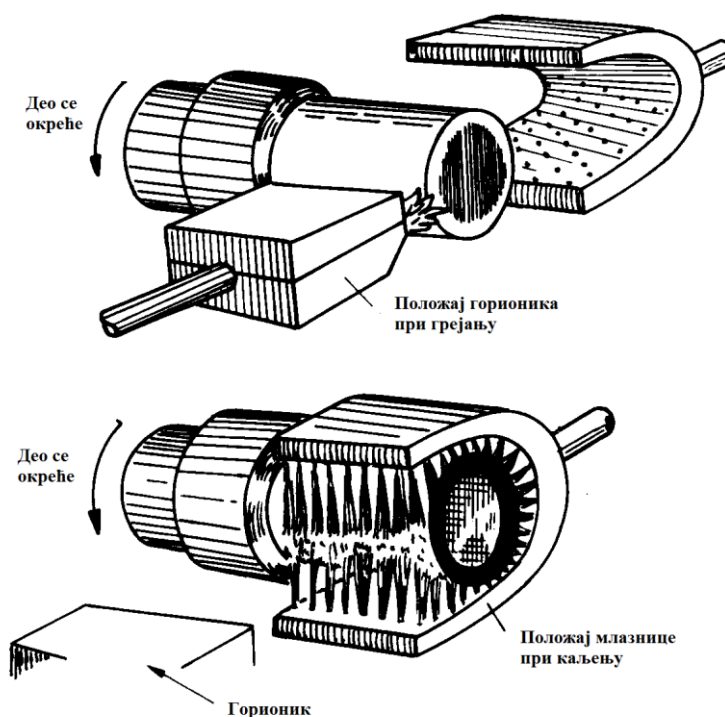
Поступно каљење - загревање површине делова до температуре каљења и хлађење одвијају се поступно један део површине за другим, тако да се све своди на понављање истих елементарних операција. Релативна брзина горионика је 50-500 mm/min. Код равних плоча горионик се креће праволинијски, а за њим водена млазница под углом од 15-45° у односу

на каљену површину. Код великих ваљкастих површина горионик и распршивач су непомични, а радни део се обрће (слика 2.21). На граничној дубини где се завршава каљени слој ствара се меки венац, слично као у подеоној равни код одливка или отковка.



Слика 2.21 Пример површинског каљења цилиндричне површине-поступно каљење

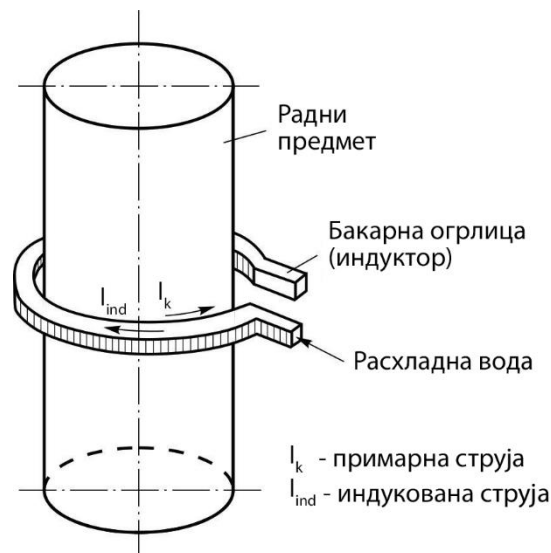
Каљење изједна - површина целог комада или њен део се загрева до температуре каљења, а затим се комад хлади у кади или прскањем (слика 2.22). При томе горионик и предмет могу бити у миру или у релативном кретању.



Слика 2.22 Пример површинског каљења цилиндричне површине-каљење изједна

2.3.8.2 Индукционо површинско каљење

Загревање се изводи уношењем челичног дела у брзо променљиво електромагнетно поље (слика 2.23). У њему се индукују вртложне наизменичне струје, исте фреквенције као и побудна струја (f). Обично се кале челици са 0.40-0.50% C, а каљењем се добија тврдоћа 55-60 HRC. Дубина загревања остварује се Џуловим 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 2.23 Индуктор за површинско индукционо каљење

2.3.8.3 Напредне технологије

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

2.4 Отпуштање

Већ је споменуто 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% C, 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.

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

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 дебљине) 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 тел.

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 2.6 приказане су упоредне карактеристике челика после жарења, каљења и отпуштања.

Табела 2.6 Упоредне карактеристике челика после жарења, каљења и отпуштања

Термичка обрада	R_m , MPa	$R_{p0.2}$, 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°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 570-920 K),

M = 15.6 - 5.6% C,

t - време отпуштања (1-24 h) и

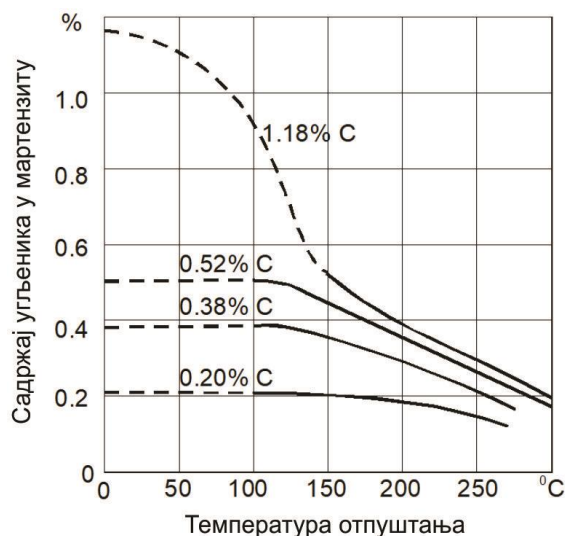
C - садржај угљеника у челику.

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.

2.4.1 Промена мартензита у току отпуштања угљеничних челика

При загревању мартензита до 80°C не запажају се никакве промене. Оне ће настати у температурском интервалу 80-200°C (150°C). Тада се вишак угљеника излучује из чврстог раствора у облику субмикроскопских честица карбида ϵ променљивог стехиометријског састава од Fe₂C до Fe₃C (имају густо паковану хексагоналну кристалну решетку). Ови ϵ карбиди се излучују на границама мартензитних кристала, посебно на местима веће густине грешака кристалне решетке. Резултат промена је поступно заобљавање тетрагоналне решетке мартензита што доводи до смањења унутрашњих напона решетке а тиме и притискујућих напона који делују на заостали аустенит.

При даљем загревању од 200-300°C (150-350°C), наставља се издвајање карбида ϵ , да би пред крај промене у чврстом раствору остало још око 0.2% C (слика 2.24). Промена степена тетрагоналности мартензита праћена је снижавањем притискујућих напона који делују на заостали аустенит. Захваљујући томе, у овом стадијуму одвија се даља промена заосталог аустенита у регуларни мартензит, иначе започета у претходној фази. Такозвани регуларни мартензит је чврст раствор угљеника у α -гвожђу са субмикроскопски излученим угљеником.

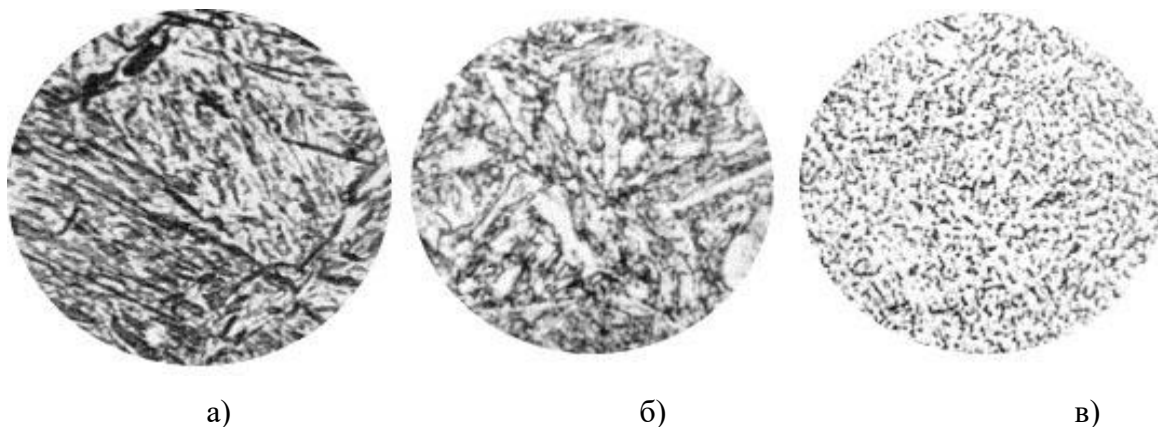


Слика 2.24 Утицај температуре на садржај угљеника у отпуштеном мартензиту

Као резултат промена у прва два стадијума, добија се сложена и неједнородна двофазна структура, делимично пресићеног чврстог раствора угљеника у α -Fe и субмикроскопских карбида ϵ , названа *отпуштеним мартензитом*. На микроскопском снимку отпуштени мартензит има изглед веома близак мартензиту али са светлијим иглицама (мањи садржај угљеника у раствору) и тамнијој основи (промена заосталог аустенита у регуларни мартензит). Тврдоћа отпуштеног мартензита (500-600 НВ), зависи од температуре отпуштања, састава челика, као и удела противуречних процеса: издвајање карбида ϵ праћено је смањењем унутрашњег напона решетке падом тврдоће, а преображај заосталог аустенита у регуларни мартензит повећава тврдоћу.

У трећем стадијуму отпуштања 300-400°C наставља се излучивање карбида ϵ и његов преображај у субмикроскопске честице цементита ($\epsilon \rightarrow Fe_xC \rightarrow Fe_3C$). Осим тога долази до директног стварања клица цементита. Као резултат ових процеса најзад се елиминише пресићење чврстог раствора те се на температури око 400°C постиже равнотежни садржај угљеника, а степен тетрагоналности се приближава јединици ($c/a \approx 1$). На тај начин мартензит се преображава у смешу ферита и цементита. Изглед и величина карбидних честица ($\sim 0.3 \mu m$) се мењају приближавајући се сфероидалном (лоптастом) облику. Као резултат тога добија се структура високоотпуштеног мартензита (отпуштени трустит) састављена из веома ситних куглица цементита у феритној основи.

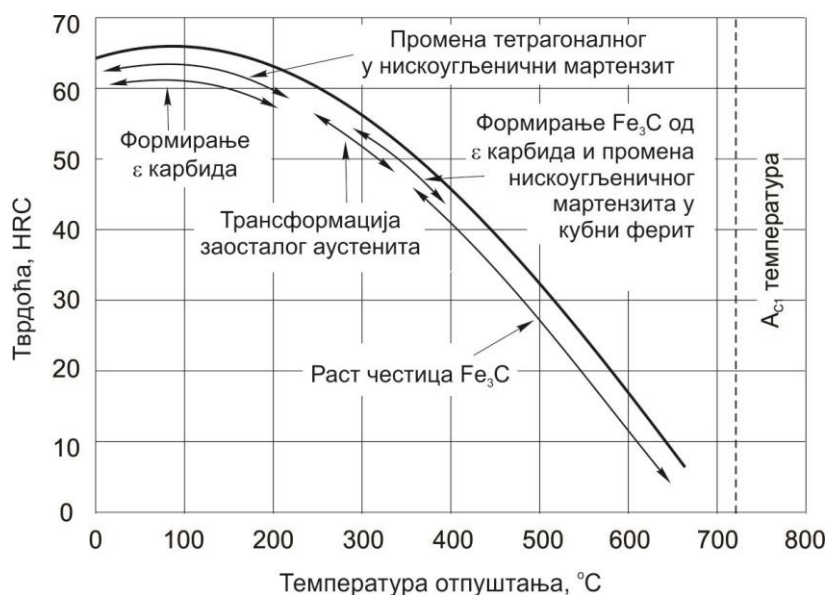
На слици 2.25 је приказана микроструктура мартензита и отупштеног мартензита.



Слика 2.25 Микроструктура мартензита: а) мартензит, б) отпунуштени мартензит и в) високо отпунуштени мартензит

Најзад, у стадијуму IV, који одговара интервалу од 400°C до температуре A_{C1} , најпре настаје даља сфероидизација субмикроскопских преципитата цементита који попримају облик куглице. Порастом температуре до 600°C ситне куглице се међусобно повезују образујући веће (реда величине $3-30 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$). Изнад 600°C цементит се излучује у микроскопској величини, што је праћено порастом феритних зрна.

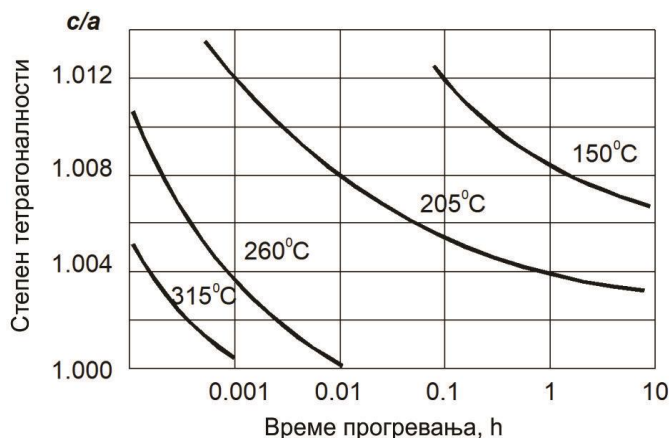
На слици 2.26 су приказани напред наведени стадијуми по којима се одвија процес разлагања неравнотежних структура при отпуштању челика.



Слика 2.26 Промена тврдоће и структуре при отпуштању угљеничног еутектоидног челика

Различите специфичне запремине мартензита и аустенита чине да у току отпуштања мартензита настају димензионалне промене челика што омогућава да се оне прате дилатометријским методама. При томе се одвијају противречни процеси: излучивање угљеника из пресићеног раствора изазива смањење специфичне запремине, а преображај заосталог аустенита у мартензит - повећање специфичне запремине; као резултат тих процеса настаје промена линеарних димензија челичних предмета.

Наведени температурски интервали појединих стадијума преображаја имају оријентациони карактер. У стварности је то континуални процес где се поједине фазе делимично прекривају. Осим тога, поред температуре, битан чинилац је и време прогревања. Дуготрајно прогревање на нижим температурама може довести до већег разлагања мартензита, него краткотрајно деловање више температуре (слика 2.27). Према неким изворима, ипак је температура далеко важнија променљива, те се време жарења може усвојити као параметар који се усваја према температури отпуштања (нпр. за $250^{\circ}\text{C} \rightarrow 0.5 \text{ h}$).



Слика 2.27 Утицај температуре и времена отпуштања на степен тетрагоналности мартензита

Пошто пораст температуре отпуштања обично доводи до повећања дуктилности то ће доћи до пада јачине и тврдоће. Зато се горња температура отпуштања ограничава. На пример, конструкциони угљенични и нисколегирани алатни челици којима је неопходна висока тврдоћа да би били отпорни на хабање обично се отпуштају испод 250°C .

2.4.2 Мартензитна промена при отпуштању легираних челика

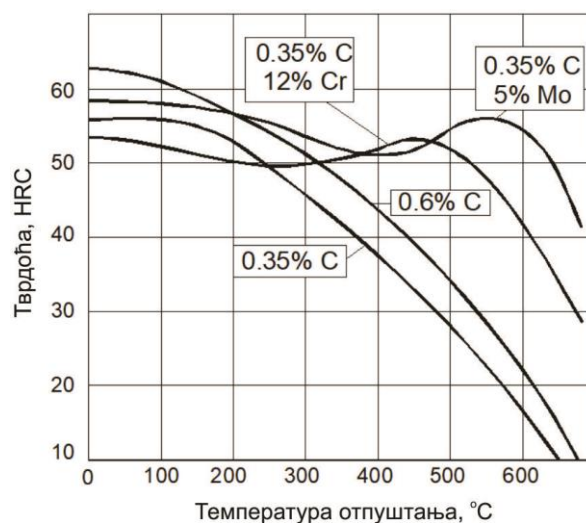
Легирајући елементи такође утичу како на температурски интервал преображаја мартензита (M_s - M_f), тако и на настале продукте. Мења се кинетика аустенитне трансформације при хлађењу после наваривања и долази до отпуштања. Сви легирајући елементи, осим кобалта, померају удесно криву почетка промене аустенита, 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 Si. 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 омогућавају образовање карбида настаје управо изнад 400°C.

Неки вишеструко легирани челици (са Cr, Mo, W или Ti), не омекшавају све до близу температуре A_1 . После отпуштања при 500-600°C показују пораст тврдоће (слика 2.28), што се објашњава растварањем цементита и преципитацијом тврдих легираних карбида. Ова појава запажена је код неких високолегираних челика и позната је као секундарно отврдњавање. Легирани карбиди су изузетно стабилни, спречавају пораст и коагулацију зрна металне основе и највише доприносе одржавању чврстине ($R_{p0.2}$, R_m) ових челика на високим температурама.



Слика 2.28 Промена тврдоће неких челика у зависности од температуре отпуштања

2.4.3 Отпусна кртост легираних челика

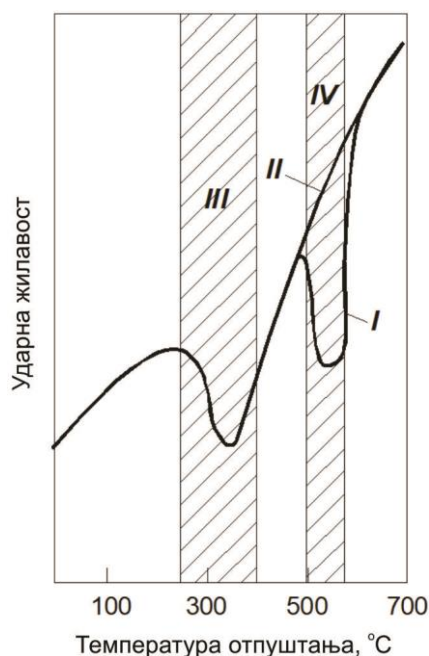
При отпуштању неких челика легираних са Cr-Mn или Cr-Ni, запажена је штетна појава тзв. **отпусна кртост** која је последица пораста тврдоће, пада жилавости и истегљивости. Самим тим, треба избегавати отпуштање са температуре на којој се ови процеси одвијају. Ако се ипак отпуштање изводи са виших температура 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 јесте 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% P), 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 P, Mn и Si допринети да се склоност ка отпусној кртости умањи. У пракси је тешко и скупо произвести челике са само 0.015% P, док би велико смањење Mn имало друге неповољне последице. Сегрегација P се спречава увођењем Mo 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.

Отпуштање неких легираних челика (при 250-400°C и 500-550°C) доводи до смањења ударне жилавости, тј. до појаве отпусне кртости. Две врсте отпусне кртости се могу запазити код легираних челика (слика 2.29). 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.



Слика 2.29 Зависност ударне жилавости челика од температуре жарења и одговарајуће брзине хлађења; I- споро хлађење, II- брзо хлађење, III- температурски интервал неповратне кртости, IV- температурски интервал повратне кртости

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 крност

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 отпуштања. 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 Mn, Si или Cr, или када су Cr и Ni или Mn 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 по границама металних 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.

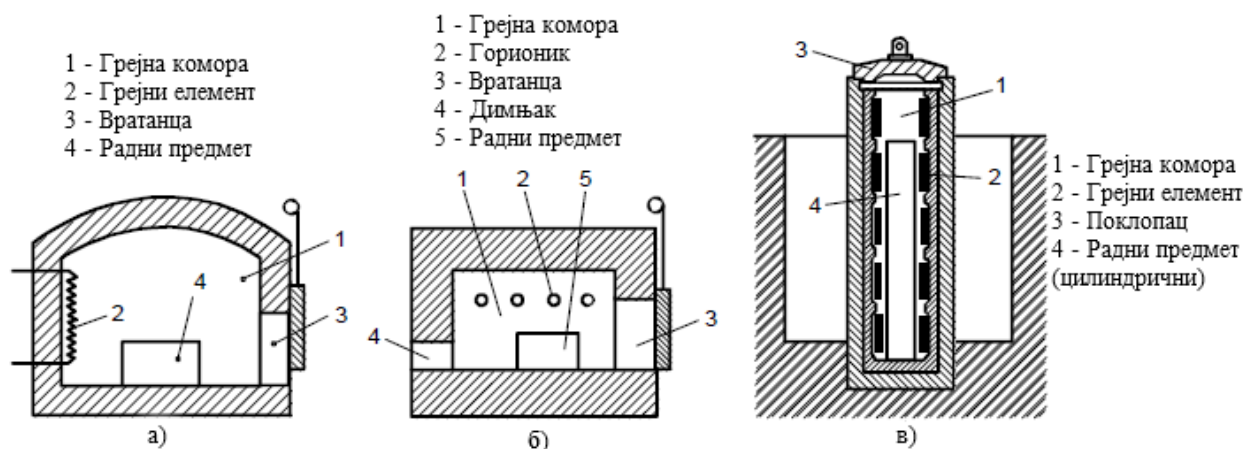
3. Пећи и расхладна средства за термичку обраду

3.1 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 вакуумским 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:

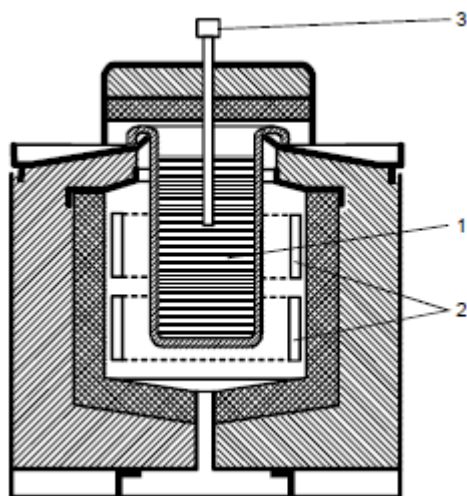
- коморне (слика 3.1а,б),
- јамске (слика 3.1в) и
- сона и метална купатила (слика 3.2).



Слика 3.1 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 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 3.2 Метално купатило: 1 - течан метал, 2 - грејачи, 3 – термометар
На брзину загревања, а и хлађења утиче и начин паковања делова у пећи (слика 3.3).

Начин паковања	n	Начин паковања	n
	1		1
	1		1.4
	2		4
	1.4		2.2
	1.3		2
	1.7		1.8

Слика 3.3 Утицај начина паковања на време загревања

На слици 3.4 су дати примери паковања делова у пракси.



Слика 3.4 Примери паковања делова за ТО

На слици 3.5 су приказани купатило и пећ за термичку обраду.



Слика 3.5 Купатило и пећ за ТО

3.2 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°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% NaNO_3 + 50% 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.

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 течност 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.

3.2.1 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.

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

Постигнута брзина хлађења при каљењу зависи и од стања површине делова 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 делова 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.

4. Сопствени напони и грешке при каљењу

4.1 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 4.1). 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:

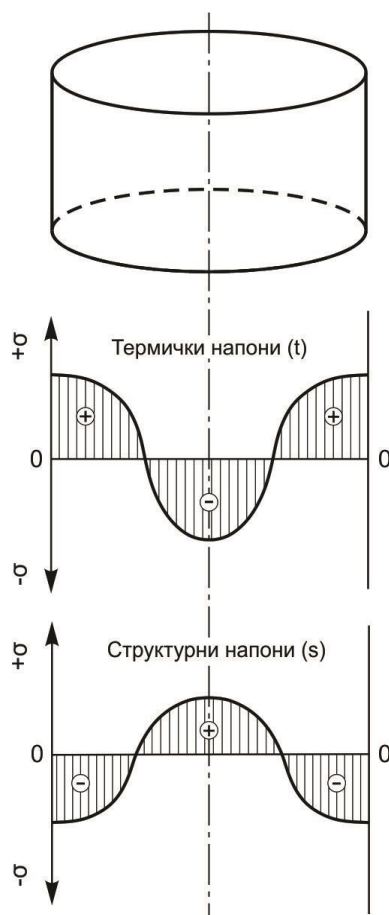
$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \text{ MPa},$$

где је:

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

α - коефицијент линеарног ширења, m/mK и

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



Слика 4.1 Шема расподеле термичких и структурних напона у каљеном челичном ваљку

Појаву структурних напона треба довести у везу са чињеницом да се у низу случајева не може остварити истоветна структура по читавом пресеку окаљеног дела. С 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 и
- прскања у току самог каљења (кад је $\sigma > R_m$ или када се машинском обрадом поремети равнотежно стање).

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

Прегревање се јавља при загревању на температури $T \gg A_{C3}$ или због предугог држања на датој температури, при чему се добија грубозрнасти (крупнозрнасти) аустенит. При брзом хлађењу у температурској области ($A_{C3}-A_{C1}$) настаје неповољна Видманштетенова 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 делова 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 као неповратан губитак. Разугљенисавањем: $C + O_2 = CO_2$ настаје феритна структура у површинским слојевима и смањује се тврдоћа и отпорност на хабање.

4.2 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 напона на затезање на површини и напона на притисак у унутрашњим слојевима. Када се површина потпуно охлади унутрашњи слојеви се још увек скупљају, али њихово скупљање је отежано, јер га спољашњи, потпуно охлађени слој омета. Услед овога ће напрезање у спољним и унутрашњим слојевима променити знак, па ће се по завршеном хлађењу на површини појавити напони на притисак, а у унутрашњости напони на затезање. Напони изазвани појавом температурског градијента по пресеку комада називају се *термички напони*.

Када при брзом хлађењу челика долази и до одређених структурних промена, то се поред термичких, јављају и *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);
- неуједначеном одвијању 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 0.40% 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 јачине неизбежна је појава прслина.

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 унутрашњи напони већи;
- величина зрна: што је зрно веће, то су и напони већи, па су у вези с 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, већи су унутрашњи напони 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 напоне на затезање, то ће у случају да се споља додају напони истог знака, затезна јачина бити мања од номиналне за испитивани челик. Супротно томе,

заостали напони на притисак подижу вредност затезне јачине, јер се један део споља додатих напона на затезање поништава са већ присутним напонима на притисак. Знатни унутрашњи напони који се јављају после каљења морају бити отклоњени како не би изазвали изненадни и превремени лом челичних делова у раду.

Отпуштање челика представља неопходно и ефикасно средство за смањење напона заосталих после каљења. При отпуштању долази: до повећања пластичности, што ствара могућност за прелазак еластичних деформација у пластичне, чиме се смањује величина унутрашњих напона; до структурних трансформација праћених запреминским променама што такође води ка смањењу напона. Међутим, неравномерно загревање и хлађење при отпуштању могу да изазову нове напоне; тако, хлађење у води челика са 0.20% C, отпуштеног на 650°C, ствара напоне једнаке напонима изазваним каљењем.

У другим случајевима прераде метала на топло, изузев каљења, када је циљ уклањање унутрашњих напона примењује се тзв. жарење ради уклањања унутрашњих напона.

На слици 4.2 је приказан случај из праксе, где је услед великих унутрашњих напона дошло до појаве прелина после каљења у неконтролисаним и неодговарајућим условима.

Конкретни разлози појаве ових прелина на масивним одговорним деловима су:

- пећ која је коришћена није у могућности да истовремено хомогено прогреје четири оваква дела (није коришћена одговарајућа пећ);
- делови су били нешто сложеније геометрије, јер имају нагле промене попречног пресека (концентраторе) које је било неопходно заоблити одговарајућим радијусом како би се спречила појава прелина на тим местима (није било потребе да припремак буде сложене геометрије, а није био ни довољно велики радијус на прелазима);
- како је у питању отковак од челика Š4732 (нисколегирани челик за побољшање) и како је маса једног дела износила око 20 kg било је неопходно делове хладити у најмање 200 l уља. Како није било могућности да се испуни тај услов, делови су хлађени у 200 l воде (дакле, није коришћено одговарајуће средство за хлађење, нити потребна количина).



Слика 4.2 Прслине после каљења

5. Основни појмови о челичним ливовима и челицима за побољшање и њихово ливење у пешчаним калупима

5.1 Челици за побољшање

5.1.1 Уводне напомене о челицима

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

Добијање челика се своди на рафинацију белог сировог гвожђа добијеног у високој пећи и додавању феро-легура. Бело сирово гвожђе за прераду у челик садржи до 4% C, 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).

5.1.2 Легирани челици

Легирани челици осим угљеника (и примеса, Si и Mn) садрже и друге легирајуће елементе, који се додају у циљу побољшања захтеваних својстава. 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 јачини, виши напон течења, већа термостойаност 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 и тсл.

5.1.3 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 својстава јачине, посебно напона 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.

Угљенични челици за побољшање су челици са садржајем угљеника 0.30 - 0.50%. 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, Č16301, Č16302, Č16303, Č1630, Č1631, Č1730, Č1731.

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 имају повишену чврстоћу и употребљавају се за одговорније делове (коленаста вратила, осовине, зупчанике, завртње), а челици Č4131, Č4134, 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 јачине и напона течења, добру жилавост и високу вредност динамичке издржљивости, па се користе за израду делова који су јако оптерећени наизменично променљивим оптерећењима.

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, горенаведеним 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 хромни 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 прокаливности и јачине, док ванадијум спречава пораст 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 обраде. Како би конструктор могао да одреди својства јачине која може да се очекује од примењеног челика, потребне су му оријентационе вредности тврдоће. Врло често

¹ У раду су приказане ознаке челика по старом JUS стандарду будући да су оне још у употреби у нашој земљи и окружењу. За анализирани челик и челични лив у глави 6 су приказане и ознаке по важећем стандарду EN 10027-1.

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 јачину тј. најбољу обрадивост 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 анализа 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 дела који треба обрадити како би се постигла могућност униформног побољшања по пресеку.

5.2 Челични ливови

Челични ливови су легуре гвожђа са угљеником (до 2.11% C), које се лију у сувим пешчаним калупима. Одливци од челичног лива разликују се од отковака по томе што имају грубозрнасту (дендритну) структуру која се може накнадно поправити само термичким обрадама са фазним променама у чврстом стању (што поскупљује процес добијања квалитетних одливака), јер се по правилу, одливци се не могу прерађивати деформисањем.

Према хемијском саставу разликују се:

- Угљенични конструкциони челични ливови: (0.10-0.60% C и збирног садржаја Cr, Ni и Mo испод 0.80%); ово су легуре, феритно-перлитне структуре
- Легирани челични ливови: садрже (0.1-2)% C и бар један легирајући елемент више од: 1% Mn, 0.6% Si, 0.3% Cr, 0.3% Ni, 0.1% Mo, 0.1% V и 0.3% Cu. Структура и особине легираних челичних ливова зависе од садржаја угљеника и горенаведених елемената. С обзиром на то да се у челичним одливцима одмах после ливења добија грубозрнаста структура, потребно их је накнадно жарити (880-950°C) и затим споро охладити у пећи. Ова термичка обрада доводи и до отпуштања напона. Челични одливци се каткад подвргавају и хемијско-термичкој обради: цементацији, нитрирању, а затим каљењу и отпуштању.

У поређењу са ливеним гвожђем, челични лив има веће ливачко скупљање (1.6-2.1%), вишу температуру ливења (1600-1700°C), а лије се само у сувим пешчаним калупима. Због мање течљивости, уливни систем и појила морају имати веће попречне пресеке него за ливено гвожђе. Пластичност и жилавост челичног лива нешто је нижа него код ковног челика истог састава, јер одливак има дендритну структуру (разгранате кристале) и знатну сегрегацију сумпора, фосфора и делом Видманштетенову структуру (феритне иглице настале при трансформацији грубих аустенитних зрна - прегрејане аустенитне (γ) структуре).

Оптималан однос напона течења ($R_{p0.2}$) према јачини на кидање (R_m) код челичних одливака добија се при 0.25-0.45% C, те се стога за ливење највише користи средњеугљенични челични лив. Мада се ливкост повећава са порастом садржаја угљеника, мана је одливка од челичног лива то што дебљина зида одливка знатно утиче на пластичност и жилавост, које опадају са порастом дебљине одливка. Особине челичног лива зависе и од

врсте пећи у којој се растоп припрема, јер то утиче на садржај нечистоћа (P и S) у одливку. Стога се уз ознаку челичног лива, понекад додаје и начин топљења који може бити:

- растоп из електричне пећи или Сименс-Мартенове пећи базичне облоге,
- растоп из електричне пећи или Сименс-Мартенове пећи киселе облоге и
- растоп из конвертора.

Средњеугљенични челични лив се највише употребљава за израду кућишта машина, за рамове преса, за ливење зупчастих венаца итд.

Нискоугљенични челични лив (0.10-0.25% C) се користи за незнатно оптерећене одливке, као што су: кућишта електромотора, делови вагона (мазалице, кућишта опруга, одбојници између вагона), делови бродова (сидра, кормила). Ситнији одливци често се цементирају, а затим кале и отпуштају да им се повећа тврдоћа, односно отпорност на хабање.

Високоугљенични челични лив налази примену за делове изложене хабању и ударном оптерећењу као што су нпр. ваљци, радни делови дробилица за камен, погонски зупчаници у цементарама, железарским ваљаоницама и тсл.

Од наведених челичних ливова нискоугљенични челични ливови се могу заваривати без посебних мера, док су остали ливови условно заварљиви; то значи да је неопходно предгревање, а понекад и текућа као и завршна термичка обрада (догревање, жарчење).

5.3 Уводне напомене о ливењу

Како је машински део који је коришћен за испитивања добијен ливењем у песку, у даљем тексту су дате само основе ливења.

Иако је ливење једна од најстаријих производних технологија, она је и данас, са извесним модификацијама, готово остала непромењена (калуп, истопљен метал/лив, кристализација).

Најпре се припрема калупна шупљина (форма), па метал топи у пећи и најзад насипа у ту празнину која је по облику и димензијама копија предмета који се израђује. Из горе наведеног произлази да се ливени предмети или одливци добијају директним очвршћивањем растопљеног метала у одговарајућој шупљини (форми). Ливачки калуп као целина у ствари је посуда, чија унутрашњост по облику и димензијама верно одсликава предмет који ће се излити. У данашње време се пре израде калупа прави копија – модел - употребног предмета; за израду модела могу се користити: дрво, пластика, метал или други погодни материјали. При изради калупа (калуповању), модел се поставља у шасију (рам, оквир) која се обично назива калупна кутија или калупник. У простор између модела и зидова калупника насипа се и сабија калупна смеша; њу чине добро измешани кварцни песак, везивно средство (глина) и вода. Пошто се калуповање заврши и изради уливни систем, модел се вади из калупа.

Разликујемо у зависности од врсте калупа као и од начина уливања течног метала у калуп:

- ливење у пешчаним калупима,
- кокилно ливење,
- гравитационо ливење,
- сифонско ливење,
- мешовито ливење (одоздо па одозго),
- центрифугално ливење,
- ливење под притиском.
- прецизно ливење и тсл.

Сви методи израде одливака разликују се:

- По начину како се у калупну шупљину доводи течан метал (гравитацијом = слободним падом, под притиском, вакуумски),
- Према стању ливачке легуре која може бити: 100% течна, > 50% течна - остало кристална (зависно од температуре прегревања лива (T_p) изнад ликвидус температуре (T_l) ($T_p = T_l + 60-160^\circ\text{C}$)) и
- По калупној шупљини која може бити испуњена ваздухом, неутралним гасом, пенастим полимерима или пак вакуумска.

Гравитационо ливење може се изводити у калупима за једнократну употребу (пешчани калупи) или у трајним калупима за вишеструку употребу (метални калупи = кокиле).

При ливењу под притиском или у вакууму, користе се искључиво трајни-метални калупи (кокиле).

У пешчаним калупима, који се после сваког ливења разбијају да би се извадио изливени предмет (одливак), израђује се око 75-90% одливака од легура гвожђа и 10-20% одливака од нежелезних метала. Највећи број одливака нежелезних метала (80-90%) производи се у кокилама (гравитационо и под притиском), а одливци од легура гвожђа лију се у кокилама у много мањем обиму (10% од укупног броја одливака по правилу од темпер лива).

Поступак се састоји из:

- Израде модела од дрвета, глине, гипса, цемента, воска, металних легура (Pb, Sn, Al, Cu и Fe), полимерних материјала;
- Израде ливачких калупа и језгара;
- Топљења ливачког метала и изливања у калуп;

- Вађења очврслих одливака из калупа, избијања језгра, одсецања очврслог метала у уливном систему, чишћења и по потреби завршне обраде одливака (термичка обрада, пескарење, брушење и тсл.).

У зависности од материјала одливка разликују се:

- Ливачке легуре гвожђа:
 - Сиви лив (SL),
 - Нодуларни лив (NL),
 - Црни темпер лив (CTeL) и
 - Вермикуларни (компактни) лив (VL).
- Челични лив (ČL) и
- Ливачке легуре нежелезних метала (углавном алуминијума, бакра, цинка, магнезијума и других метала).

5.3.1 Ливачке особине метала

Израда ливених предмета може да буде економична, а одливци задовољавајућег квалитета само ако се користе легуре које имају термофизичке особине погодне за ливење. Скуп тих особина изражава се појмом *ливкост*. Реч је о сложеној технолошкој особини, будући да она не зависи само од врсте лива, већ и од ливачког калупа. У ливачке особине самог лива спадају: *топливост, течљивост, растворљивост гасова у течном металу, сегрегација неких састојака, промена запремине при загревању и хлађењу* и друге особине које утичу на понашање метала при топљењу, самом наливању и очвршћивању (кристализацији).

5.3.1.1 Топљивост

Топљивост је способност метала и легура да при загревању мирно пређу из чврстог стања у течно и да при томе образују хомоген растоп. Пожељно је да легуре мењају агрегатно стање без претераног прштања и стварања гасних мехурова уз невелику промену почетног хемијског састава и чистоте. Топљивост се, кад је реч о легурама, најчешће процењује према температури топљења, температурском интервалу очвршћивања и количини топлоте потребне за топљење. Увек се разматра понашање растопа које се односи на апсорпцију гасова, оксидацију, појаву неметалних укључака, на узајамно деловање појединих састојака легуре, на њихову реакцију са зидовима пећи при високим и повишеним температурама, као и на испаравање и сегрегацију тј. локалну промену хемијског састава легуре. Према температури топљења и ливења, разликују се:

- метали и легуре са високом температуром топљења (легура титана, гвожђа и никла),
- метали и легуре са средњом температуром топљења (легура бакра) и

- метали и легуре са ниском температуром топљења (легуре алуминијума, магнезијума, цинка, олова и калаја).

Уопштено говорећи важи правило да, у одређеном бинарном систему, најбољу ливкост имају легуре блиске еутектичком саставу, а то су у најчешће коришћеним бинарним системима (Fe-C, Cu-Sn, Al-Si), легуре са најнижом температуром топљења (T_l), специфичном топлотом (c_p) и латентном топлотом топљења (r). Легуре блиске еутектичком саставу имају најбољу ливкост, не само што се одликују најнижом T_l , c_p и r , већ и малом разликом између ликвидус и солидус температуре.

5.3.1.2 Течљивост и ливкост

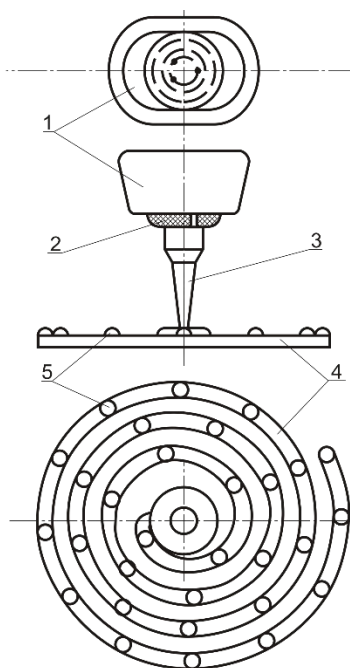
Течљивост (ϕ) растопљених метала и легура дефинише се као реципрочна вредност динамичке вискозности, тј. отпора, односно унутрашњег трења, које се јавља при релативном кретању једног слоја течности у односу на други ($\phi = 1/\eta$).

Из табеле 5.1 се види да динамичка вискозност (η) неких течних метала, има на довољно високој температури, релативно ниску вредност; при томе се течљивост растопљених метала може рангирати упоређујући их са вискозитетом воде. Према овом мерилу, највећу течљивост има калај, а затим сиви лив и др.

Табела 5.1 Вискозност неких растопљених метала и H_2O

Материјал	Температура, °C	Динамичка вискозност, (η), kg/ms (Pa·s)
Чисто гвожђе	1600	0.0040
Угљенични челик	1555	0.0026
Сиви лив	1250	0.0021
Бакар	1200	0.0032
Алуминијум	800	0.0027
Цинк	500	0.0037
Калај	300	0.0017
Вода	20	0.0010

Течљивост метала и легура расте са температуром прегревања лива, тј. загревања легуре изнад ликвидус температуре, а при температури између ликвидуса и солидуса течљивост нагло опада. Процењује се да течење лива престаје када се између ликвидуса и солидуса појави око 20-25% кристала чврсте фазе. За ливачку праксу је пре свега значајна течљивост измерена при температури ливења, тј. 100-160°C изнад ликвидуса. Ливкост такође утиче на способност лива (растопљеног метала) да попуни најудаљеније делове ливачког калупа. Стандардизована проба ливкости различитих ливачких легура изводи се у спиралном калупу, а мерило ливкости је дужина изливане спирале до тренутка кад престане даље течење. Практично се лив слободним падом насипа у чашу спиралног калупа и мери колика је дужина спирале (слика 5.1). Течење метала успорава се због унутрашњег трења (вискозности), отпора зидова калупа, као и отпора ваздуха и нарочито пада температуре лива у току ливења. Кад ови отпори надмаше хидростатички притисак растопа у уливном левку, онда течење престаје.



1-Левак, 2- Цедиљка, 3- Уливак, 4- Спирала, 5- Брадавице за успоравање лива

Слика 5.1 Шема спиралног калупа за испитивање ливкости

На ливкост, као технолошку особину течних метала, утичу:

- Густина лива, специфична топлота и латентна топлота очвршћивања, јер све наведено зависи од температурског опсега у коме лив остаје у течном стању;
- Хемијски састав легуре одређује температурски опсег кристализације. Најбољу ливкост имају еутектичке легуре и легуре блиске њима;
- Легуре са ширим опсегом очвршћивања имају рђавију ливкост, јер се први кристали у облику дендрита појављују при вишој температури. Хемијски елементи садржани у неким легурама могу да повећају ливкост тако што снижавају ликвидус температуру, као нпр. фосфор (P) у сивом ливеном гвожђу (фосфор одлаже почетак кристализације растопа).
- Вискозност утиче на ливкост, нарочито при ламинарном струјању растопа. При довољно високој температури прегревања лива, утицај вискозности прекривају други фактори;
- Површински напон лива утиче на ливкост само код танкозидних одливака;
- Оксидни филмови и нечистоће лива засићене гасовима, погоршавају ливкост;
- Температура ливења има велики утицај на ливкост будући да утиче на време за које метал остаје у течном стању (за дати калуп и легуру). Ливкост се може побољшати ако се повећа температура ливења. Уобичајено она износи 60-100°C изнад ликвидус температуре дате легуре;

- Брзина струјања растопљеног метала такође утиче на дужину спирале тј. на ливкост. Она се може повећати ако се пројектује већа висина вертикалног уливног левка или пак ако на течан метал делују спољашње силе, као нпр. при ливењу под притиском и центрифугалном ливењу;
- Сам калуп утиче на ливкост својим физичким и хемијским особинама, храпавошћу унутрашњих зидова који су у додиру са течним металом као и брзином одвођења топлоте из растопа. Брзина хлађења одливка највише зависи од коефицијента акумулације топлоте калупа (b_k):

$$b_k = \sqrt{c_k \cdot \rho_k \cdot \lambda_k},$$

где је:

c_k - специфична топлота материјала калупа,

ρ_k - специфична маса (густина) материјала калупа и

λ_k - термичка проводност материјала калупа.

Калуп са малом вредношћу b_k (нпр. песак-глина) одликује се спорим хлађењем течног метала, те се стога одлаже кристализација и добија боља ливкост него нпр. у кокили (веће b_k). На течљивост повољно утиче предгревање калупа пре ливења, као и његово обезваздушење (смањује се b_k).

5.3.2 Пешчани калупи

Одливак се добија очвршћивањем (кристализацијом) лива у калупу. У том смислу, калуп се може сматрати за "посуду" од ватросталног материјала у коју се улива и у којој очвршћава течан метал.

5.3.2.1 Израда пешчаних калупа

Пешчани калуп садржи: уливни систем, одушке за сабијени ваздух и појила која садрже резерву течног метала за надокнаду скупљања лива при хлађењу и очвршћивању. Ако би се користио калуп без појила, скупљање лива у периферним деловима одливка довело би до појаве отворених шупљина (лункера), или грешке познате као недоливеност. Резерва течног метала у појилима треба да износи 5-7% од запремине одливка.

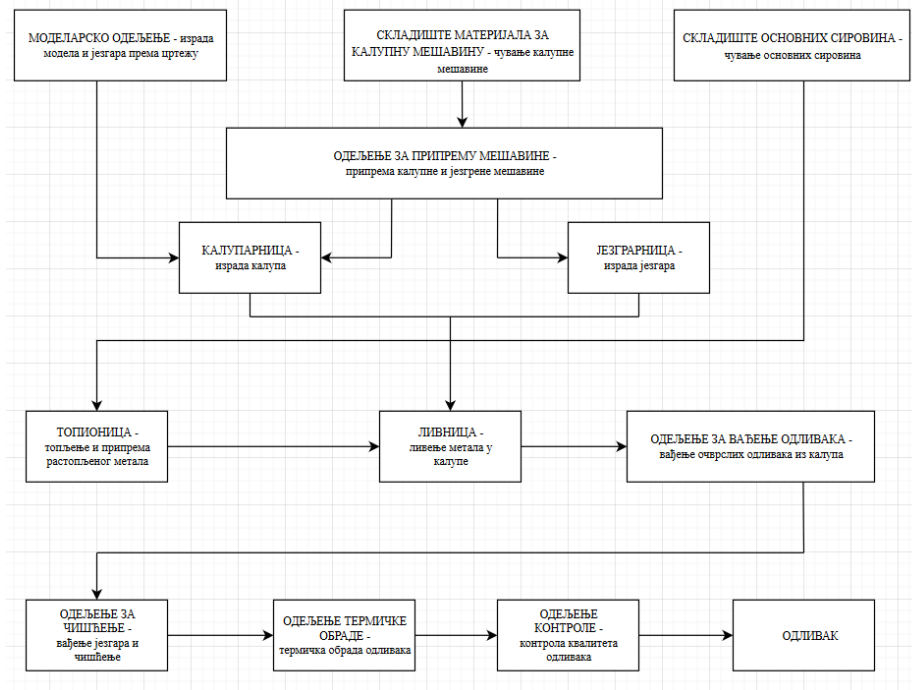
С обзиром на то да се пешчани калуп употребљава за израду само једног одливка, он се зове једнократни калуп.

Пешчани калуп се састоји из три дела:

- Калупне шупљине, тј. дела калупа у који се налива течан метал,
- Зидова калупа, тј. ливачког песка сабијеног између модела и шасије и
- Лица, тј. унутрашњих зидова калупа који су за одређено време, били у директном додиру са течним металом.

Поступак израде пешчаних калупова назива се калуповањем. Калупни материјал се сам по себи не може одупрети деловању сила при ливењу, па је неопходно пешчани калуп правити у одговарајућој призматичној кутији (калупници). Калупна шупљина се може добити применом модела или пак шестарењем помоћу шаблона; у сваком случају калупна шупљина мора бити већа од одливка за величину укупног скупљања. Да би се модел после калуповања, а пре уливања течног метала, могао извадити из калупа, он мора да буде дводелан. Подеона раван калупа бира се тако да постављање модела буде што једноставније, а вађење што лакше, уз минимално преливање метала из одушка. Подеона раван калупа се по правилу поставља дуж највеће осе симетрије одливка.

На слици 5.2 је приказана шема технолошког процеса ливења у пешчане калупе.



Слика 5.2 Шема технолошког процеса ливења у пешчане калупе

5.3.2.2 Сушење калупа и језгара

После израде пешчаних калупа, а пре насипања ливом, калупи и језгра се подвргавају сушењу на повишеним температурама, с циљем да се добије боља пропустљивост за гасове и да порасте чврстина калупа и језгара. Температура сушења зависи од везивног средства коришћеног за калупну и језгрену мешавину. Стога се препоручују следеће температуре сушења:

- 170-220°C за језгра са органским везивима,
- до 325°C за језгра са глином као везивом,
- 200-250°C за калупе од богатог песка,
- 250-400°C за калупе од врло богатог песка и

- 400-600°C за калупе од масе² и иловаче.

Време сушења језгра је у границама од 0.5 до 50 h, у зависности од величине језгра и састава калупне смесе:

- за мала језгра 0.5-2 h,
- за језгра од иловаче 2-3 h и
- за калупе од богатог песка, иловаче или масе 5-50 h.

Велики калупи суше се у поду ливнице, а средњи и мањи калупи, као и језгра уносе се у сушаре. Оне се ложе коксом или каменим угљем, а у новије време се углавном прелази на течна (мазут), односно гасовита горива (пропан, бутан). Такође се коморе могу загревати и помоћу електричне струје, што омогућава прецизну контролу температуре, односно доприноси да температурско поље у пећи буде готово равномерно.

5.4 Преглед ливачких грешака

Грешке које се по завршетку ливења могу открити на одливцима (визуелним прегледом, магнетним флуksom, ултразвучном дефектоскопијом или радиографским методама), разврставају се у две групе:

- Поправљиве (отклоњиве) грешке и
- Непоправљиве (неотклоњиве) грешке.

За поједине класе одливака, технолошки услови дефинишу захтеве које они морају да испуне, да би се сматрали прихватљивим. Овим се условима прописују допуштена димензионална одступања, као и неотклоњиве грешке које одливке сврставају у повратни метални уложак за претапање тј. у шкарт.

5.4.1 Разврставање грешака

Према нама доступним стандардима и литературним подацима, грешке одливака се могу разврстати и симболички означавати на следећи начин.

- Према спољашњем изгледу грешке се сврставају у седам класа:
 - Металне израслине,
 - Шупљине,
 - Нецеловитост (прекид континуитета масе),
 - Површинске грешке,
 - Непотпун одливак,

² Маса за калупе је природна мешавина крупнозрнастог кварцног песка и више од 20% глине. Веома је пластична, али слабо пропустљива за гасове. Употребљава се за велике и сложене одливке.

- Нетачне димензије или облик и
- Укључци и неправилна структура.
- Симболично се грешке цифарски означавају према наредној табели 5.2 која узима у обзир, како врсту лива, тако и метод ливења.

Табела 5.2 Означавање грешака ливења

Челични лив (ČL)	1
Сиви лив (SL)	2
Нодуларни лив (NL)	3
Црни темпер лив (СТeL)	4
Легуре лаких метала	5
Легуре тешких обојених метала	6
Ливење у сировим пешчаним калупима	a
Ливење у сувим калупима	b
Ливење у језгреним калупима	c
Ливење у шкољкама	d
Ливење у шкољкама са керамичком љуском	e
Прецизно ливење	f, g
Ливење у кокилама	h
Ливење под притиском	i
Центрифугално ливење	k
Континуално ливење	l

На слици 5.3 су приказане грешке на одговорном машинском делу који је испитиван у експерименталном делу.



Слика 5.3 Грешке ливења на одговорном делу (тзв "црволика" порозност)

5.5 Поправка одливака са грешкама

Не мора се сваки одливак са видљивом грешком одбацити (шкартирати) као отпад. Неке грешке се могу толерисати, ако не утичу битније на радне особине одливка, а постоје и грешке које се могу отклонити.

На основу последица које грешке могу да изазову разликују се:

- Неотклоњиве или грешке чија је поправка техно-економски неоправдана,
- Отклоњиве грешке, које се могу елиминисати применом додатних мера иако оне нису биле предвиђене технолошком документацијом и
- Поправљиве грешке су оне које се у складу са техничким условима могу умањити или отклонити: исправљањем, заваривањем, импрегнацијом и на неки други начин.

Одливци од ливеног гвожђа могу се поправити применом следећих метода: наношењем двокомпонентних металних китова, заваривањем, наваривањем металним прахом и уградњом коничних завртњева.

Наливање течних метала - заснива се на попуњавању локалне недоливености течним гвожђем. На месту дораде могу се појавити зракасте прслине индуковане знатним термичким и структурним напонима, кад се основни и течан метал знатно разликују по термофизичким особинама.

Гасно наваривање помоћу окси-ацетиленског пламена и шипке ливеног гвожђа као додатним материјалом - Пре наваривања, одливке (нарочито веће масе), треба предгрејати до око 600°C да се умање унутрашњи термички напони. После поправке, одливци се морају споро хладити било у пећи или затрпавањем у суви песак. Метал шава мора бити машински обрадив.

Поправка одливака од LG може се обавити и *заваривачким лемљењем*. Општећено место се изглеби, а затим се празнина попуњава топљењем месингане шипке у окси-ацетиленском пламену. Шав се може машински обрађивати, али је склон електрохемијској корозији, због различитих стандардних електродних потенцијала гвожђа Fe (-0.440 V) и Cu (+0.337 V). Сваки метал који има негативан електродни потенцијал, кородираће кад се изложи дејству електролита (водених раствора киселина, база, соли).

За отклањање грешака може се применити и тзв. *метализација*. Употребљавају се специјални гасни горионици са уграђеним левком који се пуни металним прахом. Захваљујући потпритиску због протока кисеоника кроз комору горионика, прах бива усисан у зону пламена највише температуре где се топи и распршује попуњавајући празнину на одливку.

Поправка неких грешака у одливцима може се извести и *уградњом коничних завртњева* на местима дефеката.

6. Испитивање челичног одливка GČ4732 и челика Č4732 у нормализованом и побољшаном стању

Испитивање се изводило на одговорном машинском делу који трпи велика динамичка оптерећења. Због забране о изношењу документације и коришћењу исте изван фирме, у раду није било могуће приложити техничке цртеже и целокупан изглед испитиваног дела. Сам део је добијен ливењем у песку, после чега је део контролисан визуелно, ултразвучно и пенетрантним течностима, како би се утврдило да ли постоје прслине и друге грешке после ливења. Одливени делови који су прошли контролу након ливења ишли су даље на машинску обраду (тзв. предмеру), затим на термичку обраду, после које се у одређене отворе на одливку пресују чауре и рукавци и најзад се изводи завршна машинска обрада на коначне мере, као и завршна димензионална контрола. Делови с грешкама који нису "прошли" контролу после ливења се даље испитују с циљем уклањања насталих грешака како би се наставио процес израде или одбацују ако се утврди да ће грешке нарушити интегритет дела. У даљем тексту дати су подаци о испитиваном материјалу, такође су приказане одређене фазе израде овог сложеног машинског дела (термичка обрада, пресовање рукаваца и бронзаних чаура, као и отклањање грешака (пре свега прслина после ливења)).

6.1 Карактеристике испитиваног материјала

Карактеристике испитиваног материјала:

- Челик Č4732,
- Полазни пречник: $\varnothing 16 \text{ mm}$,
- Полазна тврдоћа (нормализовано стање): 160 HB,
- Дужина припремка: 170 mm.

У табели 6.1 дат је хемијски састав челика Č4732.

Табела 6.1 Хемијски састав челика Č4732

Легирајући елементи	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	Остали
Садржај, %	0.38-0.45	max 0.40	0.6-0.9	0.9-1.2	0.15-0.30	0.025	0.035	0.00

Ознака челика Č4732 је ознака по домаћем SRPS стандарду. У табели 6.2 је дат преглед ознака према различитим стандардима.

Табела 6.2 Ознаке челика у другим стандардима

SRPS (Србија)	GB (Кина)	DIN (Немачка)	EN	AISI (САД)	AFNOR (Француска)	ГОСТ (Русија)	Равне (Словенија)
Č4732	ML42CrMo	42CrMo4	42CrMo4	4140	42CD4	30ChM	VCMO140

Табела 6.3 Термофизичке особине челика Č4732

Челик	Густина, g/cm^3	Термичка проводност, W/mK	Поасонов коефицијент	Специфична топлота, J/kgK	Тачка топљења, °C
Č4732	7.85	42.7	0.29	477	1432

Табела 6.4 Механичке особине челика Č4732 у зависности од стања испоруке

Термичка обрада	Затезна јачина, 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 6.5.

Табела 6.5 Механичке особине челика Č4732 у побољшаном стању

Дебљина, mm	Затезна јачина, MPa	Напон течења, MPa	Издужење, %	Сужење, %	Енергија лома, J
до 16	1100-1300	900	10	40	30
17-40	1000-1200	750	11	45	35
41-100	900-1100	650	12	50	35
101-160	800-950	550	13	50	35

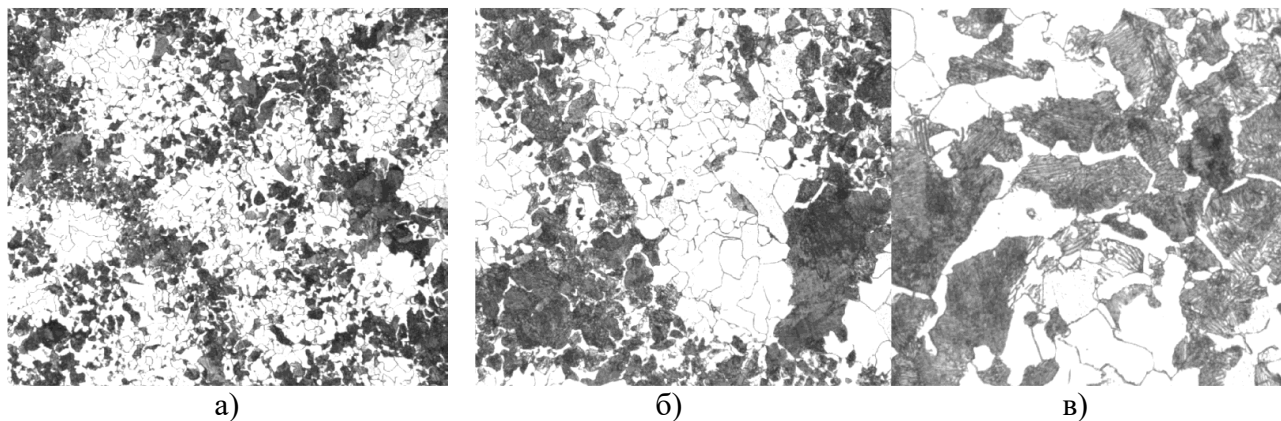
Челик Č4732 је намењен за израду високооптерећених статичких конструкција и динамичких конструкција које раде у условима ударних оптерећења. Примарне области примене су: возила, мотори и машине, вратила, турбине и компоненте турбина, ланци итд. Одликују га повољне механичке особине које се могу поправити термичком обрадом - побољшањем.

У табели 6.6 су дате механичке карактеристике испитиваног челичног лива у нормализованом стању.

Табела 6.6 Механичке особине челичног лива у нормализованом стању

Узорак	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa	A, %	Z, %	Тврдоћа, HB	KV, J (20°C)	KV, J (-20°C)
1	324	566	27	47	160	41	18
2	320	559	24	38	160	38	25
3	329	567	25	45	160	40	22

Како је одговорни део (тзв. Колевка) добијен ливењем, одговарајућом термичком обрадом нормализације, у потпуности је разбијена полазна грубозрнаста ливена структура. Структура испитиваног одливка је после нормализације процењена као феритно-перлитна. Перлит је издвојен у облику грубе мреже по границама примарних аустенитних зрна, док је ферит издвојен унутар зрна. На слици 6.1 је приказана микроструктура нормализованог одливка.

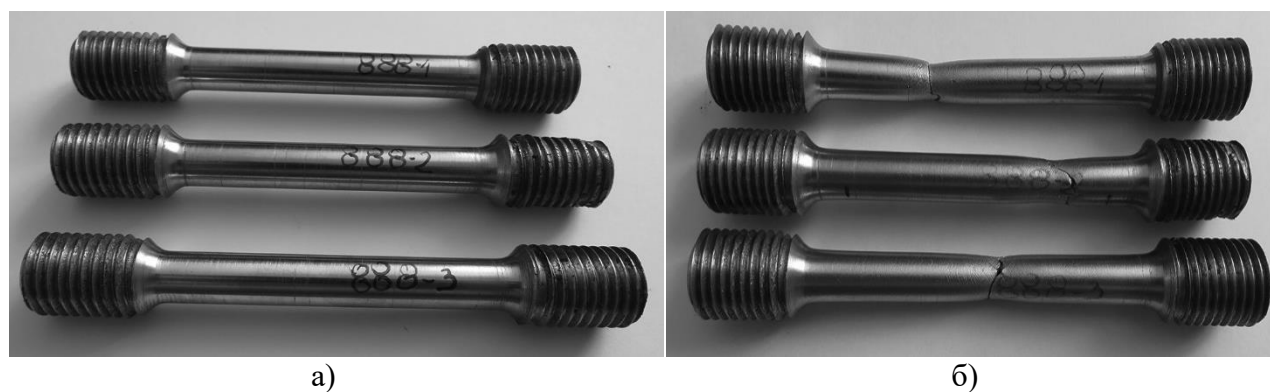


Слика 6.1 Феритно-перлитна микроструктура одливка са различитим степенима увећања:
а) 100×, б) 200× и в) 500×

На сликама 6.2а,б и 6.3а,б су приказани узорци намењени испитивању ударне жилавости и затезању – пре и после испитивања.



Слика 6.2 Узорци за испитивање ударне жилавости: а) пре лома и б) изглед места прелома



Слика 6.3 Узорци за испитивање затезне јачине: а) пре затезања и б) после затезања

Како је после испитивања утврђено да је у нормализованом стању $R_{eH} = 320 \text{ MPa}$, што је знатно више од прописане и пројектоване вредности ($R_{eH} = 230 \text{ MPa}$), даља термичка обрада није извођена, већ је део експлоатисан у нормализованом стању. Разуме се, мисли се на термичку обраду побољшања.

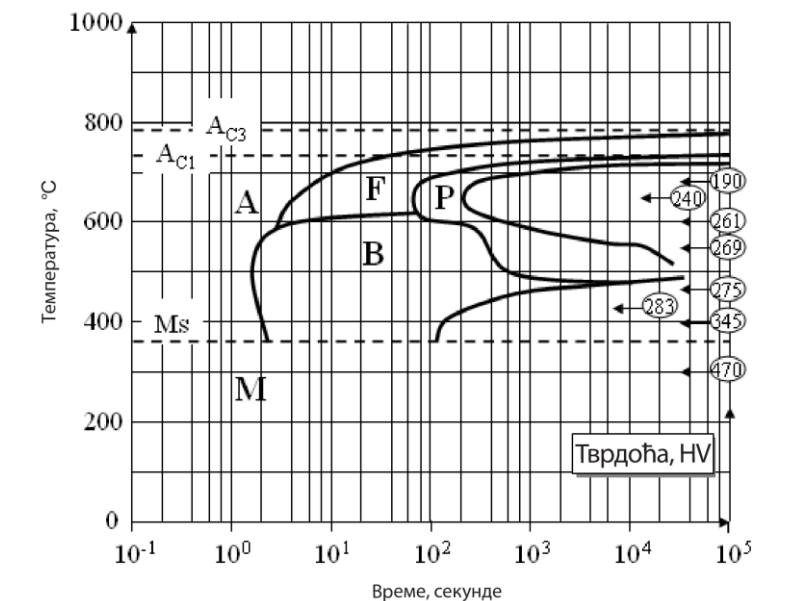
Како би утврдили какве би механичке карактеристике материјала добили после побољшања, спроведен је допунски експеримент у том циљу.

6.2 Термичка обрада побољшања

На испитиваном делу извршена је термичка обрада побољшања (каљење + отпуштање). Циљ експеримента је био да се упореде механичке карактеристике побољшаног материјала и сировог (нормализованог). Експеримент се састојао из припреме полазних комада, термичке обраде материјала, израде узорака (епрувета) на стругу, и затезања узорака на кидалици. Испитивање се изводило на три епрувете у нормализованом стању и шест узорака у побољшаном стању (три средње и три високо отпуштене).

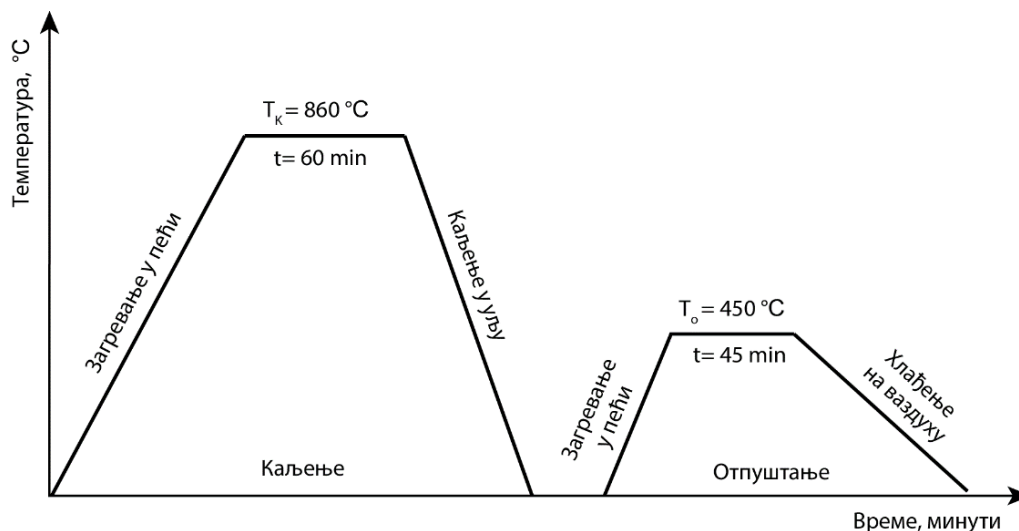
Избор најповољнијег режима термичке обраде разматраног челика је изведен на основу IRA дијаграма за разматрани челик, а циљ термичке обраде је постизање најповољнијих вредности својстава јачине и пластичности.

На слици 6.4 је приказан IRA дијаграм за челик Č4732.



Слика 6.4 IRA дијаграм челика Č4732

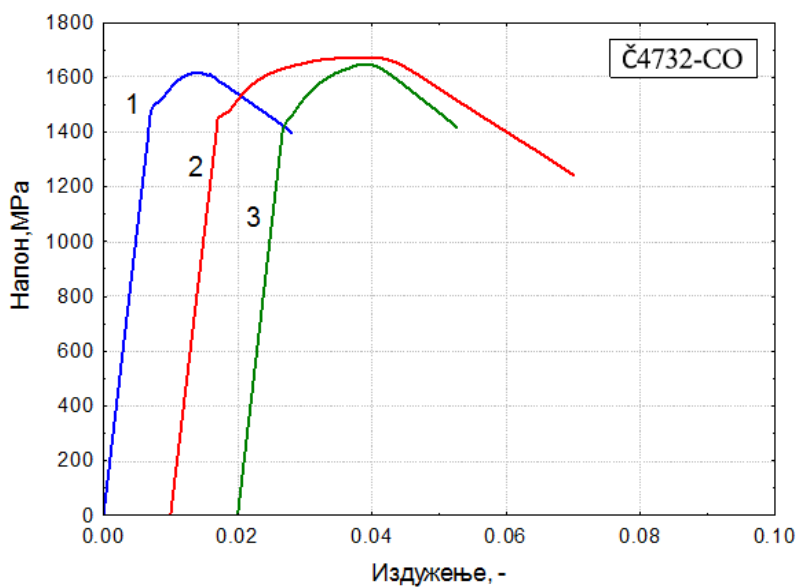
На слици 6.5 је приказан процес термичке обраде са средњим отпуштањем.



Слика 6.5 Ток термичке обраде са средњим отпуштањем

У овом случају термичка обрада се састоји из загревање до температуре аустенитизације за посматрани челик - 860°C, прогревања на тој температури 60 минута како би се део равномерно прогрејао по целом попречном пресеку и брзог хлађења у уљу како би се извршила трансформација аустенита у мартензит. Средње отпуштање је изведено на температури 450°C, део се прогревао на тој температури 45 минута и потом споро хладио на ваздуху.

На слици 6.6 је приказан дијаграм напон-издужење за побољшани челик Č4732 (средње отпуштен). Испитивање је изведено у Лабораторији за ОМД и машинске материјале на машини за испитивање материјала ZWICK/ROELL Z100.



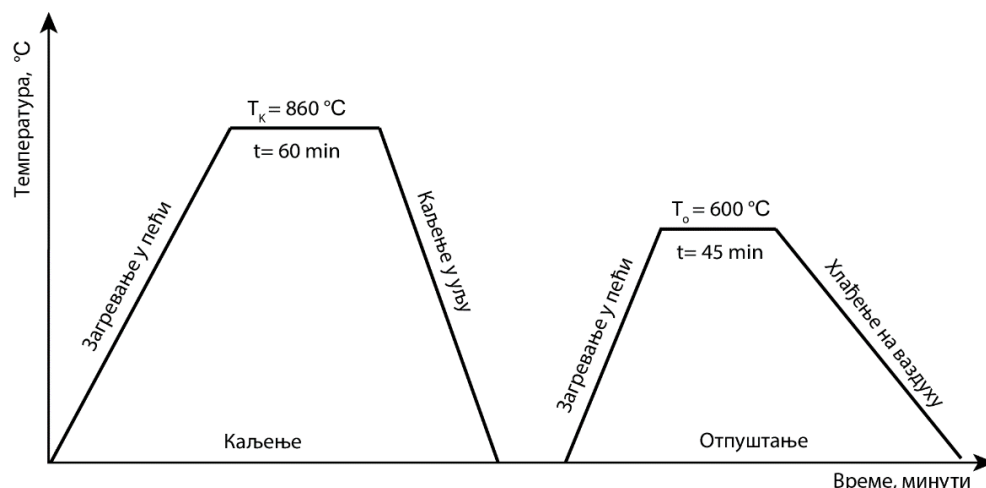
Слика 6.6 Дијаграм напон-издужење (средње отпуштање)

У табели 6.7 су дати резултати добијени након затезања горенаведеног побољшаног челика.

Табела 6.7 Резултати испитивања затезањем за челик који је средње отпуштен

Узорак	L_0, mm	S_0, mm^2	$R_{p0.2}, MPa$	R_m, MPa	$A, \%$
1	96.00	51.53	1531.02	1616.48	2.01
2	96.00	51.91	1648.61	1673.51	5.20
3	96.00	51.53	1627.92	1648.30	2.51

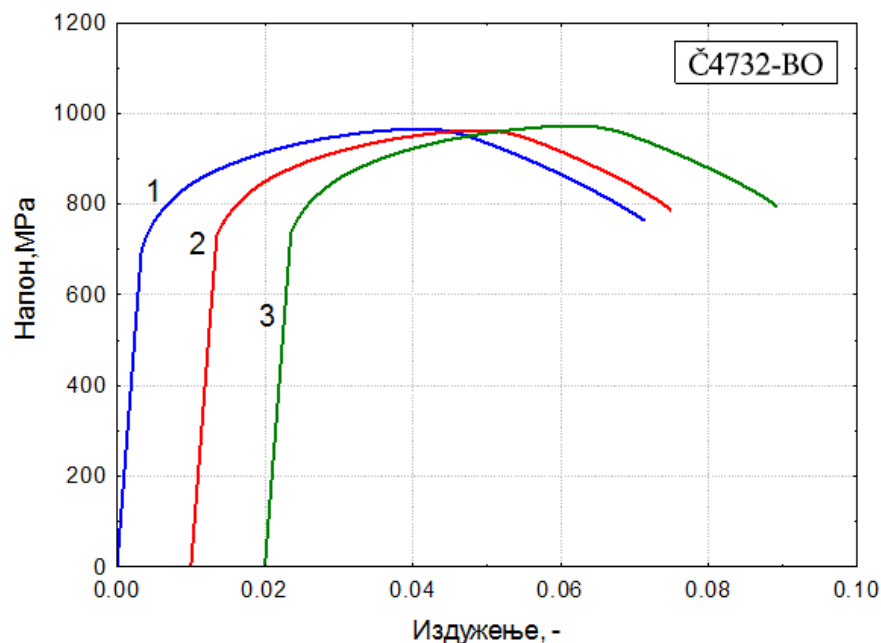
Такође, изведено је и побољшање челика са високим отпуштањем. На слици 6.7 је приказан процес термичке обраде са високим отпуштањем.



Слика 6.7 Ток термичке обраде са високим отпуштањем

У овом случају параметри за каљење су исти, док се параметри отпуштања разликују. Каљење се састоји из загревања до температуре аустенитизације за посматрани челик - 860°C, прогревања на тој температури 60 минута како би се део равномерно прогрејао по целом попречном пресеку и брзог хлађења у уљу како би се извршила трансформација аустенита у мартензит. Високо отпуштање је изведено на температури 600°C, а део се прогревао на тој температури 45 минута и потом споро хладио на ваздуху.

На слици 6.8 је приказан дијаграм напон-издужење за челик који је био високо отпуштен.



Слика 6.8 Дијаграм напон-издужење (високо отпуштање)

У табели 6.8 су дати резултати добијени након затезања челика Č4732 који је високо отпуштен.

Табела 6.8 Резултати испитивања за челик који је високо отпуштен.

Узорак	L_0 , mm	S_0 , mm ²	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
1	92.50	50.64	801.35	966.16	6.66
2	96.40	51.40	809.28	963.15	6.01
3	96.40	51.02	830.63	972.99	6.33

У табели 6.9 дате су упоредне вредности тврдоће, напона течења и затезне јачине за сва три испитивана стања (термичке обраде).

Табела 6.9 Упоредне вредности испитивања

Стање	Тврдоћа, HB	$R_{p0.2}$, MPa	R_m , MPa
Нормализовано	160	320	560
Средње отпуштено	300-320	1650	1650
Високо отпуштено	240	810	970

6.3 Дорада оштећених одливака заваривањем/наваривањем

После ливења одливака (Колевки), при испитивању пенетрантним течностима уочене су тачкасте грешке тзв. "црволике" грешке типа порозности (слика 6.9), али код једног одливка и једна већа прслина у зони дела који је изложен високим оптерећењима (слика 6.10).



Слика 6.9 Тачкасте грешке (тзв. црволика порозност)



Слика 6.10 Изглед прсLINE у одливку

Како би се утврдила дубина и тип прсLINE приступило се жлебљењу с циљем уклањања наведене грешке (слика 6.11).



Слика 6.11 Изжлебљена прсLINE до "здравог" материјала

Након жлебљења неопходно је било попунити жлеб одговарајућим додатним материјалом и комбинованом технологијом заваривања/наваривања.

Ток процеса заваривања састојао се из следећих фаза:

- предгревање дела: $T_p = 300^{\circ}\text{C}$,
- избор додатног материјала: INOX 18/8/6 Si,
- догревање жлеба/споја при заваривању/наваривању: $T = 400^{\circ}\text{C}$ и
- покривање колевке ватросталним прекривкама (тзв. каменом вуном) у циљу што споријег хлађења.

На сликама 6.12, 6.13 и 6.14 је приказан ток процеса заваривања (предгревање окси-ацетиленским пламеном, мерење температуре зоне жлеба и околине, наношење зава/навара и прекривање дела после дораде термоизолационим материјалом).



Слика 6.12 Предгревање колевке и контрола температуре у зони дораде



Слика 6.13 Изглед попуњеног жлеба заварима/наварима



Слика 6.14 Покривање целог дорађеног одливка термоизолационим материјалом

После поновног испитивања пенетрантима и накнадне завршне машинске обраде установљено да је прслина отклоњена. Треба напоменути да се при завршној машинској обради дорађеног одливка грешке типа прслина нису појавиле, како у самој зони дораде тако и у другим зонама одливка.

6.4 Термичка обрада испод нуле (тзв. "субнулти третман")

У наредна два примера биће нешто детаљније описана термичка обрада хлађењем испод нуле. Реч је о пресовању склопова са великим преклопом, тј. челичних рукаваца и бронзаних чаура у одговарајуће отворе одливка.

6.4.1 Пресовање челичних рукаваца

Како је преклоп рукаваца и отвора Колевке у које треба упресовати рукавце око 0,3 mm било је неопходно извршити загревање отвора с циљем његовог ширења, као и хлађење рукаваца како би дошло до њиховог скупљања. Овај процес после хлађења омогућава остваривање веома чврсте везе између рукаваца и отвора Колевке. Ширење и скупљање материјала зависи од следећег закона (термичке дилатације):

$$\Delta l = d_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T, mm,$$

где је:

Δl – издужење (деформација) у mm,

l_0 – почетни пречник (рукавца - d, отвора - D) у mm,

α – коефицијент линеарног ширења у 1/°C и

ΔT – промена температуре у °C.

Колевке је било потребно локално загрејати на $T_p \approx 300^\circ\text{C}$ како би се отвор довољно раширио, а рукавци су хлађени течним азотом ($t = 30 \text{ min}$). Течни азот омогућава хлађење до температуре -195°C . Ток хлађења течним азотом најпре почиње гасном фазом, а кад се достигне температура од -195°C настаје течна фаза. На слици 6.15 је приказана опрема за хлађење течним азотом (боце са азотом са одговарајућом мерно-регулационом опремом, црево и посуда за хлађење).



Слика 6.15 Опрема за хлађење течним азотом

На слици 6.16а,б су приказане гасна и течна фаза азота.



а)

б)

Слика 6.16 Истицање азота из боце: а) гасна фаза и б) течна фаза

На сликама 6.17 и 6.18 су приказане фазе процеса хлађења рукавца и изједначавање температура охлађеног рукавца и прегрејаног отвора (остваривање чврстог пресованог склопа).



а)



б)

Слика 6.17 Поступак хлађења рукавца (а) и убацивање и загревање рукавца у отвору Колевке (б)



Слика 6.18 Процес изједначавања температура пресованих делова - остваривање чврстог пресованог склопа

6.4.2 Пресовање бронзаних чаура

Поступак је готово идентичан оном за пресовање челичних рукаваца у отворе одливка. Разлика је у времену хлађења бронзаних чаура које је знатно краће како због материјала веће топлотне проводљивости, тако и због дебљине зида чаура ($t = 15 \text{ min}$).

На сликама 6.19, 6.20 и 6.21 је приказан поступак пресовања чаура.



а)

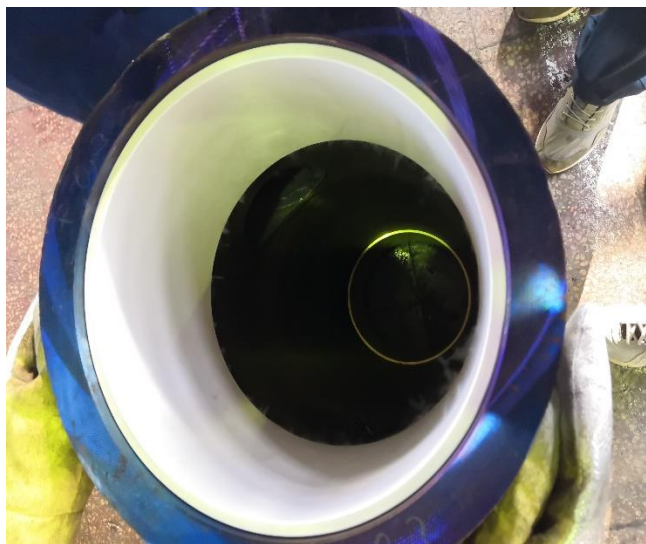


б)

Слика 6.19 а) Загревање отвора и б) хлађење чауре



а)



б)

Слика 6.20 а) Убацивање охлађене чауре и б) убачена чаура у отвор Колевке



Слика 6.21 Изједначавање температура (остваривање чврстог пресованог склопа)

После пресовања рукаваца и чаура, Колевка се финално машински обрађује и монтира на одговарајуће артиљеријско оруђе. Циљ нешто детаљнијег описа пресовања челичних рукаваца и бронзаних чаура у челични одливак јесте и утврђивање понашања материјала Колевке при загревању и посебно при хлађењу на температурама знатно нижим од нуле.

Треба напоменути да је неколико одливака због немогућности дораде одбачено, тј. проглашено за шкарт.

7. Закључак

Термичка обрада челика је веома сложен процес и од великог је значаја при обради челика. Применом термичке обраде, тј. изменом структуре материјала побољшавају се својства челика, као што су: напон течења, затезна јачина, тврдоћа, својства ударне жилавости, па чак и својства пластичности. Избор термичке обраде зависи од услова експлоатације машинског дела, а они условљавају 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 (каљење плус високо отпуштање). Користе се за израду делова машина и уређаја који се користе у веома тешким условима рада (висока променљива и ударна оптерећења).

Каљењем се добија мартензитна структура која челику обезбеђује велику тврдоћу и јачину, али скоро никакву жилавост и пластичност. Међутим, код челика код којих се захтева, пре свега велика вредност напона течења, после каљења такви челици се подвргавају отпуштању, зато што је мартензит исувише крт и такви делови не смеју да се уграде у машине које раде под великим оптерећењима. Отпусна кртост уочена при отпуштању неких легираних челика представља штетну појаву и она је последица пораста тврдоће, што прати и пад жилавости и истегљивости. Међутим, погодним избором режима термичке обраде таквих легираних челика она се може избећи. Ту се пре свега мисли на регулисано двофазно/степенасто хлађење после отпуштања. Понекад се челици склони ка настанку ове штетне појаве замењују челицима код којих она не настаје при континуалном хлађењу. Овде се мисли пре свега на челике легиране молибденом и волфрамом који спречавају настанак отпусне кртости. Ови елементи доприносе уситњавању металних зрна и поправљању својства јачине уз истовремено задржавање својстава дуктилности.

Циљ овог рада је био да се покаже како термичка обрада (нормализацијом или побољшањем одливака) утиче на најважније механичке особине челика. У раду је одређен најповољнији режим термичке обраде за челични лив и челик и тиме на реалним примерима показана практична примена, а све на основу теоријских описа споменутих у раду. Како би било могуће одредити режим најповољније термичке обраде, потребно је познавати најважије карактеристике и особине материјала.

Циљ нешто детаљнијег описа пресовања челичних рукаваца и бронзаних чаура у челични одливак био је утврђивање понашања материјала Колевке при загревању и посебно при хлађењу на температурама знатно нижим од нуле.

Треба споменути, да су финално обрађени делови - Колевке монтирани на артиљеријска оруђа и потом тестирани у врло ригорозним условима и да су показали високу поузданост у веома сложеним условима експлоатације.

8. Литература

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.
2. М. Јовановић, В. Лазић: *Рукопис предавања – Машински материјали*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, школска 2019/2020.
3. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија заваривања и ливења*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
4. http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/6-MM_ho.pdf (приступљено јануара 2020.)
5. http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/42crmo4astmen.pdf (приступљено јануара 2020.)