

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 59/2014

Слађана Р. Микић

Термичка обрада легура гвожђа

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазих-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

1. Опише уводне напомене о темичкој обради,
2. Наведе и објасни најважније врсте термичке обраде,
3. Опише пећи и расхладна средства за термичку обраду,
4. Укаже на сопствене напоне и грешке при термичкој обради,
5. Укратко објасни термичку обраду заварених спојева и наведе практичне примере изведених термичких обрада неких челика.

Препоручена литература:

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
3. М. Јовановић, В. Лазић: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017-2018.
4. В. Ђорђевић: *Машински материјали - први део*, Машински факултет, Београд, 1999.
5. Н. Видојевић: *Термичка обрада метала*, Технолошко- металуршки факултет Универзитета у Београду, Београд, 1973.
6. И. Пантелић: *Технологија термичке обраде челика 2*, Раднички универзитет, Нови Сад, 1974.
7. Р. Лучић: *Машински материјали*, Научно инжењерство, II издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.

У Крагујевцу, 2018. године

Ментор:

Проф. др Вукић Лазић

Резиме

У савременој техничкој пракси данас је незамислива израда одговорних делова без термичке обраде. Првенствено се мисли на машинске делове израђене од челика као највише коришћеног метала и легура алуминијума. Будући да је челик полиморфни метал, применом различитих видова термичке обраде могуће је подешавати најважнија излазна својства. Мисли се пре свега на механичка својства, микроструктуру и тврдоћу. У овом раду су дате уводне напомене о термичкој обради, наведене су најважније врсте термичке обраде, описана средства за загревање и хлађење, указано на сопствене напоне и деформације и дат кратак опис најважнијих поступака хемијско-термичке обраде. Споменути су и начини термичке обраде заварених спојева. Такође, наведени су примери изведених термичких обрада неких челика.

Кључне речи: термичка обрада, врсте термичке обраде, челик, пећи, расхладна средства, сопствени напони, грешке, заварени спојеви.

Summary

In modern technical practice today it is unthinkable to produce reliable parts without thermal processing. It is primarily meant that machine parts are made of steel as the most used metal and aluminum alloys. Since steel is a polymorphic metal, by applying different types of thermal processing it is possible to adjust its most important output properties. It is primarily related with mechanical properties, microstructure and hardness. In this paper, introductory notes on thermal treatment are given, the most important kind of thermal processing are listed, heating and cooling agents are described, pointed out to own tension and deformations as well as a short description of the most important procedures and chemical-thermal processing. Methods of thermal processing of welded joints were also mentioned. In the end, some examples of performed thermal process of steels are given.

Key words: thermal treatment, types of thermal processing, steel, furnace, cooling mediums, residual stress, imperfections, welded joints.

Садржај

1.	Увод	5
2.	Врсте термичке обраде челика	10
2.1	Жарење.....	10
2.2.	Каљење.....	14
2.3	Отпуштање.....	20
2.4	Отпуштање челика	24
2.4.1	Промена мартензита у току отпуштања угљеничних челика.....	24
2.4.2	Мартензитна промена при отпуштању легираних челика.....	25
2.5	Термомеханичка обрада	26
2.6	Реаустенитизација (двоструко каљење).....	27
2.7	Таложно (дисперзно) каљење	28
2.8	Хемијско-термичка обрада.....	28
3.	Пећи и расхладна средства за термичку обраду	34
3.1	Пећи за термичку обраду.....	35
3.2	Хлађење и средства за хлађење	39
4.	Сопствени напони и грешке при термичкој обради.....	41
4.1	Сопствени напони и грешке при каљењу	41
4.2	Грешке при жарену челика.....	44
4.3	Грешке при цементацији	44
4.4	Друге грешке термичке обраде.....	45
5.	Термичка обрада заварених спојева.....	46
5.1	Заваривање са предгревањем	47
5.2	Заваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем.....	47
5.3	Заваривање са предгревањем и прогревањем.....	48
5.4	Заваривање са степенастим предгревањем	48
5.5	Заваривање са међухлађењем (interpass).....	49
5.6	Жарење после заваривања.....	49
6.	Примери изведених термичких обрада	50
6.1	Угљенични челик за побољшање - Š1530 (C45)	50
6.2	Угљенични челик за побољшање - Š1730 (C60)	51
6.3	Угљенични челик за цементацију - Š1220 (C15)	52
7.	Закључак.....	53
8.	Литература	54

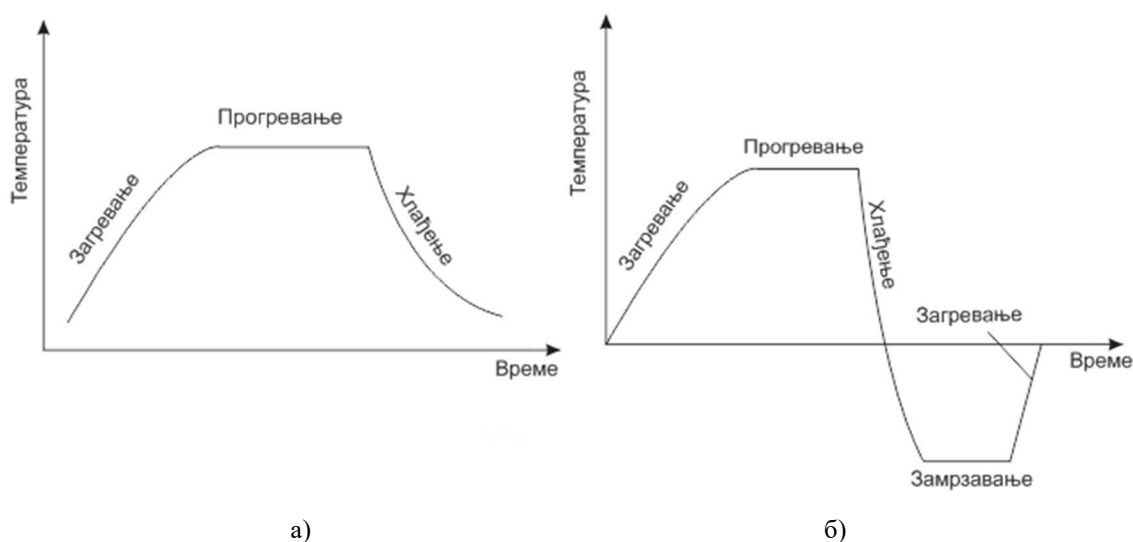
1. Увод

Тешко је утврдити када се први пут почело са применом термичке обраде у циљу побољшања својства метала. Према неким подацима термичка обрада челика је стара толико као и његова производња и примена. Термичка обрада је данас један од веома најважнијих видова технолошког процеса у највећем броју металуршких и металоперађивачких предузећа, машиноградњи, индустрији мотора, производњи алата и тсл. Такође термичка обрада налази примену у побољшању особина ливеног гвожђа, челичног лива и заварених конструкција. Широку примену налази и код обојених метала и првенствено њихових легура.

Под термичком обрадом се подразумева термички третман металног материјала у циљу постизања најважнијих механичких особина. Термичком обрадом могу знатно да се побољшају све механичке особине, као што су граница течења и динамичка чврстоћа, према којима се одређују и вредности допуштених радних напрезања. Што су граница течења и динамичка чврстоћа веће, то су допуштена напрезања већа, па се пресек, односно тежина појединих делова машина и конструкција може смањити. На овај начин се постиже двострука корист: побољшава се квалитет и продужава радни век конструкције, док се истовремено врши уштеда и укупном металу.

Термичка обрада метала се изводи у посебним пећима које могу бити: коморне, тунелске, јамске и тсл. Затим се после загревања у тим пећима обавља контролисано (регулисано) хлађење. Својства и понашање метала и легура у производним процесима и у току експлоатације зависе од: структуре, састава, начина прераде и термичке обраде којој могу бити подвргнути.

Термичка обрада се састоји из три фазе: процес који се састоји из *загревања* метала до одређене температуре, *задржавања* на тој температури и *хлађења* до собне температуре (сл. 1.1а). У циљу трансформације заосталог аустенита, понекад се наставља са хлађењем испод 0°C , тада се део задржава на ниској температури, затим поново загрева до собне температуре (сл. 1.1б) [1, 2].



Слика 1.1 а) Ток термичке обраде, б) Ток термичке обраде са хлађењем испод 0°C [2, 9]

Основни параметри у процесу термичке обраде су:

- Температура загревања (T),
- Брзина загревања (v_z),
- Време задржавања (t_z) и
- Брзина хлађења (v_h).

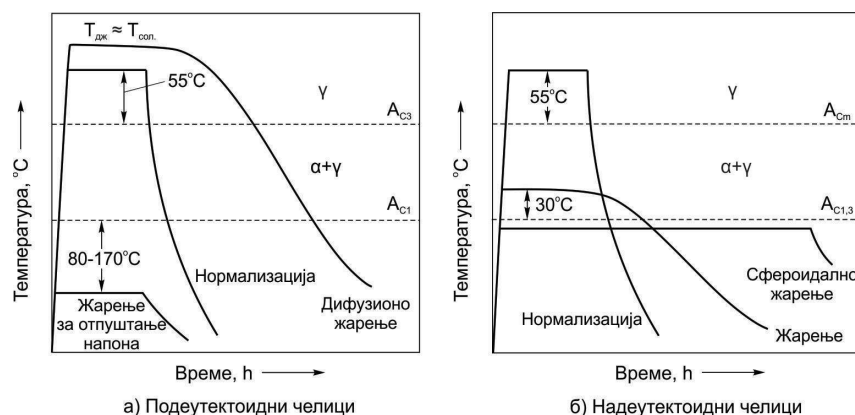
Ефекат термичке обраде зависи од: врсте легуре, хемијског састава легуре, микроструктуре, степена хладне деформације и брзине загревања и хлађења за време термичке обраде. Избор врсте термичке обраде изводи се с циљем да у току одвијања процеса не дође до битних промена облика и мера термички обрађених предмета. Поступци термичке обраде деле се у четири групе:

1. Поступци, чији је задатак омекшавање материјала и смањење унутрашњих напона.
2. Поступци, чији је циљ очвршћавање машинских делова, да би могли издржати притисак и да постану отпорни на хабање.
3. Поступци, чији је задатак повећање жилавости материјала.
4. Поступци, помоћу којих се врши модификација површине готових комада.

Термичка обрада челика је саставни део многих технолошких процеса. Циљ термичке обраде челика је да се промене њихове механичке и физичко-хемијске особине. Те промене су углавном: функција температуре, времена и у неким случајевима средине у којој се термичка обрада изводи. Због различитих термичких обрада од једног истог челика могу се добити различите структуре, а тиме и потребне механичке особине, чиме се остварују вишеструки позитивни ефекти (нпр. избор челика се смањује). Видови термичке обраде су дефинисани техничким условима у које су укључене процесна и завршна контрола. Термичка обрада се може поделити у три групе:

1. Основна термичка обрада: жарење, каљење и отпуштање.
2. Специјални поступци термичке обраде: таложно (дифузино) каљење, замрзавање, термомеханичка обрада и реаустенитизација.
3. Хемијско-термичка обрада: цементација, нитрирање и карбонитрирање [3].

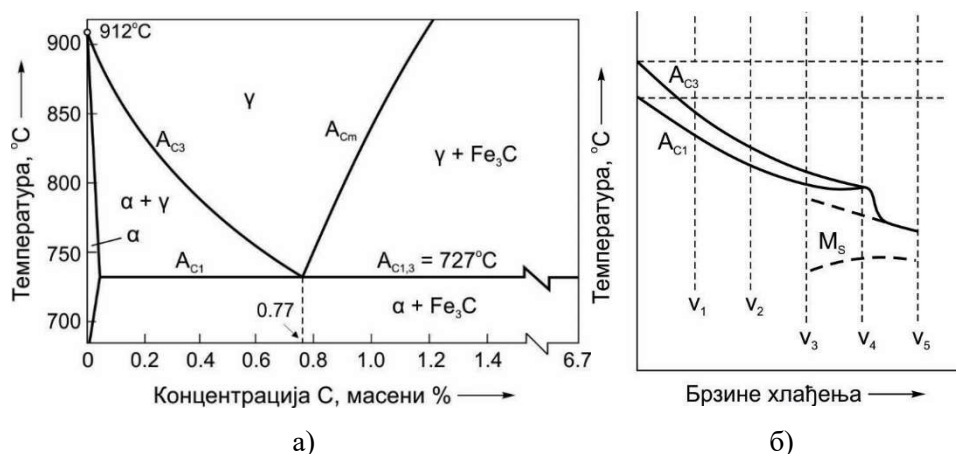
Сви видови термичке обраде су дефинисани техничким условима у којима су укључене процесна и завршна контрола. Од свих ових видова највише се примењује жарење (сл. 1.2) [1].



Слика 1.2 Жарење угљеничних челика (температура аустенитизације $T_a = A_{C3} (A_{Cm}) + 30^\circ\text{C}$) [1]

Жарење има за циљ да доведе предмет обраде у равнотежено стање које је третиран ковањем, каљењем или механичком обрадом. Каљење има за циљ да се предмету обраде повећа тврдоћа и пре свега својства отпорности. Отпуштање има за циљ смањење или потпуно уклањање унутрашњих заосталих напона, смањивање кртости каљеног челика и добијање жељених структура и механичких својстава.

С обзиром на то да разни начини термичке обраде омогућавају да се од једног те истог челика добију различите структуре, а тиме и потребне механичке особине, произлази да се захваљујући термичкој обради асортиман челика може смањити. Термичка обрада каљење и неки видови жарења започињу са аустенитизацијом. Аустенитизација је дифузиони процес који се при загревању угљеничних челика одвија на следећи начин (сл. 1.3а): појавом и растом γ -клица из перлитног ферита и растварањем $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$, односно формирањем двофазне структуре ($\alpha + \gamma$) код подеутектоидних челика ($\text{C} < 0.77\%$) и $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ код наеутектоидних ($\text{C} > 0.77\%$) челика [1].



Слика 1.3 а) Део фазног дијаграма $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ и б) зависност $\Delta T = A_{C3} - A_{C1}$ од v_h [1]

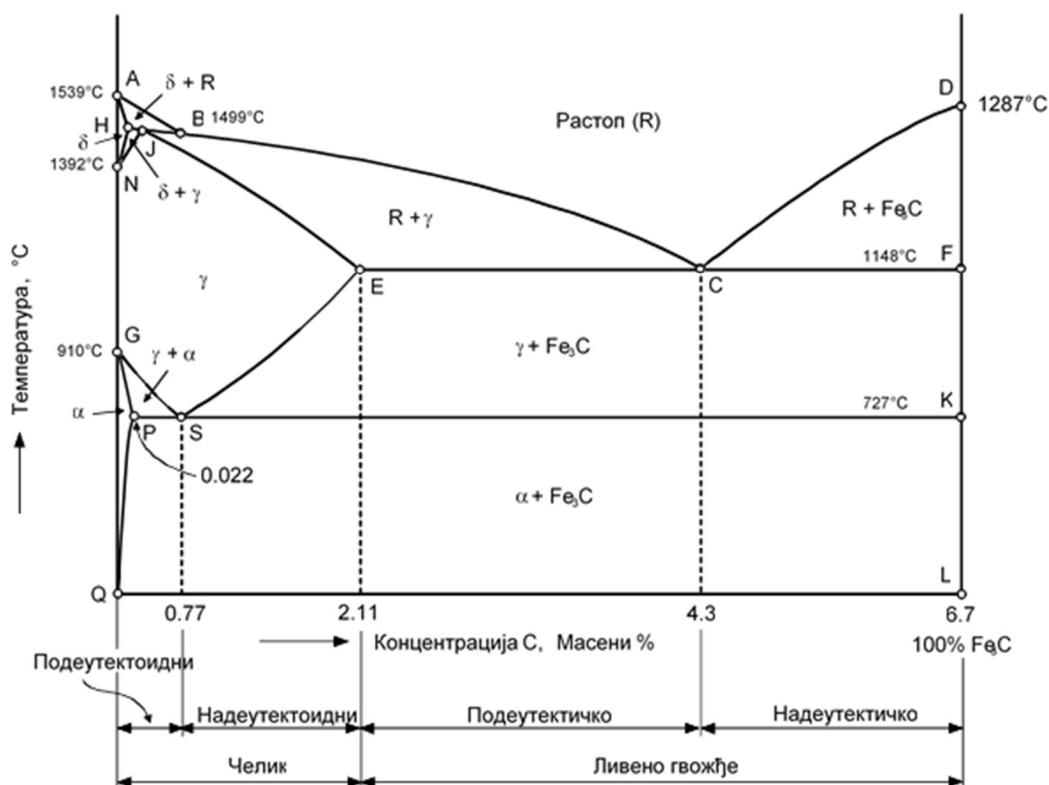
Код већине челика, при аустенитизацији није довољно добити само чисто аустенитну структуру, већ је неопходна и његова хомогенизација при температури аустенитизације (T_a) која зависи од садржаја C и легирајућих елемената. Режији термичке обраде, засновани на аустенитизацији и потхлађивању, бирају се на основу трансформационих дијаграма IRA и ARA. Дифузиони преображај аустенита настаће ако се истовремено одвија:

- Супституцијска самодифузија гвожђа која омогућава промену површински центриране кубне решетке (γ) у просторно центрирану кубну решетку (α) и
- Интерстицијска дифузија угљеника потребна за његову прерасподелу једним делом у аустенит, а затим у нискоугљеничну фазу цементит (Fe_3C).

Дијаграми континуалног хлађења (ARA), графички приказују промену аустенита за конкретан челик датог хемијског састава. Преображајне тачке A_{C3} и A_{C1} опадају са порастом брзине хлађења, с тим што брже опада температура A_{C3} , разлика $\Delta T = T_3 - T_1$ се смањује са порастом брзине хлађења (сл. 1.3б).

Параметри термичке обраде одређују се према врсти челика из равнотежног бинарног $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ и неравнотежних трансформационих дијаграма (IRA, KH). Температуре фазних промена су: A_1 , A_3 , $A_{1,3}$, A_{cm} . Технологија термичке обраде за горњу (A_3 , A_{cm}) и доњу критичну температуру (A_1) челика.

Параметри термичке обраде (температура, време прогревања, брзина хлађења) одређују се према врсти челика из равнотежног бинарног Fe-Fe₃C дијаграма (сл. 1.4) и неравнотежних трансформационих дијаграма (IRA, KH) (сл. 1.5) [1, 6, 7].

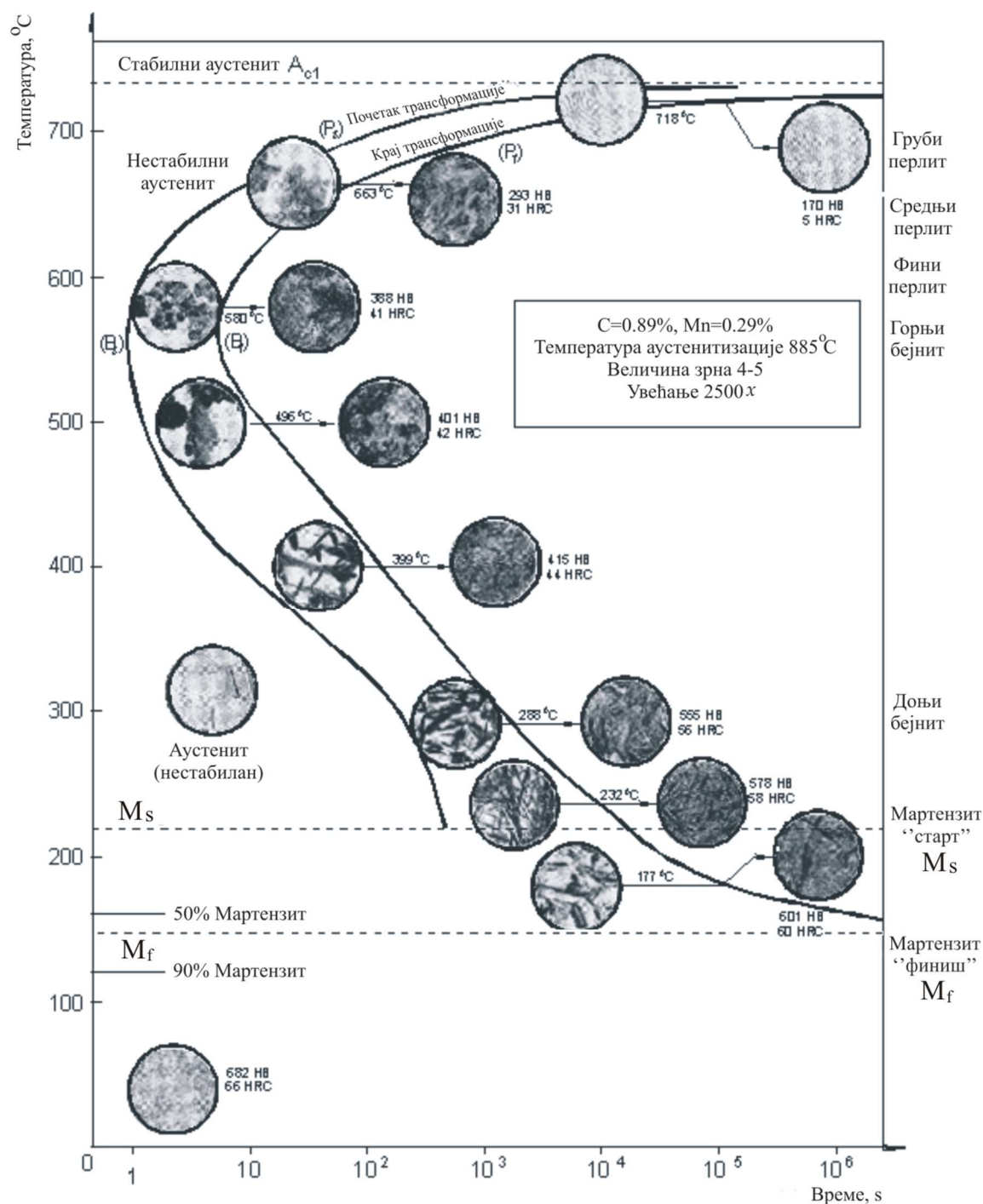


Слика 1.4 Равнотежни дијаграм нестабилног система Fe-Fe₃C [1]

У табелици 1.1 могу се видети карактеристичне температуре у преображају легуре Fe-C, које су потребне за избор процесних параметара.

Таблица 1.1 Дефиниције критичних температура [1]

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 наеутектоидних 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 наеутектоидних челика
M _s , M _f	Температура почетка, односно завршетка мартензитне промене
B _s , B _f	Температура почетка, односно завршетка бејнитне промене



Слика 1.5 Дијаграм изотермичког разлагања аустенита еутектоидног угљеничног челика [9]

2. Врсте термичке обраде челика

Основне врсте термичке обраде су:

- Жарење,
- Каљење и
- Отпуштање.

Жарење се дели на: поступке са фазним променама (дифузионо, нормализационо, меко и потпуно жарење) и поступке без фазних промена (рекристализационо жарење и отпуштање).

Каљење може бити: потпуно, запреминско и површинско.

Отпуштање се дели на: ниско, средње и високо.

2.1 Жарење

Жарење је загревање челика до одређене температуре са постепеним хлађењем, да би се извршила рекристализација и да би се постигло мање или веће уравнотежење у структури или у физичком смислу, то се односи на побољшање обрадивости челика алатом за резање. Жарење се може изводити на више начина зависно од температуре.

Изводи се на температури од 30 до 50°C изнад A_{C3} линије аустенитне структуре, а од 30 до 50°C изнад A_{C3} линије перлитне структуре. Неке врсте жарења се разликују према температури загревања и прогревања, режиму хлађења и циљу који треба остварити. Жарењем се постижу чисти структурни састави.

Његове мешавине су:

- Перлит је еутектоидна мешавина ферита и цементита која садржи 0,80% угљеника, састоји се од 88% ферита и 12% цементита (Fe_3C),
- Карбид гвожђа (цементит) са раствореним елементима легирања или специјалним карбидима тих елемената са гвожђем и
- Ферит.

Челик се испоручује у жареном стању, понекад му је потребно и додатно жарење у току прераде железарских полупроизвода.

Циљеви жарења су:

- да се промене механичке и физичко-хемијске особине,
- смањење тврдоће,
- уклањање унутрашњих напона и
- поправљање обрадивости челика резањем или деформисањем.

Процес жарења се изводи помоћу индукционих пећи. При жарењу челик треба да се полако загрева и да притом тврдоћа не буде већа од 240-250 НВ. Жарење траје 2-4 сата после чега делови остају у пећи да се споро хладе.

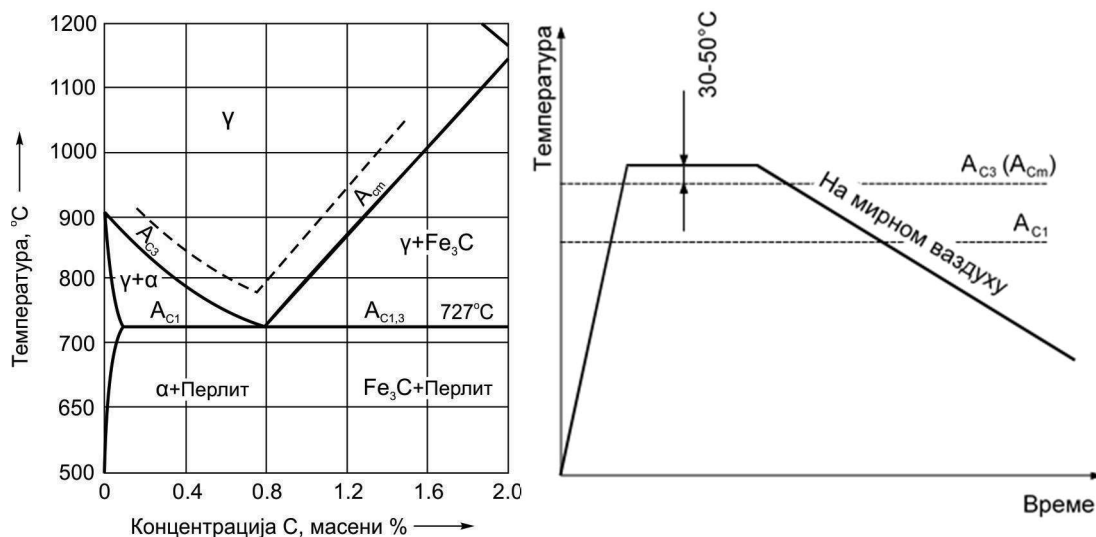
Суштина жарења је да се добије ситнозрнаста структура са добрим механичким особинама. Заједничко за све врсте жарења је то што постизање одговарајућих промена структуре и особина није неопходно повезано са загревањем челика до температура које леже изнад температуре фазних промена, мада се у случају дифузионог жарења и неких варијанти меког жарења то ипак чини [1, 4, 5].

Нормализационо жарење је један од видова жарења. То је уствари аустенитско жарење које се хлади на мирном ваздуху (сл. 2.1). Циљ нормализације јесте постизање побољшања структуре тј. добијање равномерне и ситнозрнасте структуре. Мање се нормализују високоугљенични челици, јер су они склони ка порасту зрна.

Крупноћа металних зрна зависи од три фактора:

- температуре нормализације,
- времена држања на температури и
- брзине хлађења.

Нормализација се састоји из загревања челика до око 50°C изнад горње критичне температуре A_{C3} за подеутектоидне челике, односно изнад A_{cm} за надеутектоидне, затим прогревања и хлађења на мирном ваздуху.



Слика 2.1 Температура загревања за нормализацију челика [1, 4]

У случају када су предмети који се нормализују малог пресека треба подесити брзину хлађења која за подеутектоидне челике одговара брзини хлађења на мирном ваздуху. Ово не важи за велике пресеке, јер код великих пресека језгро спорије хлади и структура остаје крупнозрнаста, па се зато предмети великих пресека загревају 2-3 пута изнад тачке трансформације A_{C3} . За надеутектоидне челике би се могло рећи да је поступак исти. Према начину хлађења постоји више врста нормализације:

- обична нормализација и
- високотемпературска нормализација [4, 5].

Нормализују се ваљалонички производи, челични одливци, отковци и заварени спојеви од дебелих челичних делова лоше заварљивости. Велики челични одливци, као што су железарски ваљци, после нормализације се високо отпуштају.

У односу на потпуно жарење, нормализација има и предности:

- обезбеђује боље механичке особине челика,
- омогућава уклањање мреже секундарног цементита и
- дозвољава већу продуктивност постројења термичке обраде.

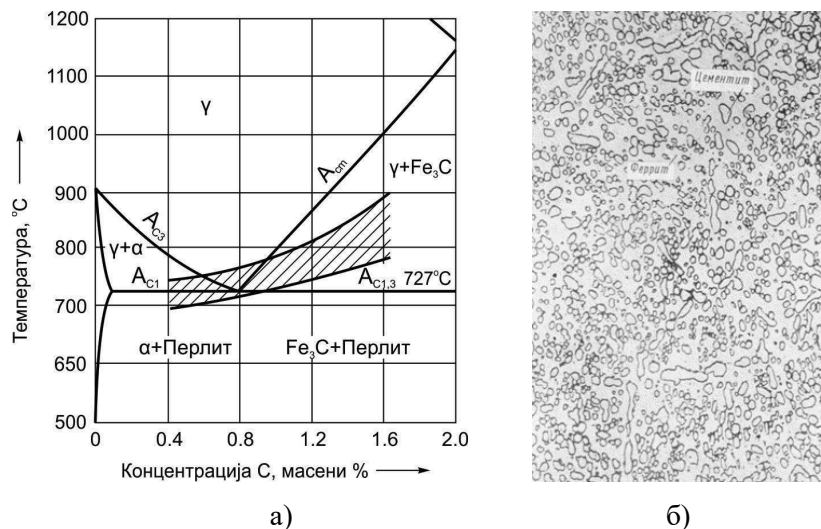
Нормализација се користи или као претходна термичка обрада, или као завршна термичка обрада конструкционих челика.

Дифузионо жарење се примењује за изједначавање хемијских неуједначености металних зрна, код челичних одливака и шипки и то углавном код легираних челика. У процесу дифузионог жарења загревање се изводи до високих температура од 1100-1200°C, јер само у том случају имамо потпуније одвијање дифузионих процеса неопходних за изједначавање хемијског састава у појединим деловима металне масе. Дифузионо жарење се примењује у циљу:

- уклањање сегрегација,
- отклањање издвојених укључака по границама примарних зрна, код умирених угљеничних и легираних челика алуминијума и
- поправљања топле пластичне прераде челика са повећаним садржајем сумпора.

Појава сегрегација не само да има негативног утицаја на механичке особине челика у ливеном стању, већ је и непожељна с обзиром на особине челика после прераде у пластичном стању. После дифузионог жарења због високих температура и дугог загревања добија се крупнозрнаста структура због дуготрајног држања (8-15 h понекад и до 14 h). Предмети се после жарења полако хладе у пећи због дуготрајног жарења. С обзиром на то да дифузионо жарење представља врло скуп поступак, углавном се користи само у случају квалитетних челика и одговорних делова.

Меко жарење се изводи код високоугљеничних челика који се загревају и прогревају неколико десетина сати око доње критичне температуре A_{C1} , температуре око 700°C и држе довољно дуго времена (18-24 h) и споро хладе. На тај начин формираће се сфероидална структура и тај процес жарења се назива сфероидизација односно меко жарење (сл. 2.2а). Уместо наизменичних ламела ферита и цементита (перлит) у процесу жарења Fe_3C фаза-цементит појављује се у облику сферних честица равномерно распоређених у феритној основи (сл. 2.2б). Најпогоднија структура меко жареног челика је феритна са округлим честицама карбида средње величине.

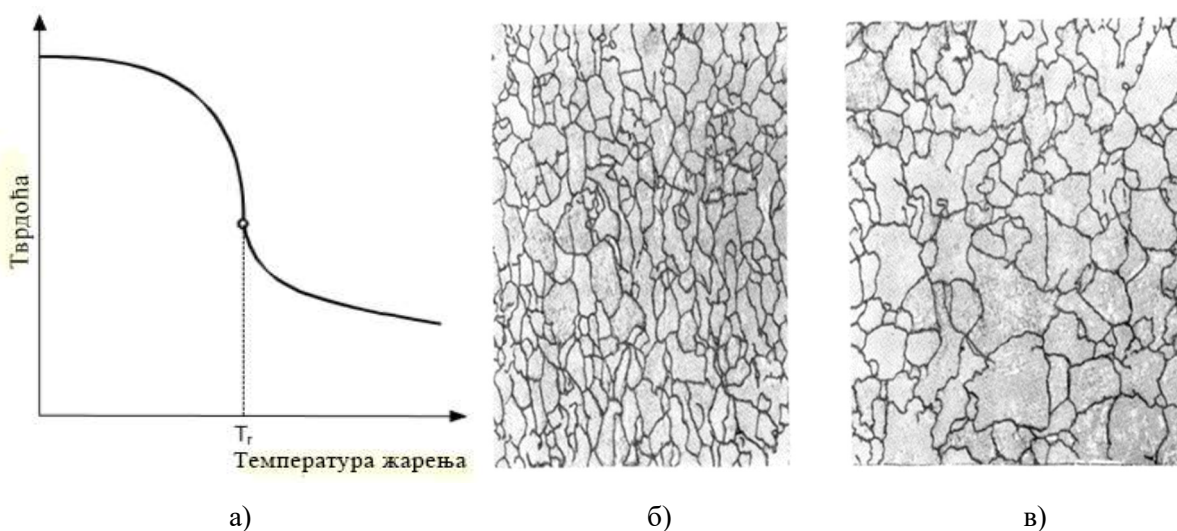


Слика 2.2 Температурска област загревања за меко жарење а) и зрнаста микроструктура Fe_3C у феритној матрици б) [1, 9]

Потпуно жарење се примењује код ниско и средње угљеничних челика с циљем добијања уједначене ситнозрнасте структуре, смањења тврдоће, повећања жилавости и својства пластичности. Изводи се на температури 30-50°C изнад тачке A_{C3} за подеутектоидне и A_{Cm} за надеутектоидне, затим се прогревају и веома споро хладе у пећи у интервалу фазних промена A_{C3} , A_{cm} - $A_{C1,3}$. Хлађење од A_{C1} до собне температуре може бити на ваздуху.

Циљ овог жарења јесте рекристализација, добијање ситнозрнасте структуре и побољшање механичких особина. Посебан вид потпуног жарења представља изотермално жарење. Изотермално жарење се користи и као замена потпуном жарењу, јер се скраћује време трајања процеса. Да би се производ заштитио од оксидације при потпуном жарењу делови се пакују у сандуке, лонце и слично, у прах дрвеног угља или струготину ливеног гвожђа. Из ситнозрног аустенита добија се ситнозрна уједначена феритно-перлинта структура, релативно мале тврдоће и довољне пластичности. Потпуно жарење се не користи за надеутектоидне челике, јер се при веома спором хлађењу цементит издваја по границама металних зрна тј. формира се цементитна мрежа по границама перлитних зрна. Овако добијена структура има лоша механичка својства.

Рекристализационо жарење се примењује код челика који су претходно обрађивани деформисањем у хладном стању и код којих је дошло до деформационог ојачавања, односно до повећања својства јачине, а смањење пластичности. Температура рекристализације T_r метала и легура зависи од температуре топљења. На слици 2.3 је дат дијаграм резултата мерења на коме се налази превојна тачка на кривој при исправљању или савијању плоче и профили који представљају температуру рекристализације [1, 3, 5].

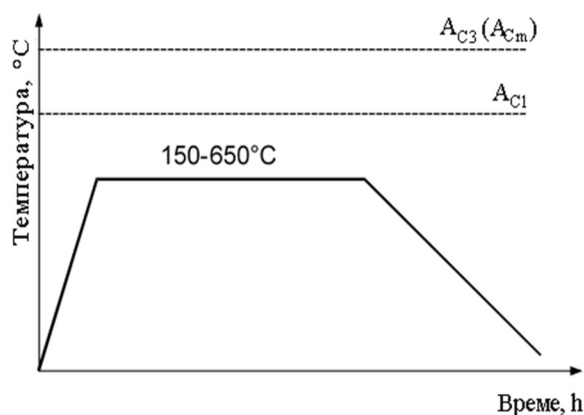


Слика 2.3 Одређивање температуре рекристализације (а) и микроструктура после хладне прераде (б) и након жарења (в) [1, 3, 5]

Рекристализационо жарење се састоји од загревања челика до температуре од 650-730°C, која зависи од састава - за нискоугљеничне челике (0,08 до 0,2% C) хладно ваљане лимове температура рекристализације је у интервалу 680-700°C, а време жарења је од 8-12 h. Хладно ваљани профили од високоугљеничних и легираних челика се жаре на температури од 730°C у трајању од 0,5-1,5 h.

Процес рекристализације се добија загревањем, а енергија која је потребана за наставак овог процеса се ослобађа услед смањивања броја дислокације третираног челика. После рекристализације мека механичка својства се знатно мењају достижући вредност пре деформисања. У случају наглог пораста зрна после рекристализације долази до смањења жилавости метала (енергије лома).

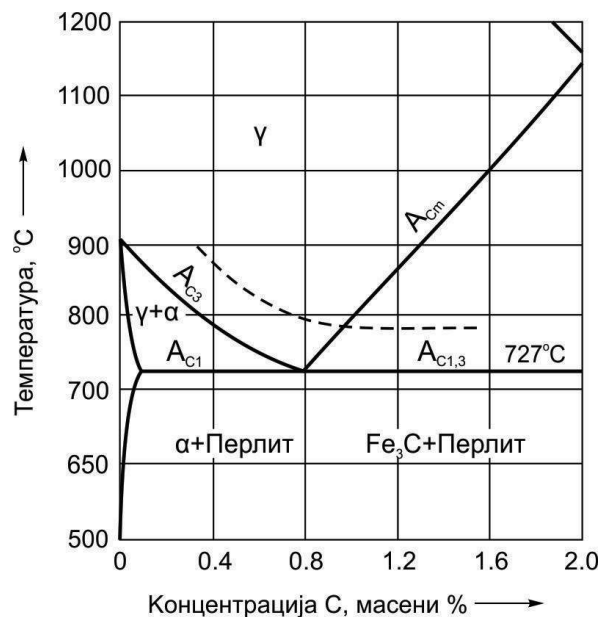
Жарење за отпуштање напона се користи када треба да се смање сопствени напони који су настали у току прераде метала, а не дејством спољашњих сила и момената. У неким ситуацијама одливак се преломи у току транспорта, то је због високог нивоа заосталих сопствених напона у одливцима. У неким случајевима се могу створити прслине на хладно или трајне деформације; узрок томе су заостали напони код заварених спојева. Постоје неки делови који раде у корозивним срединама и заостали напони убрзавају процес напонске корозије. У свим случајевима корисно је отпуштање које се остварује испод перлитне линије. При температури 500-600°C жаре се челични одливци и одливци од ливеног гвожђа у циљу отпуштања напона, а при температури око 650°C заварене челичне спојеве хладити два пута спорије од загревања (сл. 2.4). Да се не би поништили позитивни ефекти хладне пластичне прераде, повећање тврдоће, својства отпорности, отпорност на хабање, после пластичне прераде на хладно челични предмети се жаре на 250-300°C (тзв. опорављање). Постоје промене при дуготрајном држању одливака на отвореном простору, понекад се називају дозревање или природно старење.



Слика 2.4 Дијаграм жарења за отпуштање напона [3]

2.2. Каљење

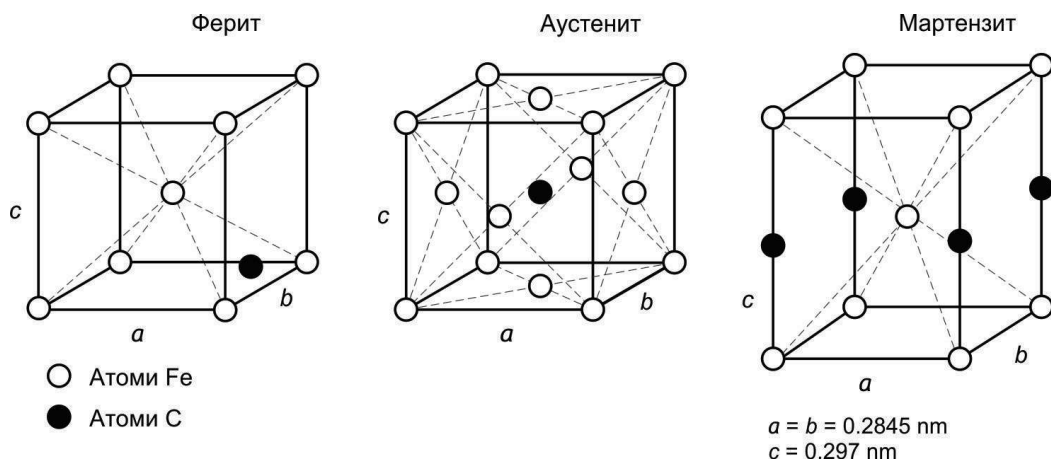
Каљење челика представља термичку обраду која се изводи загревањем радних предмета изнад тачке A_{C3} за подеутектоидне и изнад $A_{C1.3}$ за наеутектоидне челике, прогревањем на тој температури и хлађењем брзином већом од критичне да би се аустенит трансформисао у мартензит (сл. 2.5). Циљ каљења јесте повећање тврдоће и јачине челика. Температура мартензитне трансформације износи -50°C за еутектоидни челик, а затим опада са порастом угљеника раствореног у аустениту и то има за последицу више заосталог аустенита. Загревањем на температури изнад критичне тачке A_{C3} и наглим хлађењем до собне температуре постиже се одређено микроструктурно стање које одговара стању при температури каљења или некој другој температури између температуре каљења и коначне температуре хлађења.



Слика 2.5 Температура загревања угљеничних челика за каљење [1]

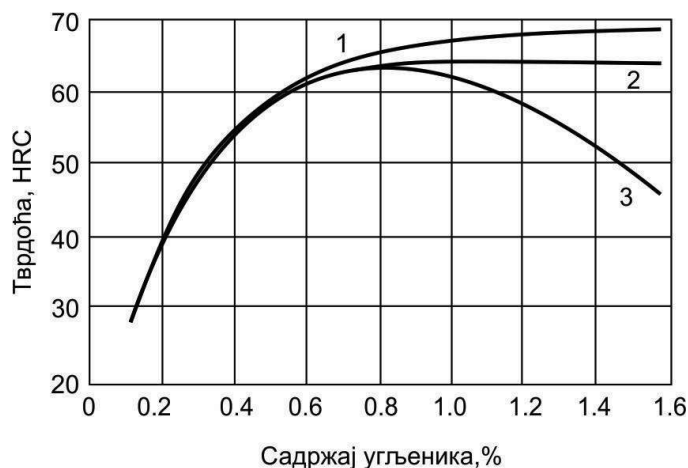
Потребна брзина хлађења добија се углавном код челика потапањем предмета у воду или уље. Подеутектоидни челици се кале из чисто аустенитног подручја, а надеутектоидни из цементитно-аустенитне структуре. Угљенични челици се најчешће хладе у води а легирани у уљу.

Да би се механизмом клизања аустенит трансформисао у мартензит, каљење челика спречава дифузиону промену аустенита до испод M_s температуре. Тетрагонална деформисана решетка α -гвожђа - мартензит, добија се као резултат каљења, који се одликује великом тврдоћом и високим својствима отпорности ($R_{p0.2}$, R_m), али ниским вредностима истегљивости и жилавости. Када се кубна решетка γ -Fe трансформише механизмом клизања, долази до деформације кубне у тетрагоналну кристалну решетку. Кристалографске осе остају ортогоналне, с тим што два параметра (a и b) остају исте дужине, док се трећи параметар (c) издужује у правцу z -осе, јер су ту смештени атоми угљеника (сл. 2.6).



Слика 2.6 Кристалне решетки чврстих растворов: ферита, аустенита и мартензита [1]

Тврдоћа мартензита зависи од садржаја угљеника раствореног у аустениту који после каљења прелази у мартензит (сл. 2.7).



Слика 2.7 Тврдоћа мартензита у функцији % C и температуре каљења (1- замрзавање, 2-каљење са $T > A_{C1,3}$, 3- каљење са температуре $T > A_{Cm}$) [1]

Криве 1, 2 и 3 се односе на надеутектоидне челике.

Крива 1 представља повећање садржаја угљеника у аустениту који утиче на пораст тврдоће и после "замрзавања".

Крива 2 представља каљење челика када се исти челици кале из аустенитно-цементитног подручја. Тврдоћа ће зависити само од процента угљеника раствореног у аустениту, који остаје исти за надеутектоидне челике. Каљење са $T_k = A_{C1,3} + (30-50^\circ\text{C})$.

Крива 3 показује пад тврдоће, када се надеутектоидни челици кале са температуре иза A_{Cm} , тада ће се појавити одређена количина нетрансформисаног-заосталог аустенита. Заостали аустенит је после каљења непожељна фаза.

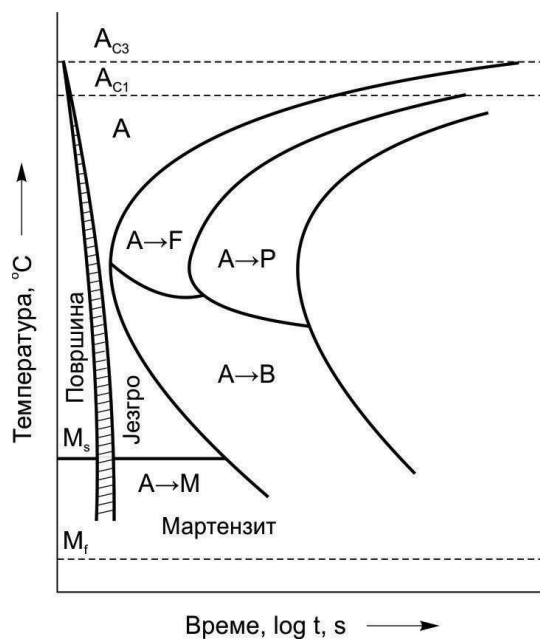
Предуга аустенитизација је штетна због пораста зрна и због дифузије угљеника из површинских слојева челика. Време држања на температури каљења треба да буде довољно да се предмет потпуно прогреје. Каљење се може изводити:

- запремински које може бити континуално, у два расхладна средства, степенасто, изотермално и
- површинско каљење, које се изводи само континуално у једном расхладном средству.

Каљење треба изводити са што блажим расхладним средствима да би настала што мања унутрашња напрезања. При каљењу настају неравнотежне структуре, које имају знатно већу јачину у односу на равнотеже као што су: ферит и перлит. Загревање и прогревање омогућавају формирање аустенита у структури, а довољно брзим хлађењем аустенита настају неравнотежне структуре каљења: мартензит, бејнит и сорбит. При хлађењу брзином већом од критичне, која се за дати челик одређује као тангента на колено криве константним хлађењем, настаје мартензитна трансформација. Неопходна брзина хлађења постиже се само на површини челичног комада, али, идући ка његовом језгру брзина хлађења постаје мања од критичне. Тај процес се појављује код угљеничних челика који се плитко закаљују, те из тога закључујемо да се потпуно прокаљују само танки пресеци, док се легирани челици прокаљују и на већем пресеку.

Запреминско каљење може бити *мартензитно* (М) и *бејнитно* (В). Ређе се користе и варијанте прекидног мартензитног и континуалног бејнитног каљења, као и таложно каљење и "замрзавање".

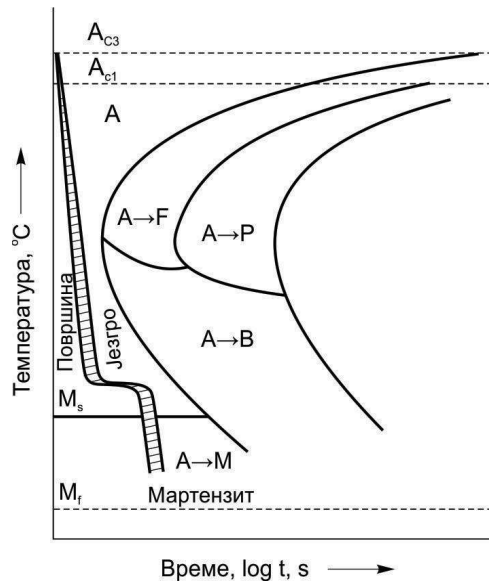
Мартензитно континуално (обично) каљење (сл. 2.8) изводи се непрекидним хлађењем радног предмета из аустенитног подручја до температуре испод почетка мартензитне трансформације (промене) M_s . Брзина хлађења се бира тако да се спречи дифузиона промена аустенита све до температуре мартензитног преображаја, где он потпуно или делимично прелази у мартензит [1].



Слика 2.8 Мартензитно континуално каљење угљеничних подеутектоидних челика [1]

Мартензитно степенасто (прекидно) каљење (мартемперинг) (сл. 2.9) се примењује код угљеничних челика танких пресека (10-12 *mm*) или малих пречника Ø8-10 *mm*. Суштина је у промени брзине хлађења на температури нешто изнад M_s . Као посредно средство за хлађење користи се растоп соли¹ константне температуре. У ствари део се убацује у каду температуре нешто изнад M_s , ту се хлади до изравнања температуре по целом пресеку, али не предуго, јер могу почети дифузионе изотермичке промене. Кад се део извади из купатила, хлади се на ваздуху. Пошто у току фазних промена опадају својства отпорности, а расте пластичност, делови се тада могу исправљати, нпр. завршним хлађењем не на ваздуху већ под пресом, односно бакарним плочама. На овај начин се код добро прокаљивих челика смањују заостали структурни напони, а елиминишу термички напони. Степенасто каљење се не препоручује за дебеле пресеке и слабо прокаљиве челике, јер може доћи до трансформације аустенита у бејнит или перлит, ако се предмет благовремено не извади из соног купатила [1].

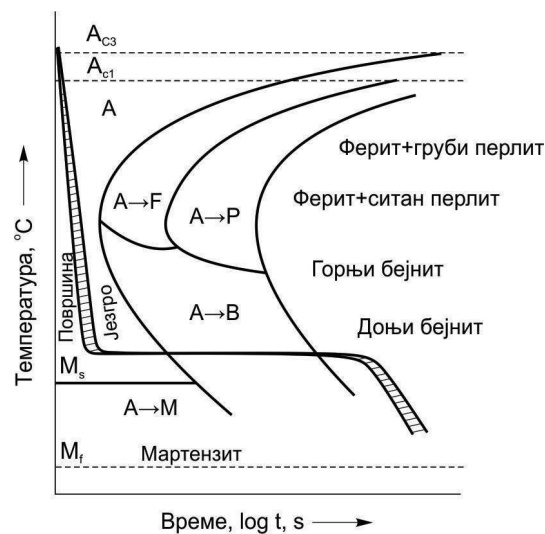
¹ Растоп шалитре (KNO_3), чилске шалитре ($NaNO_3$) или њихове мешавине (1:1).



Слика 2.9 Степенато каљење угљеничних подеутектоидних челика [1]

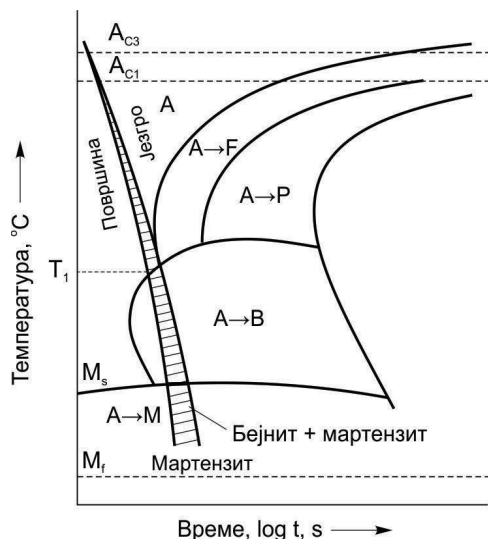
Бејнитно изотермално (изотермичко) каљење (аустемперинг) се још назива каљење са изотермичким преображајем потхлађеног аустенита при $T > M_s$ (сл. 2.10). Радни предмет се после аустенитизације и бржег хлађења до изнад M_s температуре, убацује у купатило константне температуре (250-350°C) и у њему задржава све до потпуног преображаја потхлађеног аустенита у бејнит. После тога се наставља хлађење произвољном брзином, било у води, уљу или на ваздуху. Челик бејнитне структуре има мању тврдоћу (40-58 HRC) од мартензитне, али је знатно истегљивији и жилавији (пластичнији) од челика закаљеног на мартензит и отпуштеног на исту тврдоћу.

Изотермално се кале углавном делови израђени од угљеничних и нисколегираних челика малог пресека. Код делова већих пресека (дебљине), због кратког времена инкубације, потхлађени аустенит се у средишним слојевима може трансформисати у фини перлит (око 550°C), тј. изнад B_s температуре [1].



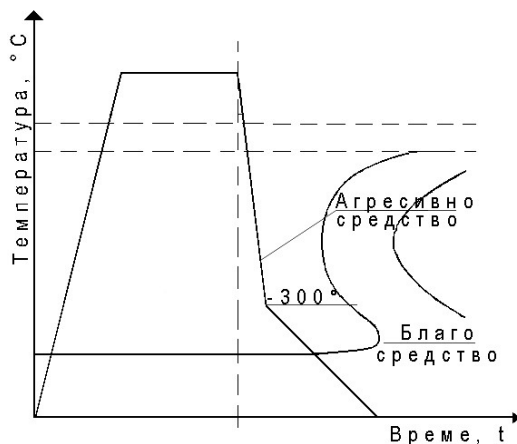
Слика 2.10 Бејнитно изотермичко каљење [1]

Бејнитно континуално каљење (сл. 2.11) изводи се загревањем подеутектоидног челика до температуре изнад тачке A_{C3} , прогревањем при тој температури и затим непрекидним хлађењем брзином нешто мањом од критичне. То значи да ће линија хлађења пресећи криву почетка разлагања потхлађеног аустенита при $T_1 > M_s$. 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 је једино могућ за неке челике чији КН-дијаграм има истурено бејнитно колено као на слици 2.11 [1].



Слика 2.11 Континуално бејнитно каљење [1]

Прекидно каљење се изводи 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 (сл. 2.12). 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 трансформација. Сам поступак каљења захтева велико искуство и умешност калиоца и пажљив рад, будући да је тешко проценити тренутак када је предмет већ потхлађен до 300°C . Прекидним каљењем деформације делова при каљењу се свде на минимум, па се не јављају прсине и димензијске грешке [1].

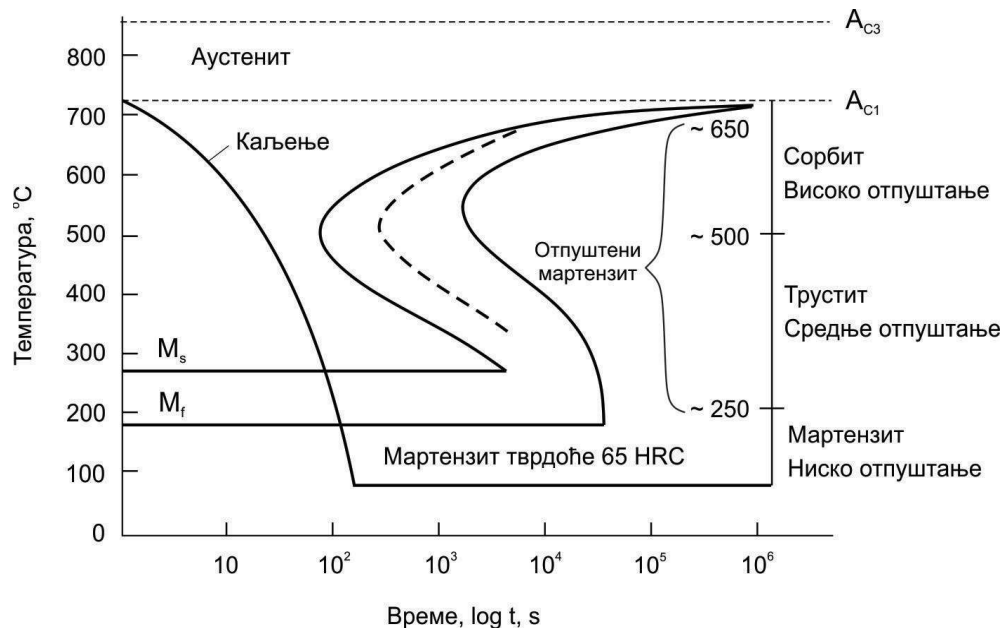


Слика 2.12 Прекидно каљење [5]

2.3 Отпустање

Процес термичке обраде који се састоји из накнадног загревања до испод критичне температуре A_{C1} , прогревања на тој температури и затим спорог хлађења, назива се отпустање. Отпустање је заправо процес жарења после каљења. Зависно од висине температуре загревања и резултата отпустања (сл. 2.13), може се поделити на:

- ниско отпустање између $100-300^{\circ}\text{C}$ или мартензитно отпустање,
- средње отпустање између $300-400^{\circ}\text{C}$ или труститно отпустање и
- високо отпустање између $450-700^{\circ}\text{C}$ или сорбитно отпустање.



Слика 2.13 Каљење и отпустање у КН дијаграму [1]

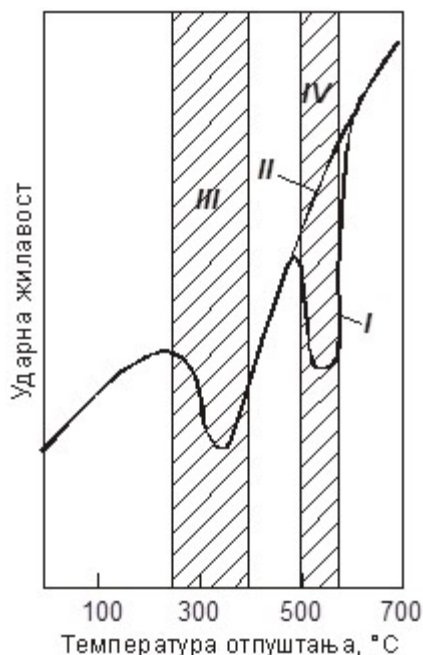
Мартензитна структура је неравнотежна и нестабилна, јер је то структура презасићена угљеником и одржава се на собној температури захваљујући незнатној дифузији угљеника при температури испод 250°C . Мартензитна структура има знатне унутрашње напоне, па се после каљења изводи отпустање у циљу снижавања заосталих напона. Када се окаљени делови накнадно загревају, активира се дифузија атома угљеника, и тим јача уколико је температура загревања виша и време држања дуже.

Отпустањем се повећава жилавост каљеног челика, а смањује чврстоћа. Отпустање има за циљ смањење или потпуно уклањање унутрашњих напона, смањивање кртости каљеног челика и добијање жељених структура и механичких својстава. Примењује се код челика, алуминијума, титана и других полиморфних метала и легура. Температура отпустања се креће у распону од 100 до 700°C . Пад унутрашњих напона при загревању често се у пракси зове и попуштање напона. Сврха отпустања је:

- смањење тврдоће и кртости,
- промена микроструктуре,
- омекшавање метала како би се лакше обрађивао деформисањем и резањем,
- рекристализација на хладно обрађеног материјала и
- отпустање заосталих напона.

Отпусна крост је штетна појава која је испољена порастом тврдоће, а падом пластичности. Она се појављује при отпуштању неких челика легираних са Cr-Mn или Cr-Ni. Мера за спречавање отпусне крости алатних челика је легирање молибденом, волфрамом или ниобијумом. Они спречавају сегрегацију, која је узрок појаве отпусне крости, а угљеник и фосфор доприносе појави отпусне крости. Легирајући елементи Si и Mn поспешују сегрегацију фосфора, па ће Mn и Si допринети да се склоност ка отпусној крости смањи. Испитивањем ударне жилавости у широком температурском дијапазону, као и утврђивањем прелазне температуре из жилавог у крт лом може се проценити осетљивост челика према отпусној крости.

Код легираних челика могу се запазити две врсте отпусне крости (сл. 2.14). Прва врста крости која је названа неповратном кртошћу првог реда, а настаје при отпуштању у интервалу 250 до 400°C. Одлика овог типа крости је неповратна природа, односно чињеница да поново жарење при истој температури неће повећати жилавост. Ова врста крости се може елиминисати загревањем до температуре изнад 400°C, међутим на овај начин се смањује тврдоћа. Други облик крости је назван повратном (реверзибилном) кртошћу другог реда. Отпусна крост ове врсте нагло смањује ударну жилавост и доводи до опасности од појаве хладних прелина. Овај тип отпусне крости може бити спречен брзим хлађењем, нпр. у води са температуре жарења. Одлика крости другог реда јесте њена реверзибилност.



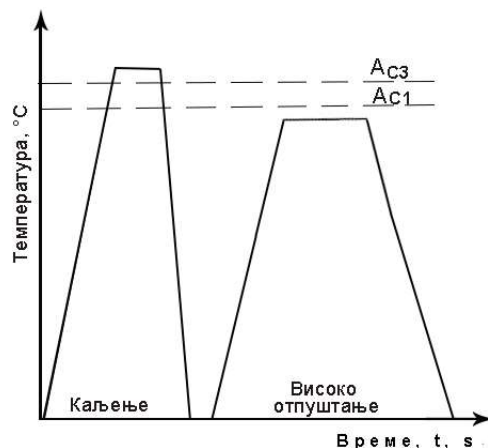
Слика 2.14 Зависност ударне жилавости челика од температуре жарења и одговарајуће брзине хлађења ; I- споро хлађење, II- брзо хлађење, III- температурски интервал неповратне кртости, IV- температурски интервал повратне кртости [9]

Ниско отпуштање врши се после каљења алата од угљеничног и легираног челика и после каљења. Изводи се на температури 150-250°C и време трајања је око 1-45 h, где тетрагонални мартензит прелази у кубни. Овим отпуштањем се постижу најмање промене чврстоће каљеног челика. Мањи део заосталог аустенита се трансформише у мартензит и изазива повећање запремине.

Ниско се отпуштају делови после површинског каљења, цементације, цијанизације или карбонитрирања. Користи се за алате, опруге и контролнике.

Средње отпуштање доводи до промене механичких карактеристика у смеру смањења чврстоће и повећања жилавости. Код средњег отпуштања при температурском отпуштању ламеларног трустита настаје зрнасти трустит отпуштања. Изводи се прогревањем при 350-500°C и затим следи хлађење у води. Тиме јачина и напон течења остају исти као и после каљења.

Високо отпуштање има за циљ да се постигне најбоља истегљивост и жилавост, односно пластичност (сл. 2.15). Изводи се на температури која је изнад 500°C, односно испод A_{C1} критичне темературе.

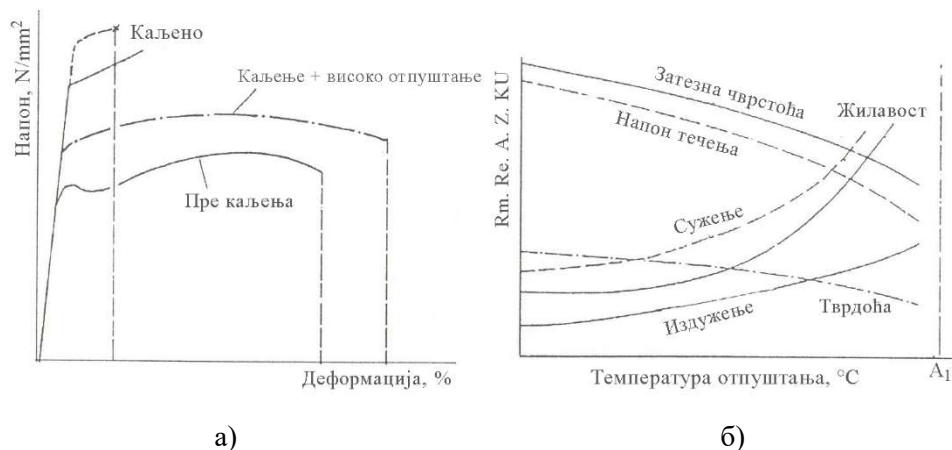


Слика 2.15 Комбинација каљења и високог отпуштања [3, 5]

Каљење које је праћено високим отпуштањем доводи до истовременог повећања јачине и напона течења, истегљивости, сужења и нарочито ударне жилавости (таблица 2.1, сл. 2.16а и 2.16б). Комбинација каљења и високог отпуштања назива се **побољшање**. Побољшање представља посебан вид термичке обраде. Примењује се углавном код конструкционих челика и састоји се из каљења предмета са температуре каљења и отпуштања са температуре нешто испод A_{C1} , а у циљу побољшања осталих механичких особина. Постоји посебне групе угљеничних и нисколегираних челика који се називају челици за побољшање.

Таблица 2.1 Упоредне карактеристике челика у жареном, каљеном и отпуштеном стању [9]

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



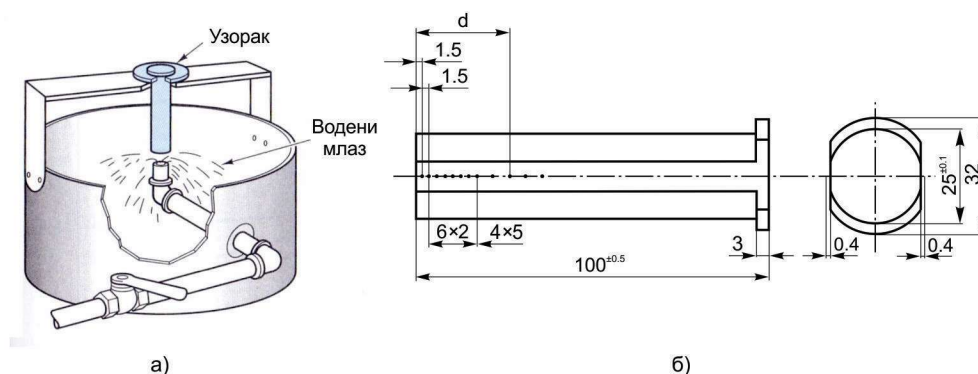
Слика 2.16 а) Дијаграм σ - ϵ , пре каљења, после каљења и побољшања, б) промена механичких својстава у зависности од $T_{отр}$ [9]

При побољшању углавном се врши рекристализација и хомогенизација структурних фаза које одговарају температури отпуштања. Отпуштањем каљеног челика мењају се механичке особине и то:

- затезна јачина опада са порастом температуре отпуштања,
- граница развлачења (напон течења) опада нешто спорије него затезна јачина,
- тврдоћа опада са порастом температуре отпуштања,
- издужење и сужење пресека расте са порастом температуре отпуштања и
- жилавост испитивана на проби са зарезом расте са растом температуре отпуштања.

Побољшање има за циљ повећање жилавости предмета, напона течења, затезне јачине, повећање издужења и повећање сужења пресека. Код угљеничних челика дебљине пресека изнад 16 mm не може се остварити потпуно прокаљивање, док код нисколегираних може.

За оцену прокаљивости користи се лабораторијска проба односно Џомини проба. То је проба на цилиндричном узорку, који се аустенитизира, а затим се чеоно хлади воденим млазом (сл. 2.17).



Слика 2.17 Џомини проба и пробни узорак [1]

Норма која је потребна за оцену дубине прокаљивања је растојање од чела узорака па до попречног пресека у коме се после каљења добија полумартензитна структура.

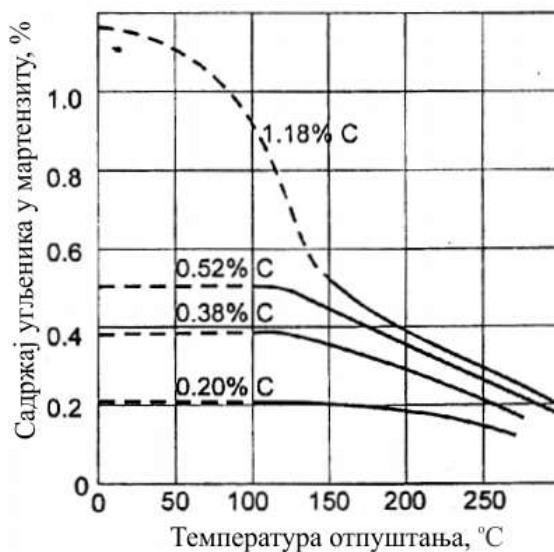
Резултат се даје у облику индекса прокаљивости $I_{50} = 24 \text{ mm}$, што значи да је на растојању $d = 24 \text{ mm}$ од чела узорка измерена тврдоћа од 50 HRC, што за угљенични челик са 0.57% C одговара структури 50% M + 50% B.

Као што је већ напоменуто процес каљења започиње аустенитизацијом челика и постепеним хлађењем брзином већом од критичне. Повољна структура се добија накнадним отпуштањем мартензита, чија је основна фаза цементит и ферит. Отпуштање траје више сати, тако да је процес предвидив, с тим се добијају унапред постављени резултати. Код отпуштања цементит има повољнији облик него цементит добијен хлађењем брзином већом од критичне.

2.4 Отпуштање челика

2.4.1 Промена мартензита у току отпуштања угљеничних челика

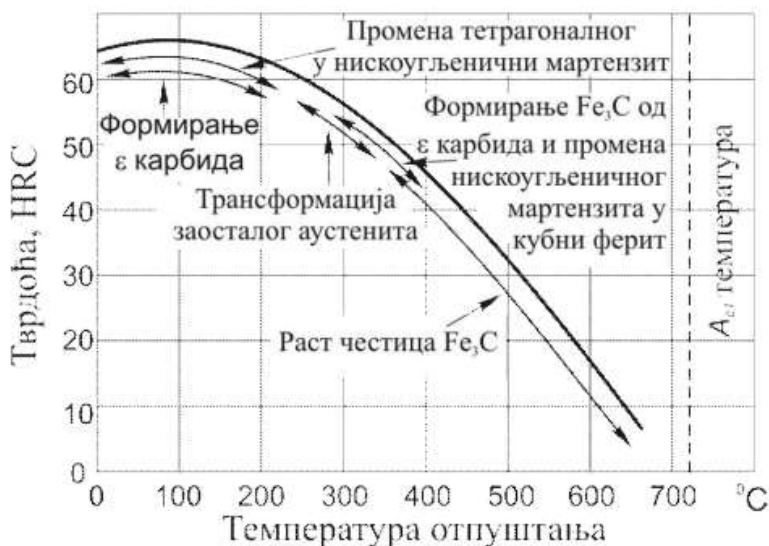
Пормена мартензита ће настати у температурском интервалу 80-200°C (150°C), тада се вишак угљеника излучује из чврстог раствора у облику субмикроскопских честица карбида ϵ променљивог стехиометријског састава од Fe_2C до Fe_3C . На границама мартензитних кристала излучују се ϵ карбиди. Даље при загревању од 200-300°C, наставља се издвајање карбида ϵ , да би пред крај промене у чврстом раствору остало још око 0.20% C (сл. 2.18).



Слика 2.18 Утицај температуре на садржај угљеника у отпуштеном мартензиту [7]

У овом стадијуму одвија се даља промена заосталог аустенита у регуларни мартензит, која је започета у претходној фази. 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 , која је названа отпуштеним мартензитом. Тврдоћа отпуштеног мартензита (500-600 HV), зависи од температуре отпуштања, састава челика и удела противуречених процеса. У трећем стадијуму отпуштања 300-400°C наставља се излучивање карбида ϵ и његов преображај у субмикроскопске честице цементита. Величина и изглед карбидних честица ($\sim 0.3 \mu\text{m}$) мењају се приближавањем сфероидалном (лоптастом) облику.

У стадијуму четири, настаје даља сфероидизација субмикроскопских преципитата цементита који попримају облик куглице. Са порастом температуре до 600°C ситне куглице се међусобно повезују образујући веће (реда величине $3\cdot 10^{-5}$ mm). Изнад 600°C цементит се излучује у микроскопској величини, што је праћено порастом феритних зрна. На слици 2.19 приказани су наведени стадијуми по којима се одвија процес разлагања неравнотежних структура при отпуштању челика.



Слика 2.19 Промена тврдоће и структуре при отпуштању угљеничног еутектоидног челика [7]

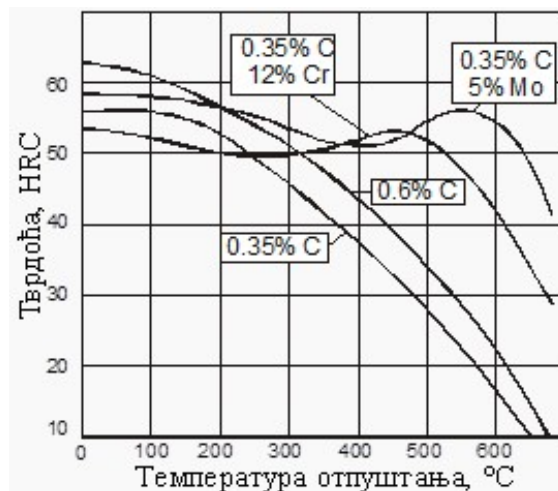
2.4.2 Мартензитна промена при отпуштању легираних челика

На температурски интервал преображаја мартензита такође утичу легирајући елементи, као и на новонастале продукте. Кинетика аустенитне трансформације при хлађењу после загревања се мења и долази до отпуштања. Сви легирајући елементи, осим кобалта, померају удесно криву почетка промене аустенита, смањујући критичну брзину хлађења при каљењу. Већина легирајућих елемената снижава температуру почетка мартензитне трансформације (M_s); односи се пре свега на Mn, а затим Mo, Cr, Ni и Cu.

Разлике у променама при отпуштању угљеничних и легираних челика испољавају се изразито изнад 400-450°C, јер је цементит у тим условима нестабилан. На нижим температурама могућа је само дифузија угљеника. Дифузија гвожђа и других елемената који омогућавају образовање карбида настаје изнад 400°C. Легирани карбиди настају за време отпуштања због промене специјалних карбида $(Fe,M)_3C$ - према једном од два механизма:

- издвајања новог карбида на граници која дели карбид M_3C и чврст раствор и
 - карбид M_3C се разлаже и уместо њега образује се легирани карбид.
- Редослед промене карбида у току отпуштања легираних челика је:
- код челика легираних хромом: $Fe_2C(\epsilon) \rightarrow M_3C \rightarrow M_7C \rightarrow M_{23}C_6$,
 - код челика легираних са Мо или W: $Fe_2C \rightarrow M_3C \rightarrow M_2C \rightarrow M_6C$.

Неки вишеструко легирани челици (са Cr, Mo, W или Ti), не омекшавају све до близу температуре A_{C1} , после отпуштања при 500-600°C показују пораст тврдоће, што се објашњава растварањем цементита и преципитацијом тврдих легираних карбида (сл. 2.20).



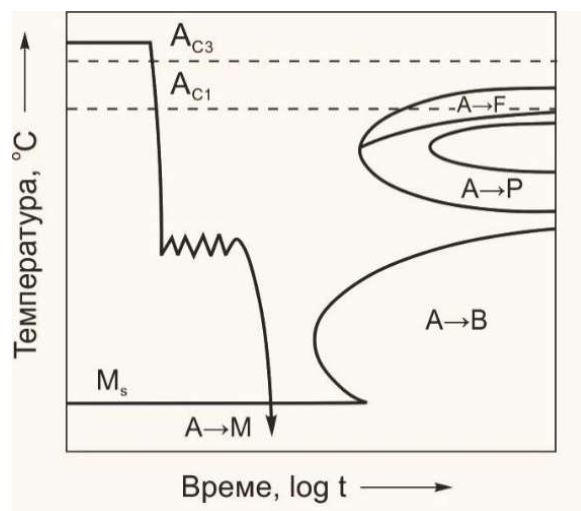
Слика 2.20 Промена тврдоће неких челика у зависности од температуре отпуштања [9]

2.5 Термомеханичка обрада

Термомеханичка обрада се заснива на пластичном деформисању аустенита и мартензитној промени. На основу температуре на којој се термомеханичка обрада изводи разликују се:

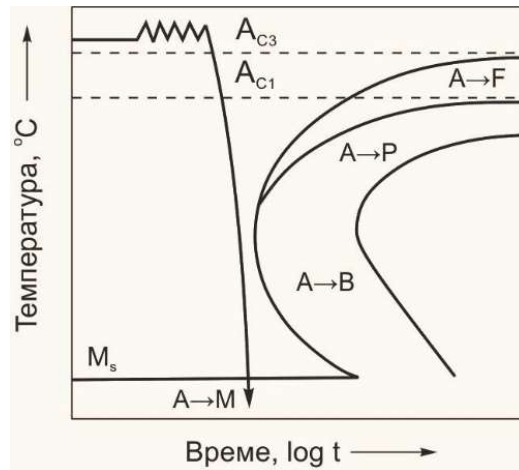
- Вискотемпературска термомеханичка обрада (ВТМО) и
- Нискотемпературска термомеханичка обрада (НТМО).

Вискотемпературска термомеханичка обрада започиње са загревањем и прогревањем изнад A_{C3} , наставља се ваљањем при тој температури, а затим следи мартензитна трансформација (сл. 2.21). У границама од 40 до 90% креће се степен деформације. Ова обрада се може применити код нелегираних и нисколегираних челика. Код нисколегираних подеутектоидних челика достиже се јачина 2500 MPa.



Слика 2.21 Шема вискотемпературске термомеханичке обраде [1]

Нискотемпературска термомеханичка обрада заснована је на аустенитизацији челика изнад температуре A_{C3} , затим хлађењу критичном брзином до нестабилног аустенита, где се челик ваља, кали и по потреби ниско опушта (сл. 2.22). Ова обрада се може успешно применити само код добро прокаљивих челика. Челици са већим садржајем примеса после извођења нискотемпературске термомеханичке обраде постижу затезну јачину око 3000 MPa.



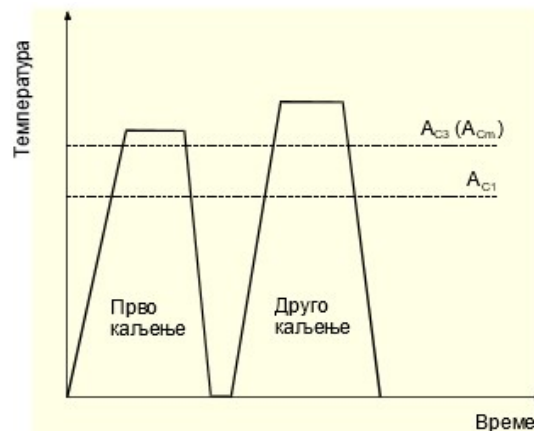
Слика 2.22 Шема нискотемпературске термомеханичке обраде [1]

2.6 Реаустенитизација (двоструко каљење)

Двоструко каљење или реаустенитизација не припада ни термомеханичкој обради, ни обичној термичкој обради. Реаустенитизација је машински део, који је претходно окаљен са уобичајене температуре каљења, накнадно се загрева до веће температуре и одмах се кали. Примењује се код високоугљеничних и легираних челика. У току загревања имамо два дела (сл. 2.23):

- један део угљеника дифундује на границе зрна и образује фини цементит, а
- други део остаје растворен у аустениту.

Као коначна структура се добија мартензит са 0.3% C и фини цементит, што представља најбољу комбинацију својстава отпорности (R_m , $R_{p0.2}$) и својстава деформације (A_5 и Z).



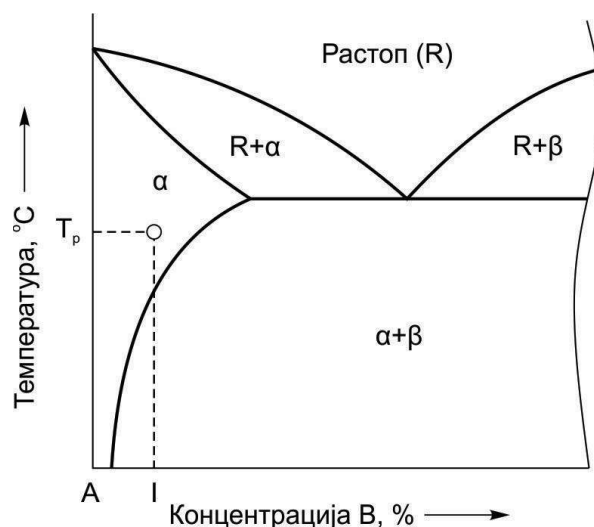
Слика 2.23 Дијаграм реаустенитизације [3, 8]

2.7 Таложно (дисперзно) каљење

Таложно каљење се заснива на пресићењу чврстих раствора и накнадном старењу. Она је најважнија термичка обрада за легуре алауминијума, магнезијума и бакра. Циљ је да се од грубе двофазне структуре добије fino диспергована секундарна фаза која повећава затезну јачину и тврдоћу.

Пресићење. Код пресићења легуре се загревају до температуре 30-50% изнад граничне растворљивости (тзв. солвус линије, сл. 2.24), нпр. до температуре T_p за легуру састава I, задржавају на тој температури и брзо хладе. Тада се исталожени састојци растварају. То је тзв. термичка обрада легура обојених метала, нпр. Al-Cu.

Отпорност челика ($R_{p0.2}$, R_m) после пресићења се мења, али се зато повећавају својства пластичности због преласка двофазне ($\alpha + \beta$) структуре у монофазну структуру (α).



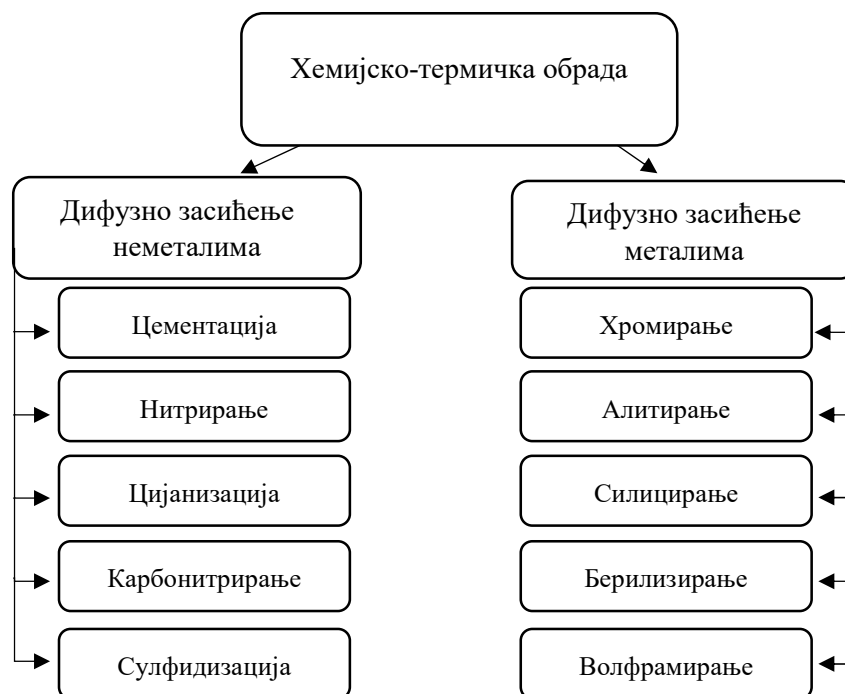
Слика 2.24 Равнотежни дијаграм са ограниченом растворљивошћу елем. В у елементу А [1]

Старење се састоји у загревању претходно пресићене легуре до температуре ниже од граничне растворљивости, држању на тој температури и хлађењу. Старењем се постиже ојачање и тиме долази до пораста својства отпорности и смањења својства пластичности. У процесу старења долази до излучивања вишка састојака из пресићеног раствора, у фазе високе дисперзије.

2.8 Хемијско-термичка обрада

Термичка обрада при којој настаје поред структурних измена и промена хемијског састава површинског слоја путем адсорпције и дифузије неких елемената назива се хемијско-термичка обрада. Састоји се из дифузионог засићења одређеним хемијским елементима да би се промениле хемијске, физичке и механичке особине површинских слојева челичних предмета, углавном тврдоћа и чврстина.

Она представља процес загревања до одређених температура у чврстој, течној или гасовитој средини, при чему долази до обogaћивања површинског слоја елементима као што су: C, N, Al, Si, Cr, B.

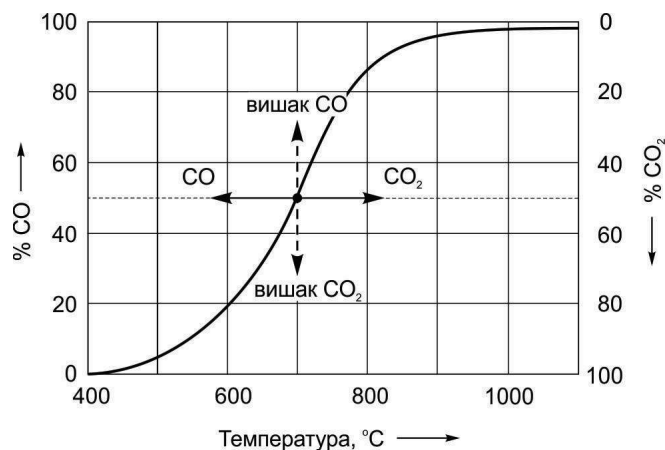


Цементација је најстарији начин хемијско-термичке обраде којом се угљенични, нисколегирани и високолегирани челици ниског садржаја угљеника површински засићују угљеником. Циљ је да се добије висока тврдоћа површинског слоја и висока отпорност на хабање. Цементација представља термомеханички процес у којем су површински слојеви обогаћени угљеником. Може се изводити у гасној, течној и чврстој средини.

Цементација у гасном средству. Овај вид цементација се највише изводи. У цементационој атмосфери функционалну улогу имају смеше $\text{CO}_2\text{-C}$ и $\text{H}_2\text{-C}$. Цементација у гасу има неке предности у односу на цементацију у чврстом средству: цена је нижа, угљеник дубље продире у површинске слојеве, времена су краћа, јер јер загревање у гасу брже него у чврстом средству богатом угљеником. Гасна цементација се у индустрији изводи у јамским пећима које се називају монокарб.

Цементација у чврстом средству. Код овог начина радни делови се прво стављају у сандуке од ватросталног челика, затим се засипају цементационом смешом и на крају се поклопац сандука заварује, односно херметички затвара. Сандук се уноси у пећ чија је температура $900\text{-}950^\circ\text{C}$ и држи око 10 h. Цементација у чврстом средству не захтева велике инвестиције, јер се може извести у било којој пећи, али се због дужег времена и отежанијих услова преоручује за једноставне радне предмете који се у пећи држе око 6 h. После тога сандук се вади и оставља да се поклопац охлади до 450°C , затим се сандук отвара, делови ваде и хладе се до собне температуре. На крају се делови кале и ниско отпуштају.

Из Будуарове криве која је приказана на слици 2.25, може се запазити да се при вишем уделу CO од равнотежног стања настаје наугљенисавање, а при вишем уделу CO_2 разугљенисавање.



Слика 2.25 Будуарова крива [1]

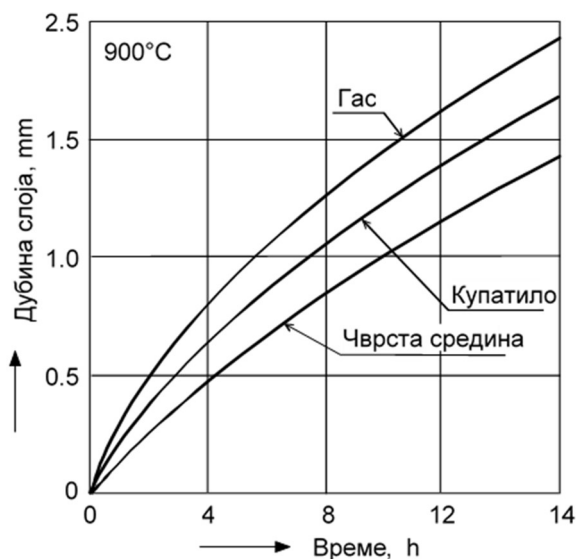
Цементација у течној средини се изводи у цијанидним купатилима израђеним од ватросталног челика. Течна цементација се у пракси најмање примењује због следећих разлога:

- ограничена је дубина цементације,
- мали су предмети обраде и
- добијање неравномерне дубине цементираног слоја.

Основни параметри цементације су:

- температура загревања,
- време држања и
- дебљина цементационог слоја.

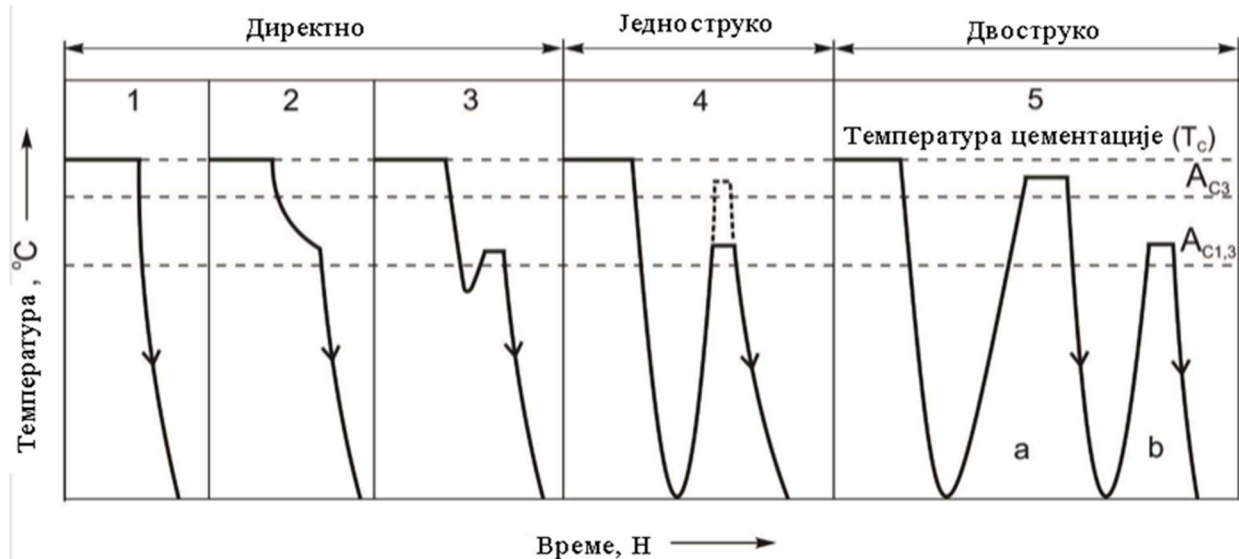
Температура цементације треба да буде изнад температуре A_{C3} . При температури већој од 900°C могу се цементовати ситнозрнасти челици са додатком титана који спречава пораст аустенитних зрна. Време држања на одабраној температури се одређује према дубини цементационог слоја (сл. 2.26).



Слика 2.26 Зависност дебљине цементационог слоја од температуре и времена цементације [1]

После цементације делови се кале (сл. 2.27):

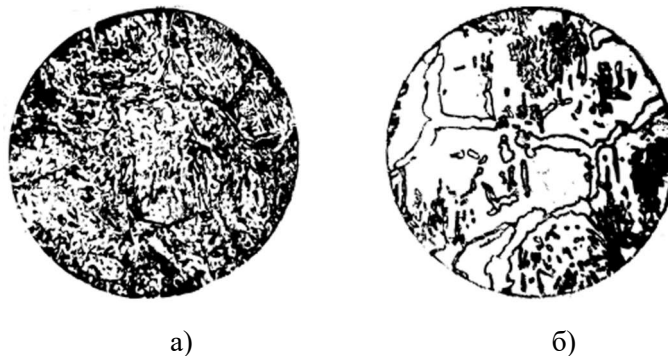
- директно каљење (после гасне цементације),
- једноструко каљење (код других поступака) и
- двоструко каљење (код других поступака).



Слика 2.27 Директно, једноструко и двоструко каљење [1]

Анализа цементационог слоја показује да се садржај угљеника креће од 1% С па опада ка језгру. У прелому окаљени цементитни слој је јасно изражен, а може се још јасније истаћи нагризањем киселинама. Окаљени предмет може да има структуру мартензита или мартензита са аустенитом. Аустенит може да изазове кртост цементационог слоја, па је често потребно отпуштање или двостепено каљење, да би се аустенит одстранио.

Лагано охлађени цементитни слој после цементације има мрежицу карбида (тзв. стеадита) са правилно распоређеним перлитом (сл. 2.28а). И та структура се назива нормална. Код неких врста челика могу се појавити структуре које се састоје од испрекидане мрежице карбида и грубо излученог ферита и перлита (сл. 2.28б).



Слика 2.28 а) Структура карбида са правилно распоређеним перлитом и б) структура карбида и грубо излученог ферита и перлита [3, 4]

Дебљина цементационог слоја се одређује на различите на начине:

- мерењем удаљености од површине комада, па до дубине која садржи 0.40%С,
- мерењем удаљености површине на којој је после каљења тврдоћа 50-55 HRC и
- на металографском узорку на коме се одређује дубина која потамни после нагризања са 5% или 10% раствора HNO_3 у денатурисаном алкохолу.

Нитрирање је дифузионо засићење површине челика азотом у гасној или течној средини, при чему се ствара површински слој, који садржи тврде нитриде легираних елемената назива се нитрирање. Разликују се тврдо и антикорозивно.

Може да се изводи:

- у гасовитој средини,
- у купатилу и
- тзв. јонско нитрирање.

Нитрирање у гасу. За припремање атмосфере користи се течан амонијак који дисоцира према једначини: $2NH_3 \rightarrow 6H + 2N_{at}$. Радне предмете је потребно пре нитрирања завршно машински и термички обрадити каљењем и отпуштањем. Тврдо се нитрирају делови аутомобилских и авионских мотора, углавном осовинице клипова, коленаста вратила, делови водених пумпи и пумпи за гориво. Температура за тврдо нитрирање је око 550°C. Код нитрирања алатних челика у гасној атмосфери предузимају се посебне мере да се добије танак нитрирани слој равномерне дебљине. Код алата од брзорезних челика циклус нитрирања траје од 30 до 60 минута при 540-560°C.

Површине које треба заштитити од нитрирања претходно се калајишу, или се електролитички никлују или бакаришу. Поред повећања површинске тврдоће нитрирање доводи и до умањења коефицијента трења и корозивне отпорности.

Нитрирање у купатилу се спроводи у смеси растопљених цијанида и кристалне соде при температури око 560°C. Из смеше се издвајају атоми N и C, а у површинске слојеве челика дифундује углавном N, јер је за дифузију угљеника потребна виша температура. У купатилу се нитрирају углавном алати као што су нарезнице, глодачи, проширивачи од брзорезног челика.

Као поступак отврдњавања површинског слоја предмета нитрирање у односу на цементацију има своје добре стране и предности:

- пошто се ради при температури од 500°C не могу настати деформације као при цементацији,
- нитриране површине врло добро подносе оптерећење на трење за цело подручје температура до 500°C, док је за цементиране површине критична температура чак при 200°C,
- нитриране површине су отпорне према корозији. Ова се особина повећава брушењем или полирањем кад се скине 0,05 mm слоја,
- тврдоћа нитрираног слоја је већа него тврдоћа цементираног. Тврдоћа је максимална већ при скидању слоја од 0,03 mm а затим постепено опада и
- челик за нитрирање врло добро подноси променљива динамичка напрезања.

Мада поред свих ових предности, челици за нитрирање имају извесна својства која спречавају њихову примену. Код извођења нитрирања мора се узети у обзир цео поступак термичке обраде, односно и претходне термичке обраде (нормализација, побољшање), као и сам процес нитрирања. Нитрирање се изводи у специјалним пећима које се могу подизати и спуштати на сандук у коме су положени предмети за нитрирање.

Цијанизација се обавља тако што се делови потопе у течна средства, тј. истопљене соли које садрже цијанску групу, као што су: NaCN , KCN , Ca(CN)_2 . Цијанизацији се подвргавају резни алати од брзорезних челика, као и високохромни челици за алате намењени за обраду деформисањем. Што се тиче квалитета, цијанизација је слична цементацији, али даје знатно већу тврдоћу, највећу која се може постићи пре накнадне термичке обраде, која се састоји из каљења и ниског отпуштања.

Карбонитрирање је дифузно "уношење" (атомног) угљеника и азота из одговарајуће гасне атмосфере у плитке површинске слојеве челичних делова. Затим се обавља каљење, углавном у уљу. Карбонитрирање често замењује цементацију, јер краће траје и даје чистије површине. При карбонитрирању хлађење се може изводити и са мањом брзином, односно у уљу уместо у води што смањује опасност од деформација. Загревање је у границама $800-900^\circ\text{C}$ за конструкционе челике што даје карбидну структуру отворднутог слоја, и $830-850^\circ\text{C}$ за алатне челике кад се добија нитридна структура тог слоја.

Сулфидизација је засићење површинског слоја челика сумпором, угљеником и азотом да би се повећала отпорност према хабању. Изводи се на температури $580-590^\circ\text{C}$, у растопљеним солима посебног садржаја у току три сата.

3. Пећи и расхладна средства за термичку обраду

Циклус термичке обраде састоји се из:

- загревања до T_x (од 150 до 1300°C),
- држања (прогревања) на T_x (од неколико минута до неколико дана) и
- хлађења различитим брзинама.

Брзина загревања зависи од: термичке проводности материјала (λ , W/mK), односа површине попречног пресека и укупне запремине дела (A/V), медијума у коме се изводи загревање, начина шаржирања и др. Различите брзине загревања постижу се:

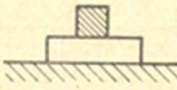
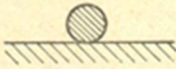
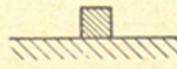
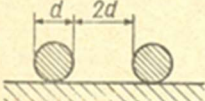
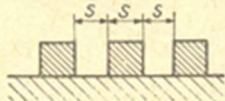
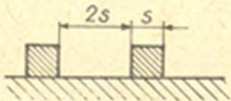
- у металним и соним купатилима/купкама: металним купкама олова или соним купатилима ($NaNO_3 + KNO_3$),
- у машинском уљу и
- на ваздуху (са вентилациом, на промаји, на мирном ваздуху).

На брзину загревања и хлађења утичу:

- основни материјал (таб. 3.1),
- облик предмета (плоча, цилиндар) и однос површина попречног пресека/укупну запремину предмета и
- начин паковања у пећи (сл. 3.1).

Таблица 3.1 Врсте основног материјала [7, 9]

Врста основног материјала	Термичка проводност, λ , W/mK
Бакар	395
Алуминијум	222
Нискоугљенични челик (500-600°C)	60
Нерђајући Cr-Ni челик	30

Начин паковања	<i>n</i>	Начин паковања	<i>n</i>
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2
	1,7		1,8

Слика 3.1 Утицај начина паковања на време загревања [7, 9]

3.1 Пећи за термичку обраду

Каљење, жарење и цементација се обављају у специјалним пећима. То су:

- пећи за отпуштање до 250°C,
- пећи за жарење, каљење и цементацију 150-600°C,
- пећи за жарење, каљење и цементацију 600-1000°C и
- за каљење BRW челика до 1300°C.

Према начину загревања пећи могу бити:

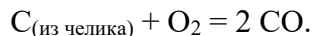
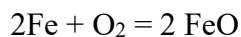
- пећи са директним загревањем: чврстим, течним гасовитим горивом и електричном енергијом и
- пећи са посебним загревањем: металне купке, соне купке и тсл.

При термичкој обради највише се за загревање употребљавају специјалне металуршке електро-пећи које се могу загревати електричним отпором-ефектом $R \cdot I^2$ или индукцијом. Такође се користе и пећи на чврста, течна и гасовита горива.

За термичку обраду специјалних челика (алатних) потребна је заштитна атмосфера због:

- заштите од оксидације, односно хемијске корозије и
- заштите од разутљенисавања.

До 500°C оба процеса су занемарљива, а при $T > 500^\circ\text{C}$ настају реакције:



Заштита од оксидације и разугљенисабања изводи се:

- загревањем у инертним гасовима,
- загревањем у заштитној атмосфери,
- загревањем у металним и соним купатилима и
- применом вакуумских пећи.

Пећи на чврста горива имају решетке на којима сагорева чврсто гориво, док су пећи на течна и гасовита горива опремљене посебним млазницама за распршавање горива. Према намени пећи могу бити универзалне и специјалне.

Према начину загревања могу да се поделе на оне које користе:

Директно загревање:

- коришћењем електричног отпора: ефектом $R \cdot I^2$ или индукцијом и
- сагоревањем горива: чврстих, течних и гасовитих.

Посредно загревање:

- металне купке - растопљено олово ($330-850^\circ\text{C}$) и
- соне купке - $\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ ($150-750^\circ\text{C}$).

Пећи за загревање при термичкој обради могу бити веома различите по конструкцији, услед чега имају различите називе као што су: коморне, јамске, дубинске, ротационе, нагибне, комбиноване, проточне. За термичку обраду пећи могу бити веома различитих конструкционих решења.

Углавном се деле на:

- коморне (сл. 3.2),



Слика 3.2 Коморна пећ [1]

- јамске (сл. 3.3) и



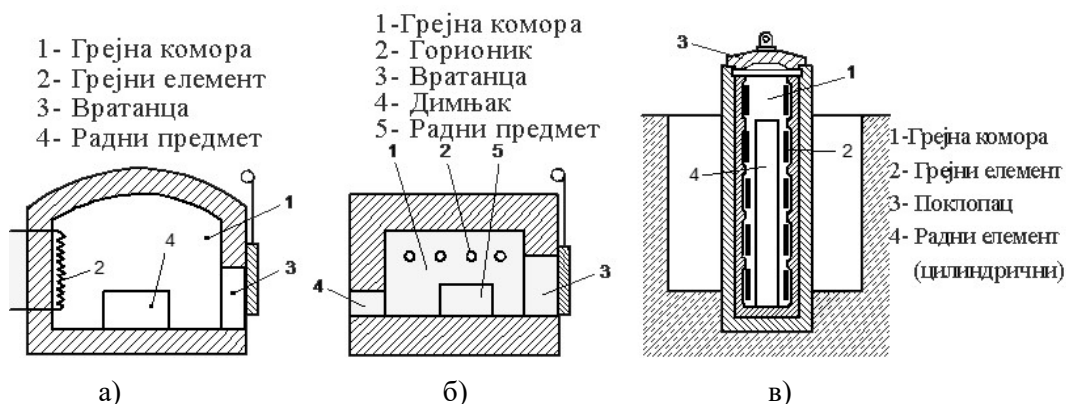
Слика 3.3 Јамска пећ [1]

- сона и метална купатила (сл. 3.4).



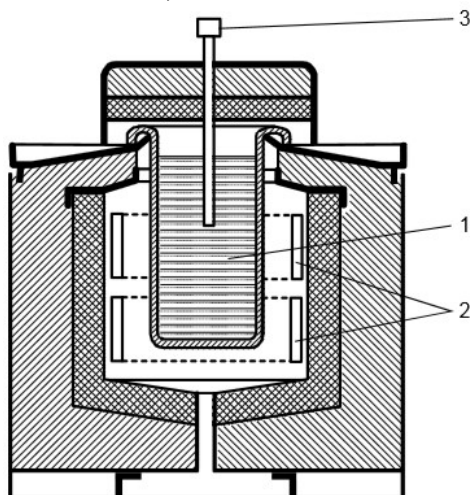
Слика 3.4 Сона купатила [1]

Код коморних пећи делови се могу загревати директно или индиректно. Индиректно делови су смештени у затвореној комори или "муфолној" пећи, која се споља греје топлим гасом. Директно продукти сагоревања долазе у непосредан додир са деловима. Углавном се једна комора користи за предгревање, а друга за завршно загревање (сл. 3.5).



Слика 3.5 Шема а) једнокоморне, б) двокоморне и в) јамске пећи [1]

За радне предмете који се загревају у течном медијуму користе се "купатила" у којима је растопљена нека со (сона купатила, KNO_3 , NaNO_3) или метал, као што је на пример олово (метална купатила, сл. 3.6).



Слика 3.6 Метално купатило, 1- течан метал, 2- грејачи, 3- термометар [1]

Соне пећи најчешће се загревају електричном струјом да би се прецизније контролисала предвиђена температура за неки вид термичке обраде челика. За термичку обраду купатила се користе код ситнијих делова, најчешће алата од брзорезних челика. Загревање у течним средствима је брзо. Загревање у соном купатилу је у границама 150-750°C, а у оловном купатилу 330-850°C.

Површинска оксидација односно сагоревање представља директан губитак метала у површинским слојевима, па долази до оштећења радног предмета. Зато су погодније коморне пећи са неутралном или контролисаном атмосфером. Добија се увођењем неутралног гаса под мањим натпритиском или стварањем вакуума у радној комори. За спречавање оксидације површинских слојева користи се азот (N) или инертни гас аргон (Ar). Употребом вакуумске пећи спречава се површинска оксидација и друге штетне појаве (сл. 3.7).



Слика 3.7 Вакуумска пећ [9]

3.2 Хлађење и средства за хлађење

Хлађење је важна технолошка операција колико и загревање, па се за већину видова термичке обраде прописује и брзина хлађења v_h . 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 другим расхладним средствима.

Као средства за хлађење користе се:

- вода (за угљеничне и нисколегиране челике, за површинско каљење),
- уље (за средње легиране челике),
- ваздух (за BRW челике),
- сона или метална купатила и
- хладне металне (најчешће бакарне плоче) које делују непосредним додиром.

Ваздух служи за каљење самозакаљивих и брзорезних челика.

Вода се употребљава за каљење угљеничних и нисколегираних челика. За каљење угљеничних челика потребана је велика брзина хлађења, зато се користи вода која најинтензивније хлади. Такође вода се употребљава и за каљење нисколегираних челика, међутим неки од њих се могу калити и у уљу. Најефикасније је каљење воденим млазом, јер млаз одстрањује све парне мехурове тако што их преводи у капљице које су способне за пренос топлоте. Брзина хлађења воде може варирати у функцији температуре и адитива:

- Чиста вода: $v_{h_{18^\circ C}}^{H_2O} = 600^\circ C / s$;
- Вода са 10% NaCl: $v_{h_{18^\circ C}}^{H_2O+10\% NaCl} = 1200^\circ C / s$;
- Вода са CaO: $v_{h_{18^\circ C}}^{H_2O+CaO} < 600^\circ C / s$;
- Вода са сапуницом (глицерином): $v_{h_{18^\circ C}}^{H_2O+sapunica} = 300^\circ C / s$ [9].

Уље се хлади 3- 4 пута спорије од воде између 650-550°C и скоро десет пута спорије у интервалу између M_s - M_f температура.

Понекад се користи комбиновано хлађење: вода + уље. Остварује се велика брзина хлађења при $T > 300^\circ C$, а мања у еластичној области, где постоји опасност од великих термичких напона. Уља за хлађење могу бити различита по саставу и по интензитету хлађења.

Сона или метална купатила се често употребљавају за хлађење. Она су погодна за брзо хлађење до температура које су изнад собних за тзв. "термално" каљење брзином већом него при хлађењу у уљу.

Треба нагласити неке корисне препоруке које се односе на количину расхладне течности у односу на масу комада и мешање средства при каљењу. Количина расхладног средства по једном килограму масе радног комада износи минимално 10 литара.

Такође, при каљењу, све до хлађења комада треба интензивно мешати средство за хлађење после потапања загрејаног комада у расхладн осредство (или померати радни предмет горе-доле без вађења из расхладног средства!). На овај начин разара се парни омотач око комада и повећава ефикасност средства за каљење, односно смањује температурски градијент површина-језгро.

Хладне металне плоче топлоту одводе кондукцијом (таб. 3.2). Плоче, челичне или бакарне служе за хлађење под пресом зупчастих венаца, плоча и других витких делова, за спречавање њихове деформације, највише витоперење. Брзина хлађења бакарних плоча износи 60°C/s, а челичних 35°C/s.

Учинак каљења различитих средстава зависи од:

- термичке проводности,
- специфичне топлоте,
- топлоте испаравања и
- вискозитета средства за хлађење.

Знатан утицај има и количина растворених гасова, који са испарењима у купатилу образују парни омотач на граничној површини каљеног предмета. Учинак расхладног медијума може се изразити као однос између закаљеног и незакаљеног пречника који се назива интензитет каљења (Н).

Таблица 3.2 Брзина хлађења челика у различитим расхладним средствима [1]

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

4. Сопствени напони и грешке при термичкој обради

4.1 Сопствени напони и грешке при каљењу

При термичкој обради, посебно каљењу, могу настати:

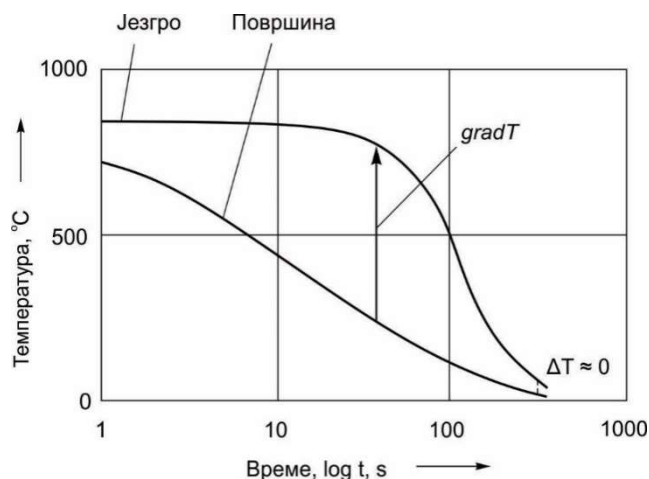
- заостали напони и деформације и
- недовољно загревање, кратко прогревање, прегоревање, разугљенисавање и оксидација.

Сопствени напони се јављају због неравномерног загревања и хлађења (термички напони), као и због структурних преображаја у еластичном подручју (структурни напони) (сл 4.1).



Слика 4.1 Распоред термичких и структурних напона при хлађењу [3, 4]

Назив сопствени напони користи се да би се разликовали од радних напона који потичу од спољашњих сила и момената. Код термичке обраде челика највећи сопствени напони настају при каљењу, јер се поред термичких напона високог нивоа јављају и структурни напони услед мартензитне локалне трансформације аустенита само у неким деловима запремине радног предмета. Термички напони су сразмерни температурском градијенту, односно порасту температуре (T) у правцу нормале (n) на изотермичку површину. Промена $\text{grad}T$ у току хлађења челичног ваљка у води је приказана на слици 4.2.



Слика 4.2 Промена $\text{grad}T$ при воденом хлађењу ваљка $\Phi 100\text{mm}$ [1]

За време хлађења настају прелазни термички напони који се мењају у току времена хлађења, а када се део охлади делују само заостали напони. Прелазни термички напони у еластичној области мењају се по закону:

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

где је:

E - модул еластичности,

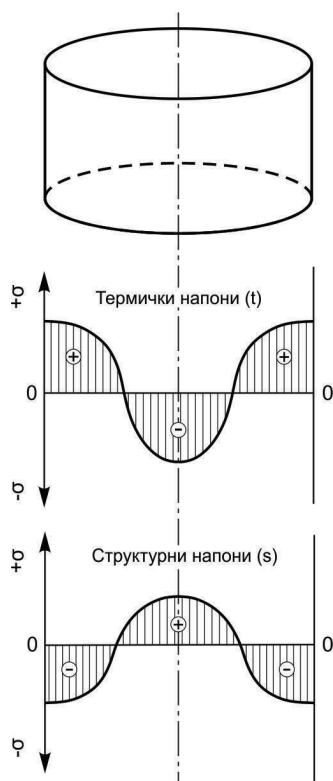
α - коефицијент линеарног термичког ширења и

ΔT - разлика температура у појединим тачкама пресека у истом тренутку времена.

Са порастом температуре модул еластичности - E опада, док коефицијент линеарног термичког ширења - α расте, али се те промене не могу аналитички изразити. Проблематика одређивања прелазних и заосталих унутрашњих напона је веома сложена. Ниво прелазних термичких напона је виши при хлађењу, него при загревању. Градијент расте са повећањем пресека радног предмета.

Прелазни максимални напони настају око 600°C , ако се надмаши јачина материјала, појавиће се прслине. Коначно напонско стање у охлађеном ваљку ће бити сложено, јер на омотачу делују напони затезања, а у средишту напони притиска (сл. 4.3), односно спољашњи слојеви остају затегнути, а језгро притиснуто.

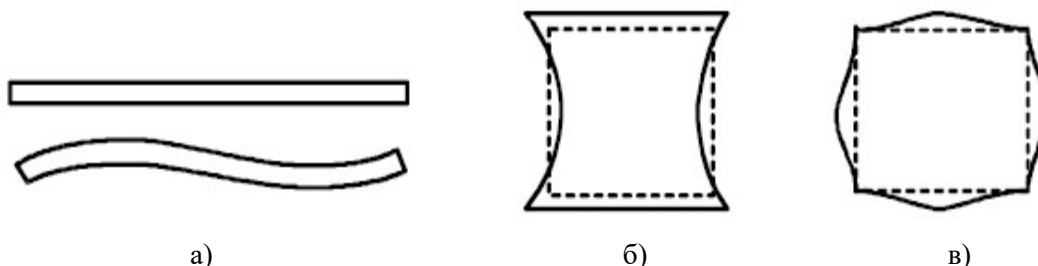
Новонастале фазе на крају термичке обраде имају различиту специфичну запремину. С обзиром да мартензит има највећу специфичну запремину, ако се претпостави да је мартензит настао само до неке дубине од омотача ка оси ваљка, јасно је да унутрашњи делови материјала ометају спољашње да се прошире ка центру.



Слика 4.3 Шема расподеле термичких и структурних напона у каљеном челичном ваљку [1]

Термички и структурни напони се сабирају (суперпонирају) па се добијају укупни унутрашњи напони и у зависности од њихове величине, распореда и геометријских карактеристика радног предмета, могу изазвати витоперење, кривљење, промене запремине и тсл. У неповољним случајевима може настати и разарање - прскање.

Прелазни и унутрашњи напони су штетни и зато се настоји да се различитим мерама што више смање. Деформисању су склони витки и танки делови. На слици 4.4 приказани су радни предмети деформисани при каљењу услед унутрашњих напона. Витоперење (сл. 4.4а) повећава се ако се предмети неправилно потапају у каду за термичку обраду. Деформисање представља одговарајућу реакцију на унутрашње напоне који се трајним деформисањем смањују (сл. 4.4б,в).



Слика 4.4 Примери деформисања делова при каљењу [1]

Ако се предмети неправилно потапају у каду за термичку обраду повећава се витоперење. Због смањења витоперења понекад се предмети хладе стегнути у пресам за каљење. Треба рачунати и на већа унутрашња напрезања што повећава опасност од појаве и ширења прслина. Мада се без обзира на предузете мере, не може увек спречити деформисање, па се користи накнадно испаравање.

Прскање настаје кад унутрашњи затежући напони надмаше јачину на кидање датог материјала. С клоност ка прслинама код челика расте са порастом садржаја угљеника и при брзом хлађењу између температура M_s и M_f . Најчешће се иницијалне прслине јављају на местима концентрације напона, као што су нагле промене пресека, зарези, оштри жлебови, нагла промена тврдоће по пресеку и тсл. Прслине се не могу накнадним мерама отклонити и мора се све предузети да не дође до њихове појаве.

Грешке каљења као што су меке зоне, могу се отклонити поновном термичком обрадом. Предмет се најпре нормализује, а затим кали. Искривљени и извитоперени делови се могу исправити под пресом, и затим жарити ради смањења напона. У случају да дође до неуспеха ових мера, извитоперен предмет се меко жари, а затим исправља на топло у преси и поново кали.

Остале грешке које су настале при каљењу су:

- недовољно загревање,
- прегревање и
- прегоревање.

У случајевима када не долази до жељених резултата или када се при машинској обради појаве прслине због поремећаја равнотежног стања унутрашњих напона, предмет се одбацује као отпадни материјал.

4.2 Грешке при жарењу челика

До појаве грешака у структури жареног челика може доћи услед:

- неправилно вођеног загревања,
- неодговарајуће температуре жарења,
- дугог времена жарења,
- непогодне пећне атмосфере или
- због неправилног хлађења.

У случају сувише високе температуре жарења или дугог времена држања долази до пораста аустенитног зрна - прегревање што има за последицу пораст зрна секундарне структуре настале разлагањем аустенита. То доводи до смањења пластичности и ударне жилавости жареног челика, док се затезна јачина обично не мења. Пораст зрна које је изазвано прегревањем може да се отклони поновном нормализацијом или потпуним жарењем. Појава прегревања са променом стања граница зрна јавља се:

- под утицајем кисеоника и сумпора који на високим температурама жарења продиру из пећне атмосфере у челик и то претежно дуж граница зрна или
- на рачун кисеоника и сумпора присутних у виду неметалних укључака у самом челику који се на високим температурама жарења делимично растварају да би се при хлађењу поново издвојили по границама зрна.

Прегоривање у површинском слоју при ковању и ваљању доводи до појаве мреже пукотина на површини челика. Недовољно висока температура жарења не осигурава потпуну рекристализацију тако да у случају подеутектоидних челика један део ферита остаје нетрансформисан. Ферит који је настао при хлађењу из аустенита разликује се по способности нагризања од ферита који при загревању није претрпео никакве промене [5].

4.3 Грешке при цементацији

При цементацији се најчешће јављају следеће грешке [4]:

1. Неодговарајућа дубина цементационог слоја, што је последица неправилног режима цементације. Недовољна дубина цементационог слоја може се исправити поновном цементацијом. Сувише велика дубина цементационог слоја представља грешку, која се не може исправити.
2. Мека места на површини услед неравномерне карбурације. Обично је последица непотпуног одмашћивања површине комада који се излаже цементацији или на неки други начин спреченог приступа средства за цементацију до свих места површине која се цементира.
3. Појава карбидне мреже у површинској зони челика, што је последица високе температуре цементације. Карбидна мрежа изазива појаву мрежастих пукотина и љуштење цементационог слоја услед повећане кртости.
4. Недовољна тврдоћа површина последица је недовољног засићења површине угљеником или недовољно брзог хлађења током каљења.
5. Неравномерно опадање садржаја угљеника у цементационом слоју, односно одсуство прелазне зоне. У овом случају долази до љуштења цементационог слоја ради напрезања која се јављају при каљењу.

6. Грубозрнаста структура прелома је последица високе температуре цементације, може да се уклони каљењем уз поновно загревање до погодне температуре, односно двоструким каљењем.

4.4 Друге грешке термичке обраде

Прегревање се јавља при загревању на температури $T \gg A_3$ или због предугог држања, при чему се добија крупнозрнасти аустенит. При брзом хлађењу настаје веома неповољна игличаста 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).

Недовољно загревање, $T_k < A_3$ па је почетна структура $\alpha + \gamma \rightarrow \alpha + M$. Грешка се отклања поновним загревањем + каљењем.

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

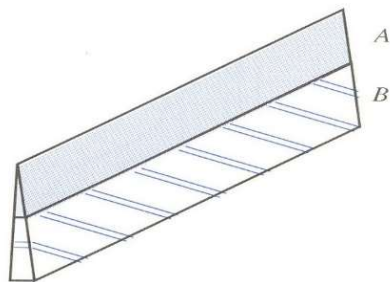
Витоперење настаје при неправилном шаржирању пећи, кад се део посрави плочастимце уместо вертикалног положаја - вешања [7].

Пример: каљење секире (сл. 4.5)

Неке зоне каљених делова, као што су секире, веома се брзо хладе па прелазе у мартензит (резни део врха клина – зона А), док неке зоне још увек имају врућ и мек аустенит. Меке зоне лако подnose све промене – зона В. Када се делови охладе и изврши трансформација $A \rightarrow M$, они се шре па крте зоне могу напрснути.

Решење:

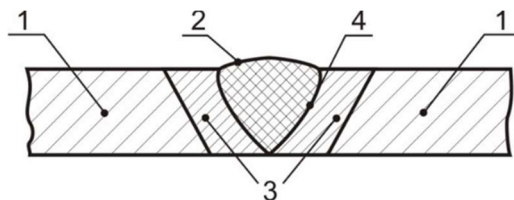
1. Део (секиру) полако загревати до потпуне аустенитизације.
2. Каљење извести у топлом уљу, течном металу или растопљеној соли изнад M_s температуре, држати до изједначавања температуре по целом пресеку (да се спречи настанак прелина).
3. Хлађење извести на ваздуху у опсегу $M_s - M_f$.
4. Спровести накнадно ниско отпуштање.



Слика 4.5 Каљење секире [7]

5. Термичка обрада заварених спојева

Заварени спој је део нераздвојивог споја изведен заваривањем од елемената завариваног материјала (сл. 5.1). Састоји се из шав и основног материјала од којег су израђени елементи који се спајају заваривањем.



Слика 5.1 Суочено заварен спој; 1- основни материјал, 2-шав, 3- зона утицаја топлоте (ZUT), 4- зона стапања [8]

При заваривању различитих метала и легура, у зависности од примењеног начина и поступака, неминовно долази до већих или мањих структурних промена које углавном делују неповољно на механичка својства заварених спојева. Поступци термичке обраде који се примењују у току извођења завареног споја деле се на:

- загревање пре заваривања и у току заваривања и
- жарење после заваривања.

Циљ загревања завариваних делова јесте да се повећа брзина хлађења и тиме спречи закаљивање ZUT-а (појава мартензитне структуре) и појава хладних прслина.

Претходна термичка обрада има за циљ оптималну припрему материјала за заваривање: уједначавање хемијског састава, отклањање сопствених напона од претходне прераде и добијање погодних механичких особина. Ово се постиже нормализационим жарењем, потпуним жарењем, непотпуним жарењем, жарењем за отклањање напона и каљењем. Загревање делова пре почетка заваривања се назива предгревање, а загревање у току самог процеса и после њега зове се догревање или прогревање.

Термичка обрада у току заваривања углавном је непотпуно жарење и жарење за отклањање напона. У току заваривања могу се убројати и предгревање делова пре заваривања, као и за време заваривања. Као накнадна термичка обрада обично се примењује нормализационо жарење, жарење за отклањање напона и каљење са отпуштањем. Код термичке обраде заварених спојева највише се примењује предгревање. Претходно загревање има за циљ да се повећа брзина хлађења и назива се предгревање. Температура предгревања износи од $100 \div 250^{\circ}\text{C}$ за угљеничне челике и од $100 \div 450^{\circ}\text{C}$ за легиране челике.

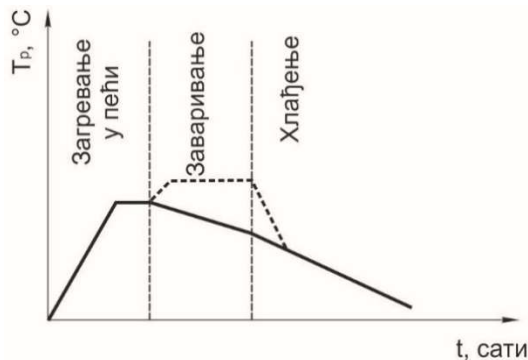
У зависности од врсте челика, његове дебљине, конструкционог решења завареног споја, поступка и технологије заваривања, температура предгревања може износити од неколико десетина до неколико стотина $^{\circ}\text{C}$. Претходна термичка обрада се понекад зове загревање ради сушења страница жлебова. Она се изводи помоћу горионика са окси-ацетиленским или окси-пропанским пламеном. Када се за предгревање користе други извори топлоте (гасни пламен, приручне пећи на ђумур) постигнута температура може се контролисати термокредама или термопаровима.

Термокреде се топе или мењају боју на тачно одређеним температурама. Температура до које су делови загрејани пре заваривања може се у неким случајевима приближно одржати за све време израде шав, док је понекад пад температуре толики да је потребно накнадно локално загревање-догревање. Разликују се следеће варијанте заваривања:

- заваривање са предгревањем,
- заваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем,
- заваривање са предгревањем и прогревањем,
- заваривање са међухлађењем (interpass) и
- заваривање са степенастим предгревањем.

5.1 Заваривање са предгревањем

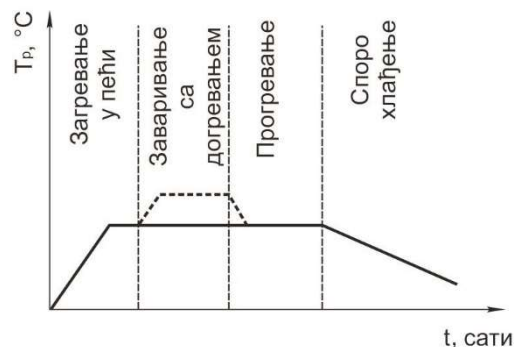
Заваривање са предгревањем се примењује за масивне делове код којих температура предгревања незнатно опада (сл. 5.2). Температура завариваних делова може да порасте изнад почетне температуре предгревања, код аутоматских поступака заваривања или примене електроде великог пречника.



Слика 5.2 Загревање са предгревањем [8]

5.2 Заваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем

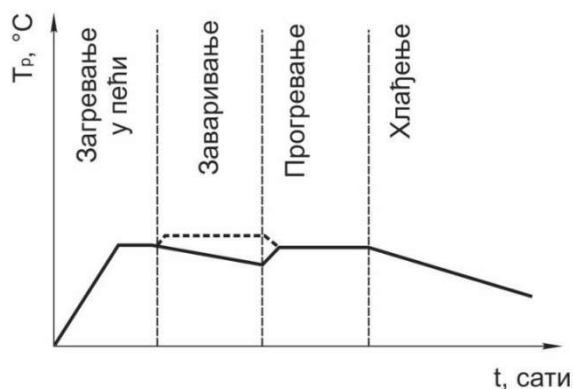
Примењује се за танкозидне конструкције сложеног облика које се интензивно хладе због велике површине (Слика 5.3). У току заваривања делови се догревају до температуре прогревања, затим следи прогревање и хлађење у пећи за термичку обраду, односно у сувом песку или ћумуру.



Слика 5.3 Заваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем [8]

5.3 Заваривање са предгревањем и прогревањем

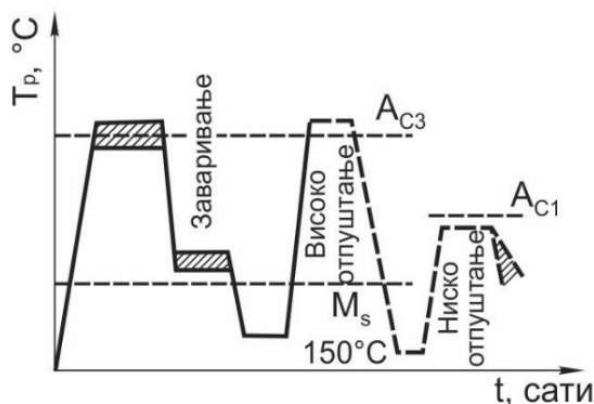
Заваривање са предгревањем и прогревањем примењује се за масивне делове од угљеничних и нисколегираних челика код којих је сувише велика брзина хлађења покривног зава (слоја). Температурски режим заваривања је приказан на слици 5.4. Прогревањем на температури предгревања задњи завар изједначава се са осталим заварима у шаву који су били подвргнути спонтаном жарењу деловањем топлоте при полагању наредних слојева.



Слика 5.4 Заваривање са предгревањем и прогревањем [2]

5.4 Заваривање са степенастим предгревањем

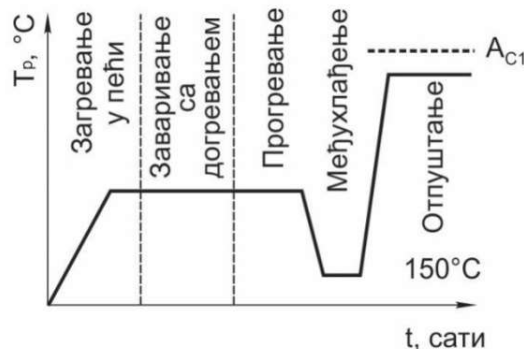
Примењује се само када је то једини начин да се добију заварени спојеви високог квалитета због тога што је доста компликован и скуп за извођење (сл. 5.5). Делови се најпре предгревају до аустенитног подручја, затим се хладе до температуре заваривања која је нешто изнад температуре мартензитне трансформације (M_s). Тако се постиже технолошка отпорност при заваривању, односно спречава се појава прелина у току израде шавова. Након заваривања делови се хладе до температуре од 150°C и са те температуре двоструко отпуштају: најпре високо, а затим ниско.



Слика 5.5 Заваривање са степенастим предгревањем [8]

5.5 Заваривање са међухлађењем (interpass)

Заваривање са међухлађењем је савремен начин заваривања којим се спречава појава прслина. Погодан је за заваривање челика са већим садржајем заосталог аустенита и уопште дебелих челичних делова. Делови се предгревају, догревају, прогревају, а затим хладе до 150°C, задржавају неко време при тој температури и подвргавају термичкој обради-отпуштању (сл. 5.6). Задржавањем завареног споја при 150°C одлаже се преображај заосталог аустенита у мартензит па се добија бејнитна структура или нискоугљенични мартензит чиме се спречава појава прслина.



Слика 5.6 Заваривање са међухлађењем и отпуштањем [2]

5.6 Жарење после заваривања

Жарење после заваривања се најчешће изводи у циљу смањења заосталих напона, а највише због уситњавања металних зрна. Жарење у циљу смањења напона примењује се за одговорне заварене конструкције чија је дебелина $s > 30 \text{ mm}$, или за које је испуњен услов:

$$0.1 \cdot R_{eH} + s \geq 50,$$

где је: R_{eH} – граница течења основног материјала у MPa .

Време трајања термичке обраде, односно време држања при температури жарења приближно је 2 min/mm дебелине, али не сме бити краће од 1 h нити дуже од 5 h. Брзина хлађења мора бити двоструко мања од брзине загревања. Овај режим жарења најлакше је остварити у пећима за термичку обраду, или спречијално конструисаним пећима. Жарење у циљу смањења заосталих напона, због високе цене, опреме и извођења, примењује се само када је то неопходно. Жарење је неопходно за заварене или репариране конструкције које се после заваривања механички обрађују. Ако би се механички обрађивали делови са заосталим напонима дошло би до поремећаја равнотежног напонског стања, као и трајних деформација и промена димензија, што је недопустиво код блокова мотора, кућишта машина алатки и других конструкција.

Извори топлоте за термичку обраду могу бити стационарне и мобилне пећи, гасни горионици, термитна реакција, као и индукциони грејачи, електроотпорско загревање и др. [8].

6. Примери изведених термичких обрада

6.1 Угљенични челик за побољшање - Š1530 (C45)

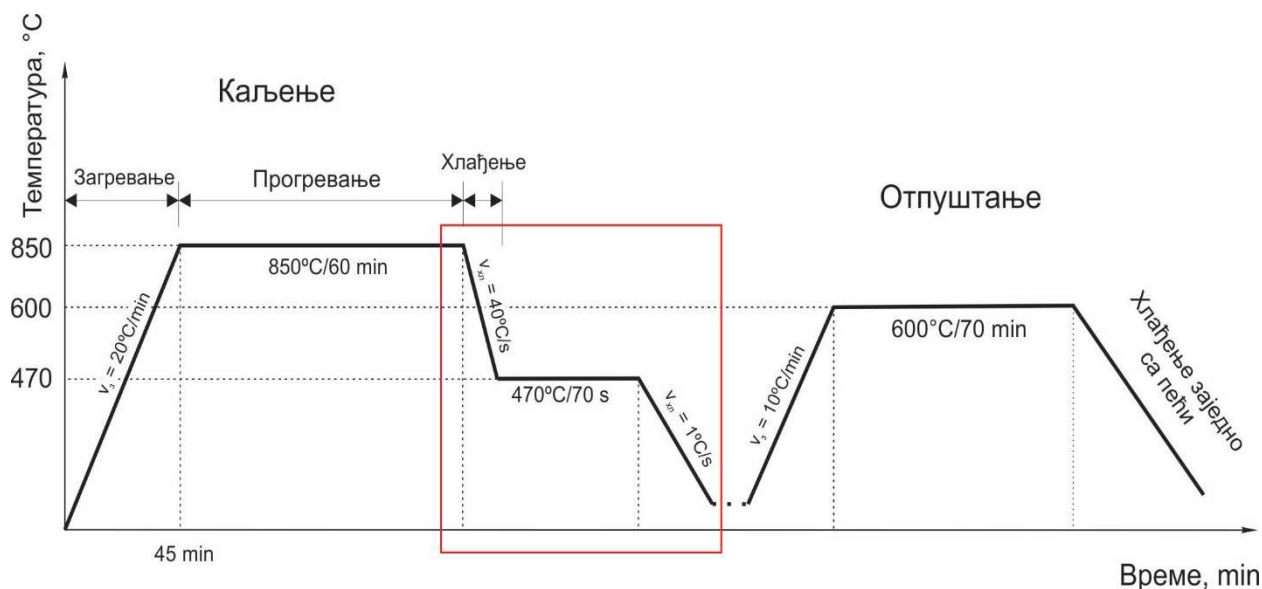
Челик Š1530 спада у групу средњеугљеничних челика. Користи се када је потребна већа јачина и тврдоћа него у ваљаном стању. Може се обрађивати машински: резањем, брушењем и полирањем. Подвргава се побољшању (каљењу и отпуштању) и користи се за ковање, израду завртњева, вратила, осовина, ножева, чекића, бургија за дрво, фелни и др.

Прописан хемијски састав:

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

Типичан режим термичке обраде:

- Нормализација – 840-880°C и хлађење на ваздуху (≈ 207 HB),
- Каљење – 820-860°C и хлађење у води или уљу и
- Отпуштање – 550-660°C и хлађење на ваздуху или у пећи.



Слика 6.1 Карактеристичан режим побољшања за челик C45

Механичке особине после нормализације:

Дебљина/пречник, mm	< 16
Дебљина, mm	< 16
Напон течења, MPa	мин. 340
Затезна јачина, MPa	мин. 620
Издужење, %	мин. 14

Механичке особине после побољшања (K + VO):

Дебљина/пречник, <i>mm</i>	< 16
Напон течења, <i>MPa</i>	мин. 49
Затезна јачина, <i>MPa</i>	мин. 700-800
Издужење, %	мин. 14
Суужење, %	мин. 35

6.2 Угљенични челик за побољшање - Š1730 (C60)

Спада у групу конструкционих високоугљеничних челика за побољшање. Садржај угљеника је око 0.60% што га чини погодним челиком за каљење али веома лошим за заваривање.

Прописан хемијски састав:

Легирајући елементи	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S
Садржај, %	0.61	max 0.40	0.75	max 0.40	max 0.10	max 0.40	0.035	0.040

Карактеристична термичка обрада:

- Нормализација – 820-860°C и хлађење на ваздуху ($\approx$ 240 HB),
- Каљење – 800-840°C и хлађење у води или уљу и
- Отпуштање – 550-660°C и хлађење на ваздуху или у пећи.

Механичке особине после нормализације:

Дебљина/пречник, <i>mm</i>	< 16
Напон течења, <i>MPa</i>	мин. 380
Затезна јачина, <i>MPa</i>	мин. 710
Издужење, %	мин. 11

Механичке особине после побољшања:

Дебљина/пречник, <i>mm</i>	< 16
Напон течења, <i>MPa</i>	мин. 570
Затезна јачина, <i>MPa</i>	мин. 830-980
Издужење, %	мин. 11
Суужење, %	мин. 25
Дебљина, <i>mm</i>	<16

6.3 Угљенични челик за цементацију - Č1220 (C15)

Челик Č1220 (C15) спада у групу угљеничних нисколегираних челика. Користи се за конструкције нижег приоритета и може се лако машински обрађивати резањем, брушењем и полирањем и добро је заварљив ($C_{max} = 0.20\%$).

Прописан хемијски састав:

Легирајући елементи	C	Si	Mn	P	S
Садржај, %	0.12-0.19	0.17-0.37	0.35-0.65	≤ 0.04	≤ 0.04

Механичке особине челика Č1220 су релативно повољне с обзиром на то да је челик веома обрадив различитим технологијама. С обзиром на низак садржај угљеника ($C < 0.20\%$) овај челик није каљив па се његове механичке особине могу побољшати једино хемијско-термичком обрадом (цементацијом, нитрирањем, карбонитрирањем итд).

Гарантоване механичке особине за $s < 16\text{ mm}$

Челик	Затезна јачина, MPa	Напон течења, MPa	Модул, еластичности, MPa	Издужење, %	Сужење, %	Тврдоћа, HB	Енергија лома, J
Č1220	500-800	370	205000	8	60	100-180	87

7. Закључак

На основу свега поменутог можемо закључити да челик термички обрађујемо како би побољшали његове физичке, механичке или технолошке особине. Жарење представља загревање металног комада на одређену температуру, држања на тој температури, а затим контролисано хлађење на собној температури. Суштина ове термичке обраде је да се добије ситнозрнаста структура аустенита са добрим особинама после трансформације у феритно-перлитну структуру. Каљење је врста термичке обраде која се користи како би повећали тврдоћу челика. Приликом каљења врши се трансформација аустенита у мартензит. Каљење се може изводити у води, уљу или ваздуху. Тврдоћа челика после каљења највише зависи од садржаја угљеника. Због тога се челици са садржајем угљеника мањим од 0.30% се по правилу не кале. За разлику од челика за побољшање чији је процентуални удео угљеника од 0.30 до 0.60%. Што се отпуштања тиче то је процес регулисаног загревања после каљења. Може се поделити на ниско, средње и високо отпуштање. Отпуштањем повећавамо жилавост каљеног челика, а смањују се тврдоћа и јачина. Циљ отпуштања је смањење унутрашњих напона, смањивање кртости каљеног челика и добијање жељених структура и механичких својстава. Често су у примени и поступци хемијско-термичке обраде у циљу побољшања особина површинских слојева машинских делова. Најшире су заступљени цементација и нитрирање.

При свим овим наведеним термичким обрадама могу настати грешке. При каљењу могу настати заостали напони и деформације. Док грешке при жарењу настају најчешће услед неправилног загревања, дугог времена жарења и неодговарајуће температуре жарења. Могу се јавити оксидација и разугљенисавање, витоперење и прегоревање.

Поступци термичке обраде који се користе приликом извођења завареног споја деле се на: загревање пре заваривања, загревање током заваривања и жарење после заваривања. Циљ загревања заварених делова јесте да се повећа брзина хлађења и тиме спречи закаљивање ZUT-а и појава хладних прслина. Жарење после заваривања се користи у циљу смањења заосталих напона.

8. Литература

1. М. Јовановић, В. Лазић, Д. Арсић: *Наука о материјалима*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
2. М. Јовановић, Д. Адамовић, В. Лазић Н. Ратковић: *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
3. И. Пантелић: *Технологија термичке обраде челика 2*, Раднички универзитет, Нови Сад, 1974.
4. С. Гугаљ: *Термичка обрада челика*, Београд, 1962.
5. Н. Видојевић: *Термичка обрада метала*, Технолошко – Металуршки факултет, Београд, 1973.
6. Р. Лучић: *Машински материјали*, Научно инжењерство, II издање, "Вук Караџић", Параћин, 1995.
7. В. Ђорђевић: *Машински материјали - први део*, Машински факултет, Београд, 1999.
8. М. Јовановић, В. Лазић: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
9. М. Јовановић, В. Лазић: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2007-2018.