

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Термичка обрада метала

Број индекса: 320/2011

Марко Д. Николић

**ИЗБОР ТЕРМИЧКОГ ТРЕТМАНА АЛАТА ЗА ХЛАДНУ
ОБРАДУ ДЕФОРМИСАЊЕМ – НА ПРИМЕРУ МАТРИЦЕ И
ИЗВЛАКАЧА ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА
СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Драган Адамовић - ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

Истакне важност термичке и хемијско-термичке обраде метала, опише основне поступке и услове за правилно извођење термичке, односно хемијско-термичке обраде.

Такође, потребно је да опише механичка, физичка и остала својства алатних челика, изврши избор материјала и одреди параметре термичке обраде алата за обраду деформисањем - матрице и извлакача за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида. Потребно је да предложи потребну опрему и простор за извођење процеса и изврши контролу изведене термичке обраде.

У другом делу рада, кандидат треба да приступи разматрању параметара и услова извођења хемијско-термичке обраде јонског нитрирања и тврдог хромирања поменутих елемената алата и да у закључку изнесе компарацију добијених вредности у погледу триболошких, механичких, физичких и економских показатеља.

Препоручена литература:

- [1] **Јовановић М., Адамовић Д.** и други: *Машински материјали*, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [2] **Видојевић Н.:** *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1973
- [3] **Пантелић И.:** *Технологија термичке обраде челика – I део*, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.
- [4] **Пантелић И.:** *Технологија термичке обраде челика – II део*, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.
- [5] **Ђукић В., Недић Б.:** *Алатни челици*, Научна књига, Београд 1990.

Крагујевац, датум

ментор:

Др Драган Адамовић, ред. професор

Резиме: У раду се разматрају поступци термичке и хемијско-термичке обраде метала као и њихови ефекти на промену физичких, механичких, структурних и технолошких карактеристика челика. Најпре је извршена анализа алатних челика и дефинисани параметри термичке обраде каљења и отпуштања челика Č4150, који је одабран као материјал за израду елемената алата за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида – матрице и извлакача. У другом делу рада учињен је покушај да се дефинишу параметри јонског нитрирања и тврдог хромирања поменутих елемената алата који би служили за анализу и компарацију економских, триболошких и свих осталих параметара свих наведених термичких и хемијско-термичких обрада елемената алата за обраду деформисањем.

Кључне речи: Термичка обрада, алатни челик, хемијско-термичка обрада, каљење, отпуштање, јонско нитрирање, тврдо хромирање, тврдоћа, опрема, контрола.

Abstract: In this work are considered proceeding of heat and heat-chemical treatment of metals and his effects on physical, mechanical, structural and tehnological changes of steel. At firs it's done an analysis of tool steel and defined parameters of heat treatment quenching and tempering of steel Č4150, which is chosen as material for proceeding elements of tools for ironing – die and punch. In the other part of work, the try has done to define parameters of ion nitriding and hard chromium plating of specified elements which would serve for analysis and comparison of economical, tribological and all the other parameters and all specified heat and heat-chemical treatment of elements of tool for ironing.

Key words: Heat treatment, tool steel, heat-chemical treatment, quenching, tempering, ion nitriding, hard chromating, hardness, equipment, control.

САДРЖАЈ:

1. УВОД	1
1.1. Значај термичке обраде	1
1.2. Основни појмови у термичкој обради	1
1.3. Материјали и термичка обрада	2
2. ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ КОД ЧЕЛИКА	3
2.1. Дијаграм стања Fe-Fe ₃ C и основне структуре челика	3
2.2. Промена потхлађеног аустенита	4
2.2.1. Образовање проеутектоидних фаза	6
2.2.2. Перлитна промена	6
2.2.3. Бејнитна промена	7
2.2.4. Мартензитна промена	8
3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ	10
3.1. Дијаграми изотермичког распада аустенита (ИРА, ТТТ)	11
3.2. Дијаграми континуалног разлагања аустенита (АРА, КХ)	11
4. ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ПОСТУПАКА ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ И ЊИХОВИХ КАРАКТЕРИСТИКА	13
4.1. Жарење	13
4.2. Каљење	17
4.3. Отпуштање	19
4.4. Термо-механичка обрада и реаустенизација	20
4.5. Површинско каљење	21
5. СРЕДСТВА И ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ И ХЛАЂЕЊЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ	24
5.1. Средства и опрема за загревање	24
5.2. Средства за хлађење	25
6. СОПСТВЕНИ НАПОНИ И ГРЕШКЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ	27
7. КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА ИЗВЕДЕНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ	30
8. ХЕМИЈСКО-ТЕРМИЧКА ОБРАДА (ХТО)	31
8.1. Цементација	31
8.2. Нитрирање	33
8.3. Цијанизација и карбонитрирање	34
8.4. Остали методи термо-хемијског отврђавања површине	35
9. ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТА ЗА ОБРАДУ ДЕФОРМИСАЊЕМ – МАТРИЦА И ИЗВЛАКАЧ ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА	37
9.1. Особине алата	37
9.1.1. Алатни челици	38
9.1.1.а Нелегирани (угљенични) алатни челици	39
9.1.1.б Легирани алатни челици	39
9.2. Анализа и избор материјала за израду алата за обраду у хладном стању	41
9.3. Физичке, механичке и структурне карактеристике материјала	43
9.4. Избор потребне термичке обраде	43
9.4.1. Температурни и остали параметри термичке обраде	44
9.4.2. Опрема и средства за загревање и хлађење	47
9.4.3. Простор за извођење термичке обраде	48

9.5. Испитивање квалитета изведене термичке обраде	50
9.5.1. Металографска испитивања	50
9.5.2. Испитивање тврдоће	52
9.5.3. Одређивање величине аустенитног зрна	53
9.5.3.а Методe мерења величине зрна	53
9.5.4. Испитивање прокаљивости	55
9.5.5. Испитивања без разарања	57
9.6. Хигијенско-техничка заштита при термичкој обради	58
10. ХЕМИЈСКО-ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТ ЗА ОБРАДУ ДЕФОРМИСАЊЕМ – ИЗВЛАКАЧ И МАТРИЦА ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА	59
10.1. Јонско (плазма) нитрирање као поступак површинског отврдњавања елемената алата (извлакач и матрица)	59
10.1.1. Увид у структуру нитрираног слоја	60
10.1.2. Челици за нитрирање – избор материјала	61
10.1.3. Параметри процеса јонског нитрирања елемената алата	62
10.2. Тврдо хромирање елемената алата за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида	65
10.2.1. Особине тврдог хрома	65
10.2.2. Теорија галванског наношења превлака и потребна опрема	66
10.2.3. Поступак тврдог хромирања	69
10.2.3.а Припрема делова за тврдо хромирање	69
10.2.3.б Састав електролита и остали параметри хромирања	69
10.2.3.в Избор аноде и ћелије за електролизу	70
10.3. Испитивање основних особина превлака и модификованих слојева	72
10.3.1.а Испитивање тврдоће превлака	72
10.3.1.б Испитивање адхезије превлаке	76
10.4. Поређење основних карактеристика термичких третмана	79
11. ЗАКЉУЧАК	82
12. ЛИТЕРАТУРА	83

1. УВОД

1.1 ЗНАЧАЈ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

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

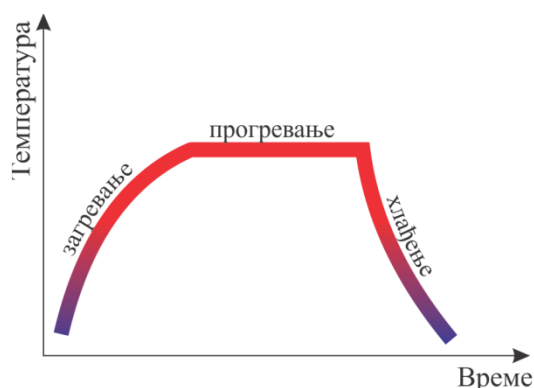
Како особине метала и легура зависе од њихове структуре, то је на основу познавања атомске, кристалне и фазне структуре могуће одредити вредности особина које су од практичног интереса, а кроз промену структуре могућа је промена особина у одређеним границама.

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

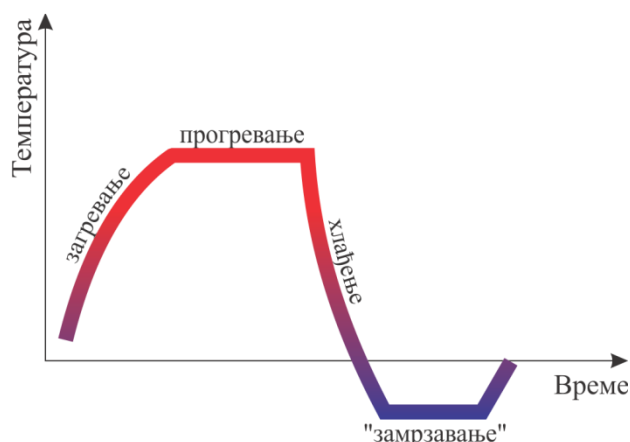
Термичка обрада налази примену и у побољшању особина ливеног гвожђа, челичног лива и заварених конструкција као и код нежелезних легура као што су: алуминијум, магнезијум, бакар, никл и друге [2].

1.2 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ У ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

У основи, термичка обрада представља технолошки процес који се састоји из загревања метала до одређене температуре, задржавања на тој температури и хлађења до собне температуре. Понекад се у циљу трансформације заосталог аустенита, наставља са хлађењем испод 0°C , део се задржава на ниској температури (“замрзава”) и поново загрева до собне температуре (сл. 2).



Слика 1. Ток извођења процеса термичке обраде



Слика 2. Ток термичке обраде са хлађењем испод 0°C

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

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

Термичка обрада може да буде и сложена, брзина загревања може да се мења у зависности од температурног интервала, задржавање може да се изводи на две или три температуре, при чему може да варира и брзина хлађења у појединим температурним областима [6].

1.3 МАТЕРИЈАЛИ И ТЕРМИЧКА ОБРАДА

Познавање металних материјала уско је повезано са значајем термичке обраде и условима њеног извођења. Када је реч о металним материјалима, ту се пре свега мисли на гвожђе¹ тј. легуре гвожђа.

Легуре гвожђа су и данас најважније и такође највише коришћене легуре у техничкој пракси, некада се означавају заједничким називом - техничко гвожђе. Са изузетком веома чистих врста гвожђа добијених посебним производним поступцима, легуре гвожђа јесу поликомпонентне (комплексне) легуре које осим основног метала садрже увек мању или већу количину других елемената. Неки од њих улазе у гвожђе већ при његовој изради (из сировина, атмосфере пећи, продуката топљења), други се додају намерно ради постизања тражених особина легуре.

Успешно извођење термичке обраде изискује добро познавање хемијског састава материјала као и структурну грађу и фазне промене. Недовољно познавање понашања материјала услед термичког третмана може довести до низа негативних ефеката који би негативно утицали на карактеристике материјала након термичке обраде (концентрација напона, појава прслина, итд.). Дакле, може се закључити да су материјали и термичка обрада уско повезани и да је неминовност добро познавање материјала ако се жели озбиљно разматрати проблематика и параметри извођења термичке обраде [1, 6].

У овом раду извршена је анализа термичких и хемијско-термичких обрада које се најчешће примењују при изради алата за обраду деформисањем на хладно. Учињен је покушај да се правилно дефинишу режими термичких третмана и приказана је потребна опрема за извођење процеса каљења, јонског нитрирања и тврдог хромирања. У закључку је дата анализа и компарација карактеристика материјала подвргнутих наведеним термичким третманима.

¹ Гвожђе (железо) је полиморфан метал и јавља се у две фазе. Фаза α -Fe (испод 912°C) има просторно центрирану кубну решетку – A_2 док се γ -Fe, јавља у другој фази, при загревању у температурском опсегу од 912-1394°C, и има површински центрирану кубну решетку A_1 .

2. ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ КОД ЧЕЛИКА

При хлађењу, легуре гвожђа и угљеника (челика) из растопа почињу да се издвајају први кристали очврслог метала. Тај тренутак почетка очвршћавања се везује за слободну енергију растопа која је испод солидус линије мања него изнад ње. Због тога метал тежи да пређе у чврсто стање. Даљим хлађењем количина очврслог метала расте све до тренутка достизања температуре која лежи на ликвидус линији, односно када је целокупна легура постала чврста. При даљем хлађењу, после очвршћавања, већина метала и легура подлеже даљим променама, којима се могу битно мењати њихове особине. За разлику од кристализације, која се увек одвија на високим температурама при којима је брзина дифузије веома велика, фазне промене у чврстом стању могу се одвијати како при вишим тако и нижим температурама на којима је дифузија знатно тежа. На основу тога да ли промене настају трансфером масе или не, фазне промене могу бити: *дифузионе* и *бездифузионе*.

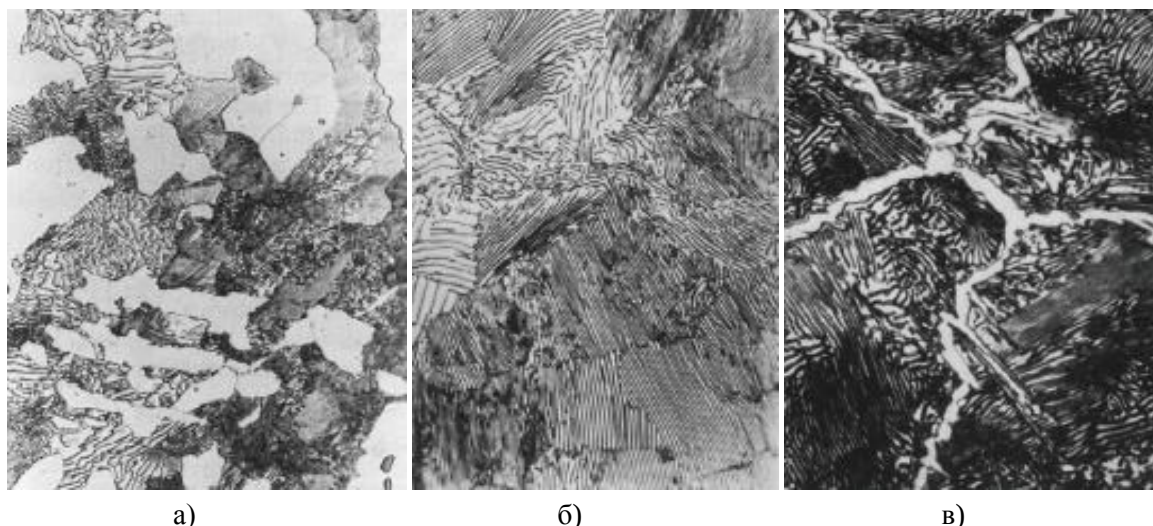
Дифузионе промене веома зависе од температуре. После појаве клице, ка њој дифундују атоми што доводи до раста клица и померања (ширења) њених граница. Супротно томе, при довољно брзом хлађењу, на температурама испод 200°C кад је већ елиминисана дифузија, могуће су само бездифузионе промене, које се дешавају тзв. *механизмом клизања*. При тој промени долази до правилног и групног престројавања атома, при чему релативно померање суседних атома не прелази међуатомско растојање [1, 2].

2.1 ДИЈАГРАМ СТАЊА Fe-Fe₃C И ОСНОВНЕ СТРУКТУРЕ ЧЕЛИКА

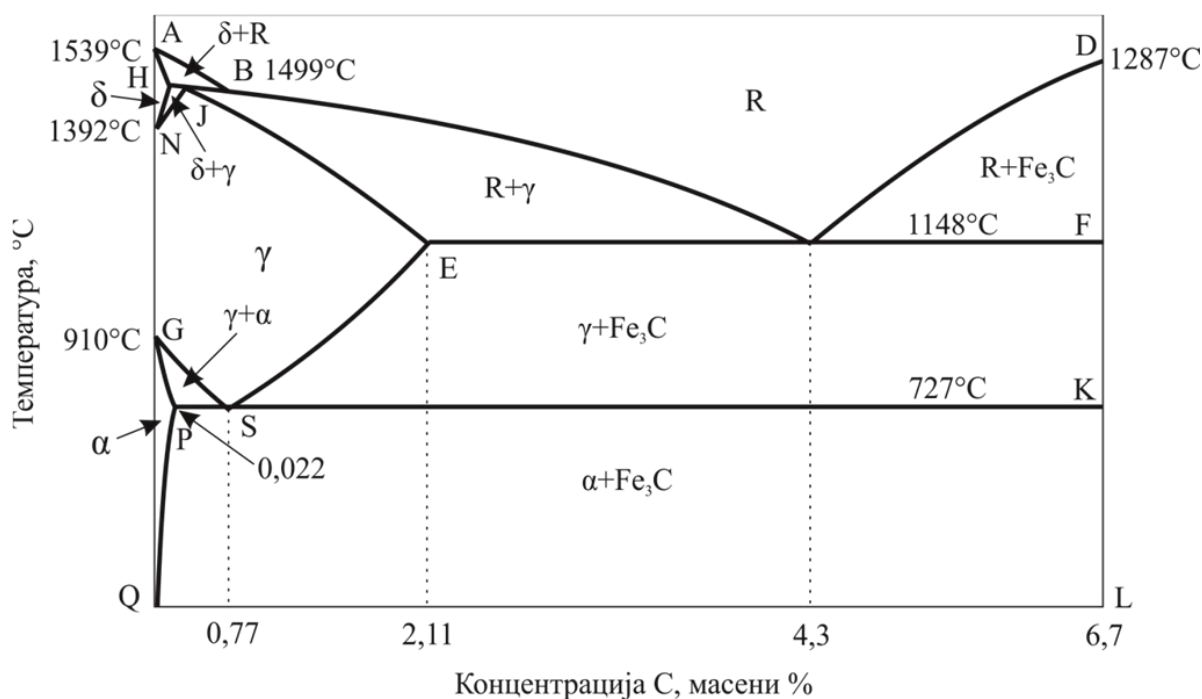
Равнотежни дијаграм метастабилног система објашњава основне структуре и настајање фазних промена код челика. При садржају 6,67 масених %, угљеник (C) са гвожђем образује интерстицијално чврсто једињење Fe₃C које представља карбид гвожђа - *цементит*. Пошто се при реакцијама у метастабилном систему цементит не мења, може се сматрати као компонента и дијаграм означавати као дијаграм Fe-Fe₃C (сл. 4). За техничку праксу од значаја је готово цео опсег концентрације угљеника (0 до 6,7%). Легуре са садржајем угљеника до 2,11% називају се челици. Еутектоидна концентрација (0,77% C) дели челике на подеутектоидне (садржај угљеника до 0,77%) и надеутектоидне (0,77 до 2,11% C). Легура са садржајем 0,77% C је еутектоидни челик. Легуре са садржајем угљеника већим од 2,11% зову се *сиво ливено гвожђе*² и *бело ливено гвожђе*³ а еутектичка концентрација (4,3%) их дели на подеутектичке и надеутектичке. Легура са садржајем угљеника од 4,3% је еутектичка легура [1].

² Сиво ливено гвожђе или легуре гвожђе-угљеник-силицијум (1,8-3,6% C и 0,5-1,9% Si), садржи велику количину цементита па је зато тврдо и крто.

³ Бело ливено гвожђе или легуре гвожђе-угљеник-силицијум (2,5-4% C и 1-3% Si), знатна количина угљеника издвојена у виду графита утиснутог у феритно-перлитној или перлитној матрици.



Слика 3. Микроструктура челика: а) подеутектоидног (перлитно – феритна структура, ферит – светла зрна, перлит – тамна зрна), б) еутектоидног (перлитна структура), в) наеутектоидног (зрна перлита окружена проеутектоидним цементитом)



Слика 4. Равнотежни дијаграм метастабилног система $Fe-Fe_3C$

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

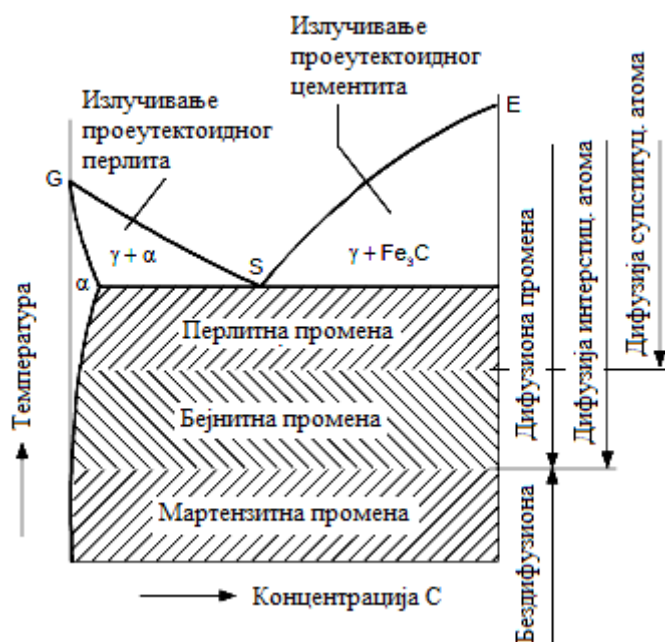
2.2 ПРОМЕНА ПОТХЛАЂЕНОГ АУСТЕНИТА

Разлагање аустенита догађа се само на температурама нижим од 727°C (критична тачка A_{T1}), за описивање кинетичке трансформације потхлађеног аустенита користе се експериментално добијени дијаграми време-температура-степен разлагања, или дијаграми изотермалне трансформације потхлађеног аустенита, тј. разлагања аустенита при константној температури.

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

При већем потхлађењу аустенита до температуре при којој брзина дифузије гвожђа и супституцијски растворених примеса опада до занемарујућих вредности, остаје могућност дифузије атома растворених интерстицијски (пре свега угљеника), настаје бејнитна промена. Продукт распада аустенита у оваквим условима је бејнит - неравнотежна смеша плочастих кристала прехлађеног чврстог раствора α и ситних карбидних честица.

При знатном потхлађивању аустенита, долази до бездифузионе мартензитне промене. Продукт овакве промене аустенита јесте неравнотежни чврст раствор угљеника у α -гвожђу *тетрагонални мартензит*.



Слика 5. Област главних промена потхлађеног аустенита

Код подеутектоидних или наеутектоидних челика промене аустенита, при спором хлађењу, почињу излучивањем ферита односно секундарног цементита. Те се промене означавају као проеутектоидне и имају велики утицај на структуру и особине челика и на промене преосталог аустенита [1, 2, 6].

2.2.1 ОБРАЗОВАЊЕ ПРОЕУТЕКТОИДНИХ ФАЗА

Образовање проеутектоидних фаза заступљено је код подеутектоидних и надеутектоидних челика у виду излучивања проеутектоидног ферита и секундарног цементита. Тако да код подеутектоидних или надеутектоидних челика (при спором хлађењу) после проеутектоидних промена долази до еутектоидне промене у току које се преостали аустенит мења у перлит. Та промена не утиче на већ издвојени проеутектоидни ферит или цементит.

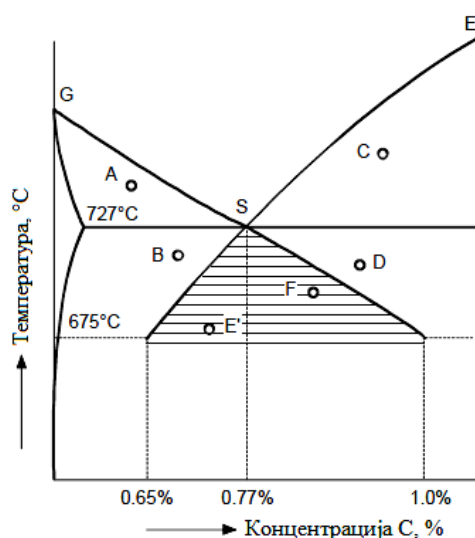
Проеутектоидни ферит или секундарни цементит настају онда када састав челика није еутектоидни односно када долази до пресићења матичне фазе феритом или цементитом.

Нпр. проеутектоидни ферит може настати онда када састав и температура аустенита одговарају тачкама у равнотежном дијаграму гвожђе-угљеник, које леже испод криве GS (нпр. тачка А) и у неравнотежним условима изнад продужетка криве SE (нпр. тачка В сл. 6). Слично ће се у надеутектоидном челику излучивати проеутектоидни цементит, буду ли састав и температура аустенита дати тачком која лежи испод криве CE, али и изнад продужетка криве GS (нпр. тачка С за равнотежне и D за неравнотежне услове). Ако би разматрана тачка лежала испод обеју кривих (нпр. тачке E', F), био би аустенит пресићен како феритом (тј. гвожђем) тако цементитом (тј. угљеником). У таквим би се условима из аустенита излучивали истовремено ферит и цементит, одвијао би се еутектоидни распад потхлађеног аустенита и без проеутектоидних реакција. Тако настаје перлит другачијег састава од еутектоидног ($\neq 0.77\% \text{ C}$) тзв. квази-еутектоид.

Проеутектоидне фазе без изузетака настају на границама аустенитних зрна и при даљем потхлађењу расту и дебљају. При великим потхлађењима долази до престанка задебљања мрежасте фазе и почиње да се формира *Видманитетенова структура* (игличаста) карактеристична за веће брзине хлађења и може се срести у зони утицаја топлоте код заварених спојева [1, 6].

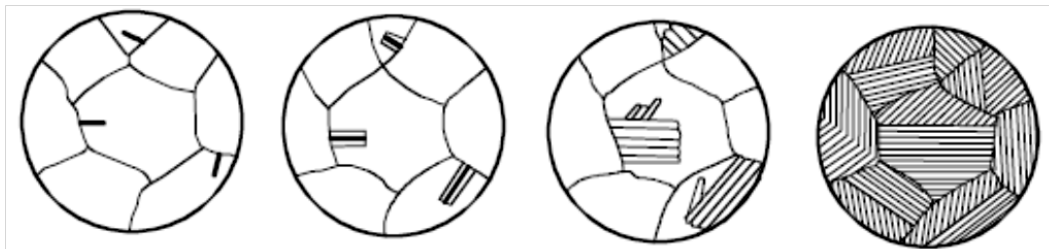
2.2.2 ПЕРЛИТНА ПРОМЕНА

У равнотежним условима, из аустенита који садржи $0.77\% \text{ C}$ издваја се (при константној температури, 727°C) смеша ферита ($\sim 88\%$) и цементита ($\sim 12\%$), која се назива еутектоидни перлит. При већим брзинама хлађења перлит настаје из аустенита и испод 727°C све док је термодинамички могуће да се из γ -фазе излуче истовремено ферит и цементит. За то је потребна довољно висока температура за дифузију угљеника, као и дифузију гвожђа и супституцијски растворених атома примеса. У овим условима концентрације угљеника и температуре распада аустенита може настати перлитна структура како код подеутектоидних тако и код надеутектоидних челика блиских еутектоидном саставу. Пошто је перлит састављен од честица (обично ламела) двају фаза, при образовању перлита мора се појавити клица како ферита тако и цементита. За услове потхлађивања кад се из аустенита не излучују проеутектоидне фазе већ се аустенит трансформише директно у перлит, појавиће се као активна клица



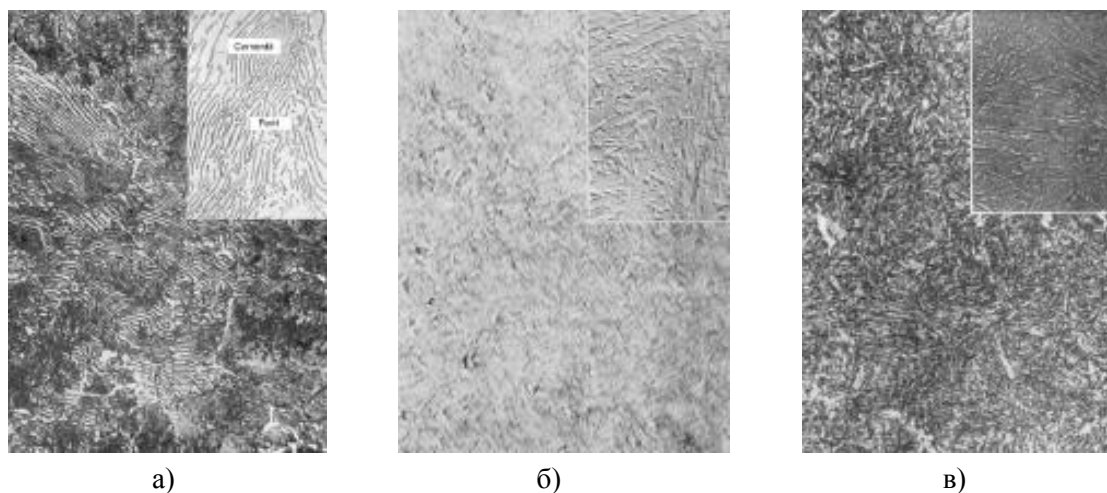
Слика 6. Област стабилне и метастабилне равнотеже Fe-C

она фаза која би се и иначе излучила из аустенита у равнотежном дијаграму. Нпр. у аустениту, чији састав и температуру одређују тачке које леже у шрафираној области ближе продужетку криве SE (сл. 6), активни заметак биће ферит, при температурама и саставима аустенита блиским продужетку криве GS то ће бити цементит. Перлитне колоније (зрна) су састављене од двају врста честица које се при расту међусобно допуњују. Према овом моделу довољне су за појаву колоније само две клице: једна феритна, друга цементитна.



Слика 7. Схема трансформације аустенита у перлит код еутектоидног челика из једног зрна

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



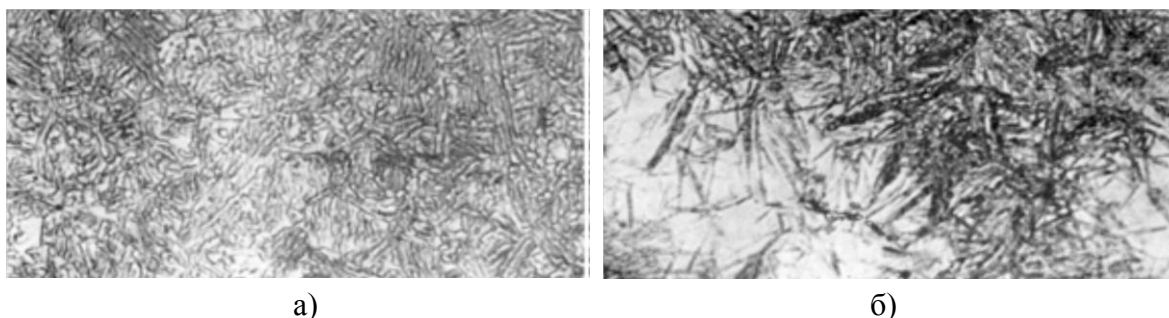
Слика 8. Микроструктура перлита: а) грубо ламеларни перлит, б) сорбит - густо сложене феритне и цементитне честице добијене при изотермичком хлађењу челика на температури $\sim 650^{\circ}\text{C}$, в) трустит - фини перлит добијен потхлађењем и изотермичким задржавањем челика на температури $\sim 550^{\circ}\text{C}$

На перлитну промену утичу такође и легирајући елементи и примесе у челику. Сви додати елементи изузев кобалта и алуминијума успоравају ток перлитне промене тиме што смањују како брзину нуклеације тако и брзину раста. Релативно једноставна перлитна промена код угљеничних челика се знатно компликује код легираних челика, нарочито ако је челик легиран карбидотворним елементима (Cr, V, Mo, W) и ако је потхлађење аустенита мало [1, 5, 6].

2.2.3 БЕЈНИТНА ПРОМЕНА

Продукт изотермичког преображаја потхлађеног аустенита на некој температури у области од $\sim 550^{\circ}\text{C}$ до тачке M_s је прелазна структурна компонента – бејнит. Као што је раније поменуто бејнитна промена се остварује при температури на којој престаје дифузија супституцијски растворених елемената, а остаје само интерстицијска дифузија. То значи да угљеник дифундује из потхлађеног аустенита чиме се стварају зоне које су осиромашене или обogaћене угљеником. Такве зоне трансформишу се у пресићени ферит и игличасти цементит који заједно чине бејнит.

Структура бејнита зависи од температуре на којој се одвија преображај. Код подеутектоидних челика (угљеничних и нисколегираних) настаје при температури 550 до 350°C тзв. горњи бејнит, чине га ламеле бејнитног ферита и њима паралелне честице карбида (цементита).



Слика 9. Микроструктура: а) горњег бејнита; б) доњег бејнита (слична мартензитној микроструктури)

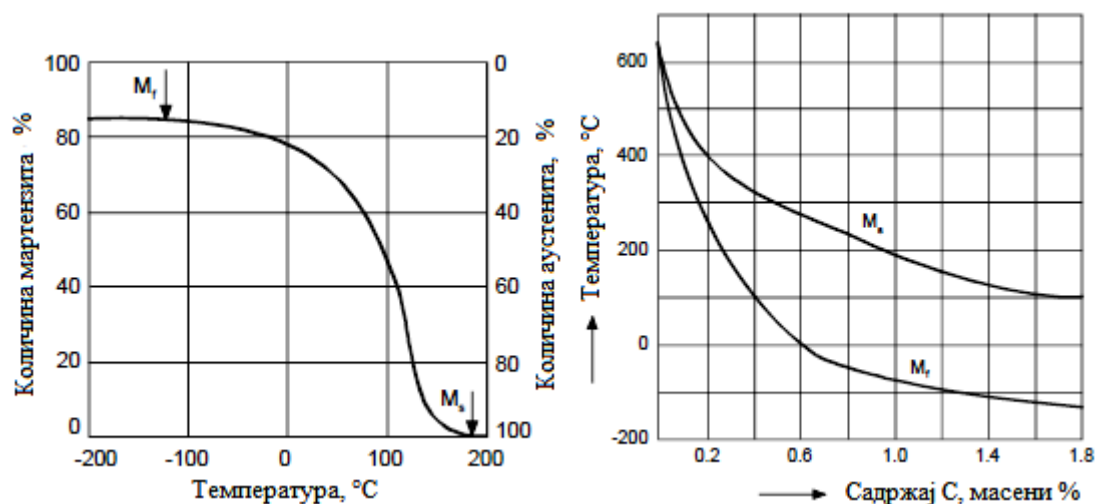
Доњи бејнит се образује почев од температуре 350°C па до тачке M_s и има ламеларну структуру сличну мартензиту. Код доњег бејнита карбидне плочице смештене су унутар плочица бејнитног ферита, под углом од 55 до 60° у односу на подужну осу основних феритних ламела [6].

2.2.4 МАРТЕНЗИТНА ПРОМЕНА

Ова врста промене назива се бездифузиона јер се одвија на температури испод 216°C , где дифузија еутектоидног челика престаје. Мартензитна трансформација настаје када брзина хлађења стабилног аустенита достигне вредност критичне брзине⁴, тако да се аустенит без претходног ослобађања угљеника трансформише у презасићен α -чврсти раствор. Структура челика који се добија при условима критичне брзине хлађења назива се мартензит. Мартензит је једнофазна структура и представља презасићен чврсти раствор угљеника и других легирајућих елемената у α -Fe. Настаје као резултат бездифузионе трансформације аустенита и зависи само од температуре, а не и од времена трајања процеса.

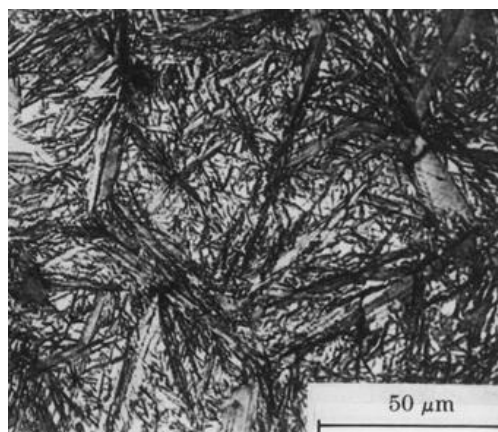
Атоми угљеника, после врло брзог хлађења, остају присилно растворени у решетки α -Fe, несиметрично је проширују и преводе у нову тетрагоналну запремински центрирану решетку. Мартензитна трансформација настаје на температури M_s а завршава се на температури M_f .

⁴ Критична брзина хлађења – минимална брзина хлађења којом се спречава дифузиона промена све до температуре почетка мартензитне трансформације.



Слика 10. Кинетичка крива мартензитне промене и утицај садржаја угљеника раствореног у аустениту на температуре M_s и M_f

Мартензитна промена доводи до веома високе тврдоће челика. После хлађења испод температуре M_s део аустенита се не трансформише и остаје задржан као тзв. заостали мартензит. Трансформација аустенита у мартензит повезана је са повећањем запремине (промена запремине може прећи и 5%). Мартензитни агрегат, због своје веће специфичне запремине, у односу на заостали аустенит ствара заостало напонско поље. Треба ли даље запремине аустенита трансформисати у мартензит, морају такође и оне да повећају своју почетну запремину чиме се у међуфазним зонама и даље повећава напон. Повећана еластична деформација делује својим енергетским ефектом против даље трансформације, те се распад аустенита зауставља и део аустенита остаје непромењен као заостали аустенит. Заостали аустенит је, нарочито код алатних челика, непожељна структурна компонента. Код челика са порастом количине заосталог аустенита опада тврдоћа а као последица распада заосталог аустенита при радним или случајно повишеним температурама долази до промене димензија делова. Удео заосталог аустенита може се снижити тако што се каљење у кади (20 °C) допуњује додатним хлађењем на температури испод M_f . Овакво каљење тзв. замрзавање се изводи пре свега код неких алатних челика. Најчешћи начин снижења удела заосталог аустенита у мартензит или његово одстрањивање је отпуштање. Микроструктура закаљеног челика састоји се из плочастих или иверичастих кристала мартензита, између којих је распоређен нетрансформисани – заостали аустенит [1, 5, 6].



Слика 11. Микроструктура мартензита

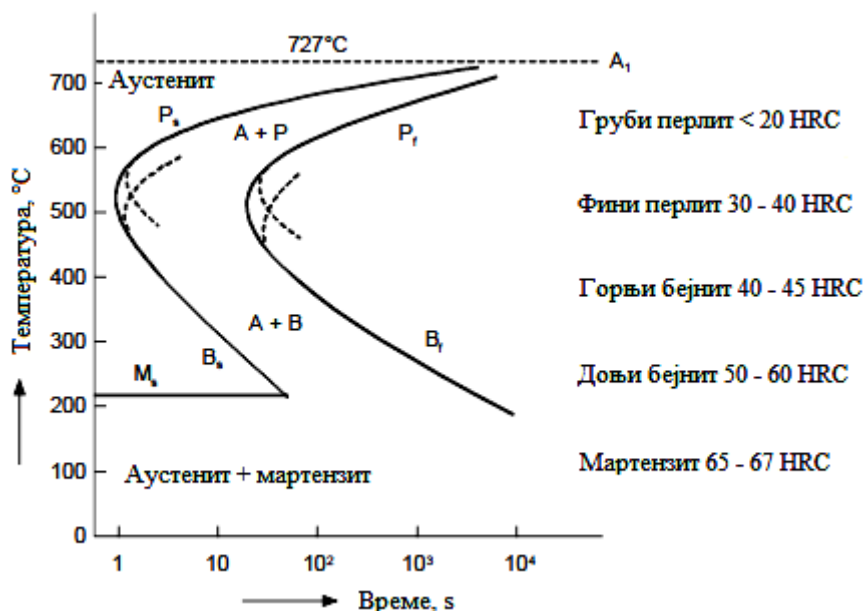
3. ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ

Дијаграми који показују ток промене потхлађеног аустенита, зависно од температуре и времена, називају се трансформациони дијаграми. За разлику од равнотежних дијаграма они важе за челик одређеног хемијског састава и за одређене услове аустенизације (величина зрна, хомогеност аустенита и др.). Садрже податке о почетку и крају излучивања проеутектоидних фаза, као и температурске зоне перлитне, бејнитне и мартензитне промене аустенита.

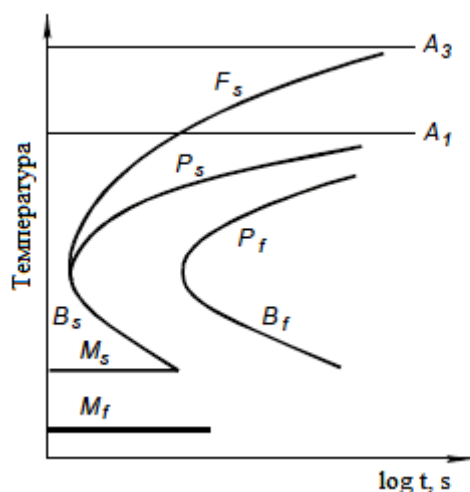
Данас коришћени трансформациони дијаграми јесу у два облика: изотермички дијаграми, који дају продукте промене аустенита при одређеним константним температурама, и анизотермички дијаграми који дају те продукте при различитим брзинама хлађења.

3.1 ДИЈАГРАМИ ИЗОТЕРМИЧКОГ РАСПАДА АУСТЕНИТА

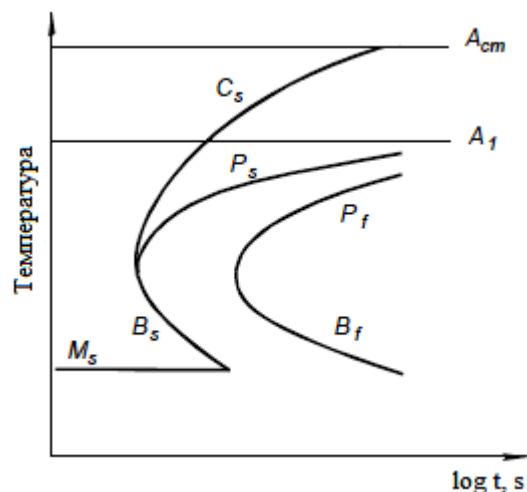
Перлитна промена у еутектоидним челицима је дифузна промена, која се одвија нуклеацијом клица и њиховим растом. Брзина промене је дата брзином образовања клица и брзином њиховог раста. При малом потхлађењу аустенита испод температуре A_1 кинетички параметри промене су готово занемарљиви па је брзина промене зато мања. Прва зрна перлита (P_s) се појављују тек после веома дугог времена задржавања на трансформационој температури. При већем потхлађењу, до око 550°C , за нуклеацију је потребна мања енергија, то значи да се повећава брзина нуклеације и брзина пораста, а тиме и укупна брзина промене. Даљим снижавањем трансформационе температуре опада брзина дифузије гвожђа па и укупна брзина промене. Криве почетка и краја промене називају се ИРА дијаграми, а понекад и „S“ или TTT (*time-temperature-transformation*) дијаграми. Изглед тог дијаграма за еутектоидни угљенични челик дат је на слици 12.



Слика 12. Дијаграм изотермичког распада аустенита еутектоидног угљеничног челика



Слика 13. Дијаграм ИРА подеутектоидног челика



Слика 14. Дијаграм ИРА надеутектоидног челика

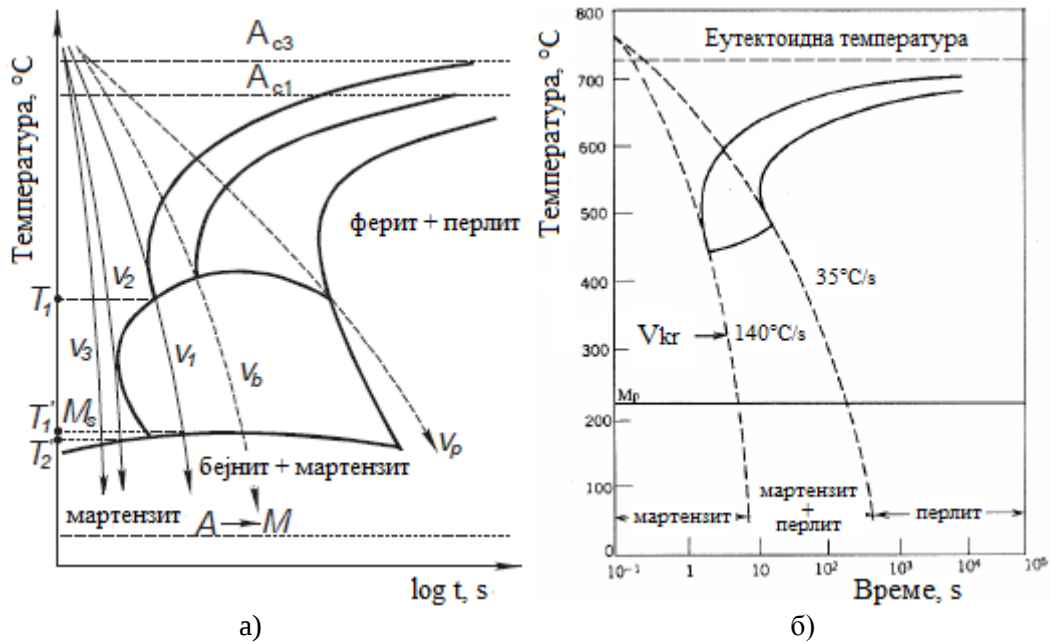
На облик и положај кривих у дијаграмима утичу многи фактори али треба поменути утицај легирајућих елемената. Сви легирајући елементи осим Co и Al повећавају стабилност аустенита, односно померају криве удесно. Такође, подижу или спуштају температуру најмање стабилности аустенита и M_s температуру. Легирајући елементи који образују супституцијски чврст раствор (Ni , Cu) не мењају облик дијаграма већ га само померају удесно док елементи који граде карбиде (Cr , Mo , V , W) изразито мењају облик дијаграма. Такође, већа аустенитна зрна померају криве удесно а ситнија улево [1, 6].

3.2 ДИЈАГРАМИ КОНТИНУАЛНОГ РАЗЛАГАЊА АУСТЕНИТА

У условима непрекидног хлађења аустенита различитим брзинама (нпр. на мирном ваздуху, при принудном струјању ваздуха, или у уљу, кречном млеку, води, води са 5-10% NaCl), добија се дијаграм континуалног хлађења, тзв. КХ дијаграм. Слично као и код изотермичког разлагања аустенита, најмањим брзинама хлађења одговара феритно-перлитна структура ($F+P$) код подеутектоидног челика, односно феритно-цементитна ($F+C_m$) код надеутектоидног челика. Већим брзинама хлађења одговара бејнитно-мартензитна ($B+M$) а највећим брзинама хлађења чисто мартензитна структура (M).

Укратко се разлика између ИРА и КХ дијаграма може свести на следеће:

- Код ИРА дијаграма почетак и крај промене прате се по изотерми ($T=\text{const.}$) а код КХ дијаграма промена аустенита се прати по одговарајућим кривама хлађења ($V_1, V_2, V_3, \dots$);
- Чисто бејнитна структура не може се добити континуалним хлађењем већ само у изотермичким условима хлађења (фактор време је битан за дифузију);
- Криве континуалног хлађења (КХ) померене су удесно и доле у односу на ИРА дијаграм, што значи да касни почетак и крај разлагања аустенита и да се помера ка нижим температурама.



Слика 15. КХ – дијаграм: а) подеутектоидног челика; б) еутектоидног угљеничног челика

Анализирајући даље КХ – дијаграм уочава се да, при брзини хлађења V_1 нешто мањој од критичне ($V_{kr} = V_2$), један део аустенита дифузионо се мења у фини перлит (бејнит), а други део остаје непромењен све до M_s температуре, кад почиње његов бездифузиони преображај у мартензит. Крајњу структуру тада чине бејнит и мартензит. Ако се брзина хлађења повећа до V_3 ($V_3 > V_{kr}$) дифузиона промена аустенита више није могућа, он се потхлађује до тачке M_s , трансформишући се даље механизмом клизања у мартензит. Испитивања су показала да се сав аустенит не трансформише у мартензит, већ да у структуру каљених челика увек остаје мања или већа количина непреображеног – заосталог аустенита. Из дијаграма на слици се види да при хлађењу брзинама мањим од v_p и v_b добија се мешовита структура ферита, перлита, бејнита и мартензита.

Минимална брзина хлађења, којом се одлаже промена аустенита све до M_s температуре, одговара тангенти на колено КХ криве и назива се критична брзина хлађења (V_2). Нелегирани (угљенични) челици имају веома велику критичну брзину хлађења која се креће од $200\text{--}600^\circ\text{C/s}$, веће брзине одговарају нискоугљеничним челицима, а најмања V_{kr} одговара еутектоидном челику. Код легираних челика, сви додатни елементи (изуев Co и Al) повећавају стабилност аустенита, померају удесно кинетичке криве, то значи да продужују период инкубације, односно смањују V_{kr} . Најзад, треба истаћи да су структуре легираних челика сложеније од нелегираних, оне могу бити мешавина ферита, перлита, бејнита, мартензита и нешто заосталог аустенита, па се краће називају међуфазним структурама [1, 5, 6].

4. ПРЕГЛЕД ОСНОВНИХ ПОСТУПАКА ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ И ЊИХОВИХ КАРАКТЕРИСТИКА

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

Табела 1. Дефиниција 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 надеутектоидних челика
A _{r1}	Температура завршетка еутектоидне промене аустенита у ферит и цементит при хлађењу
A _{r3}	Температура почетка промене аустенита у ферит при хлађењу подеутектоидних челика
A _{rCm}	Температура почетка издвајања секундарног цементита из аустенита при хлађењу надеутектоидних челика
M _s , M _f	Температура почетка, односно завршетка мартензитне промене
B _s , B _f	Температура почетка, односно завршетка бејнитне промене

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

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

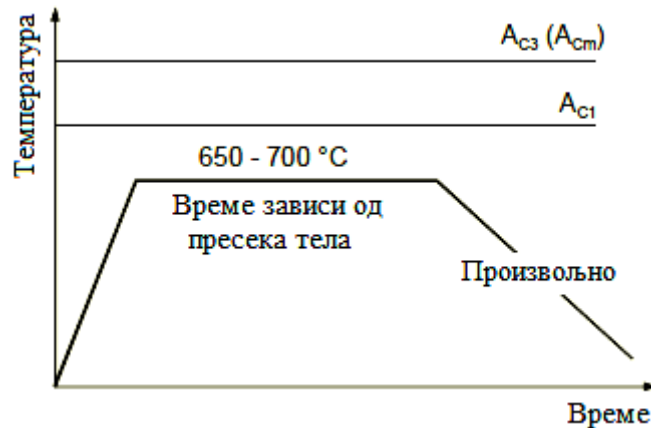
4.1 ЖАРЕЊЕ

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

- жарење без фазне трансформације - рекристализационо и за отпуштање заосталих напона
- жарење са фазном трансформацијом - дифузионо (хомогенизација), потпуно, нормализационо, изотермално жарење и сфероидизација.

Рекристализационо жарење. Заснива се на загревању метала, претходно пластично деформисаног на хладно, до температуре више од температуре рекристализације, задржавању на тој температури и хлађењу произвољном брзином. Температура рекристализације (T_r) метала и легура зависи пре свега од њихове температуре топљења (T_l). За технички чисте метале, она приближно износи $T_r \approx 0.4T_l$, а за легуре типа чврстог раствора $T_r \approx 0.6T_l$; нискоугљенични челици имају $T_r \approx 650^\circ\text{C}$, што

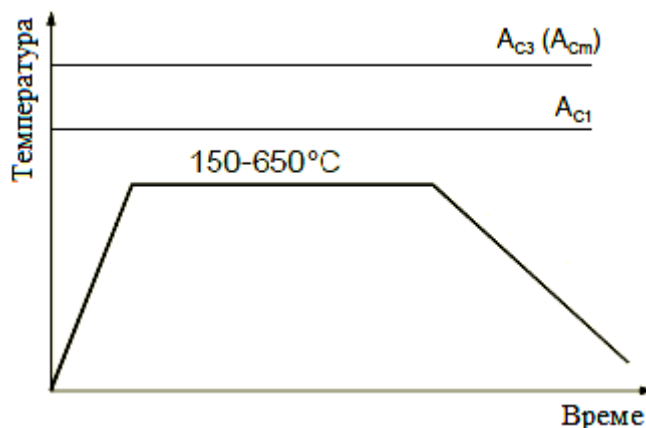
представља границу прераде на топло и хладно. На овај се начин отклањају последице деформисања на хладно нискоугљеничних челика.



Слика 16. Рекристализационо жарење

Овим видом жарења омогућује се даља прерада пресовањем, ваљањем и вучењем. Рекристализационо жарење је краткотрајно код танких пресека, а веома дуго код дебелих пресека због потребе једноликог прогревања и рекристализације по целом пресеку [1, 5].

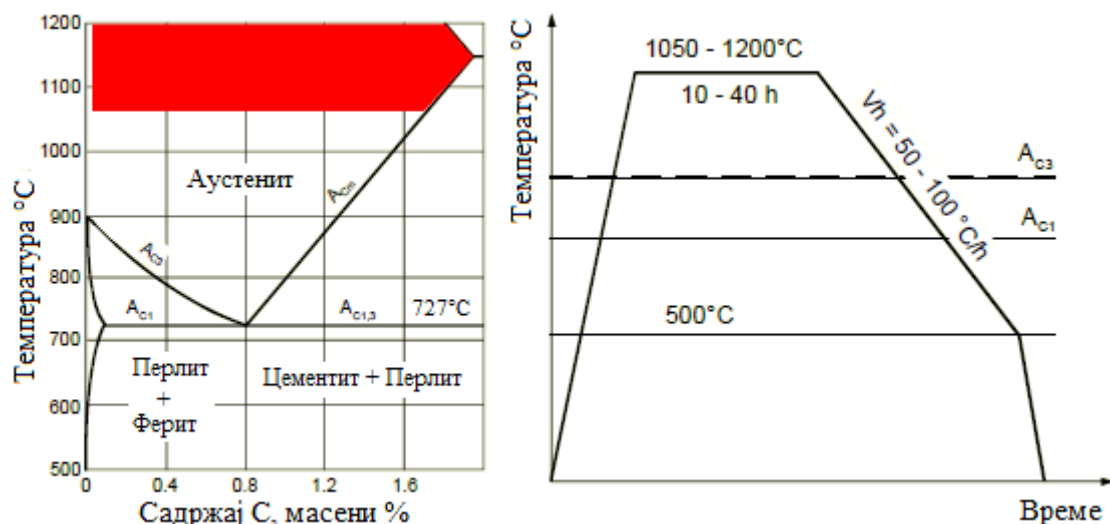
Жарење за отпуштање напона. Отпуштање напона остварује се лаганим загревањем дела до температуре испод тачке A_{C1} ($A_{C1,3}$), задржавањем при тој температури и још споријим хлађењем него при загревању. Челичне одливке и одливке од ливеног гвожђа треба жарити ради отпуштања напона при температури 500-600°C.



Слика 17. Жарење за отпуштање напона

Челични делови, обрађени пластичном деформацијом на хладно жаре се ради смањења напона на знатно нижим температурама (250-300°C испод температуре рекристализације). Понекад се жарењем при температури од 150°C изводи тзв. стабилизационо отпуштање, углавном код мерних и контролних алата, да би се постигла неопходна димензиона стабилност [1, 5].

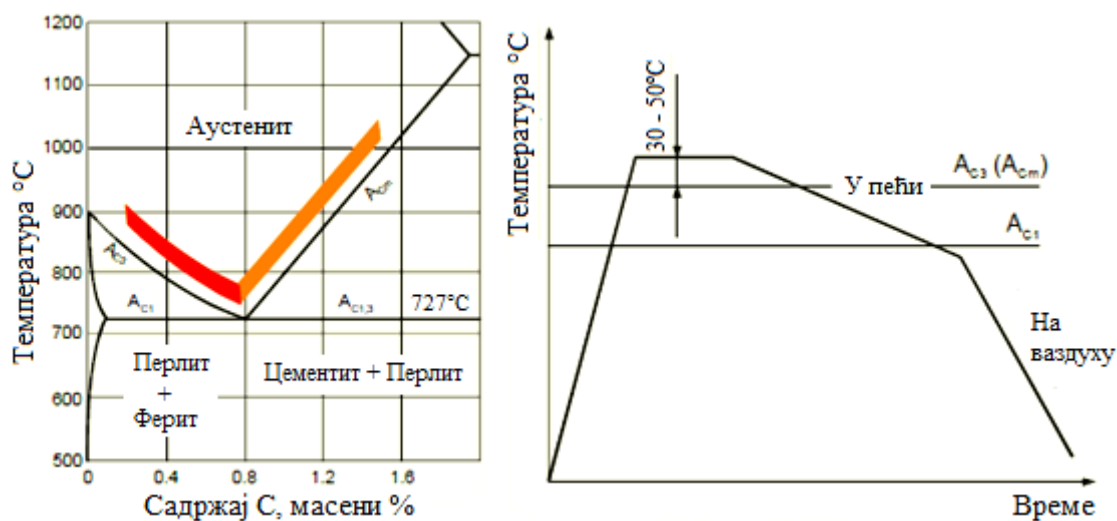
Дифузионо жарење (хомогенизација) се примењује за изједначавање хемијске неуједначености металних зрна чврстог раствора, тј. за умањење микросегрегације (неуједначеност састава унутар кристала) код челичних одливака и шипки, и то углавном код легираних челика. У процесу дифузионог жарења загревање се изводи до високих температура 1100–1200°C јер само у том случају имамо потпуније протицање дифузионих процеса неопходних за изједначавање хемијског састава у појединим деловима металне масе.



Слика 18. Дифузионо (хомогенизационо) жарење

После дифузионог жарења, због високих температура и дуготрајног загревања, добија се крупнозрна структура. У циљу уситњавања металних зрна и поправљања својстава код челичних шипки се постиже накнадном обрадом деформисањем, а одливци се подвргавају потпуном жарењу или нормализацији [1, 5].

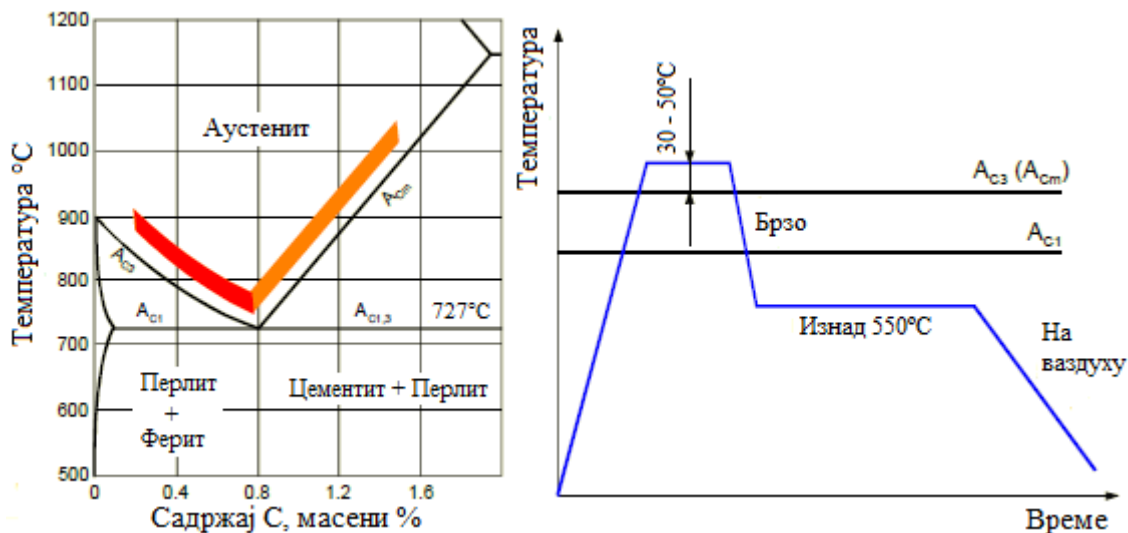
Потпуно жарење. Заснива се на загревању челика до аустенитног подручја ($30-50^{\circ}\text{C}$ изнад тачке $A_{C3}-A_{Cm}$), затим задржавању на одабраној температури и веома спором хлађењу у пећи у интервалу фазних промена (A_{C3} , A_{Cm} , A_{C1}). Даље хлађење од A_{C1} до собне температуре може бити на ваздуху.



Слика 19. Потпуно жарење

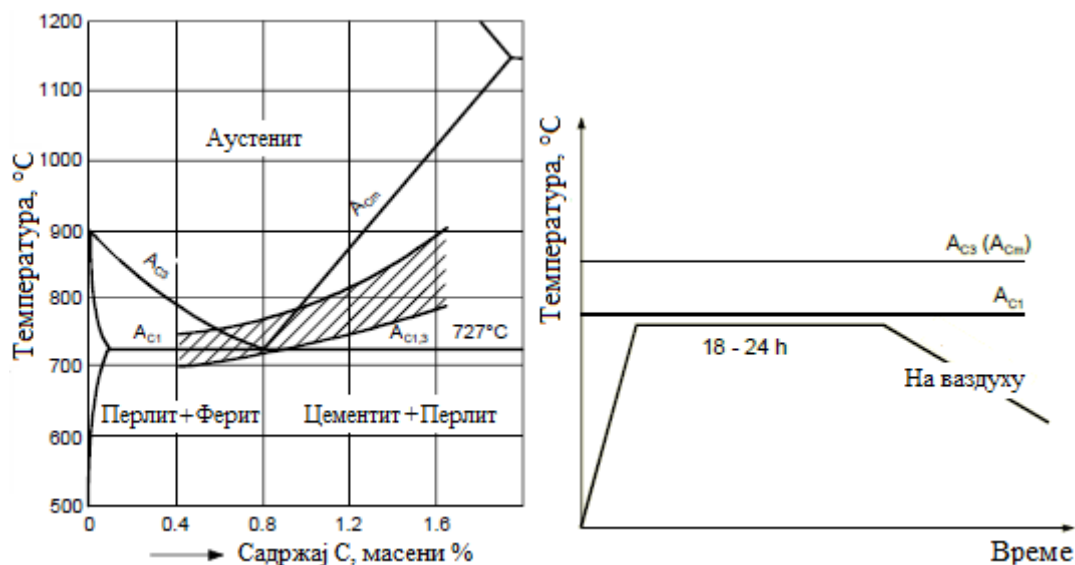
Сврха потпуног жарења јесте уситњавање зрна, отклањање неповољне Видманштетенове структуре, уједначавање структуре, као и отклањање сопствених напона, тако да челик постане мекши и ковнији. Примењује се код нискоугљеничних челика као припрема за дубоко извлачење и за побољшање машинске обрадивости код високоугљеничних челика. Потпуно жарење се не користи за надеутектоидне челике јер се при веома спором хлађењу цементит издваја по границама металних зрна, тј. формира се цементитна мрежа на границама перлитних зрна [1, 5].

Изотермално жарење. Део се загрева $30-50^{\circ}\text{C}$ изнад горње критичне температуре A_{C3} , затим брзо хлади до температуре нешто изнад 550°C , задржава при тој температури до завршетка перлитне промене и најзад хлади на ваздуху. Изотермално жарење има предност у односу на потпуно жарење јер обезбеђује скраћено време процеса и добијање једнородније структуре.



Слика 20. Изотермално жарење

Мeko (сфероидално) жарење. Изводи се загревањем око доње критичне температуре (A_{C1}), задржавањем неколико десетина сати на тој температури и затим се делови споро хладе до собне температуре.

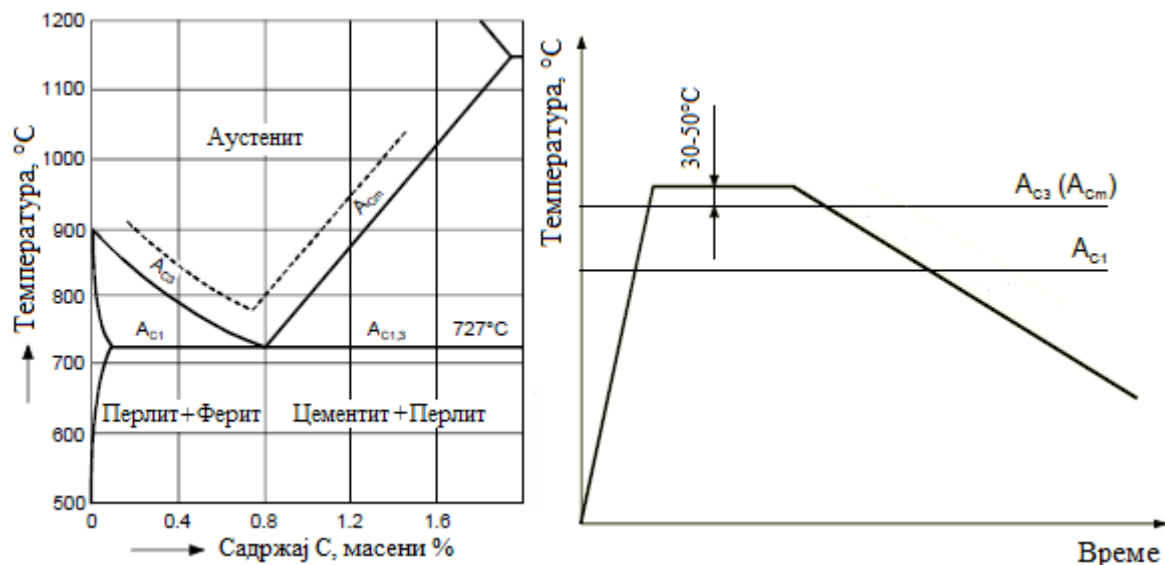


Слика 21. Мeko (сфероидално) жарење

Као резултат ове обраде добија се структура мекшег-зрнастог (глобуларног) цементита, уместо ламеларног који је тврђи. Примењује се ради побољшања обрадивости резањем, нарочито отковака од високоугљеничних и легираних челика. При обради резањем ламеларног перлита, нож сече тврде ламеле Fe_3C , а код глобуларног размиче зрна и сече мекшу феритну основу.

Нормализационо жарење (нормализација) је процес жарења челика на температури вишој за $30-50^{\circ}\text{C}$ од тачке A_{C3} или A_{Cm} , што зависи од састава челика. После потпуне трансформације полазне структуре у аустенит следи споро хлађење на

мирном ваздуху до собне температуре. Нормализација се примењује да се уклони крупнозрна структура добијена у поступцима обраде у топлом стању (ливење, ковање, ваљање, заваривање и др.).



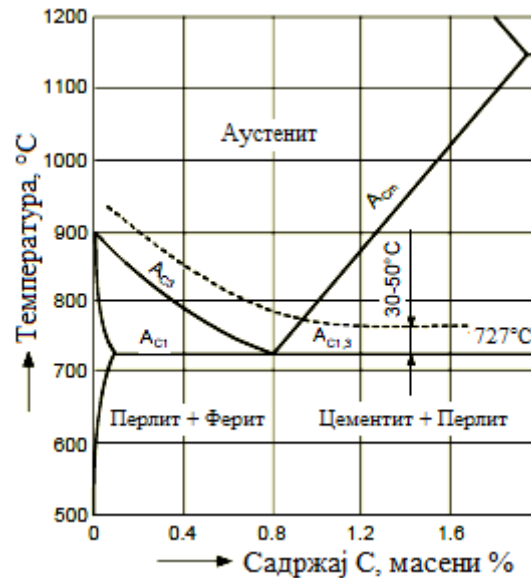
Слика 22. Нормализационо жарење

Код нискоугљеничних челика у процесу нормализације дешавају се исти процеси као и код потпуног жарења тј. уситњавање металног зрна. Међутим, због нешто веће брзине хлађења (хлађење на ваздуху) добија се финија структура перлита (тање ламеле ферита и цементита). Овако добијена структура, после нормализације, обезбеђује боља механичка својства (већу чврстоћу и тврдоћу), у односу на својства добијена потпуним жарењем. Због тога се код нискоугљеничних и средњеугљеничних челика уместо потпуног жарење углавном примењује нормализација. Нормализацијом високоугљеничних челика уклања се цементитна мрежа тако што се нешто бржим хлађењем (хлађењем на ваздуху) аустенита спречава издвајање цементита на границама металних зрна тј. спречава се поновно стварање цементитне мреже. Добијена структура састоји се од ситних ламела ферита и цементита (сорбит) [1, 5].

4.2 КАЉЕЊЕ

Каљење челика је термичка обрада која се изводи загревањем радног предмета изнад температуре A_{c3} , за подеутектоидне и $A_{c1,3}$ за надеутектоидне челике прогревањем на тој температури и хлађењем брзином већом од критичне. Суштина каљења челика је да се потхлађивањем аустенита спречи његова дифузиона промена до M_s -температуре, испод које настаје промена механизмом клизања, тзв. мартензитна трансформација.

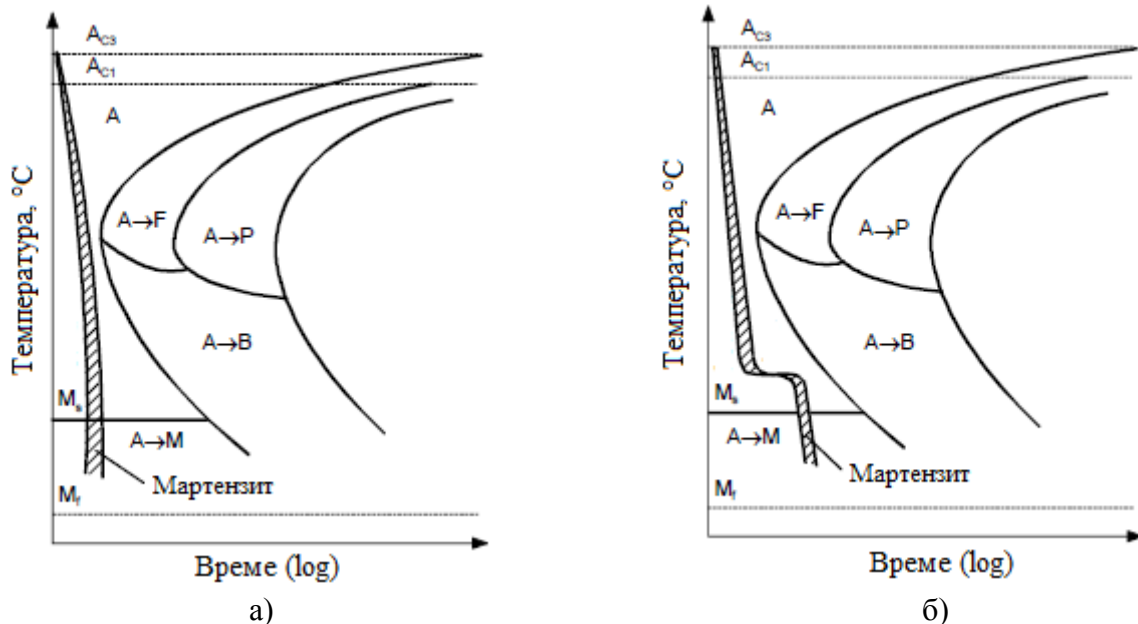
Као резултат каљења добија се тетрагонални мартензит, структура која се одликује великом тврдоћом и високим својствима отпорности, али ниским вредностима дуктилности и живавости [1].



Слика 23. Температура загревања за каљење челика

Каљење се може различито изводити. За разлику од површинског каљења које може бити само континуално, запреминско каљење се може изводити и у два расхладна средства, степенасто (каљење са прекидом) и изотермално [5].

Континуално (обично) каљење се изводи у једном расхладном средству. Загрејани предмет се потопи у расхладно средство и држи потопљен док се не охлади. Област температура са које се изводи каљење је приказана на слици 23. Брзина хлађења се бира тако да се спречи дифузиона промена аустенита све до температуре мартензитног преображаја (сл. 24а).

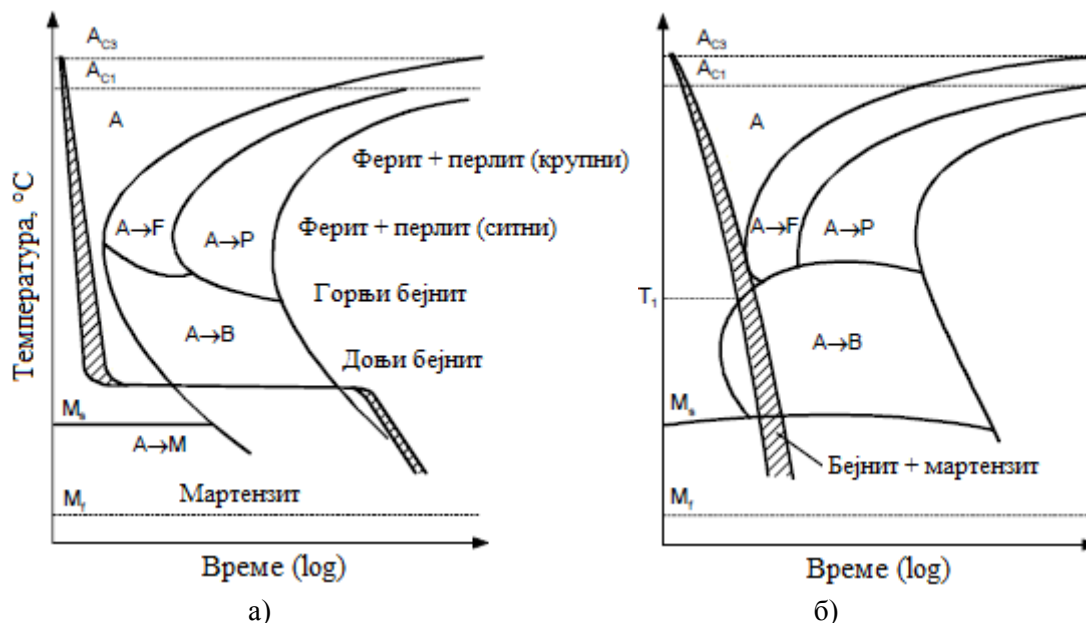


Слика 24. Мартензитно каљење: а) континуално, б) степенасто

Степенасто мартензитно каљење (мартемперинг) се примењује код угљеничних челика танких пресека или малих пречника (8–10 mm). Суштина је у промени брзине хлађења на температури нешто изнад M_s . Материјал се задржава на тој температури а затим хлади до собне температуре (сл. 20б). Добијена структура је

мартензит. Степенастим каљењем смањују се унутрашњи напони, деформације и могућност појаве прелина [1].

Изотермичко бејнитно каљење (аустемперинг) подразумева брзо хлађење челика до температуре настајања доњег бејнита, држање на тој температури док се не заврше све промене (аустенит у бејнит), и затим спорог хлађења (сл. 25а). Челик бејнитне структуре има знатно мању тврдоћу, али му се повећавају особине дуктилности (пластичност и жилавост). Изотермички се кале, углавном, делови малих пресека, израђени од угљеничних и нисколегираних челика.



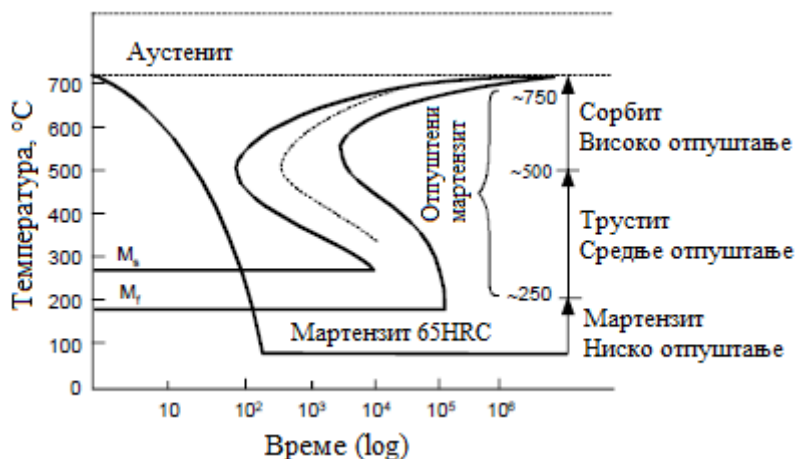
Слика 25. Бејнитно каљење: а) изотермичко, б) континуално

Континуално бејнитно каљење се примењује једино за челике чији КХ дијаграм има истурено колено. Као резултат каљења добија се бејнитно-мартензитна структура (сл. 25б) [1, 5].

4.3 ОТПУШТАЊЕ

Отпуштање представља вид термичке обраде којим се повећава жилавост челика, деформабилност и смањују унутрашња напрезања услед каљења. Температура отпуштања се креће у распону од 100 до 700°C.

Разликује се *нискотемпературно* (150 до 250°C), *средњетемпературно* (250 до 500°C) и *високотемпературно* (500 до 750°C) отпуштање. Зависно од температуре отпуштања у структури каљеног челика настају мање или веће промене нестабилних структура каљења почев од ограничене дифузије атома угљеника, затим издвајања честица цемента и на крају рекристализације металне основе. Време држања треба да омогући потпуно одвијање фазних промена карактеристичних за изабрану температуру отпуштања.



Слика 26. Каљење и отпуштање приказано на КХ дијаграму

Нискотемпературним отпуштањем се у најмањој мери утиче на чврстоћу каљеног челика. При загревању мартензита каљења на температуру из опсега од 150 до 250°C настаје померање атома угљеника унутар решетке мартензита и смањење степена тетрагоналности тако да од тетрагоналног мартензита каљења настаје кубни мартензит отпуштања. Настаје извесно смањење тврдоће, чврстоће и унутрашњих напона а повећава се жилавост. Мартензит отпуштања задржава игличасти изглед мартензита каљења а услед отпуштања добија тамнију нијансу.

Средњетемпературно отпуштање доводи до значајнијих промена механичких карактеристика у смеру смањења чврстоће и повећања жилавости. У структури мартензита каљења настаје издвајање веома ситних честица цементита поред већ наведеног прелаза у кубни мартензит, док се још увек задржава карактеристичан изглед мартензита. При средњетемпературном отпуштању ламеларног трустита каљења настаје зрнасти трустит отпуштања. Са повишењем температуре отпуштања настаје укрупњавање карбида тако да они постају видљиви оптичким микроскопом.

При **високотемпературном отпуштању** настаје рекристализација феритне основе и структура губи игличасти изглед карактеристичан за каљено стање. Карбиди толико порасту да постају јасно видљиви оптичким микроскопом и имају зрнасти облик. У нижем опсегу температура високотемпературног отпуштања настаје сорбит а при вишим температурама перлит отпуштања [2,6].

4.4 ТЕРМО-МЕХАНИЧКА ОБРАДА И РЕАУСТЕНИЗАЦИЈА

ТМО је новији начин обраде челика, заснован на пластичном деформисању аустенита након чега следи мартензитна промена. У поређењу са конвенционалним побољшањем добија се виша граница течења, те повећање јачине на кидане и дуктилности. На основу температуре на коју се ТМО изводи разликујемо:

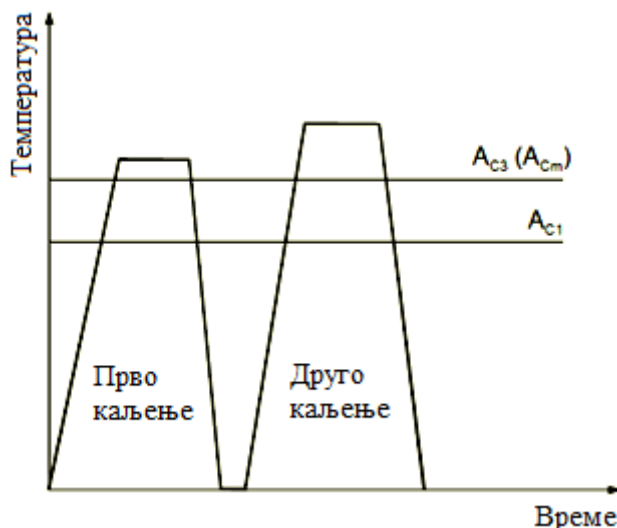
- Високотемпературску термо-механичку обраду (ВТМО) и
- Нискотемпературску термо-механичку обраду (НТМО).

У случају ВТМО челик се пластично прерађује деформисањем по дебљини, у области стабилног аустенита, изнад тачке A_{C3} . После завршеног ваљања на топло изводи се брзо хлађење воденим млазом што спречава дифузиону промену аустенита, а омогућава мартензитну трансформацију. Најзад се ваљани производи (плоче, профили) ниско отпуштају.

При НТМО челик се најпре аустенизира (изнад тачке A_{C3}), потом нагло хлади до температурског интервала метастабилног аустенита. На тој температури (око 500°C)

челик се прерађује ваљањем, па затим директно кали и најзад ниско отпушта. На овај начин могу се прерађивати само челици који на дијаграму изотермичког разлагања имају потпуно раздвојене области перлитне и бејнитне промене [1].

Реаустенизација (двоструко каљење) је релативно нова термичка обрада високоугљеничних челика. Машински део који је претходно окаљен са уобичајене температуре каљења, накнадно се загрева до нешто више температуре и одмах потом кали. У току загревања један део угљеника дифундује на границе зрна и образује фини цементит, а други део остаје растворен у аустениту.



Слика 27. Реаустенизација (двоструко каљење)

Овако добијена мартензитна структура представља најбољу комбинацију својстава отпорности (R_m , $R_{p0.2}$)⁵ и својстава деформибилности⁶ [1, 5].

4.5 ПОВРШИНСКО КАЉЕЊЕ

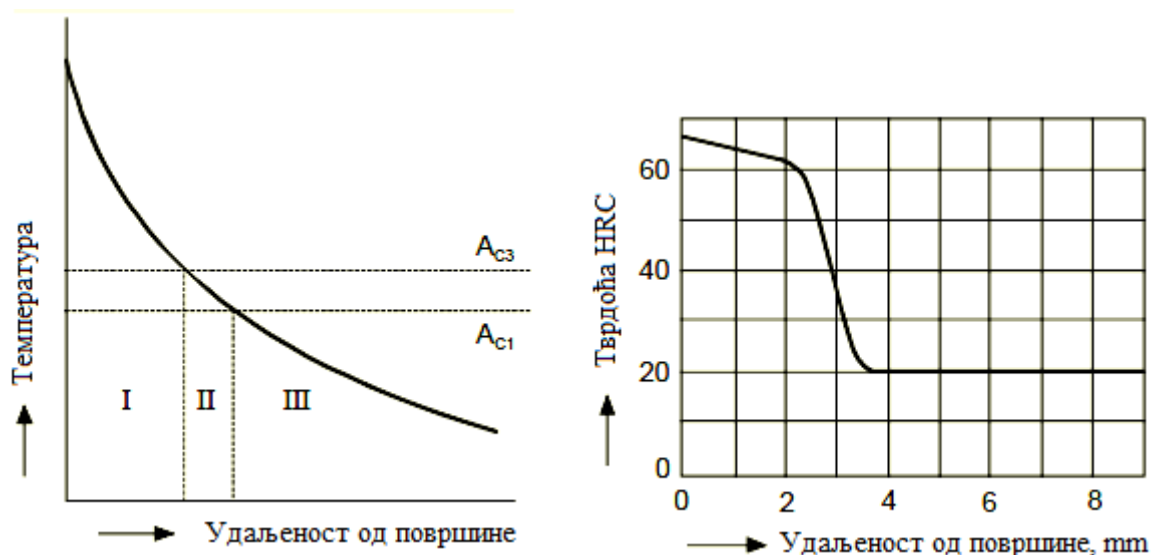
Површинско каљење је термичка обрада којом се закаљују само површински слојеви комада, док његово језгро задржава почетну структуру тако се добија велика површинска тврдоћа уз велику жилавост и мању тврдоћу језгра што је пожељно код делова од којих се траже следеће особине:

- велика отпорност на хабање,
- повећана отпорност против ударног динамичког оптерећења и
- висока граница замарања површине

⁵ R_m - затезна чврстоћа, максимални технички напон добијен при испитивању затезањем;

$R_{p0.2}$ - напон течења, напон при коме настаје одређена пластична деформација, $\epsilon=0,2\%$ за челик;

⁶ Деформибилност представља способност материјала да се пластично деформише .

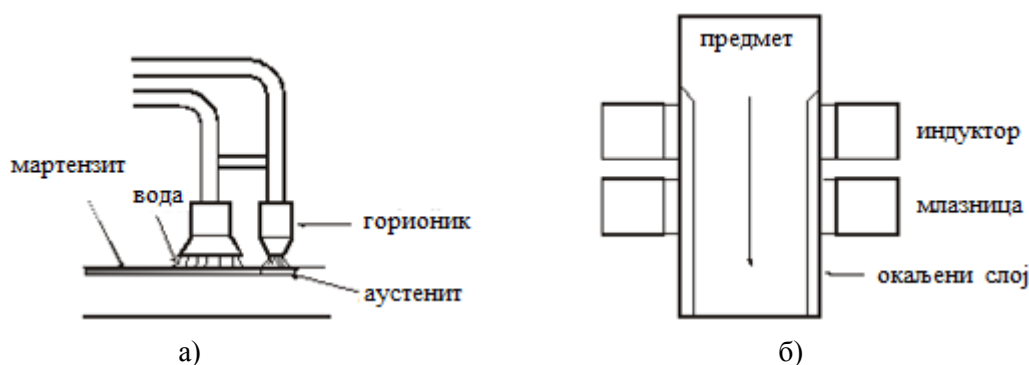


Слика 28. Распредела температуре и тврдоће на различитим удаљеностима од каљење површине

Површинско каљење се састоји из брзог загревања површинских слојева до температуре каљења и затим брзог хлађења, при томе се аустенит у површинском слоју преображава у мартензит. Према извору топлоте разликујемо: *пламено каљење*, *индукционо каљење*, *каљење ласером* и *каљење потапањем*.

Пламено каљење. Ово каљење се изводи тако што се површина загреје гасним пламеном и одмах након тога охлади млазом воде. Загревањем треба да се у површинском слоју оствари аустенит, који се брзим хлађењем трансформише у мартензит. Дубина закаљене зоне зависи од температуре пламена, брзине померања пламена и хемијског састава челика. За загревање површине може се користити пламен ацетилена, керозина и др. Пламен ацетилена има температуру од преко 3000°C, брзо загрева површину али постоји већа могућност прегревања површине, док је пламен керозина ниже температуре (2300°C) али су трошкови загревања керозином већи у односу на загревање ацетиленом. Облик горионика треба да буде прилагођен облику површине која се кали, али се може толерисати веће одступање облика у односу на поступак индукционог каљења.

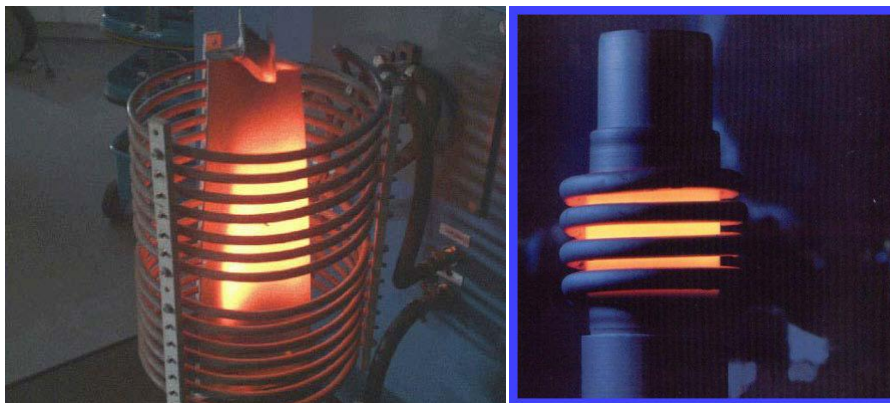
Након површинског каљења изводи се нискотемпературно отпуштање [5, 6].



Слика 29. Схема пламеног каљења а) и индукционог каљења б)

Индукционо каљење. Заснива се на појави вихорних струја у површинском слоју челика под утицајем магнетног поља индуктора. Индуктор представља бакарни проводник обликован према машинском делу који се површински ојачава. Метода је погодна за делове константног попречног пресека и простијег облика. Индуктори

већих снага се хладе водом која се креће кроз шупљи бакарни проводник. Индуктор загрева површину челика до аустенитне области а затим се она хлади млазом воде, или ако је предмет погодног облика одвођењем топлоте кроз околни материјал према незагрејаном делу предмета. Дубина закаљеног слоја зависи од учестаности наизменичне струје, брзине померања индуктора и хемијског састава челика. Предности овог поступка у односу на пламено каљење су чистије површине, мање расипање енергије, прецизније регулисање процеса а недостаци су скупља апаратура и то што поступак није погодан за делове сложеног и несиметричног облика.



Слика 30. Приказ примера индукционог каљења

Каљење ласером. Као извор топлоте код ове методе се користи ласерски сноп светлости. Померањем снопа по површини (или померањем предмета) загрева се површина дуж линије померања. Због велике концентрације енергије загревање се изводи обично импулсно и након престанка дејства снопа настаје брзо хлађење услед одвођења топлоте кроз основни материјал. Уколико ласерски сноп поново пређе истом путањом смањеном снагом настаје отпуштање каљених области површина. Ова метода је погодна за повећање тврдоће линијских области на површини челичних делова, као што су нпр. ивице финих машинских делова изложене хабању, ивице резних алата за просецање, деформисање и сл.



Слика 31. Каљење ласером

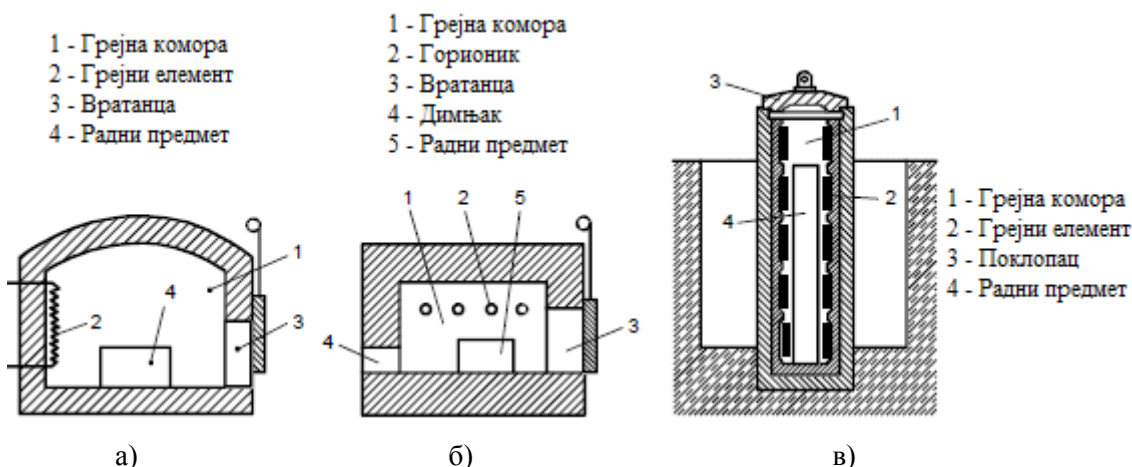
Каљење површина потапањем. Поступак каљења површинских слојева потапањем у растоп соли (BaCl , KCl) или метала (Cu-Sn , SL) се изводи тако што се машински део краткотрајно потопи у растоп загрејан на температуру, која је бар за 100°C већа од температуре каљења. При томе се због релативно кратког потапања загреје само површински слој који се наредним хлађењем окали. Време држања у растопу се одређује експериментално и зависи од димензија и облика предмета који се површински кали, од температуре растопа, врсте челика и сл. [5, 6, 14].

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

5.1 СРЕДСТВА И ОПРЕМА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ

За загревање челика при термичкој обради највише се употрељавају специјалне пећи. Оне се загревају електричним отпором – ефектом $R \cdot I^2$ или индукцијом, односно сагоревањем чврстих, течних и гасовитих горива. При томе се топлота предаје директно преко гаса (конвекцијом) или зрачењем. Загревање се у неким случајевима обавља и у вакуумским пећима и тада се топлота предаје зрачењем. Пећи за загревање при термичкој обради могу бити веома различите по конструкцији, услед чега имају различите називе као што су: коморне (са једном или више комора), јамске, дубинске, ротационе, комбиноване, проточне итд. Међутим, оне се према конструкционом извођењу обично разврставају на:

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

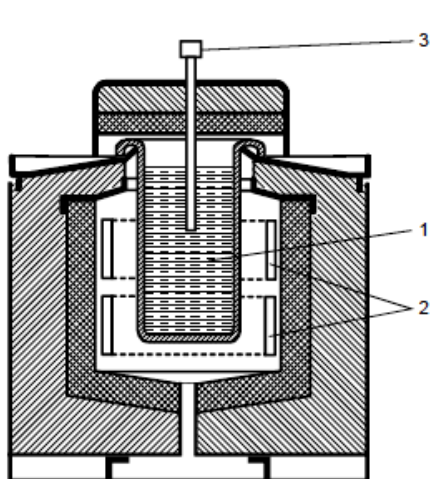


Слика 32. Схеми једнокоморне (а), двокоморне (б) и јамске пећи (в)

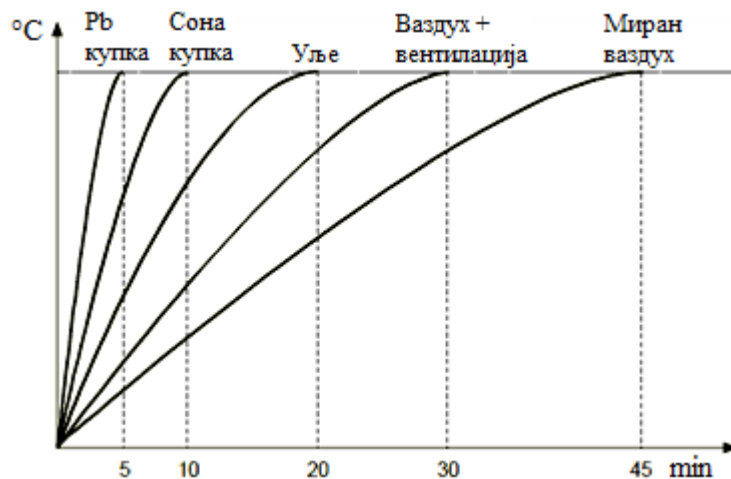
С обзиром на то да ли су намењене загревању различитих или само одређених делова, пећи могу бити универзалне и специјалне.

Код коморних пећи делови се могу загревати директно (када продукти сагоревања долазе у непосредан додир са деловима) или индиректно (када су делови смештени у затвореној комори, која се споља греје топлим гасом). Често су ове пећи двокоморне, при чему једна комора служи за предгревање, а друга за завршно загревање. Када је у питању површинско каљење, загревање се врши индукционим путем.

Делови се могу загревати и у течној средини. У ту сврху се користе „купатила“ у којима је растопљена нека со (сона купатила) или метал (метална купатила). Пећи се најчешће загревају електричном струјом (ређе пламеном) тако да истопљена со или метал (најчешће олово) добије потребну температуру, када се делови убацују у растоп. Загревање у овим течним средствима је брзо, а регулисање температуре веома тачно. Температурни опсег загревања у соним кадама је обично 150-750°C док је у оловним купатилима 330-850°C.



Слика 33. Метално купатило
1 – течан метал, 2 – грејачи,
3 – термометар



Слика 34. Различите брзине загревања у зависности
од средстава за загревање

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

Атмосфера у пећи би могла бити неповољна и у том смислу што неки њени састојци доводе до извесног губитка угљеника из површинских зона челика (разугљенисавање), док други могу довести до супротног ефекта – повећања количине угљеника (наугљенисавање). Зато је остварење контролисане атмосфере у коморама пећи значајно, како због спречавања оксидације тако и са овог становишта [1,5].

5.2 СРЕДСТВА ЗА ХЛАЂЕЊЕ

Највише примењивана средства за хлађење јесу вода, ваздух и уље. С обзиром на претходна објашњења, угљенични челици захтевају знатне брзине хлађења при каљењу, а нарочито они са нижим садржајем угљеника. Зато се угљенични челици нормално хладе водом, као средством које најинтензивније хлади. Међутим, ни тада се ови челици не могу охладити довољно великом брзином по читавом пресеку масивнијих делова. Вода се такође употребљава и за каљење неких нисколегираних челика. Легирани челици имају мању критичну брзину хлађења и зато се хладе уљем (блаже расхладно средство него вода), док се неки високолегирани челици могу хладити у струји ваздуха па чак и на мирном ваздуху (ови задњи се називају мартензитни или природно каљиви челици)

Учинак каљења различитих средстава зависи пре свега од термичке проводности, специфичне топлоте, топлоте испаравања и вискозитета средства за хлађење. С обзиром на појаву паре и гасова веома је важно релативно кретање предмета у купатилу, којим се тај омотач интензивно отклања.

Из табеле 2 је јасно да је најефикасније расхладно средство вода и неки водени раствори (каустична сода NaOH). Али њихова је мана што у температурском опсегу настајања мартензита ($\approx 350-250^{\circ}\text{C}$) имају велику брзину хлађења, односно велики $\text{grad}T$, који индукује знатне заостале термичке напоне. Такође се види да уљна купатила у поређењу са водом хладе 3 до 4 пута спорије у области температура $650-550^{\circ}\text{C}$ и скоро 10 пута спорије на температурама мартензитног преображаја. Иако је

њихова примена као мање интензивног средства за хлађење понекад неопходна, уља, код појединих поступака и материјала ипак не могу да потисну водена купатила [1, 2].

Табела 2. Брзина хлађења челика у различитим условима [1]

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

Треба истаћи да је најефикасније каљење воденим млазом (прскањем) јер млаз одстрањује све парне мехурове који се јављају тако што их преводи у капљице које су способне за трансфер топлоте. Уља за хлађење могу бити различита по саставу, односно интензитету (способности) хлађења. То су обично минерална уља са евентуалним додатком масних уља. Понекад се за хлађење употребљавају сона или метална купатила. Она су нарочито погодна при брзом хлађењу до температура које су изнад нормалних за тзв. "термално каљење" (види одељак о изотермичком и степенастом каљењу). При томе је брзина хлађења већа него при хлађењу у уљу. Хлађење дела смештенног између металних плоча долази у обзир за делове листастог облика. Наиме, у овим случајевима постоји опасност од витоперења делова, па се они притискају бакарним плочама које се изнутра хладе водом, тако да се делови истовремено кале и спречава њихово деформисање. Овом случају одговара каљење поступком мартемперинг. Учинак каљења различитих средстава зависи пре свега од термичке проводности, специфичне топлоте, топлоте испаравања и вискозитета средства за хлађење. С обзиром на појаву паре и гасова веома је важно релативно кретање предмета у купатилу, којим се тај омотач интензивно отклања.

6. СОПСТВЕНИ НАПОНИ И ГРЕШКЕ ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

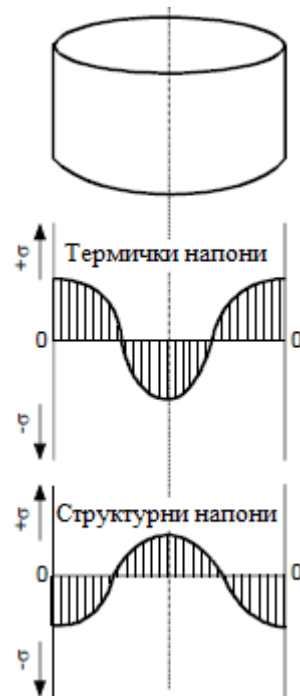
Сопствени напони се могу дефинисати као напони који настају у материјалу услед неке обраде која је на њему извршена (резање, деформисање, заваривање итд.). Они лоше утичу на карактеристике материјала тако што у току експлоатације могу да доведу до разарања, димензионе нестабилности итд. Треба их разликовати од радних напона јер радни потичу од радних (спољашњих) оптерећења којима је део изложен.

Када је реч о термичкој обради челика, сопствени напони се јављају због неравномерног загревања и хлађења – *термички напони* као и услед структурних преображаја – *структурни напони*. Ови унутрашњи напони не само што изазивају еластичне деформације, већ у мањем или већем степену изазивају и неједновремену и неједнаку пластичну деформацију слојева по попречном пресеку, што има за последицу појаву заосталих напона.

Неједнаке брзине хлађења спољних и унутрашњих слојева челика праћене су и променом запремине. Површински слојеви се брже скупљају од унутрашњих, што има за последицу појаву унутрашњих напона. После потпуног хлађења на површини се јављају заостали напони на притисак, а у унутрашњости дела заостали напони на затезање.

Образовање структурних напона је последица неједнаке структуре у површинским и унутрашњим слојевима. Мартензитна структура се прво формира у површинским слојевима, па тек касније у унутрашњим (потпуна прокаљивост). Како је мартензитна трансформација (аустенит → мартензит) праћена повећањем запремине, то ће довести до образовања у површинским слојевима напона на притисак, а у унутрашњим слојевима напона на истезање. Као резултат завршене трансформације у површинским слојевима јављају се заостали напони на затезање, а у унутрашњим слојевима заостали напони на притисак. У зависности од односа термичких и структурних напона у површинском слоју заостали напони могу се разликовати у знаку и величини. Код делова сложеног облика обично су структурни напони већи од термичких.

Ако унутрашњи напони у процесу каљења достигну веће вредности од затезне чврстоће материјала, тада може доћи до појаве прелина. Појаву прелина посебно поспешују напони на затезање у површинским слојевима. Због тога је потребно напоне затезања, који се углавном јављају као последица структурних напона, умањити. Смањење структурних напона може се постићи смањивањем брзине хлађења непосредно испод температуре почетка мартензитне трансформације, као и избегавањем високих температура загревања, односно прегревања материјала. Појава прелина и деформација је честа појава код челика код којих је потребна велика критична брзина хлађења.



Слика 35. Схема расподеле напона у каљеном челичном ваљку

Унутрашњи напони изазивају и витоперење, кривљење и зато се при каљењу треба водити рачуна о њиховом положају при хлађењу. Термичком обрадом се могу постићи значајна повећања механичких особина челика али уколико она није правилно изведена она доводи до грешака које могу потпуно уништити термичком обрадом се могу постићи значајна повећања механичких особина челика али уколико она није правилно изведена она доводи до грешака које могу потпуно уништити комад или смањити његов радни век.

Све грешке које настану на материјалу а последица су термичке обраде називамо *грешкама термичке обраде*. Грешке термичке обраде обухватају велики низ истих и све оне мање или више утичу на радни део. Да би се оне избегле треба спровести поједине мере у оквиру припреме термичке обраде као што су:

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

Када су испуњени горе наведени услови могућности за појаву грешака се смањују али и даље постоји простор за њихово појављивање [1, 6].

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

Недовољно загревање. Недовољно загревање настаје у случају када се челик загреје до температура које су ниже од потребних. На пример, ако се подеутектоидни челик загреје до температура које су ниже од тачке A_{C3} , што значи да ће део ферита остати нетрансформисан у аустенит. После хлађења, аустенит се трансформише у мартензит, а ферит који није трансформисан остаје у структури каљеног челика. Као резултат добија се структура мартензит + ферит. Како је ферит релативно мек, он смањује тврдоћу делова после каљења. Ова грешка може се исправити тако што се недовољно загрејан каљени челик жари, а затим поново загрева до потребних температура.

Прегревање. До прегревања долази у случају када се челик загрева до температура које су много више од потребних температура (знатно изнад A_{C3} и A_{Cm}), или ако се при нормалним температурама држи дуже време. Последица прегревања је појава крупнозрног аустенита. У процесу спорог хлађења прегрејаног челика у температурном интервалу критичних тачака $A_{T3}-A_{T1}$, долази до појаве јако крте Видманштетенове структуре. Као резултат прегревања у процесу каљења образује се крупноигличасти мартензит. Механичка својства прегрејаног челика су знатно нижа. Отклањање грешака прегревања насталих у процесу жарења захтева поновно жарење, или делове подвргнути процесу нормализације. Челике прегрејане у процесу каљења жарити и поновити каљење.

Прегоревање. Прегоревање настаје у случају када се челик загрева до температура које су блиске температури топљења. Прегоревање је праћено издвајањем оксида железа по границама металног зрна због чега су челици веома крти. Прегоревање је непоправљива грешка.

Оксидација и разугљеничавање. Оксидација и разугљеничавање челика у процесу загревања долази као последица узајамног дејства његове површине са гасовима који се налазе у атмосфери пећи (кисеоник, водоник). Оксидацију карактерише стварање оксида железа FeO на површини делова. Оксид представља неповратни губитак материјала, доводи до неуједначене тврдоће и захтева неопходну допунску обраду делова, што повећава трошкове израде. Разугљеничавање је процес смањивања садржаја угљеника у површинским слојевима делова ($C+O_2 \rightarrow CO_2$) и доводи

до стварања феритне структуре у површинском слоју, што јако смањује тврдоћу на површини делова, а тиме и отпорност на хабање. Најбољи начин да се делови у процесу загревања заштите од оксидације и разугљеничавања јесте загревање у пећима са заштитном (контролисаном) атмосфером која је инертна у односу на челик.

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

Деформације. Деформације (измена димензија и облика), које настају на деловима при термичкој обради, јесу резултат термичких и структурних напона који се јављају у челику услед неравномерног хлађења и фазних трансформација. Неравномерно загревање, високе температуре, неправилан положај делова у средству за хлађење и велике брзине хлађења у температурном интервалу мартензитне трансформације могу довести до кривљења делова. Спречавање кривљења делова постиже се правилним избором режима термичке обраде (температура загревања, брзина и начин хлађења), а код дугих и танких делова користити се каљење у алатима [2, 3, 6].

7. КОНТРОЛА КВАЛИТЕТА ИЗВЕДЕНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

На крају процеса термичке обраде третиране делове треба подвргнути контроли како би се утврдило њихово стање и успешност процеса термичке обраде. Контрола термичке обраде, поред провере тврдоће, склоности ка напрслинама и склоности ка кривљењу, подразумева и контролисање температуре у току процеса термичке обраде.

Контрола се може поделити у три фазе:

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

Контрола делова пре термичке обраде треба да обухвати основна сазнања о материјалу и његовом стању пре третирања. Уколико део није адекватно израђен и на себи има прслине или могућа места концентрације напона онда се и то узима у обзир, односно отклања. Уколико немамо довољно сазнања о материјалу, процес веома лако може бити неуспешан. Контрола тока термичке обраде се пре свега односи на контролу температура, времена и брзине загревања. Уколико неки од поменутих параметара одступа од прописаних, може доћи до лоше изведене термичке обраде. И на крају се увек приступа контроли комада после термичке обраде. С обзиром да су то најчешће делови коначних димензија оне морају бити стабилне и у оквирима прописаних толеранција. Контрола се односи и на контролу геометрије комада као и на контролу тврдоће и дубине на којој се жељена својства протежу. Поред тога, може се приступити и одређивању микроструктуре али и провери стања површине комада. Под стањем површине комада се мисли на могуће постојање микропрслина које у току експлоатације могу да доведу до хаварије. У том циљу се изводе пенетрантна и магнетна дефектоскопија које могу дати слику о стању материјала на површини а може бити примењена и ултразвучна метода.

О неким од поменутих метода ће бити више речи у наредним поглављима.

8. ХЕМИЈСКО-ТЕРМИЧКА ОБРАДА (ХТО)

У техничкој пракси постоји више случајева, кад се тражи тврда површина комада и истовремено довољна жилавост његовог језгра. Каљени део испуњава захтеве у погледу тврдоће, али у целини остаје крт; отпуштањем се повећава жилавост, опада тврдоћа. Захтев за високу тврдоћу површине и жилаво језгро истовремено, може се остварити било површинским каљењем или процесима који се заједнички називају хемијско-термичка обрада. За разлику од површинског каљења, код ових процеса одвија се дифузно засићење површине челика металом или неметалом на повишеној температури, тј. мења се хемијски састав, а тиме и особине површине; састав испод површинског слоја остаје неизмењен. Код неких од ових процеса, после промене хемијског састава површине, изводи се термичка обрада док код других процеса она није нужна. Међу главне начине хемијско-термичке обраде убрајају се:

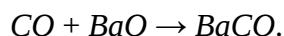
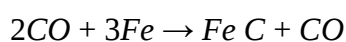
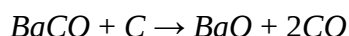
- цементација,
- нитрирање,
- цијанизација и карбонитрирање,
- други начини отврдњавања површине (алитирање, силицирање, хромирање, борирање) [1].

8.1 ЦЕМЕНТАЦИЈА

Спада у најраспрострањеније методе ХТО. При цементацији се засићује површина нелегираних и легираних челика угљеником који у стању испоруке садрже 0.15-0.25% C. После цементације ови се челици могу закалити на високу површинску тврдоћу. Пошто се проценат угљеника повећава само у површинском слоју комада, остаје задржана велика жилавост језгра.

Цементација се може извести у *гасовитој*, *чврстој* и *течној средини*. У свим срединама, за цементацију је неопходан атомни угљеник (у стању стварања). Он се углавном добија хемијском реакцијом угљенмоноксида (CO) са усијаним гвожђем или разлагањем метана (CH₄) [1].

Цементација у чврстом средству за цементацију. Овај начин цементације се изводи тако што се челични делови слажу у металне кутије са смешом за цементацију која садржи веома висок проценат угљеника, а чију основу представља дрвени угаљ у облику гранулата величине 5-8 mm, па се у добро затвореним кутијама загревају у току одређеног времена на температури која у зависности од челика износи 850 до 930°C. При узајамном дејству кисеоника из ваздуха, који се задржао међу гранулама смеше за цементацију, са угљеником из дрвеног угља ствара се CO (због недостатка кисеоника не настаје CO₂) који је на вишим температурама нестабилан у контакту са железом [2]. Атомни угљеник продире у спољашње слојеве комада а преостали угљенмоноксид даље реагује са површином комада. То значи да се наугљенисавање опет одвија преко гасне фазе. Реакцију убрзава присуство BaCO₃, који са угљеником ствара додатну количину CO:



Цементација у чврстом средству не захтева велике инвестиције, јер се може извести у било којој пећи, али су времена дужа и рад отежанији, тако да је погодна само за цементацију једноставних комада. Они се слажу у сандук наизменично са

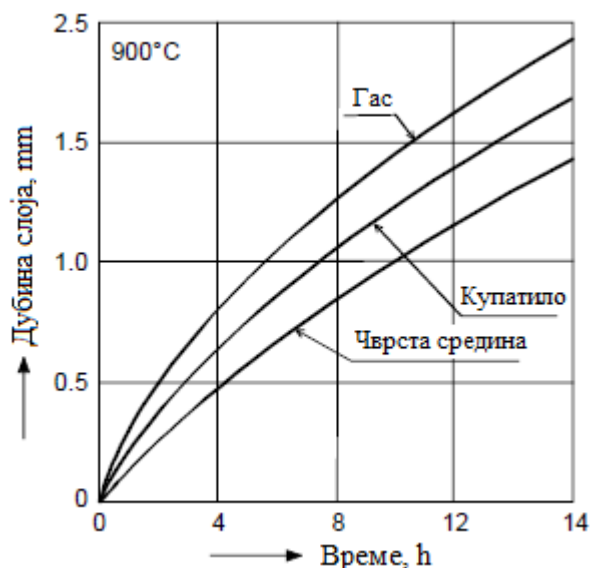
ћумуром, гранулације 3-10 mm, убацују у пећ загрејану до 950°C, држе у њој око 6 h; после тога сандук се вади и хлади до 450°C. На овој температури сандук се отвара, делови избацују и хладе до собне температуре. После тога, делови се кале и ниско отпуштају [1].

Цементација у течној средини. Цементација у течности се изводи у цијанидним купатилима од ватросталног материјала (облоге од графитних плоча) при температури 840 до 930°C. Овај поступак треба разликовати од цијанизирања, када је у купатилу више цијанида и када површински слојеви имају виши садржај азота, а нижи садржај угљеника. Купатило се може загревати споља гасом или директно струјом која протиче између уроњених електрода.

Табела 3. Састав купатила за цементацију [1]

Састојак	Садржај састојака (%) при температурама	
	840 - 900°C	900 - 930°C
NaCN	10 - 23	6 - 16
BaCl ₂	0 - 40	30 - 55
KCl	0 - 25	0 - 20
NaCl	26 - 40	0 - 20
Na ₂ CO ₃	max 30	max 30
NaNCO	max 1	max 0.5

При температурама изнад 900°C могу се цементирати ситнозрни челици са додатком титана код којих не огрубљава аустенитно зрно ни при дугом задржавању. Време држања на одабраној температури одређује се према траженој дебљини цементираног слоја. При цементацији у чврстом средству добија се максимална дебљина слоја од приближно 1.5 mm, а за дубље слојеве већ су времена дужа па је повољнија цементација у гасу, односно у течности. Утицај времена на дубину цементираног слоја при цементацији у различитим срединама на температури од 900°C дат је на слици 36 [1, 2, 3].



Слика 36. Зависност дубине цементираног слоја од температуре и времена процеса

Цементација у гасу. Главни састојци гаса за наугљенисавање су угљенмоноксид (CO), засићени и незасићени угљоводоници (метан, пропан, бутан); при високој температури и услед каталитичког деловања гвожђа, CO и CH₄ ступају у реакције. Повишење температуре потпомаже ток реакције, тј. наугљенисавање комада, а снижавање делује супротно тј. комад се разугљенисава. Цементација у гасу у односу на цементацију у чврстом стању (прашку) има неке предности:

- цена је нижа,
- јаче продире угљеник у дубинске слојеве,
- времена су краћа, пошто је загревање брже и
- површина је чиста без запечене цементационе масе.

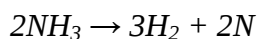
Цементација у гасу изводи се у (јамским) шахтпећима. За стварање гасне атмосфере, у тим пећима које имају херметичну комору где се убацују делови за цементацију, употребљавају се ниско испарљиве течности. Та тзв. цементациона течност је смеша терпентина и алкохола (или петролеја). У пећи, загрејаној до око 950°C, ова течност прелази у гас који садржи приближно: 27% CO, 65% H₂, 2% CH₄, 5% H₂ и трагове виших угљоводоника [1, 3].

8.2 НИТРИРАЊЕ

Нитрирање је термохемијски процес у којем се у површински слој челика дифузијом обогаћује атомима азота, у циљу повећања тврдоће, отпорности на хабање – која се задржава до радне температуре од око 500°C, затим отпорности на корозију као и повећање динамичке чврстоће. У том циљу челици се загревају у средини способној да на температури нитрирања 500-520°C ослободе атоме азота који дифузијом улазе у површински слој метала и где се мањи део (0,015%) растварају у решетки α-Fe, а већим делом граде са железом и другим елементима (Al, Cr, Mo, V и др.) тврде и ситнозрне нитриде (FeN, Fe₄N, AlN, CrN, Cr₂N, MoN, Mo₂N, V₂N и др.). Нитрирању се подвргавају средњеугљенични конструкциони челици (са 0,2–0,4% C) и легирани челици са 1,2–2% легирајућих елемената. За разлику од цементације, нитрирање је завршна термичка обрада (после каљења и отпуштања) и много је спорији процес од цементације.

У зависности од агрегатног стања средства за нитрирање разликује се: *нитрирање у гасовитој средини* (NH₃), *нитрирање у течној средини* (тенифер процес – назив поступка добијен од почетних слогова три латинске речи: *tenux* – тврдо, *nitrogenium* – азот и *ferrum* – железо), и *јонско нитрирање*.

Нитрирање у гасовитој средини. Делови припремљени за нитрирање загревају се на температуру од 500-520°C у специјалним пећима у које се за време трајања процеса непрекидно уводи амонијак NH₃. На повишеној температури од приближно 200°C амонијак се разлаже ослобађајући активне атоме азота по реакцији:



Слободни атоми азота дифундују у површински слој челика. Дубина дифузије атома азота повећава се са температуром и временом трајања процеса. Повећавањем температуре процеса расте дубина дифузије азота, али опада тврдоћа нитрираног слоја. Процес нитрирања траје око 24–60 h. У циљу смањења временатрајања процеса, нитрирање се изводи у два ступња. Први ступањ на температури 500–520°C у трајању 10–15 h и има за циљ добијање високе тврдоће 1200 HV. Други ступањ је загревање на 550–600°C у трајању 10–20 h са циљем повећавања дубине без смањења тврдоће у површинском слоју формиране у првом ступњу. Дубина нитрираног слоја је најчешће у границама 0,3–0,6 mm. После нитрирања није потребна никаква накнадна термичка обрада. Нитриране површине су чисте и није потребна додатна машинска обрада [1, 3].

Нитрирање у течној средини (тенифер процес). Делови припремљени за нитрирање потапају се у каде са растопљеним солима цијана (85% соли (40% KCNO и 60% NaCN) + 15% Na₂CO₃) кроз које се пропушта сув ваздух. Температура процеса 560–580°C у трајању од 1–3 часа. У току процеса ослобођени атоми азота дифундују у површински слој челика образујући на површини дела карбонитридни слој Fe₂(C,N) дубине 7–15 μm, а испод њега слој чврстог раствора азота у α-Fe. Укупна дубина нитрираног слоја добијена овим поступком износи 0,15–0,5 mm. Тврдоћа нитрираног слоја код угљеничних челика достиже вредност 300–350 HV, а код легираних челика 600–1100 HV. Нитрирањем у течној средини не долази до промена димензија делова,

као ни до појаве деформација. Поред овог начина нитрирања у индустрији се користе и други патентирани поступци нитрирања у течної средини [1,3].

Јонско нитрирање. Процес јонског нитрирања обавља се у три фазе:

- у првој фази у трајању од 50–60 минута, при ниском притиску 0,1–0,5 *mbara* и напону од 1100–1400 V у атмосфери водоника обавља се процес чишћења површине дела од оксидног слоја распршивањем;
- друга фаза – главни део поступка, почиње повећавањем притиска у комори на 1–13 *mbara* и загревањем дела до потребне температуре нитрирања 470–580°C у одговарајућој смеси гасова. У току ове фазе у површински слој дифундују атоми азота. Дифузиони слој представља чврсти раствор азота у α -Fe и нитрида које азот гради са присутним елементима (Al, Cr, Mo, V);
- трећа фаза поступка јонског нитрирања је хлађење делова које се обавља у вакууму. Целокупан процес јонског нитрирања може да траје и више од 24 h.

После јонског нитрирања површине делова су чисте и није потребна никаква накнадна обрада. Јонским нитрирањем могу се обрађивати челици и ливена гвожђа. Нелегирани челици и ливена гвожђа имају релативно малу тврдоћу дифузионог слоја 350–550 HV, док високо легирани челици за нитрирање, алатни и нерђајући челици постижу тврдоћу од 1000 HV (70 HRC). Јонско нитрирање има карактеристичну технолошку могућност нитрирања рупа и шупљина комада што је посебно погодно за нитрирање матрице алата [2, 3, 5].

8.3 ЦИЈАНИЗАЦИЈА И КАРБОНИТРИРАЊЕ

Ови поступци се састоје у истовременом обогаћивању површинске зоне челичних делова угљеником и азотом, после чега се изводи каљење. При томе је циљ да се постигне велика површинска тврдоћа код алатних челика и отпорност према хабању код конструкционих челика.

Цијанизација се обавља потапањем делова у течна средства, тј. истопљене соли које садрже цијанску групу (CN), као што су: NaCN, KCN, Ca(CN)₂ и др. Отуда потиче и назив поступка. Резни алати од брзорезних челика и високохромни челици за алате при обради деформисањем подвргавају се цијанизацији нискотемпературским поступком ($T = 510\text{--}560^\circ\text{C}$, $t = 10\text{--}30\text{ min}$, дубина слоја 0.05 mm, 900–950 HV). Делови машина од конструкционих средње угљеничних челика постају отпорнији на хабање после високотемпературске цијанизације ($T \approx 778^\circ\text{C}$, 58–62 HRC (680–760 HV)). Поред алатних челика цијанизирају се и конструкциони челици, углавном делови авионских мотора и аутомобила више класе (рукавци коленастих вратила, брегасте осовине, стабла вентила, цилиндарске кошуљице, бризгалке дизел мотора). Исто тако се третирају и вретена машина алатки, зупчаници, екструдери, матрице за пресовање пластике, контролници. У погледу 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 поступак дифузног уношења угљеника и азота из одговарајуће гасне атмосфере у плитке површинске слојеве челичних делова. После тога обавља се каљење, најчешће у уљу.

По својој суштини овај поступак је близак високотемпературској цијанизацији, а по резултатима цементацији. Зато карбонитрирање често замењује цементацију јер краће траје и даје чистије површине (захваљујући азоту). Задатак азота је да делујући као легирајући елемент смањи критичну брзину хлађења (каљења), јер се и он, поред

угљеника, раствара у аустенитној γ -решетки. Зато се при карбонитрирању хлађење може изводити и са мањом брзином, тј. у уљу уместо у води што смањује опасност од деформација. Дубина карбонитрираног слоја не прелази 0.8 mm (најчешће испод 0.60 mm), а ако су потребне веће дубине отврдњавања обично се користи гасна цементација. После каљења и отпуштања добија се површинска тврдоћа око 63 HRC, а структура се састоји, од финих кристала мартензита, фино диспергованих карбидно-нитридних честица и 25-30% заосталог аустенита. Овај аустенит побољшава радне особине, нарочито када су у питању бешумни зупчаници. Температура карбонитрирања је нешто нижа од температуре цементације, а виша од температуре нитрирања, тако да представља изванредан компромис са гледишта брзине дифузије угљеника и азота. Загревање је у границама 800-900°C за конструкционе челике што даје карбидну структуру отврдног слоја, и 830-850°C за алатне челике кад се добија претежно нитридна структура тог слоја [1].

8.4 ОСТАЛИ МЕТОДИ ТЕРМО-ХЕМИЈСКОГ ОТВРДЊАВАЊА ПОВРШИНЕ (ДИФУЗНА МЕТАЛИЗАЦИЈА)

Поред наведених поступака, користе се и поступци дифузне метализације, чији је циљ да се увођењем одговарајућих елемената у површинске слојеве челика и ливених гвожђа постигну повољна својства (повећана отпорност према хабању, корозији итд.). За дифузну метализацију употребљавају се углавном спрашене феролегуре (фероалуминијум, ферохром и феросилицијум) са додатком нишадора NH_4Cl , који на високој температури $\sim 1000^\circ\text{C}$ хемијски реагује са феролегурама образујући лако испарљиве хлориде (AlCl_3 , CrCl_3 , SiCl_4). При додиру са усијаним челиком, ови хлориди дисоцирају, а на површини комада остају слободни атоми (Al, Cr, Si) који дифундују у челик. Ови елементи образују са $\alpha\text{-Fe}$ супституијске чврсте растворе, који побољшавају особине површинских слојева [1].

Борирање. Борирање је процес термохемијске обраде у којем се површински слој челика обогаћује бором загревањем у одговарајућој средини. Борирањем се постиже врло висока тврдоћа, висока отпорност на хабање и висока отпорност на корозију.

Борирање се изводи електролизом растопљене соли бора $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, на температури 930–950°C при чему је део који се борира катода. Трајање процеса је 2–6 часова. Разлагањем соли бора образују се атоми бора који дифундују у површински слој обрађиваног дела. Процес борирања се може обавити и без електролизе потапањем у каде са раствором солима $\text{NaCl} + \text{BaC}_2$ са додатком 20% фери-бора или 10% B_4C . Добри резултати добијају се и борирањем у гасној средини дибора B_2H_6 и водоника, на температури 850–900°C. Структура борираног слоја на површини дела састоји се од борида FeB , а нижи слојеви од борида Fe_2B . Дубина слоја је 0,1–0,2 mm. Борирани слој има врло високу тврдоћу 1800–2000 HV [2, 3].

Алитирање. Алитирање је термохемијски процес дифузионог обогаћивања површинског слоја нискоугљеничног челика и ливеног гвожђа (сивог лива) алуминијумом загревањем у одговарајућој средини. Циљ алитирања је повећање отпорности на оксидацију на повишеним температурама од 850–900°C (око десет пута већа у поређењу са Cr–Ni челицима). Такође, алитирани слој има добру отпорност на корозију у морској води. Ово се објашњава стварањем танког слоја Al_2O_3 (каолин) који покрива површину, па штити од оксидације, од дејства гасова који садрже С и од дејства киселина. Поступак алитирања се изводи у чврстој или течној средини. Алитирањем у чврстој средини делови се у челичним кутијама затрпају смешом праха

(49% Fe–Al + 49% Al₂O₃ + 2% NH₄Cl) и жаре на температури 950–1050°C у трајању 3–12 часова. У овом поступку ослобађају се атоми алуминијума који дифундују у површински слој и повећавају концентрацију алуминијума до ~30–40%. Структура алитираног слоја је чврст раствор алуминијума у α–Fe. Стварају се и хемијска једињења Fe₃Al или Fe₃Al₅ + FeAl₃. Дубина алитираног слоја је 0,4–0,5 mm. Тврдоћа слоја је 400–500 HV. Отпорност према хабању је велика, а слој је и крт [2, 3].

Силицирање. Силицирање је термохемијски процес дифузионог обогаћивања површинског слоја средњеугљеничних челика силицијумом загревањем у одговарајућој средини. Циљ процеса силицирања челика је добијање високе отпорности на корозију (у морској води, азотној, сумпорној и соној киселини) и повећање отпорности према оксидацији до 700°C, и уз релативно мало повећање отпорности према хабању. Обично се обавља на деловима уређаја у хемијској индустрији и производњи нафте. Силицирање се изводи обично у гасовитој средини разлагањем пара SiCl₄ на 950–1050°C у трајању 2–5 часова. Структура силицираног слоја је чврст раствор силицијума у α–Fe. Дубина слоја износи 0,3–1 mm, а тврдоћа 200–300 HV [2,3].

Тврдо хромирање. Тврдо хромирање је термохемијски процес дифузионог обогаћивања површинског слоја нискоугљеничних и алатних челика хромом загревањем у одговарајућој средини. Овај процес обезбеђује површинском слоју челика високу тврдоћу, отпорност на хабање, топлотну постојаност и отпорност на корозију у срединама као што је морска вода или азотна киселина, тј. у базним и киселим срединама, отпорност према оксидацији. Структура хромираног слоја састоји се из карбида хрома (Cr,Fe)₇C₃ или (Cr,Fe)₂₃C₆ и слоја испод њега са високим садржајем C (0,8% C). Тврдоћа хромираног слоја код нискоугљеничних челика је 250–300 HV, а код средње и високолегираних челика је 1200–1300 HV. Дебљина хромираног слоја износи 0,001–0,5 mm.

Берилизирање је засићавање површине челика берилијумом, при чему се постиже висока тврдоћа која у случају високоугљеничних челика износи и до 1800 HV и веома изражена отпорност на гасну корозију при повишеним температурама блиска отпорности алитираних слојева. Берилизирање се изводи у праху берилијума или фероберилијума уз додатак Al₂O₃ и NH₄Cl или тако што водоник и хлороводоник проводе преко комадића берилијума, при чему се ствара хлорид берилијума који у реакцији са железом даје берилијум способан за дифузију [2].

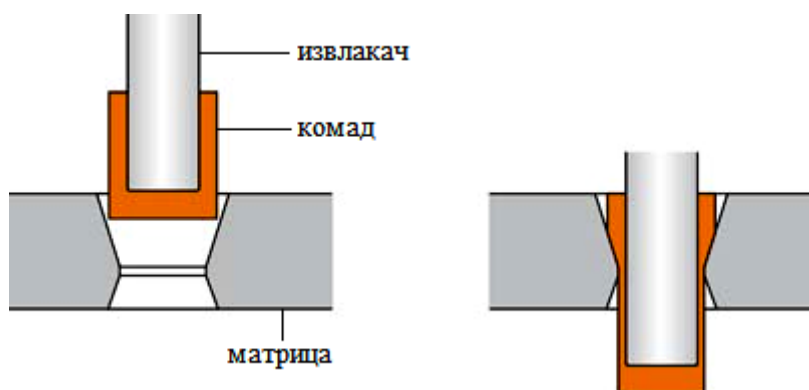
Волфрамирање, молибденирање и ванадијумирање се односе на дифузионо засићавање површинског слоја челика волфрамом, молибденом или ванадијумом, при чему се повећава отпорност челика према дејству киселина, док се не утиче на отпорност према гасној корозији на повишеним температурама. Ова три процеса изводе се на начин изложен код берилизирања с тим што се волфрамирање врши и електролизом волфрамата, молибденирање и у растопу молибденових соли [2].

9. ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТА ЗА ОБРАДУ ДЕФОРМИСАЊЕМ - МАТРИЦА И ИЗВЛАКАЧ ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА

Технологија обликовања метала деформисањем је последњих деценија неизбежна технологија у индустријским високо продуктивним процесима. Овакав вид технологије обухвата процесе код којих се под дејством довољно великих спољашњих оптерећења остварује пластична деформација, односно трајно мења облик полазног материјала. Основне особине технологије пластичног обликовања су очување непрекидне структуре, непроменљивост запремине и побољшање особина чврстоће полазног материјала. Поред свега тога, треба имати у виду и сложена напонско-деформациона стања која се при обради јављају како у обликованим коадима тако и у алатима.

Постоји вишеструка подела поступака пластичног обликовања. Тако се обрада дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида сматра обрадом у хладном стању (осим у изузетним случајевима када се материјал за обраду загрева).

За разлику од класичног дубоког извлачења у овом случају се врши циљано стањивање лима, уз истовремену поступну редукцију пречника и повећање висине комада.



Слика 37. Схема поступка дубоког извлачења са стањењем

У првој фази може да се ради извлачење без стањења или полазни комад може бити цилиндрични комад, добијен супротносмерним истискивањем. Извлачење се врши у матрици са једним или више прстенова. Због релативно велике дебљине лима нема опасности од појаве набора, па се држач најчешће не користи [11].

9.1 ОСОБИНЕ АЛАТА

Карактеристике материјала који се користе за израду алата за обраду дубоким извлачењем су директно повезане са експлоатационим режимима. Од материјала који се примењују за израду алата деформисањем на хладно очекује се висока отпорност према хабању тј. висока димензиона постојаност у току периода експлоатације. Посебна врста челика која се користи за израду свих врста алата јесу алатни челици.

Потребне карактеристике алата, које се огледају у горе наведеним захтевима, могу се остварити правилним избором материјала, термичке или хемијско–термичке обраде као и правилном дефинисању параметара наведених третмана [8, 11]..

9.1.1 АЛАТНИ ЧЕЛИЦИ

Основна својства која алатни челици морају поседовати су:

- отпорност на хабање (мартензитно-карбидна микроструктура),
- висока ударна жилавост.

Производни (економски) захтеви и својства према алатним челицима:

- могућност обраде алата одвајањем честица,
- висока закаљивост,
- висока прокаљивост,
- занемарива склоност ка повећању зрна приликом аустенитизације,
- незнатна промена димензија током рада,
- сигурност с обзиром на појаву прслина и ломова током термичке обраде,
- незнатна склоност разугљеничењу током термичке обраде,
- отпорност на корозију,
- могућност полирања,
- економичност итд.

Алатни челици се примењују у термички обрађеном стању (поједини видови каљења и отпуштања). Додатно се могу спровести неки од поступака отврдњавања површине. Побољшавање својстава алата површинским термичким обрадама углавном се спроводи слидећим поступцима:

- површинско каљење,
- термохемијски поступци (цементација, нитрирање, карбонитрирање, борирање, дифузија металних елемената – V, Cr, Al, Si),
- тврдо електрохемијско хромирање,
- наношење карбида, нитрида, карбонитрида и оксида из парне фазе (CVD и PVD поступци),
- наношење дијамантних слојева (DLC– Diamond Like Carbon).



Слика 38. *Схема поделе алатних челика*

9.1.1.a Нелегирани (угљенични) алатни челици

До краја 19. века сви алати су израђивани од угљеничних алатних челика. Тренутно, нелегирани (угљенични) алатни челици заузимају око 10% удела у укупној маси произведених алатних челика. Упркос знатно неповољнијим својствима тако високи удео угљеничних алатних челика одржао се због тога што су:

- најјефтинија врста алатних челика,
- најширег асортимана димензија,
- једноставни за термичку обраду,
- ниске температуре аустенитизације,
- мање осетљиви према разугљеничењу површине током термичке обраде,
- лакше обрадиви механичким обрадама,
- боље заварљиви.

Нелегирани алатни челици припадају групи племенитих челика, а садрже 0,5-1,5% угљеника, те мање уделе силицијума и мангана. Што је виши удео угљеника у челику то је виша тврдоћа (виши удео секундарног цементита), а нижа жилавост. Будући да нису легирани ова група челика има ниску прокаљивост ($\sim 10\text{ mm}$). Због ниске прокаљивости имају бољу жилавост у односу на друге алатне челике јер се каљењем у површинским слојевима постиже мартензитна микроструктура, док у језгру остаје еутектоидна микроструктура. Ова група алатних челика се кали, са релативно ниских температура аустенитизације, у води и ниско отпушта ($<200^\circ\text{C}$) због пада тврдоће. Пре каљења обично се спроводи сфероидално (меко) жарење којим се олакшава обрада раздвајањем и припрема каснија аустенитизација.

Зависно од процента угљеника у микроструктури нелегирани алатни челици могу бити:

- подеутектоидни (до 0,77% C): феритно-перлитни,
- еутектоидни (0,77% C): перлитни,
- надеутектоидни ($>0,77\%$ C): перлитно-цементитни.

Главни недостатак угљеничних алатних челика је врло кратко инкубацијско трајање до промене потхлађеног аустенита у еутектоидне или бејнитне структуре. Због тога што тај период траје свега неколико секунди неопходно је интензивно хлађење у води. То може довести до појаве великих напрезања која узрокују појаву прслина и потенцијалне ломове. Најважније позитивно својство ове групе алатних челика представља њихова жилавост, па стога место примене углавном проналазе у изради ударних алата [18].

9.1.1.b Легирани алатни челици

Нисколегирани алатни челици за хладан рад

Заједничка карактеристика ове групе челика је ниска отпорност на отпуштање, осредња жилавост (у односу на угљеничне алатне челике) те висока отпорност на хабање. Основни циљ због којег се спроводи легирање ових челика представља повишење прокаљивости те добијање квалитетнијих и постојанијих карбида у односу на карбид Fe_3C . Нисколегирани алатни челици отпуштају се ниско ($\leq 250^\circ\text{C}$) при чему је примарни циљ избегавање појаве великих напрезања.

Подгрупе нисколегираних алатних челика за хладан рад су:

- високоугљенични W-V челици,
- ниско и средњеугљенични W-Cr-(Si)-V челици,

- нисколегирани Cr челици,
- нисколегирани Mn-Cr-V и Mn-Cr-W челици.

Високолегирани алатни челици за хладан рад

Главни легирајући елемент ове групе челика је хром (>5%) уз могуће додатно легирање ванадијумом, молибденом и/или волфрамом. Хром притом може деловати на:

- настанак карбида ($(Fe, Cr)_3C$, Cr_7C_3 са приближно 91% хрома или $C_{23}C_6$ са приближно 94% хрома, тј. пораст отпорности на хабање,
- повишење температуре аустенитизације,
- пораст отпорности на корозију.

Повишењем степена легираности и температуре аустенитизације расте удео заосталог аустенита у закаљеној микроструктури што може смањити појаву деформација након каљења. С обзиром на хемијски састав, микроструктуру и својства високолегирани алатни челици за хладни рад могу се поделити у 3 подгрупе:

- челици са ~5% хрома (нпр. X100CrMoV5-1),
- високоугљенични ледебуритни челици са 12% хрома (нпр. X210Cr12, X210CrW12, X65CrMoV12, X55CrVMo12-1),
- мартензитни нерђајући челици (X42Cr13, X45CrMoV15, X5CrMo14, X1CrMoV18).

а) Челици са ~5% хрома

Челик X100CrMoV5-1 припада групи надеутектоидних челика чији је хемијски састав 1% угљеника, 5% хрома, 1% молибдена и 0,25% ванадијума. Одликује се врло добром отпорношћу на хабање, жилавости, високом прокаљивошћу те постојаношћу димензија током каљења. Главна примена му је за израду алата за обликовање лима, мерног алата, нарезница, матрица сложених облика, алата за прераду полимера итд.

б) Високолегирани ледебуритни челици са 12% хрома

Главни представник ове групе алатних челика је челик X210Cr12 који припада подеутектичким (ледебуритним) челицима, а садржи 2% угљеника, 12% хрома и 0,1% ванадијума. Покушај корекције неких лошијих својстава (нпр. жилавости) челика X210Cr12 довели су до модификације састава у погледу снижавања садржаја угљеника и додатка молибдена и ванадијума.

Табела 4. Високолегирани ледебуритни алатни челици

Ознака челика		Процентуални хемијски састав				
EN	JUS	C	Cr	W	Mo	V
X210Cr12	Č4150	2	12	-	-	-
X210CrW12	Č4650	2	12	0,7	-	-
X165CrMoV12	Č4750	1,65	12	0,5	0,6	0,3
X155CrMo12 1	Č4850	1,55	12	-	0,7	1

Додатак волфрама челику X210CrW12 само је повисио отпорност на хабање у поређењу са челиком X210Cr12. Термичка обрада високолегираних ледебуритних челика са 12% хрома састоји се од аустенитизације (~1000°C), хлађења у уљу и отпуштања при 480-560°C. Најчешћа примена ове групе челика је за израду алата за хладно обликовање, дубоко извлачење, истискивање итд. Сви ледебуритни челици су склони разугљенисању па их је потребно споро загревати у заштитној атмосфери (нпр. инертни гас, вакуум, инертна сона купатила) [18].

в) Мартензитни нерђајући челици

Мартензитни нерђајући челици садрже 0,2-0,9% угљеника, 13-18% хрома, 0,5-1,2% молибдена и до 0,1% ванадијума (нпр. челици X20Cr13, X42Cr13, X55CrMo14, X91CrMoV18 итд.). Да би се каљењем постигла мартензитна микроструктура потребно је достићи температуре аустенизације од 950-1080°C. Каљењем у уљу може се избећи излучивање карбида који би снизили отпорност на корозију. Поред мартензита у микроструктури преостане и део заосталог аустенита. Разлика потенцијала мартензита и заосталог аустенита је врло мала па се у погледу корозијске отпорности таква микроструктура сматра монофазном. Након каљења следи отпуштање при нижим температурама (150-250°C) ради избегавања излучивања карбида отпуштања који смањују корозиону постојаност. У испорученом сфероидном стању (1160-1180°C) мартензитни челици су врло добро обрадиви механичким обрадама, па је поступак сфероидизације код коначног корисника челика ретко потребан. Хомогенизација еутектичких карбида се углавном примењује за челик X91CrMoV18 који је једини ледебуритног карактера у овој групи алатних челика. Уобичајено сфероидно жарење спроводи се око температуре A_1 која за челике са 12-18% Cr износи 820-860°C [18].

Будући да мартензитни челици садрже релативно мали удео карбида могу се и у сфероидном стању квалитетно полирати што је важно за њихову коначну примену. Висколегирани мартензитни нерђајући алатни челици за хладан рад најчешће се примењују за:

- медицинске инструменте (нпр. скалпели, зубарска клешта, пинцете...),
- прибор за јело (нпр. ножеви),
- жилети, бритве,
- кројачке маказе,
- матрице итд.

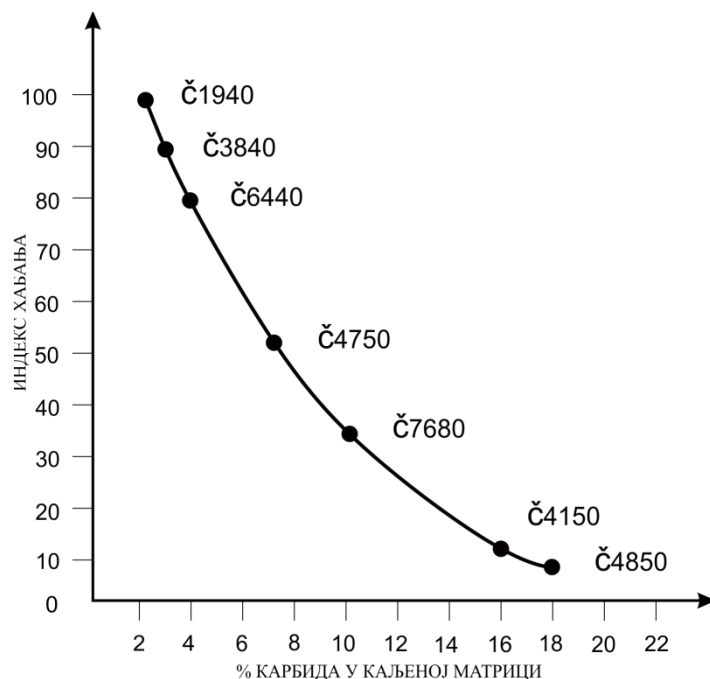
9.2 АНАЛИЗА И ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА ЗА ИЗРАДУ АЛАТА ЗА ОБРАДУ У ХЛАДНОМ СТАЊУ

У даљем раду разматрани су материјали који би могли задовољити услове израде алата за обраду деформисањем - матрице и извлакача за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида.

Приликом пројектовања алата битно је водити рачуна и о материјалу који се алатом обрађује као и о типу производње (малосеријска или великосеријска). Осим наведених фактора битна је и процена трошкова материјала за израду алата што је у директној вези са типом производње. Уколико је реч о великосеријској производњи пожељно је да алат има високе експлоатационе карактеристике како би се избегле честе замене алата и евентуалне накнадне дораде.

Термичке, односно, хемијско-термичке обраде које ће бити разматране су: каљење, отпуштање, нитрирање, цементација и тврдо хромирање. Такође, разматран је технолошки, економски и функционални аспект термичког третмана алата и дати режими наведених термичких, односно, хемијско – термичких обрада.

Као што је већ раније напоменуто, главна карактеристика коју алат за обраду деформисањем мора поседовати јесте висока отпорност на хабање. Из овог разлога направљен је компаративни дијаграм појединих алатних челика који би могли послужити за израду елемената алата за обраду деформисањем тј. дубоким извлачењем са стањењем (матрица и извлакач).



Слика 39. Отпорност према абразивном хабању [18]

На дијаграму се уочава да су два челика (Č4150, Č4850) издвојена по својој отпорности према абразивном хабању, због високог процента карбида у каљеној структури. Наведени челици припадају групи високолегираних алатних челика за хладан рад. Узимају се у даље разматрање и приступа се процени њихових осталих карактеристика, датих у табели 5, након чега ће један од њих бити одабран за даљу анализу уз одређивање параметара потребне термичке обраде.

Табела 5. Оцене својстава алатних челика [18]

Група челика	Ознака челика	Оцене својстава								
Високолегирани за хладан рад	JUS	Отпорност на хабање	Жилавост	Отпорност на отпуштање	Закаљивост HRC	Прокаљивост	Обрадивост мех. обрадама	Деформације при каљењу	Тврдоћа после отпуштања	Цена
	Č4150	8	1	6	64	висока	3	мале	64-57	3
	Č4650	8	1	6	65	висока	2	мале	64-56	2
	Č4750	8	2	6	64	висока	3	мале	64-57	3
	Č4850	8	2	7	63	висока	4	мале	64-55	4
	Č4172	1	8	6	44	висока	8	средње	44-42	3
	Č4175	2	6	6	58	висока	6	средње	56-54	3
	Č4770	3	6	6	53	висока	6	средње	58-52	3

На основу карактеристика датих у табели 5 може се закључити да челици Č4150 и Č4850 имају релативно слична механичка, физичка и технолошка својства и уз правилну примену режима термичке обраде апсолутно одговарају постављеним захтевима који се од алата за обраду деформисањем очекују.

Како се у модерној индустрији мора тежити оптимизацији времена и трошкова а исто тако водити рачуна о квалитету производа, долази се до закључка да се у обзир приликом пројектовања производа (у овом случају елементи алата) мора узети у обзир

и набавна цена материјала. У овом случају (према табели 5) јефтинији материјал јесте челик Č4150 и он је усвојен као материјал за израду елемената алата.

У даљем раду биће разматране адекватне термичке обраде поменутог челика, које би обезбедиле потребне карактеристике елемената алата. Такође, биће учињен покушај да се на основу литературних препорука правилно одреде технологија и параметри извођења термичке обраде.

9.3 ФИЗИЧКЕ, МЕХАНИЧКЕ, СТРУКТУРНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ИЗАБРАНОГ МАТЕРИЈАЛА

Висококвалитетан челик (Č4150), који има поред високе тврдоће и добру жилавост, може се употребљавати за све алате за хладну обраду, нарочито за компликоване и јако оптерећене алате. Алата од овог челика отпорни су према хабању и при термичкој обради веома су димензијски и обликовано стабилни. Одлика овог челика је и добра резна способност. Челик Č4150 (X210Cr12 по EN-у) се испоручује у меко жареном стању.

Табела 6. Приближан процентуални хемијски састав челика Č4150 [10]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
2,1	0,18	0,3	0,020	0,022	11,8	0,15

- Тврдоћа након жарења 250 НВ, чврстоћа након жарења 830 МПа, поред високих својстава тврдоће и чврстоће висок садржај хрома обезбеђује и отпорност према корозији.
- Висока тврдоћа приближне је вредности тврдоће брзорезних челика чиме се постиже врло висока отпорност према хабању.
- Поред наведених повољних својстава, треба додати и велику постојаност према деформацијама при каљењу што је веома значајно за прецизне алате.
- Што се тиче заварљивости, спада у ред тешко заварљивих челика због високог садржаја угљеника тако да је неопходно предузети посебне мере (оцена заварљивости, предгревање).
- Критичне преображајне тачке (орјентационе вредности):
 $A_{с\text{почетак}}=771^{\circ}\text{C}$, $A_{с\text{завршетак}}=806^{\circ}\text{C}$; $A_{г\text{почетак}}=725^{\circ}\text{C}$, $A_{г\text{завршетак}}=692^{\circ}\text{C}$
- Температура M_s (орјентациона вредност), у зависности од температуре аустенизације (960°C): $M_s=200^{\circ}\text{C}$ за хлађење на ваздуху, 190°C за хлађење у уљу.
- Прокаљивост је јако добра а висока тврдоћа се постиже по целокупном попречном пресеку [8,10].

9.4 ИЗБОР ПОТРЕБНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

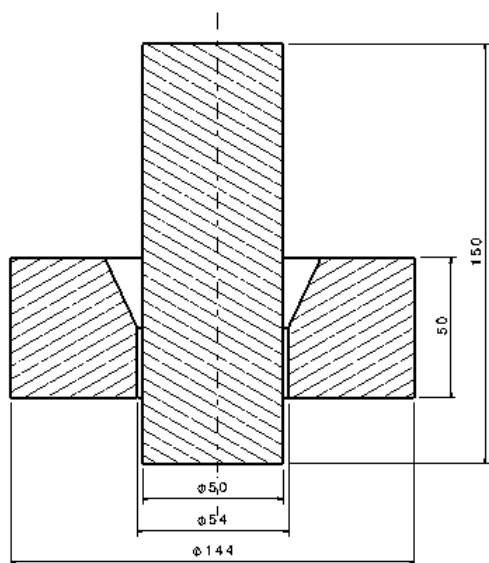
Челик Č4150 (X210Cr12) се испоручује у меко жареном стању, након чега поседује претходно наведене карактеристике. У циљу постизања потребних механичких карактеристика које изискује примена овог челика за обраду у хладном стању потребно је извршити одговарајућу термичку обраду.

Група челика у коју спада поменути челик (Č4150), представља најпознатију и најмасовнију групу алатних челика која се одликује високим садржајем хрома и угљеника што обезбеђује веома карактеристична својства и примену.

После израде комада механичком обрадом делови се подвргавају каљењу а затим отпуштању. Важност правилног избора параметара термичке обраде огледа се у постизању жељених експлоатационих карактеристика елемената алата, подвргнутих термичком третману.

9.4.1 ТЕМПЕРАТУРНИ И ОСТАЛИ ПАРАМЕТРИ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

Када је реч о каљењу, температура загревања подразумева достизање температуре у којој материјал достиже аустенитну структуру. Та температура се још назива и температура аустенизације. Укупно време загревања τ_u , тј. време држања делова у пећи, састоји се из збира два времена, односно, $\tau_u = \tau_z + \tau_p$, где је: τ_z - време загревања до потребне температуре, а τ_p - време држања на тој температури. Време загревања до задате температуре зависи од: температуре загревања, садржаја угљеника и легирајућих елемената, величине и облика делова, начина смештања делова у пећи, врсте пећи и других фактора. Веће брзине загревања треба избегавати због појаве значајних унутрашњих напона који могу довести до појаве деформације или до појаве прелина које су наравно непожељне.



Слика 40. Приказ габаритних димензија елемената алата



Слика 41. Изглед матрице

При постизању температуре загревања потребно је делове држати на тој температури одређено време, које мора бити минимално, али довољно да обезбеди завршетак фазних трансформација и постигне довољну концентрацију угљеника и легирајућих елемената у аустениту. Време држања на константној температури зависи, као и време загревања, од многих фактора који утичу на процес растварања и фазних трансформација у челику.

Димензије елемената:

- извлакач: пречник $d=50\text{ mm}$; висина $h=150\text{ mm}$;
- матрица: спољашњи пречник $D_s=144\text{ mm}$; унутрашњи $d_u=54\text{ mm}$, $h=50\text{ mm}$.

Према препорукама, због великог садржаја карбида, потребно је држати челик (Џ4150) дуже време на температури каљења. То време је приближно 15–20 минута за квадратне попречне пресеке $20 \times 20\text{ mm}$. За пресеке веће од наведеног, продужава се време температуре држања на температури каљења за 10–15 минута. Температура аустенизације за Џ4150 износи 960°C . Уколико се поштују литературне препоруке, режим термичке обраде (каљења) би се могао дефинисати вредностима према табели 7 [13, 5, 7].

Табела 7. Дефинисање времена загревања и прогревања

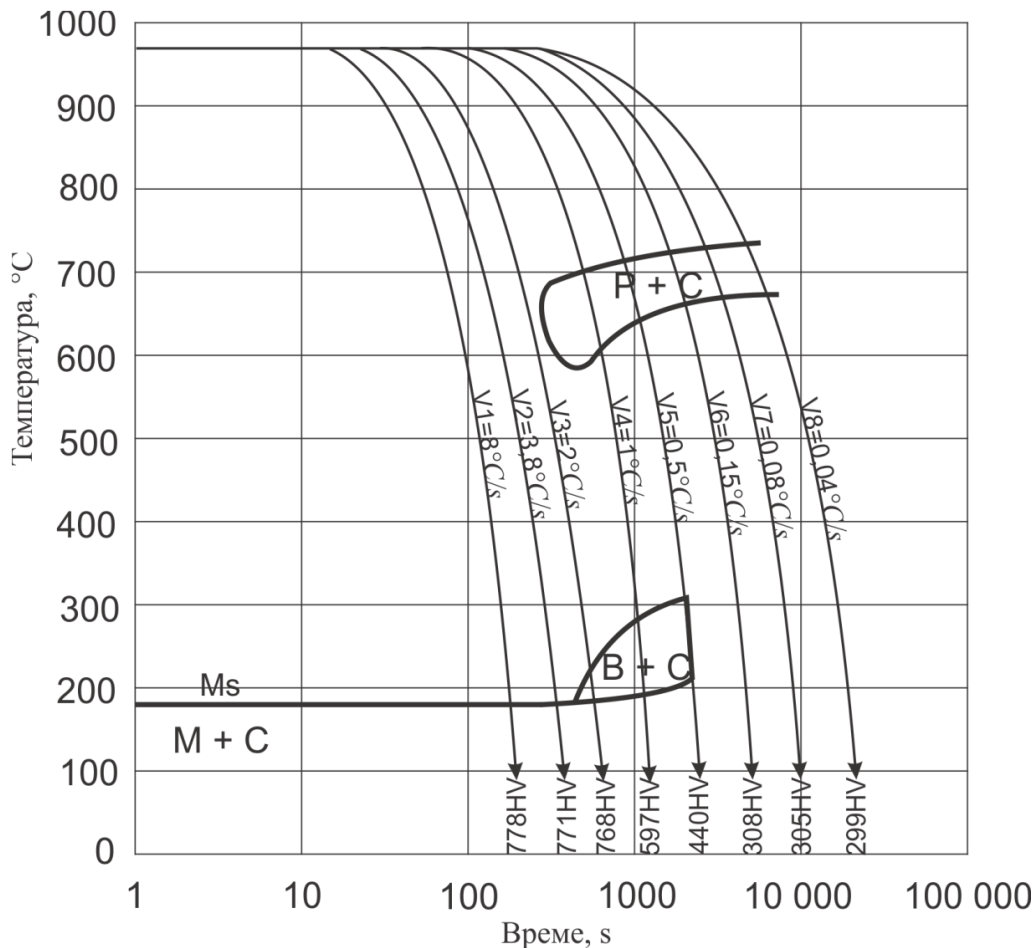
Карактеристична дебљина комада, mm	Каљење у коморној вакуумској пећи	
	Загревање, min	Прогревање, min
50	55	25

Легирани челици имају мању критичну брзину хлађења и зато се хладе уљем (блаже расхладно средство него вода), док се неки високолегирани челици могу хладити у струји ваздуха па чак и на мирном ваздуху.

Табела 8. Поступак каљења

Температура	Средство за хлађење	Тврдоћа каљене пробе 20 x 20 mm
940 – 980°C	Уље	64 – 66 HRC
Брзина загревања (према литературним препорукама)		10-20°C/min
Брзина хлађења (према КХ дијаграму са слике)		4-8°C/s

Са КХ дијаграма може се очитати потребна (критична) брзина хлађења и мора бити таква да се онемогући настајање других структура сем мартензита.



Слика 42. КХ дијаграм челика Č4150 [10]

Отпуштање се изводи испод критичне температуре A_{C1} . Циљ је да се постигне најбоља дуктилност и жилавост. У поређењу са челиком у нормализованом или

жареном стању, отпуштање након каљења доводи до истовременог повећања напона течења, истегљивости, сужења и нарочито ударне жилавости.

Табела 7. Зависност тврдоће од температуре отпуштања

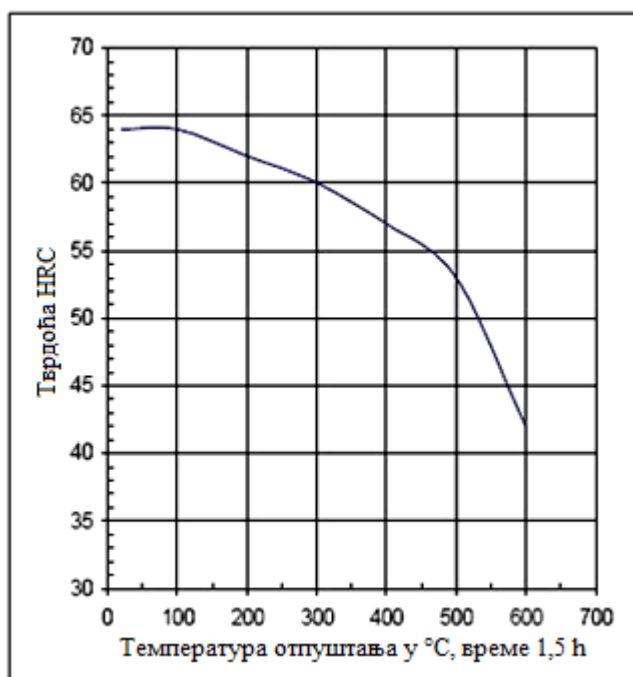
Тврдоћа (HRC) у зависности од температуре отпуштања					
100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
64	62	60	57	53	42

Запажено је да су челици који су легирани са Mn или Cr посебно осетљиви на настајање штетне појаве приликом отпуштања која се назива отпускна кртост. Оваква појава карактерише драстично опадање жилавости и истегљивости уз велики пораст тврдоће. Појаву отпускне кртости може да елиминира присуство молибдена у челику. Евидентно је да челик Č4150 спада у групу челика који би могли бити склони ка отпускној кртости (висок проценат угљеника и одсуство молибдена) тако да се отпуштање мора извести са малим брзинама хлађења како се додатно не би створили напони у материјалу. Ово изискује чињеницу да хлађење мора бити изведено на мирном ваздуху (евентуално у уљу али никако у води). Такође, није пожељно ни да температура отпуштања буде висока.

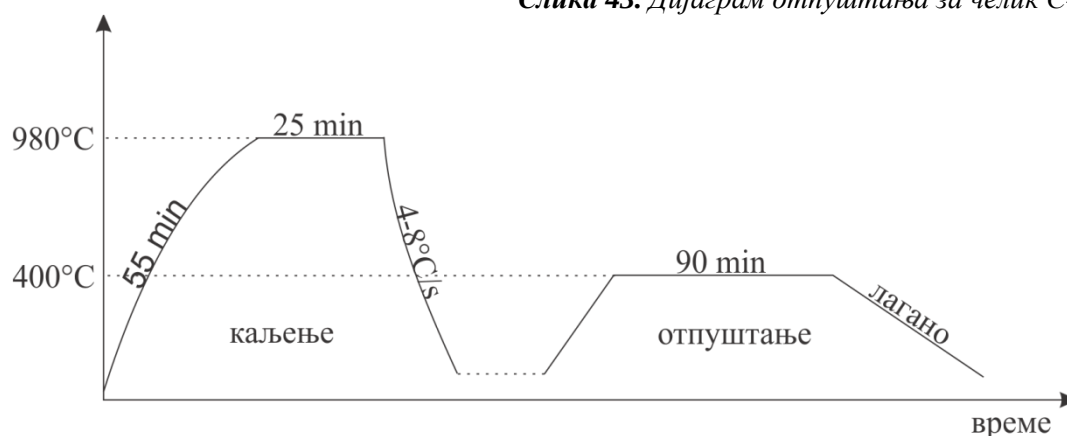
Пошто је у питању нережући алат, препорука је да се отпуштање изведе на температури од 400°C чиме би се хлађењем (лагано хлађење у пећи) добила тврдоћа од 56–58 HRC.

Табела 8. Параметри отпуштања

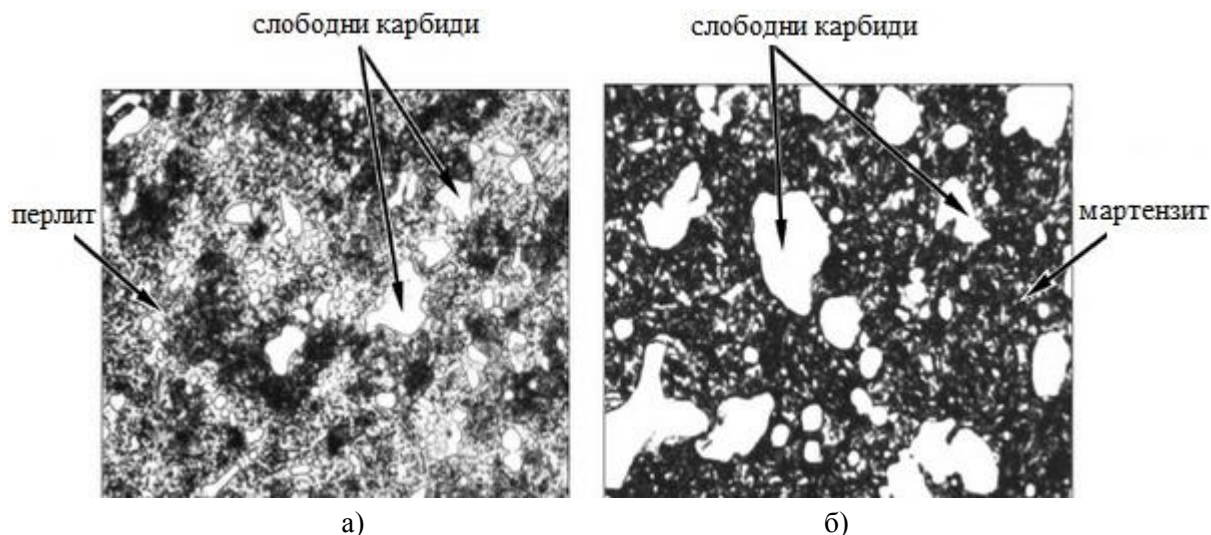
Температурни опсег отпуштања	Одговарајуће радне тврдоће
150 – 400°C	57 – 63 HRC



Слика 43. Дијаграм отпуштања за челик Č4150



Слика 44. Технолошки дијаграм термичке обраде (каљење и отпуштање)



Слика 45. Микроструктура челика Č4150: а) жарено стање; б) каљено и отпуштено стање

Мартензит служи и као добро везиво за карбиде а коначна структура челика је подеутектичког карактера и након каљења се састоји од: $M+K''+K^c+A_z$. Након отпуштања заостали аустенит A_z се трансформише у отпуштени мартензит M_o . Структура садржи висок удео (18%) квалитетних Cr карбида Cr_7C_3 високе тврдоће од око 1800 HV [18].

9.4.2 ОПРЕМА И СРЕДСТВА ЗА ЗАГРЕВАЊЕ И ХЛАЂЕЊЕ

Термичку обраду специјалних челика (алатних) потребно је изводити у пећима са заштитном атмосфером због:

- заштите од оксидације (тј. хемијске корозије),
- заштите од разугљенисавања,
- значајно мање деформације што је изузетно битно због димензија алата,
- аутоматско вођење процеса,
- обрада без загађивања околине

Изнад 500°C настају реакције: $2F + O_2 = 2FeO$ и FeO у присуству H_2O прелази у $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ што представља рђу (корозију) и C (из челика) + $O_2 = 2CO$ што представља разугљенисавање⁷.

Управо из горе наведених разлога за термичку обраду компоненти алата (матрице и извлакачи) могу се користити једнокоморне вакуумске пећи као на следећој слици.

⁷ Разугљенисавање – смањење садржаја угљеника у површинским слојевима комада.



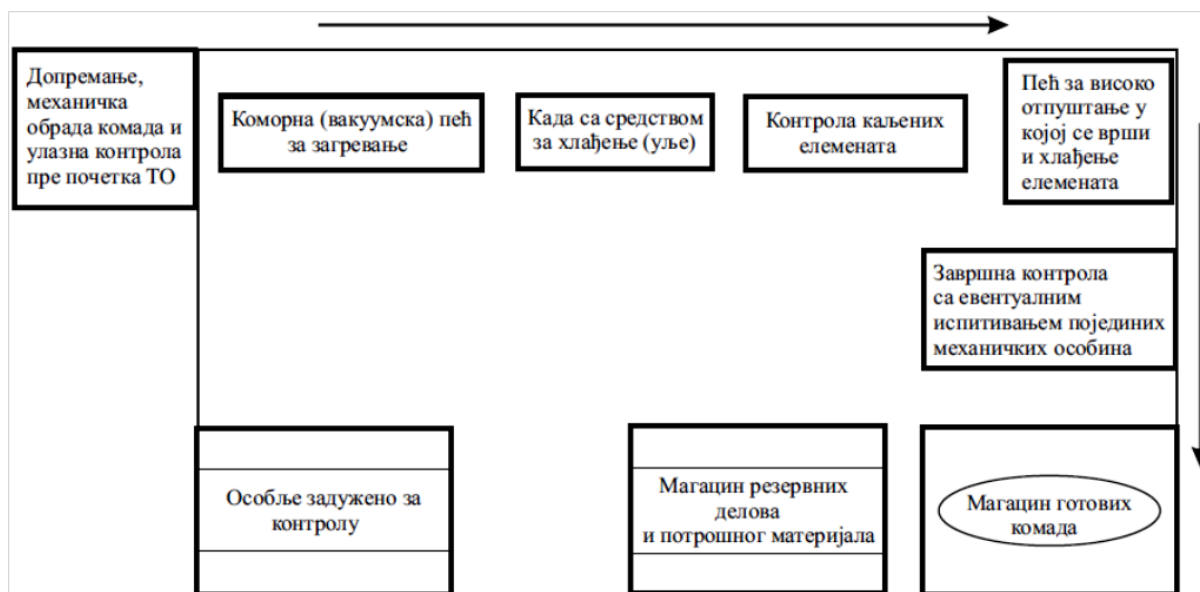
Слика 46. Једнокоморна вакуумска пећ; Карактеристике пећи: вакуум до 10^{-4} bara, максимална радна температура 1350°C ; хлађење у гасовима N_2 , Ar, He, H_2 ; хлађење у смеши гасова

Прва шаржа делова се загрева заједно са комором уз поштовање прописане брзине загревања, док се свака наредна убацује у већ загрејану пећ на температуру аустенизације, тако да се препоручује ступњевито загревање (предгревање), што указује на то да је пожељно да пећ поседује и преткомору. Због раније наведених разлога, као расхладно средство користи се уље. Уља за хлађење могу бити различита по саставу. То су обично минерална уља са евентуалним додатком масних уља која се налазе у кадама у којима се урони шаржа са загрејаним деловима. Оно што је битно код хлађења у течности јесте да у току хлађења настају три фазе:

- *фаза парног омотача* у којој слој течности који ступи у контакт са усијаним телом нагло почне да испарава и ствара око тела стабилан парни омотач;
- *фаза врења*. У овој фази долази до нестајања претходно створеног парног омотача и овде је процес хлађења најинтензивнији;
- *фаза конвекцијског хлађења*.

9.4.3 ПРОСТОР ЗА ИЗВОЂЕЊЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

Извођење термичке обраде изискује постојање посебне хале у којој ће бити смештене пећи, расхладна средства као и простор који би био предодређен за селективну контролу комада и евентуалну механичку дораду. Пример једне такве хале, тј. илустративни приказ тока термичке обраде у хали дат је на слици 47. Наравно, уз све компоненте приказане на слици, једно савремено постројење за термичку обраду мора да поседује и адекватан вентилациони систем, као и аспираторе који би били смештени изнад каде са уљем. Одељење за механичку обраду треба бити изоловано због елиминисања продуката обраде који би се могли наћи у ваздуху у виду честица. У оквиру погона налазе се и транспортери (покретна колица) који омогућују линијски транспорт комада. Такође, треба оформити магацин потрошне робе који не мора бити у оквиру погона (као што је приказано на слици) али мора омогућити извођење процеса термичке обраде без застоја.



Слика 47. Схематски приказ постројења и тока термичке обраде

Посебну пажњу треба обратити на поседовање заштитне опреме о чему ће бити више речи у неком од наредних поглавља. Што се складиштења готових комада тиче, пожељно је придржавати се и одређених стандарда који прецизно дефинишу услове складиштења елемената израђених од челика а од којих се очекује висок квалитет и добре експлоатационе карактеристике.



Слика 48. Пример савременог постројења за термичку обраду (каљење + отпуштање)

Основни пратећи документи који прате алат од пријема на ТО па све до завршне фазе су: *идентификациони картон* и *пропратни картон за процес термичке обраде*.

Пропратни картон за поступак термичке обраде матрице и извлакача од челика Č4150				
Назив производа:	Шифра:	Број:	Серија: Шаржа:	Комада:
Редослед операција		Потпис:		Датум:
Ред. бр.	Назив операције	Режим	Напомена	Потпис
1	Пријем			
2	Контрола			
3	Припрема			
4	Каљење			
5	Контрола			
6	Отпуштање			
7	Контрола			
8	Паковање			
9	Отпрема			

Слика 49. Изглед пропратног картона термичке обраде

Ови документи омогућују да се води евиденција о целом циклусу термичког третмана алата, као и да се бележе поједини параметри који могу бити увек расположиви на увид.

9.5 ИСПИТИВАЊЕ КВАЛИТЕТА ИЗВЕДЕНЕ ТЕРМИЧКЕ ОБРАДЕ

Испитују се грешке у виду прслина и деформација. Такође, испитује се тврдоћа и врше се још нека испитивања (прокаљивост, микроструктура...) о којима ће бити више речи у даљем тексту.

Већ је напоменуто да челик Č4150 има високу димензиону постојаност при термичкој обради тако да су евентуалне промене димензија (деформације) занемарљиве чак и за високо прецизан алат за дубоко извлачење са стањењем. Ове грешке се посебно елиминишу ако се примене технике степенастог загревања при загревању елемената код термичке обраде.

9.5.1 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА

Циљ ових испитивања је откривање евентуално присутних грешака у структури након термичке обраде. Испитивања се врше на специјалним узорцима чија се површина бруси до високог сјаја, а затим нагриза погодним средством. Металографска испитивања спадају у методе контроле узорака са разарањем. Њима се може стећи слика о структури материјала, распореду тврдог слоја итд. Металографска испитивања се могу поделити на микроскопска и макроскопска.

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

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



Слика 50. Микроскоп за металографију



Слика 51. Сто за израду избруска

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



а)



б)

Слика 52. Изглед микроскопа за скенирање а) SEM, б) TEM [16]

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

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

Макроскопска испитивања се заснивају на посматрању, голим оком или са лупом повећања до 20 пута малог узорка исеченог из термички обрађеног дела. После брушења и полирања површине попречног пресека добија се тзв."шлиф", који се

нагриза специјалним хемијским средством како би се обезбедила боља видљивост зона. Макроскопским испитивањима стичемо слику о распореду тврде и меке зоне. На овај начин се може одредити дубина отврднулог слоја и његов положај на површини елемента.

9.5.2 ИСПИТИВАЊЕ ТВРДОЋЕ

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

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

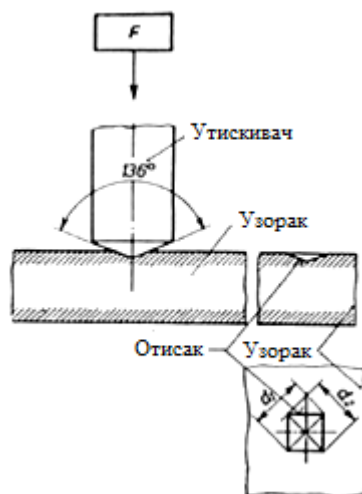
Статичке методе се изводе на апаратима за мерење тврдоће при чему се узорак пре испитивања чисти како би мерење било што тачније. У статичке методе спадају: Бринел (НВ), Викерс (НV), Роквел (HRC), Кнуп (НК) итд. [1, 7, 9]

Контрола тврдоће алата за обраду деформисањем (матрице и извлакача) врши се селективно, након сваке завршене фазе термичког третмана и одмах после завршетка процеса термичке обраде. Метода којом се врши селективна контрола јесте метода по Викерсу (НV).

$$HV = 0,102 \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{d^2 \sin^2(136/2)}{2}$$

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2}$$



Слика 52. Схема мерења тврдоће методом по Викерсу

Утискивач је дијамантски врх правилне четворостране пирамиде са углом између наспрамних страна од $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Сила утискивања може бити различита али треба истаћи да се смањењем силе повећава могућност осипања резултата (нетачности). Свакако да је циљ каљења достићи захтевану тврдоћу комада, али је неопходан услов да та тврдоћа буде равномерно распоређена. Испитани елементи који у току улазне, селективне или завршне контроле не задовољавају критеријуме постављене у вези тврдоће, одстрањују се како би се избегло нарушавање квалитета

коначних делова који ће представљати алат за дубоко извлачење са стањењем дебљине зида. Очекивана тврдоћа после каљења 64–66 HRC (840–890 HV), док је очекивана тврдоћа након отпуштања 57 HRC (660 HV).

Услови који морају бити испуњени:

- Дебљина узорка мора бити већа 1,5 пута од дијагонале отиска;
- Одстојање центра отиска од ивице узорка, или до контуре било ког другог отиска, не сме бити мање од дијагонале отиска;
- Утискивач мора бити управан на површину узорка;
- Површина узорка треба да буде равна, глатка и чиста.

9.5.3 ОДРЕЂИВАЊЕ ВЕЛИЧИНЕ АУСТЕНИТНОГ ЗРНА

Због утицаја величине зрна структуре на својства материјала, потребно је у неким случајевима одредити врсту, величину и количину појединих зрна, користећи специјалне поступке. Најчешће се одређује тзв. стварна величина зрна, односно величина зрна након термичке обраде.

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

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

Метода која би могла бити искоришћена за челик Č4150 јесте метода загревања. Код методе загревања узорак се загрева у пећи на $930 \pm 10^\circ\text{C}$ (30–60 min) и хлади на ваздуху. Припрема се као микрошлиф и одређује величина зрна после нагризања са 4% раствором HNO_3 у алкохолу.

Одређивање величине стварног зрна. За одређивање величине стварног зрна узорка није потребан термички третман, већ се узорци исецају из комада и припремају за испитивање [6, 12].

9.5.3.a Методе мерења величине зрна

Одређивање величине металних зрна се врши мерењем појединих зрна на микроскопу.

Најчешће коришћене методе су:

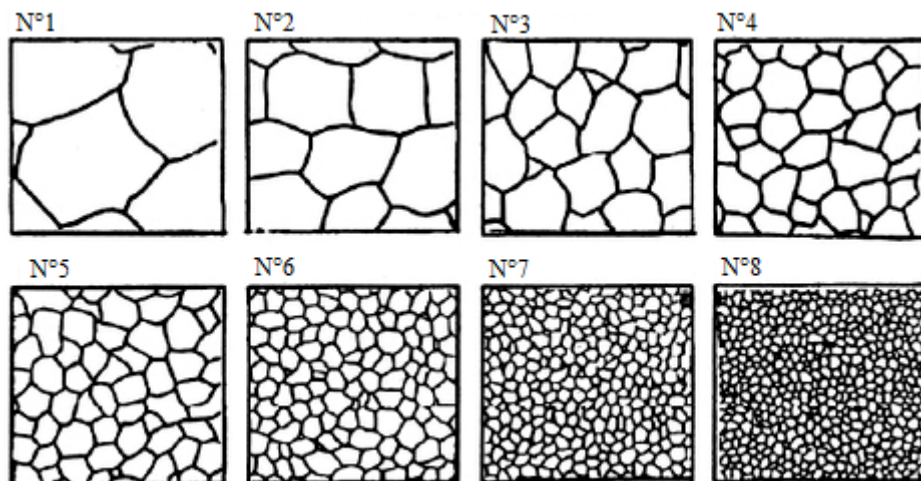
- метода поређења величине зрна са зрнима еталона (ASTM метода) и
- метода бројања зрна обухваћених површином и по линији

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

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

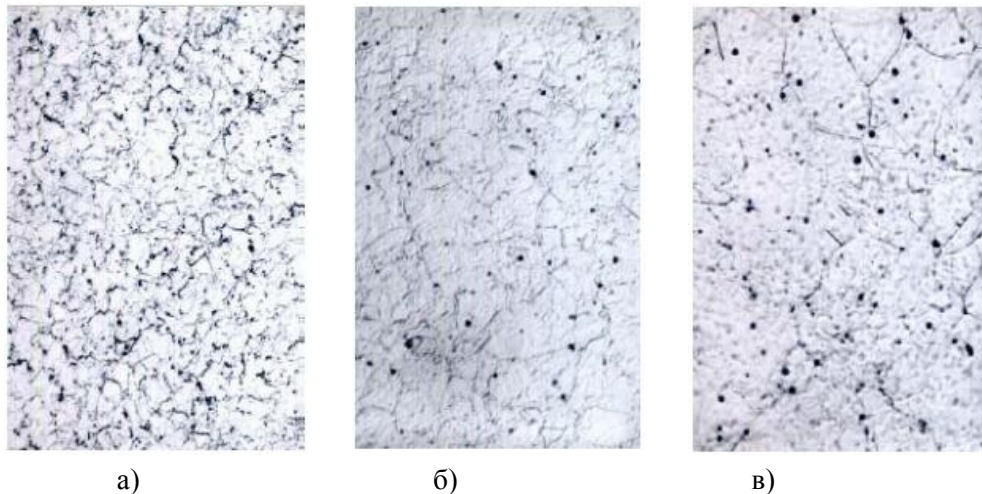
Табела 9. Групе зрна у зависности од броја зрна по mm^2

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



Слика 53. Упоредни приказ величине зрна класе од 1 до 8

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



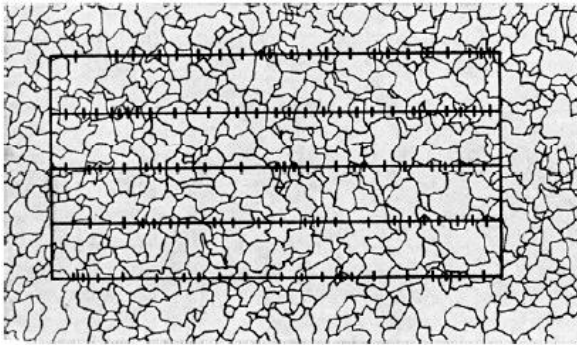
Слика 54. Промена величине аустенитног зрна при загревању

а) температура 700°C / N°6,7,8/; б) температура 950°C / N°4-8/; в) температура преко 950°C /N°1-5/;

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



Слика 55. Бројање зрна обухваћених површином



Слика 56. Бројање зрна по линији

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

9.5.4 ИСПИТИВАЊЕ ПРОКАЉИВОСТИ

Способност челика да се каљењем добијени слој мартензитне или мартензитно–труститне структуре простире до одређене дубине назива се прокаљивост. При каљењу челика, у зависности од критичне брзине хлађења и попречног пресека дела, добија се различита структура од површине ка језгру. Пошто се унутрашњи слојеви делова спорије хладе од спољашњих слојева, у том опсегу, где је брзина хлађења мања од критичне, прокаљивање је само до одређене дубине, док се у језгру разлагањем аустенита образује ламеларна структура ферита и цементита (трустит, сорбит или перлит).

Ако се језгро хлади брзином већом од критичне онда се по целом пресеку образује мартензитна структура, у том случају прокаљивост је потпуна. Ово значи да се са променом брзине хлађења и структуре, од површине ка језгру, мења и тврдоћа. Према томе, што је мања критична брзина хлађења, већа је прокаљивост и обрнуто, што је већа критична брзина хлађења, мања је прокаљивост.

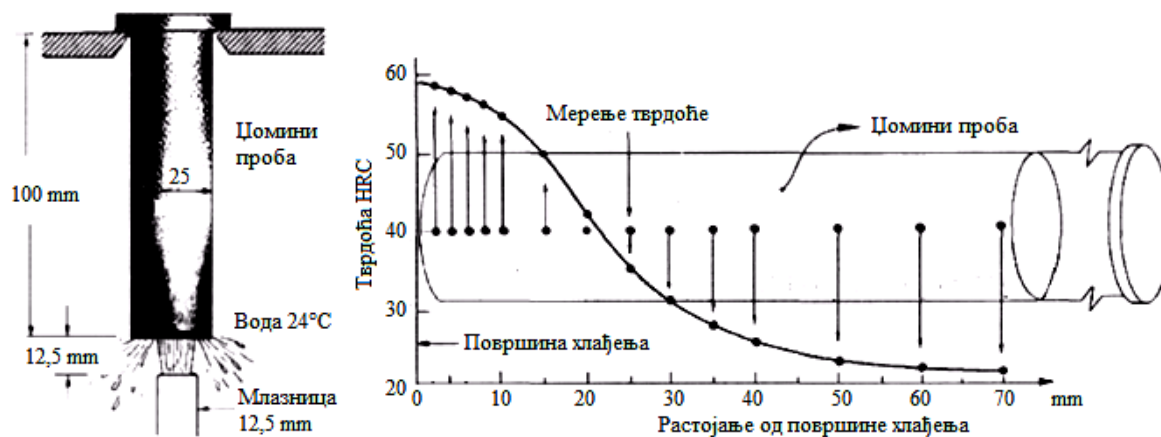
За дубину закаљеног слоја узима се растојање од површине до слоја који има структуру полумартензита (50% мартензит + 50% трустит). Тврдоћа полумартензитне структуре зависи од садржаја угљеника и са порастом угљеника тврдоћа расте.

Сви фактори који умањују критичну брзину хлађења, односно повећавају стабилност потхлађеног аустенита, повећавају прокаљивост. Челици легирани манганом, хромом, молибденом и мањим количинама бора (какав јесте Č4150), имају већу стабилност потхлађеног аустенита, па је за хлађење потребна мања критична брзина, што повећава прокаљивост челика. Елементи који на високим температурама граде постојане карбиде (W, Ti, V, Nb и др.) повећавају прокаљивост ако се загревањем растварају. Недовољно високе температуре загревања и нерастворени карбиди смањују прокаљивост. Угљенични, а нарочито нискоугљенични челици захтевају велике критичне брзине хлађења и имају малу прокаљивост. Ове челике практично је немогуће прокалити по целом пресеку ако су веће дебљине од 8–15 mm. Величина металног зрна аустенита има великог утицаја на прокаљивост. Ако се повећавањем температуре и времена загревања величина аустенитног зрна драстично повећа, дубина закаљеног слоја расте 2–3 пута.

Из досадашњих разматрања може се закључити да прокаљивост челика зависи од садржаја угљеника, величине металног зрна аустенита и од легирајућих елемената

присутних у челику. Прокаљивост челика одређује се чеоним каљењем – методом по Џоминију. За један челик потребно је имати директну и доследну повезаност између тврдоће и брзине хлађења. Међутим, та повезаност је високо нелинеарна. Осим тога теоријске основе за квантитативну анализу су врло компликоване. За решавање овог питања у пракси се користи стандардна метода за одређивање прокаљивости чеоним хлађењем челика (метода по Џоминију).

У овом поступку испитивања прокаљивости, изузев хемијског састава, сви фактори који могу утицати на тврдоћу по дубини комада (облик и мера узорка, услови хлађења) одржавају се константним. Цилиндрични узорак стандардне величине равномерно се загрева до температуре у аустенитном подручју, држи на тој температури одређено време и одмах затим чеона површина узорка хлади млазом воде одређене брзине истицања, како је то показано на слици. После хлађења узорка до собне температуре, брусе се две наспрамне површине паралелне са осом узорка у циљу мерења тврдоће. Тврдоћа се одређује методом HRC дуж осе сваке брушене површине [4, 6].

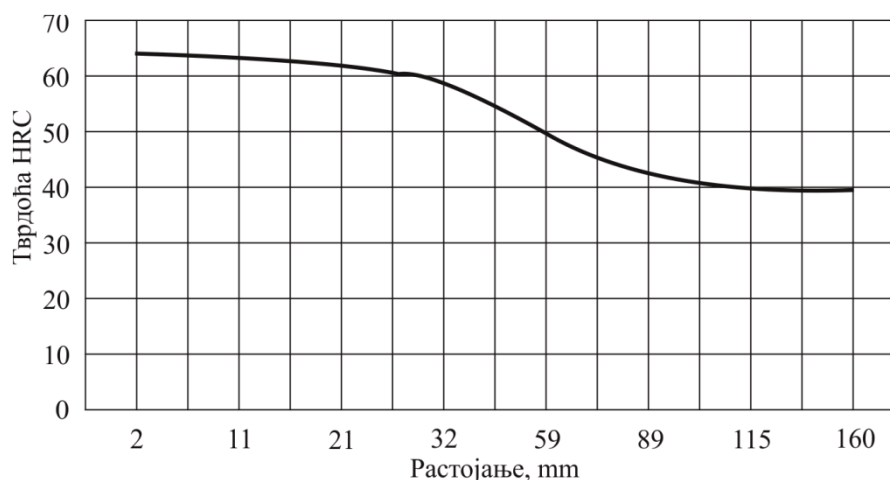


Слика 57. Схема испитивања прокаљивости методом по Џоминију

Из досадашњих разматрања, може се закључити да челик $\check{C}4150$ има добру прокаљивост, што омогућава, добар распоред тврдоће по целом попречном пресеку.

Табела 10. Тест прокаљивости за челик $\check{C}4150$ [23]

Растојање, mm	2	11	21	32	59	89	115	160
Тврдоћа, HRC	64	63	62	59	49	42	39	39



Слика 58. Џомини крива расподеле тврдоће за челик $\check{C}4150$

9.5.5 ИСПИТИВАЊА БЕЗ РАЗАРАЊА

Предност ових испитивања је могућност добијања информација о стању унутар материјала које никако не можемо видети споља уз, наравно, очување целovitости испитиваног елемента. Користе се пре свега у сврху контроле обављања процеса термичке обраде и контроле добијених делова. Могу се спроводити на самом улазу елемената алата у процес извођења термичке обраде, тј. као улазна контрола. Своју примену налазе и као селективно контролисање елемената алата тј. након завршене сваке фазе термичке обраде (нпр. после каљења, затим после отпуштања, итд.) али се најчешће примењују као завршна контрола.

У испитивања без разарања спадају:

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

Извлакач и матрица алата за дубоко извлачење лима са стањењем дебљине зида представљају одговорне елементе алата који се морају подвргнути одређеним контролама пре уградње у извршни механизам машине.

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

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

- средство за чишћење површине (алкохол, бензин, трихлоретилен),
- пенетрант,
- развијач.

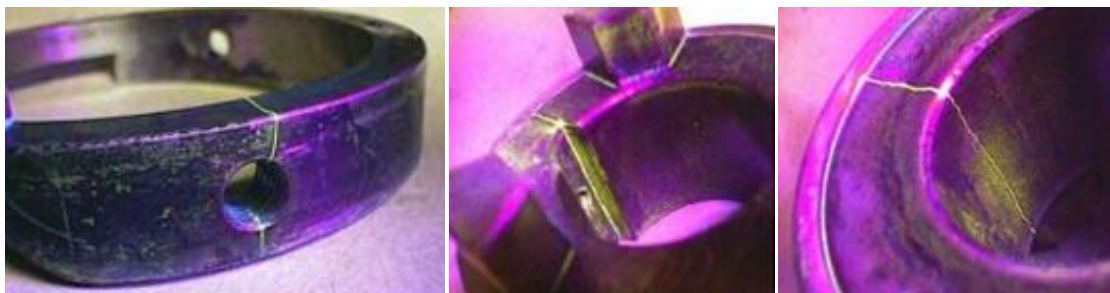
Испитивана површина се најпре пажљиво очисти, а затим нанесе пенетрант (данас углавном у облику спреја) који треба да делује 5 до 10 минута, после тога се растварачем уклања вишак пенетраната и слој пере водом. Најзад се наноси развијач који извлачи пенетрант стварајући црвену линију или црвене тачкице.



Слика 59. Пенетрантна проба

За утврђивање површинских грешака само код феромагнетних материјала често се примењују магнетне методе. Суштина ових метода је да се предмет који се испитује постави између полова електромагнета, кроз чије намотаје пролази једносмерна или наизменична струја. Линије магнетних сила при пролазу кроз хомогени материјал

су равномерне, док наиласком магнетних линија сила на неки укључак, прслину и сл. доћи ће до скретања магнетних линија сила. Да би се грешке у материјалу уочиле, обзиром да су магнетне линије невидљиве, предмет који се испитује посипа се феромагнетним прахом у трансформаторском уљу са керозином (1:1) или у алкохолу.



Слика 60. Грешке откривене магнетном методом - методом ферофлуksа

Примена феромагнетних прашкова заснована је на способности феромагнетних честица, када се нађу у магнетном пољу, да се оријентишу у правцу поља и распоређују у правцу највећег повећања магнетне густине магнетних линија, тако да се у околини дефекта групишу, односно, честице феромагнетног праха се у дефекту сакупљају [9, 12, 23].

9.6 ХИГИЈЕНСКО-ТЕХНИЧКА ЗАШТИТА (ХТЗ) ПРИ ТЕРМИЧКОЈ ОБРАДИ

Процес термичког третмана материјала се изводи на изузетно високим температурама као и у средини која може да угрози здравље опслужуиоца тј. оператора који је задужен за надгледање и контролу самог процеса. Управо из овог разлога хигијенско-техничка заштита мора бити на веома високом нивоу како би се избегле евентуалне повреде или неке од нежељених последица по здравље извршилаца. О безбедности на раду у оваквим условима постоје стандарди и прописи који су прописани законодавним уредбама и којих се морају придржавати како запослени тако и послодавци. Изузетно је битно развити свест о важности безбедоносних аспеката код радника тј. опслужуиоца пећи који су и најизложенији потенцијалним незгодама.

Само постројење за термичку обраду метала мора да поседује добар вентилациони систем јер се као продукти високотемпературних третмана материјала јављају пара и штетне материје у ваздуху (посебно уколико је у процес термичке обраде укључена и хемијско-термичка обрада) тако да је битно константно убацивати свеж ваздух како не би дошло до пада нивоа кисеоника у ваздуху.

Такође, обавезно је коришћење елемената личне заштите (рукавице, кецеља, итд.) и забрањено је уношење отвореног пламена из разлога што се око пећи могу јавити лако запаљиви гасови као продукти испарења.

Мора се знати који од коришћених материјала је изразито токсичан и при руковању са таквим материјалима морају се користити заштитне маске (нпр. олово, цинк...итд). Такође, рад са цијанидним солима (која иначе не смеју доћи у контакт са киселинама) и киселинама изискује посебну опрезност и упућеност радника о безбедном начину руковања са оваквим супстанцама. Пожељно је да радници без искуства најпре прођу својеврсну обуку о безбедности и правилној употреби ХТЗ опреме као и начину реаговања у екстремним ситуацијама, што и јесте пракса у модерним европским фирмама, без обзира на то да ли је ниво угрожености радника висок или низак [2, 7].

10. ХЕМИЈСКО-ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТА ЗА ОБРАДУ ДЕФОРМИСАЊЕМ – ИЗВЛАКАЧ И МАТРИЦА ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА СТАЊЕЊЕМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА

Када је реч о изради алата, од којег се очекују висока површинска тврдоћа и добре антихабајуће карактеристике, неминовност је разматрати поједине хемијско-термичке обраде које би допринеле постизању захтеваних механичких и експлоатационих карактеристика елемената алата. Већ је напоменуто да се примена хемијско-термичке обраде огледа кроз два основна приступа:

- модификовање површинских слојева,
- наношење превлака.

Када је у питању модификовање површинских слојева најширу примену налазе поступци површинског каљења и термо-механичке обраде. Међутим, све су заступљенији процеси који се базирају на имплантацији јона у површински слој радног предмета, односно термо-хемијски и термо-дифузиони поступци у плазми.

Када је у питању наношење превлака, које могу да имају потпуно другачије физичке, механичке и триболошке особине од основног материјала, најзаступљенији су поступци галванизације. Међутим, у новије време све је заступљенија примена технологија CVD и PVD које обухватају низ поступака али захтевају употребу савремених уређаја чија је примена понекад исплатива само за великосеријску производњу појединих компоненти.

У даљем делу рада разматрани су поступци јонског нитрирања и тврдог хромирања који би довели до постизања одговарајућих карактеристика површинских слојева елемената алата за обраду деформисањем на хладно [2, 15, 17].

10.1 ЈОНСКО (ПЛАЗМА) НИТРИРАЊЕ КАО ПОСТУПАК ПОВРШИНСКОГ ОТВРДЊАВАЊА ЕЛЕМЕНАТА АЛАТА (ИЗВЛАКАЧ И МАТРИЦА)

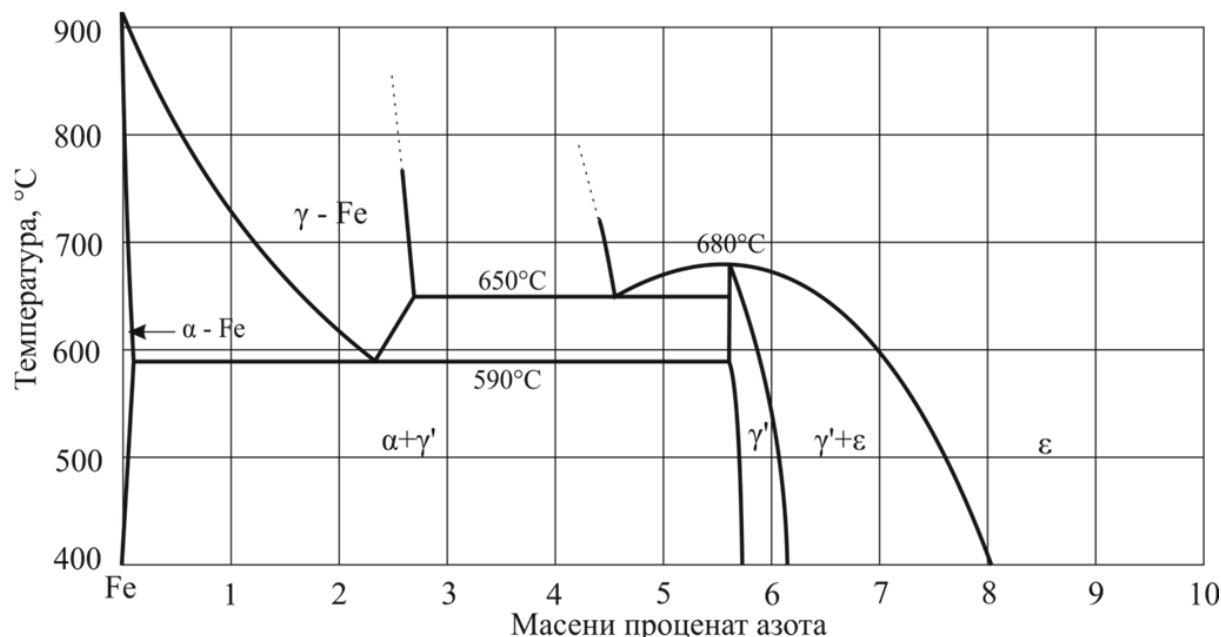
Поступак јонског нитрирања има најширу примену и даје најбоља својства површинског слоја у поређењу са осталим начинима нитрирања (нитрирање у течной и гасовитој средини). Поступак се остварује у комори са разређеним гасом који садржи азот (NH_3 , N_2) када је део, који се нитрира, прикључен на негативну електроду – катоду, а анода је зид коморе уређаја за јонско нитрирање. Између катоде и аноде успоставља се тињајуће пражњење. Позитивни јони гаса бомбардују површину катоде и загревају је до потребних температура.

Оно што поступак јонског нитрирања такође издваја од осталих поступака нитрирања, јесте и нешто краће време трајања процеса што доноси велику предност гледано са аспекта продуктивности.

Јонско нитрирање има карактеристичну технолошку могућност нитрирања рупа и шупљина комада што је посебно погодно за нитрирање матрице алата и може се закључити да се процес састоји из три основне фазе које ће бити појашњене у каснијем делу рада [2, 20, 21].

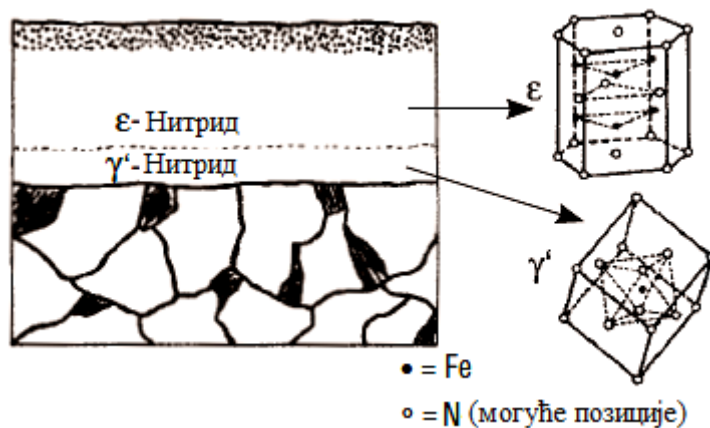
10.1.1 УВИД У СТРУКТУРУ НИТРИРАНОГ СЛОЈА

Увид у структуру нитрираног слоја даје равнотежни дијаграм стања система Fe-N, који је приказан на слици 61. На температурама нитрирања нижим од еутектоидне температуре (590°C) нитрирани слој се састоји из три фазе: ϵ , γ' и α .



Слика 61. Дијаграм стања Fe-N

ϵ -фаза је нитрид Fe_2N са хексагоналном решетком и широком области стабилности од 8–11,2% N; γ' -фаза је нитрид сиромашнији азотом Fe_4N , са 5,5–5,95% N; α -фаза је азотни ферит са максималним садржајем азота у чврстом раствору од 0,42% на еутектоидној температури и минималним садржајем азота на собној температури од око 0,01%.



Слика 62. Приказ детаља нитрираног слоја [20]

На температурама вишим од 590°C, поред наведене три фазе ствара се и γ -фаза, односно азотни аустенит који се при лаганом хлађењу са температуре нитрирања разлаже на $\alpha + \gamma'$ -еутектоид. Азотни аустенит може при довољно брзом хлађењу да се трансформише у мартензит. При прелазу од површине ка дубљим зонама нитрираног слоја запажа се нагли пад концентрације азота. Оваква скоковита промена

концентрације азота, која је настала на температури нитрирања задржава се и после хлађења до собне температуре.

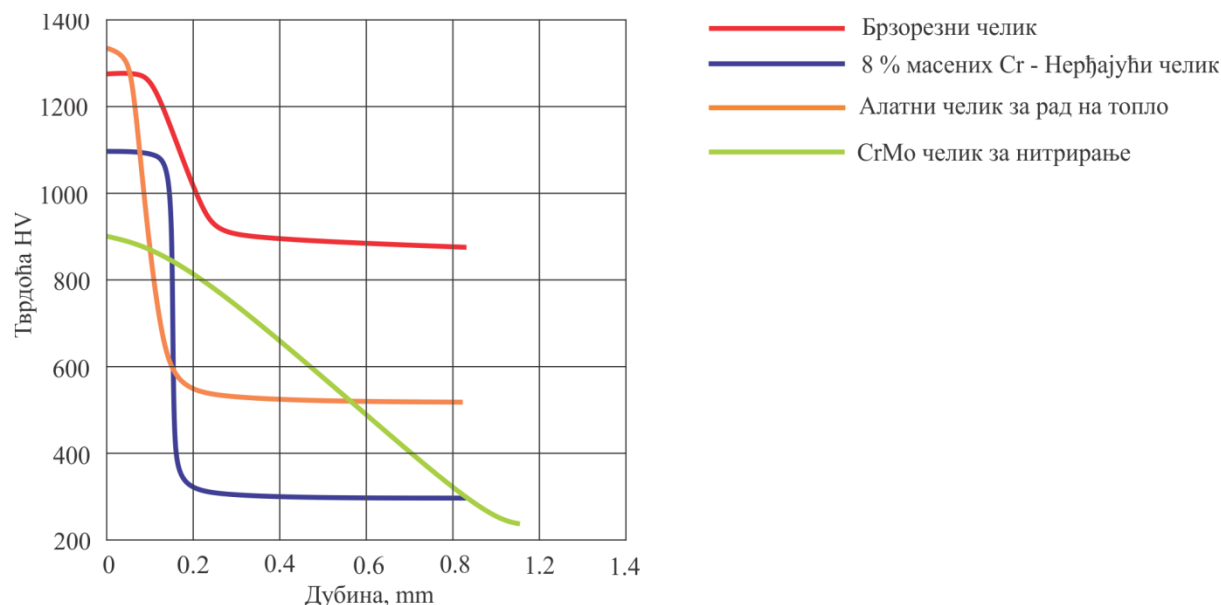
При нитрирању челика азотом засићује се не само ферит, већ и цементит, док се повећаном садржају азота на површинине граде крте нитридне фазе. У нитрираном слоју челика на собној температури запажа се почев од површине присуство следећих фаза: ϵ , γ' , $\alpha+\gamma'$ – еутектоид и α -фаза са секундарно издвојеном γ' -fazом. За разлику од легура Fe-N без угљеника, ϵ и γ' -фазе представљају карбонитриде, тј. садрже у чврстом раствору и угљеник, па се могу приказати формулама: $\text{Fe}_2(\text{N},\text{C})$ и $\text{Fe}_4(\text{N},\text{C})$.

У присуству легирајућих елемената склоних образовању нитрида долази до настајања нитрида ових елемената. То су пре свега елементи Ti, W, Mo, V, Mn, Cr а поред ових и алуминијум који гради нитрид AlN.

Сви легирајући елементи, а слично се понаша и угљеник, смањују дубину нитрираног слоја. Насупрот овоме, неки легирајући (горе наведени) елементи знатно повећавају тврдоћу нитрираног слоја [2, 20].

10.1.2 ЧЕЛИЦИ ЗА НИТРИРАЊЕ – ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА

Практично, нитрирању се могу продвргнути сви челици али је пожељно да челик који се подвргава нитрирању поседује неки од хемијских елемената који граде нитриде као што су: Al, Mo, Cr и V. Поред повишења отпорности на хабање нитрирани челици имају повишену динамичку издржљивост и корозиону постојаност. Легирајући елементи повећавају тврдоћу нитриране зоне, али смањују дубину и дају оштар прелаз профила тврдоће од површине према језгру.



Слика 63. Профил тврдоће за различите врсте челика након јонског нитрирања

Неколико челика погодних за нитрирање дато је у табели, један од наведених челика ће бити одабран за одређивање параметара јонског нитрирања елемената алата (извлакач и матрица) за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида. Такође, у табели су дати параметри каљења и отпуштања наведених челика тј. термичких обрада које претходе процесу јонског нитрирања [18].

Табела 11. Челици за нитрирање [18]

Ознака челика:		Стање испоруке:	Термичка обрада:	
EN	JUS	Меко жарено, HB _{max}	Каљење, °C	Отпуштање, °C
31CrMo12	Č4738	248	870-910 (уље)	570-700 (ваздух)
39CrAlMoV13 9		262	920-960 (уље)	570-650 (у пећи)
34CrAlMo5	Č4739	248	910-940 (уље)	570-650 (ваздух)
41CrAlMo7	Č4784	262	880-920 (уље)	570-650 (ваздух)
34CrAlS5		217	900-950 (вода)	580-660 (ваздух)
34CrAlNi7	Č4531	245	850-900 (уље)	580-660 (ваздух)
41CrMo4	Č4735	235	820-860 (уље)	550-620 (ваздух)

Материјал који може да послужи за одређивање параметара јонског нитрирања тј. израду елемената алата за обраду деформисањем, може бити било који од наведених челика (табела 11). Без разматрања економских или било којих других аспеката а узимајући у обзир да су сви наведени челици релативно сличних механичких карактеристика, за одређивање параметара јонског нитрирања одабран је челик 41CrMo4 (Č4735).

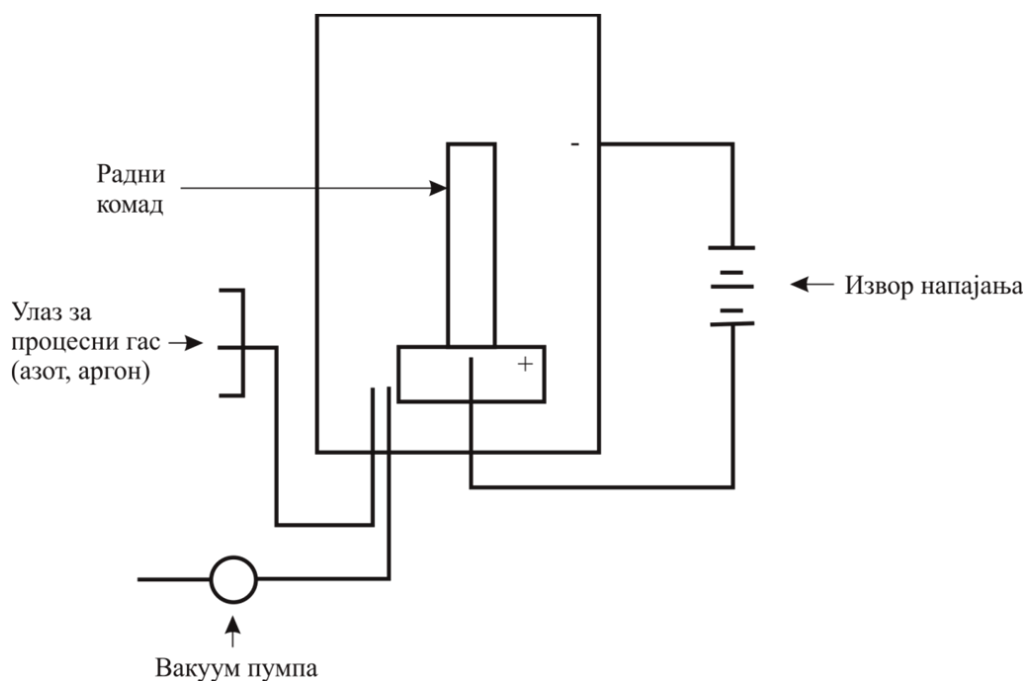
Табела 12. Процентуални хемијски састав челика 41CrMo4 (Č4735).

C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
0.38 - 0.45	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	0.9 - 1.2	0.15 - 0.25	≤ 0.035	≤ 0.035

10.1.3 ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСА ЈОНСКОГ НИТРИРАЊА ЕЛЕМЕНАТА АЛАТА

Као и код већине поступака хемијско-термичке обраде, изузетно је важно добро припремити површину за наношење дифузног слоја, било да је реч о дифузној метализацији или о дифузији неметала (као што је случај са јонским нитрирањем).

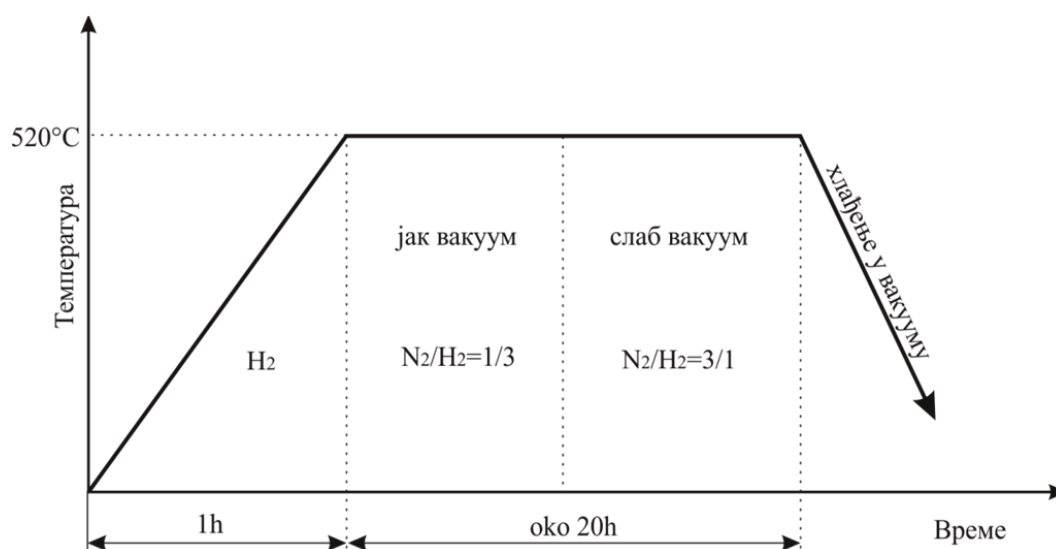
Матрица и извлакач се израђују механичким видовима обраде, затим се подвргавају каљењу и отпуштању (побољшање). Побољшањем се постижу оптимална механичка својства са ситнозрном микроструктуром што олакшава апсорпцију азота и настајање нитрида. Након побољшања изводи се завршна механичка обрада (брушење) и одмашћивање. Оно што је изузетно битно је да се површине које се не желе нитрирати не могу, у случају јонског нитрирања, прекривати танким слојем калаја (као што је случај са осталим поступцима нитрирања) већ се за то мора користити материјал којим би се избегла могућност евентуалног варничења. Такође, пожељно је да температура отпуштања (након каљења) буде виша од температуре нитрирања јер се на тај начин задржавају механичка својства језгара обрађиваних предмета (матрица и извлакач) а често се дешава да сам поступак нитрирања заправо буде и отпуштање.



Слика 64. Принципијелна схема јонског нитрирања

Као што је већ напоменуто, процес јонског нитрирања се одвија у 3 фазе:

- у првој фази у трајању од 50–60 min, при ниском притиску 0,1–0,5 mbara и напону од 1100–1400 V у атмосфери водоника обавља се процес чишћења површине дела од оксидног слоја распршивањем;
- друга фаза – главни део поступка, почиње повећавањем притиска у комори на 1–13 mbara и загревањем дела до потребне температуре нитрирања од 520°C у одговарајућој смеси гасова. У току ове фазе у површински слој дифундују атоми азота. Дифузиони слој представља чврсти раствор азота у α -Fe и нитрида које азот гради са присутним карбидотворним елементима;
- трећа фаза поступка јонског нитрирања је хлађење делова које се обавља у вакууму.

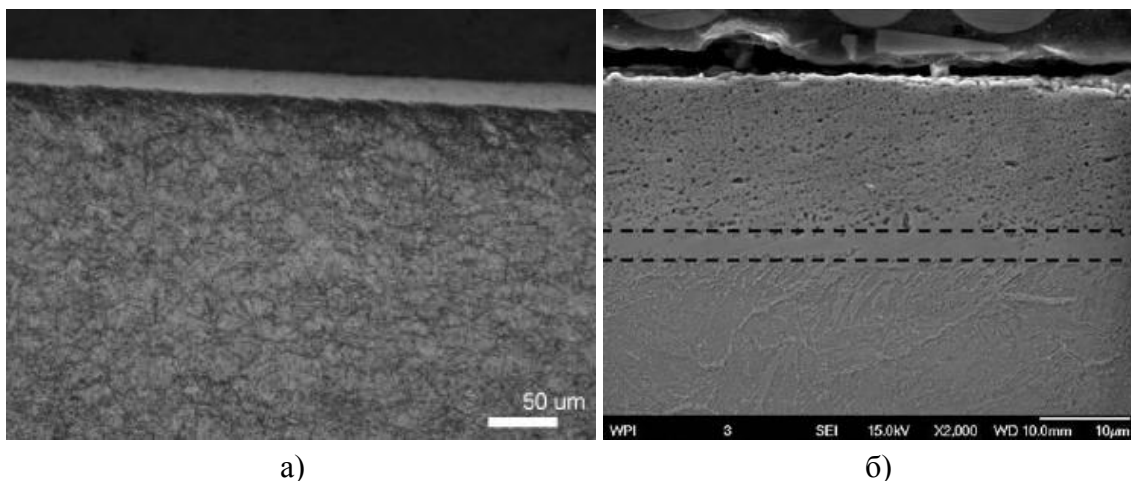


Слика 65. Технолошки дијаграм процеса јонског нитрирања челика Š4735



Слика 66. Опрема за плазма нитрирање [13]

На слици је приказана опрема за плазма нитрирање са DC⁸ напојном јединицом електричне снаге 50 kW и две вакуумске коморе које омогућавају нитрирање радних делова пречника 1300 mm и дужине 3000 mm.



Слика 67. Приказ микроструктуре челика Š4735: а) нитрирани слој дебљине 18,6 μm , б) SEM микрографија површине нитрираног слоја (испрекиданим линијама су одвојене три зоне које чине нитрирани слој) [20]

Због саме чињенице да челик Š4735 припада групи посебних челика намењених нитрирању очекују се погодне карактеристике нитрираног слоја у смислу високе тврдоће нитрида које са дифундованим азотом граде легирајући елементи које овај челик садржи (Cr, Mo). Након свега наведеног, може се закључити да минимална очекивана тврдоћа након јонског нитрирања елемената алата за обраду деформисањем од челика Š4735 износи 850 HV.

⁸ DC – Direct current (Једносмерна струја)

Такође, очекује се да нитрирани слој нема оштар прелаз тврдоћа између модификованог слоја и субстрата што доприноси повећању квалитета и постојаности нитрираног слоја.

Током нитрирања димензије елемената расту за око 3% од дебљине слоја а очекивани раст дебљине нитрираног слоја је минимум 15 μm по једном сату трајања процеса. Након процеса нитрирања пожељно је (али не и неопходно) механичком обрадом уклонити тзв „бели слој“ [22].

10.2 ТВРДО ХРОМИРАЊЕ ЕЛЕМЕНАТА АЛАТА ЗА ОБРАДУ ДУБОКИМ ИЗВЛАЧЕЊЕМ СА СТАЊЕЊМ ДЕБЉИНЕ ЗИДА (МАТРИЦА И ИЗВЛАКАЧ)

Поступци наношења металних превлака хрома веома се често срећу у пракси, што је условљено карактеристичним особинама ових превлака. Превлаке хрома су постојане према атмосферској корозији при нормалној и повишеној температури, веома су тврде и отпорне на хабање, имају мали коефицијент трења и могу имати висок сјај без накнадне обраде. Захваљујући наведеним особинама, могу се разликовати три врсте хромних превлака:

- Декоративне хромне превлаке, које се обично наносе на превлаке бакра, никла, цинка и месинга да би се предмет украсио и заштитио од корозије.
- Тврде хромне превлаке, чији је циљ да се повећа трајност површине предмета који су изложени хабању, нпр. код клипова, резног алата, алата за обраду деформисањем итд.
- Порозне хромне превлаке које су намењене површинама које се у експлоатацији морају подмазивати уљима.

Наношење тврдих хромних превлака разликује од поступка за добијање декоративних превлака у томе што се оне наносе директно на челик (ређе алуминијум или цинк) и што је њихова дебљина знатно већа и износи 0,001 до 0,5 mm . Наношење тврдих хромних превлака чија је дебљина већа од наведених није економски исплатива. Челик на који се наносе тврде превлаке не сме да има тврдоћу већу од 57 до 62 HRC, јер челици са већем тврдоћом после хромирања постају крти [9, 13].

10.2.1 ОСОБИНЕ ТВРДОГ ХРОМА

Неке од најбитнијих особина тврдог хрома су:

- Површинска тврдоћа превлаке износи 63-69 HRC. (Галвански хром има 5 до 10 пута већу тврдоћу од металуршког хрома). На Мосовој скали тврдоћа хрома је 9, што значи да има тврдоћу корунда.
- Специфична тежина електролитичког хрома износи 6,5 gr/cm^3 .
- Тврди хром поседује ниски коефицијент трења услед корисне особине одбијања, односно недостатка моћи лепљења материјала. Тако да коефицијенти отпора клизања износе:

челик по челику = 0,20

хром по челику = 0,16

- Хром је отпорнији на хабање за око 2 пута од цементираних делова (мада имају сличну тврдоћу).
- Хром почиње да омекшава изнад температуре од 350°C, да губи боју (оксидише) изнад 500°C.

- Адхезија хрома за основу је врло јака, у чему има предност над осталим галванским превлакама и омогућава његову примену и за најоптерећеније машинске делове.
- Превлака хрома може да се наноси на челике у природном и термичком обрађеном стању, јер се процесом хромирања не мења структура материјала.
- Тврди хром поседује велику хемијску отпорност и на високим температурама на већину гасова, алкалија, соли и киселина (сем киселина халогена на свим температурама и сумпорне киселине на топло). Услед своје хемијске пасивности превлаке хрома су постојане на ваздуху, не тамне и зато их не треба чистити, тако да предмети с превлаком хрома добијају изглед племенитог метала [13].

10.2.2 ТЕОРИЈА ГАЛВАНСКОГ НАНОШЕЊА ПРЕВЛАКА И ПОТРЕБНА ОПРЕМА

За сврхе галванотехнике, потребна је једносмерна струја, малог напона од 1 до 12 V, а у изузетним случајевима напон може бити и 25 V. Јачина струје може бити велика и она зависи од величине ћелије за електролизу, а може се кретати и до неколико хиљада ампера.

За добијање струје служе:

- динамо машине и
- исправљачи.

Динамо машина која даје једносмерну струју, ниског напона и велике јачине, спојена је обично са трофазним електромотором који обрће ротор динамо машине. Карактеристика овакве групе је да она даје константан напон без обзира на величину оптерећења. Динамо машине се могу спрезати паралелно и серијски при чему се у првом случају добија већа јачина струје, а у другом већи напон. Недостатак ових уређаја је низак степен искоришћења електричне енергије који се креће око 65% као и бука коју оне производе при раду.

Исправљачи могу бити на бази живине паре или полупроводника. Живини исправљачи због својих специфичности нису нашли примену у галванотехници. Међутим, исправљачи на бази полупроводника или такозвани суви исправљачи нашли су широку примену у галванотехници. Као полупроводнички материјали за израду исправљача користе се купрооксид, селен, германијум и силицијум. Најлошије карактеристике има купрооксидни исправљач а најбоље силицијумски исправљач. Овај последњи за исту снагу заузима много мањи простор од других исправљача, подноси знатно више температуре него остали исправљачи има највећи степен искоришћења електричне енергије који се креће око 99.5%. Карактеристично је за суве исправљаче да им напон опада са струјним оптерећењем, зато је потребно предвидети са додатним компензационим уређајем, тако да се може повећавати напон на трансформатору који снабдева струјом исправљач.

Неки поступци заснивају се на примени периодично мењаног правца струје или реверсне струје. У овом случају предмет буде катода више десетина секунди, па се променом правца струје учини анодом за време од 0,5 до 5 секунди. На овај начин добијају се боље металне превлаке. Поред наведених уређаја који служе за добијање струје, опрема за наношење превлака галванским путем, садржи и следеће компоненте:

- електрични водови,
- носачи предмета,
- ћелије за електролизу,

- уређаји за мешање електролита,
- уређаји за филтрирање електролита,
- уређаји за сушење,
- полуаутомати и аутомати.

Електрични водови. За довод струје од извора до ћелије за електролизу користе се обично бакарни проводници тако димензионисани да пад напона у њима буде мали. Јаче загревање ових водова за време рада указује на недовољне димензије. За бакарне водове дозвољава се оптерећење од 2 A/mm^2 . Практично се за струју од 1000 А узима проводник пресека 6 cm^2 . У недостатку бакра може се употребити алуминијум, с тим што се мора повећати пресек јер електрична проводљивост алуминијума износи око 61% од проводљивости бакра. При употреби алуминијума треба имати у виду и његову неплеменитост па водове тако поставити да буду заштићени од киселина.

Регулисање јачине струје и напона на ћелији за електролизу врши се помоћу погодних променљивих отпорника при чему се вредности струје и напона читавају на амперметру и волтметру.

Носачи предмета. Предмети на које треба нанети металну превлаку поставе се на одговарајуће носаче најчешће специфично конструисане за поједине потребе у зависности од облика предмета и његове величине. Да се на носач не би таложио метал, сама шипка као и помоћне кукице изолују гумом или пластичном масом, при чему се оставе слободна само она места која ће играти улогу електричних контаката.

Ћелије за електролизу. Ћелије за електролизу⁹ могу бити израђене од различитог материјала отпорног према електролиту који ће се у њој налазити. Нпр. мање ћелије могу бити израђене од порцелана. Ћелије већих димензија су од дрвета или челика обложене гумом, пластичном масом или оловом у зависности од природе електролита и радних услова. Ћелије облика каде користе се обраду великих предмета. Када се металне превлаке наносе на ситне предмете тада се обично користе звона или добоши. Карактеристика звона и добоша је да лагано ротирају око своје осовине. Запремина звона креће се од 5 до 50 литара. Количина металних предмета која се ставља мора бити таква да при ротирању звона не дођу у контакту са анодом. Код добоша је омотач избушен и цео добош је загњурен у електролит који се налази у кади. Преко специјално конструисаних металних прстенова у добошу, доводи се катодна струја на предмете. Добоши по издизању из каде, након што из њих исцури електролит, празне се кроз отвор пошто се одстрани поклопац.

Уређаји за мешање електролита¹⁰. Пошто концентрација металних јона опада у близини катоде а расте у близини аноде, неопходно је мешати електролит. У неким случајевима развија се на катоди и аноди довољно водоника односно кисеоника чији мехурићи при пењању нагоре живо мешају електролит па није потребно допунско мешање. Када се током употребе у неком електролиту не појављује муљ тада је најпогоднији начин мешања продувавањем компримованим ваздухом кроз цеви смештене на дну ћелије за електролизу. Мешање ваздухом није пожељно за алкалне електролите јер угљендиоксид из ваздуха претвара натријумхидроксид у натријумкарбонат.

⁹ Електролиза - електрохемијска реакција разлагања електролита деловањем једносмерне струје.

¹⁰ Електролит - спој метала који даје превлаку, најчешће у облику комплексне металне соли.

Уређаји за филтрирање електролита. За добијање сјајних превлака електролит не сме да садржи честице муља, прашине или металног хидроксида. Овакве честице, уколико доспеју као талог на катоди у процесу катафорезе или механички, условиће талог који се ни глачањем не може поправити и превлака не може имати висок сјај. Из овог разлога мора се електролит повремено или континуално пречишћавати. Електролите за хромирање није потребно филтрирати. Да се спречи појава муља из анода, оне се обично стављају у платнене вреће или вреће од синтетичког материјала које задржавају муљ.

Филтри од отпорног материјала могу чинити целину са ћелијом за електролизу. Материјал кроз који се електролит филтрира може бити памучна тканина, синтетичка тканина, активан угаљ и сл. Електролит се у филтер убацује са пумпом. Уколико филтер и пумпа не чине саставни део ћелије за електролизу, тада филтер и пумпа чине једну покретну јединицу постављену на постоље са точковима тако да се могу преносити.

Уређаји за сушење. После прања предмета на које су нанете металне превлаке треба осушити. Сушење треба да буде брзо обављено и да при том предмет не добије површинске мрље. Најпростија апаратура за сушење је сто са струготином од дрвета или звоно са струготином од дрвета. Предмети се у првом случају ручно трљају сувом струготином која не сме бити кисела нити садржавати смоле (струготина од јавора је најбоља). Звоно и сто могу се и загревати ради бржег сушења предмета. Ситни предмети могу се сушити и путем центрифуге и сушнице које се загревају електричном енергијом или паром. Топао ваздух уводи се са једне стране а засићен паром одводи са друге стране сушнице. У новије време користи се и сушење инфрацрвеним зрацима.

Полуаутомати и аутомати. Пошто се у галванотехничким поступцима обрађује често пута велики број истих комада, очигледно је да аутоматизација и механизација процеса у галванотехници треба да буде корисна, јер треба да обезбеди устаљеност квалитета превлака, да повећа капацитет постројења и снизи цену производа услед уштеде радне снаге, потрошње метала, хемикалија и енергије.

У случају полуаутомата обично је аутоматизован само процес наношења превлаке, док је код потпуних аутомата аутоматизован и процес брушења, глачања, чишћења површине, нагризања и наношења превлака. У погледу саме електролизе могуће је аутоматско одржавање састава електролита, нивоа електролита, температуре, времена, јачине струје¹¹ итд. [9]



Слика 68. Изглед опреме за галванско наношење превлака [14]

¹¹ Јачина струје је количина наелектрисања која прође кроз проводник у неком временском интервалу.

10.2.3 ПОСТУПАК ТВРДОГ ХРОМИРАЊА

10.2.3.a Припрема делова за тврдо хромирање

Један од битних услова за постизање добрих резултата приликом тврдог хромирања је одговарајућа припрема површине на коју се наноси превлака. У зависности од крајњег циља врши се и одговарајућа припрема површине али се у највећем броју случајева поставља захтев да предмети пре уношења у каду за електролизу имају глатку површину, која није масна и покривена невидљивим слојем оксида метала. Уштеда у трошковима припреме може се постићи већ код производње предмета и његовог правилног складиштења како би се спречило настајање корозије коју је онда неопходно уклонити.

Припрема узорака за тврдо хромирање састоји се у следећем:

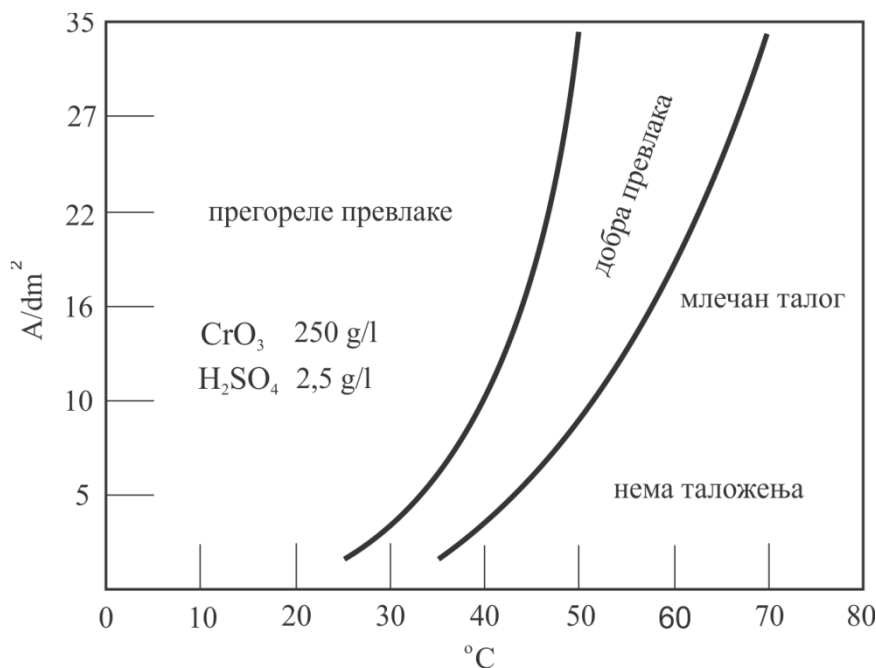
- Делове пре хромирања треба добро преконтролисати у циљу елиминације могућности постојања евентуалних прслина, најчешће су у примени визуелна и пенетрантна контрола мада се могу применити и остали видови контроле материјала без разарања;
- Предмети се механички бресе и глачају и морају бити без оксидне скраме. Изводи се грубо и фино брушење али то ипак није довољно јер на елементима настају извесне „бразде“ као последица брушења, тако да је процес глачања неопходан. Елементи након глачања имају изузетно глатку и сјајну површину. Након механичких обрада елементи се доводе на димензије које ће након наношења превлаке бити у границама прописаних толеранцијом. Уколико дебљина превлаке, заједно са основним делом пређе дозвољену толерантну област, могуће је процесом брушења уклонити „вишак“ али се овај процес не препоручује па је неопходно правилно одабрати параметре процеса тврдог хромирања;
- Врши се одстрањивање масноћа органским растварачима а последње одмашћивање врши се помоћу алкалног електролитичког поступка са раствором који садржи 30-45 g/l калцинисане соде, 15-30 g/l тринатријумфосфата и 7,5-15 g/l натријумхидроксида. Радна температура је 93°C, катодни период је 1-2 минута а после тога анодно третирање 15-30 секунди;
- Декапирање се обично изводи у раствору хромне киселине, најчешће у самом електролиту, тако што се предмети учине анодама за време од 10 секунди до 1 минута при густини струје од 10-50 A/dm² и напону од 4-6 V. Ово има незгодну страну што се електролит богати гвожђем. Може се ова операција изводити и у засебној кади, али тада постоји опасност да се састав електролита квари уношењем предмета који носе на себи хромну киселину [9, 23].

10.2.3.б Састав електролита и остали параметри тврдог хромирања

Након припреме узорака врши се избор електролита. За тврдо хромирање најчешће се користи електролит са 250 g/l хромне киселине (CrO₃) и 2,5 g/l сумпорне киселине (H₂SO₄). Температура процеса је 55°C а препоручена густина струје¹² 35 A/dm². За један час таложи се под овим условима 0,0254 mm хрома. Пошто је реч о алату за обраду деформисањем препорука је да дебљина слоја превлаке буде 0,01 mm. Вишак нанетог хрома (уколико постоји) одстрањује се брушењем. Брушење хрома је прилично скуп посао па се зато тежи наношењу тачно потребне дебљине хрома.

¹² Густина струје представља јачину струје по јединици површине.

Овакав начин тврдог хромирања познат је и као *хромирање на меру*. У овом случају морају се употребити помоћне катодe или маске (помоћне катодe су од метала док маске могу бити неметалне) које би примиле део густине струје, како би се хром равномерно таложио а поред тога често се користе и профилисане аноде чија је површина прилагођена површини катодe.



Слика 69. Области густине струје и температуре за добијање добрих превлака хрома

Ако челик услед тврдог хромирања постане сувише крт може се применити нискотемпературно отпуштање након наношења превлаке [9, 23].

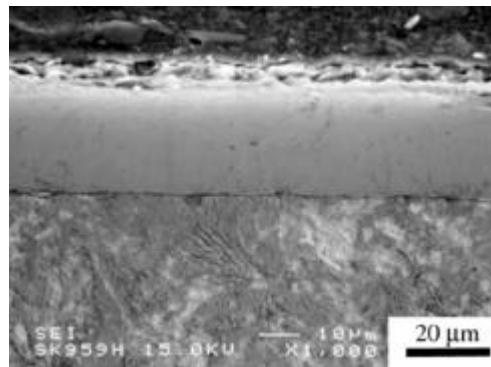
10.2.3.в Избор аноде и ћелије за електролизу

Одабрана анода је легура бакра са 7% антимонона. Легуре олова су боље од чистог олова из разлога што чисто олово у сумпорно киселим растворима хромне киселине брзо оксидише по површини уз стварање олово-супероксида који добро проводи електричну струју. Одабрана ћелија за извођење процеса тврдог хромирања је обложена армираним стакленим плочицама које се лепе китом отпорним на киселину.

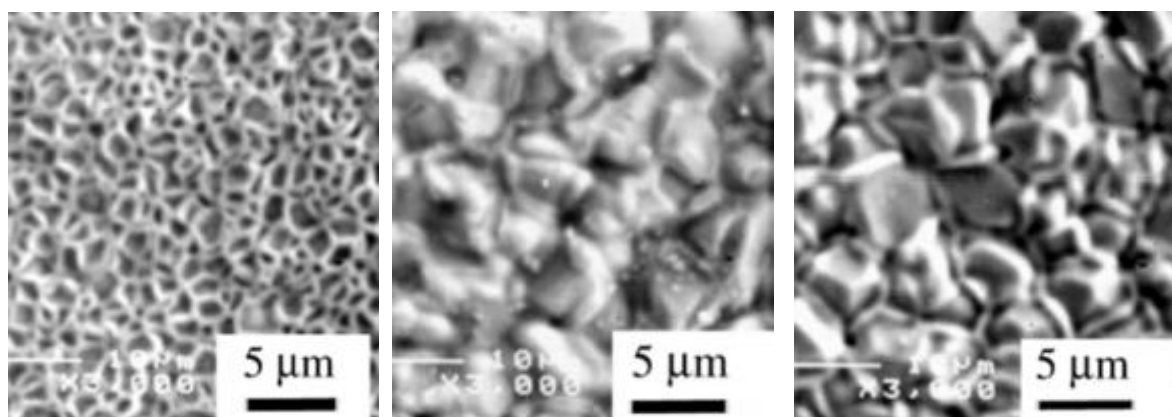
Загревање електролита врши се електричним путем при чему грејачи морају бити у кварцним цевима. Због јаког развијања гасова на електродама, из ћелије за електролизу одлази велика количина магле од електролита, која је веома штетна за дисајне органе, па се изнад ћелије за електролизу постављају вентилациони канали којима се ова магла одстрањује. Пошто се приликом хромирања користе велике густине струја потребно је да носачи предмета буду прилагођени овом захтеву.

Табела 13. Састав купатила и режим рада при тврдом хромирању [23]

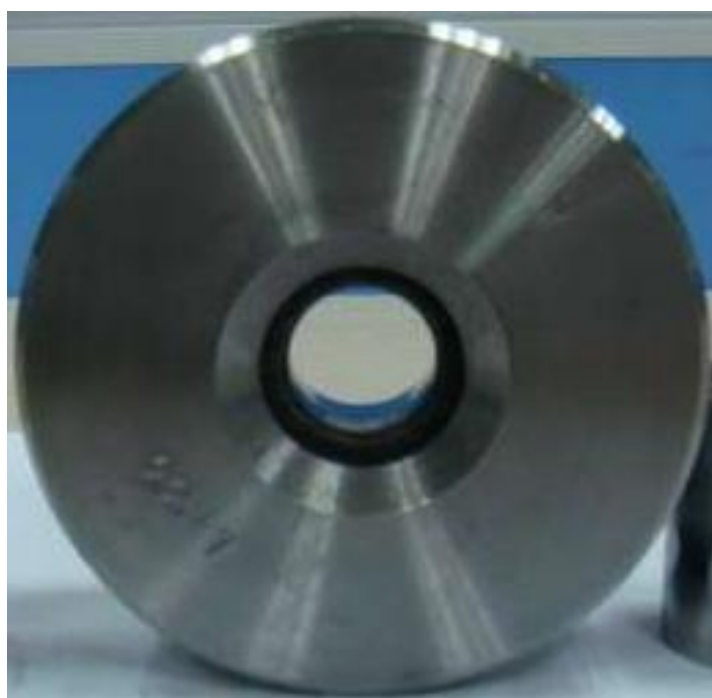
Састав купатила у g/l	
CrO ₃	250
H ₂ SO ₄	2,5
Режим рада	
Температура купатила, °C	55
Густина струје, A/dm ²	35
Напон, V	12
Анода	Pb+7% Sb
Дебљина слоја, mm	0,01
Време, min	око 30



Слика 70. Изглед пресека превлаке тврдог хрома на челику Č1331



Слика 71. Приказ површине превлаке тврдог хрома и промена изгледа површине у току процеса наношења тврдог хрома на челику Č1331 [19]



Слика 72. Изглед хромиране матрице

10.3 ИСПИТИВАЊЕ ОСНОВНИХ ОСОБИНА ПРЕВЛАКА И МОДИФИКОВАНИХ СЛОЈЕВА

Испитивање особина превлака и модификованих слојева изискује коришћење савремене апаратуре и посебне лабораторијске услове.

Неке од особина које се најчешће испитују су:

- фазни састав,
- дебљина и густина превлаке,
- морфологија површине,
- механичке особине,
- оптичке особине,
- електричне особине,
- електрохемијске особине,
- остале особине.

Због обимности рада нису описане све методе којима се испитују поједине особине превлака и модификованих слојева. У разматрање су узете само методе испитивања механичких особина јер су механичке особине један од најважнијих показатеља квалитета изведене хемијско-термичке обраде [17].

10.3.1 ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ ОСОБИНА ПРЕВЛАКЕ

Основне механичке особине превлаке су:

- Јангов (Young) модул еластичности,
- тврдоћа (микротврдоћа, нано/пико тврдоћа),
- триболошке особине (коэффициент трења, антихабајуће карактеристике и адхезија превлаке).

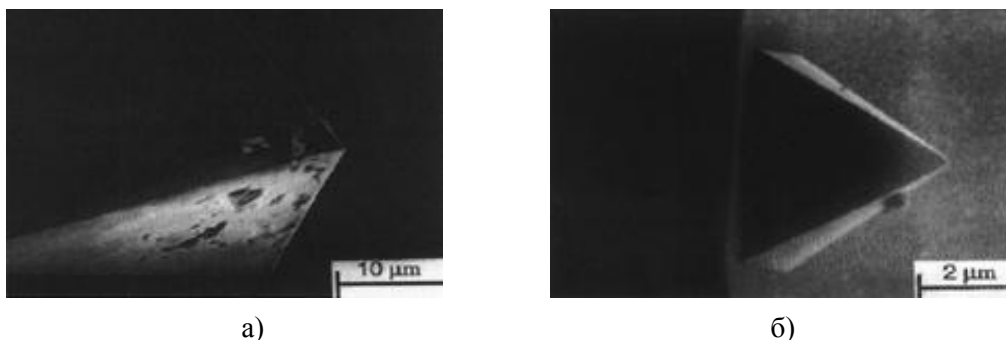
10.3.1.a Испитивање тврдоће превлака

Тврдоћа је основна особина која се испитује код свих површинских превлака које се користе у машинству. Најбоље одсликава чврстоћу материјала у условима хабања и представља отпорност на локалну пластичну деформацију.

Постоје одређене области у домену којих се врши мерење тврдоће, па тако разликујемо:

- макро област (оптерећења од 2 N до 30 kN),
- микро област (оптерећења мања од 2 N),
- нано/пико област (оптерећења у наноњутнима).

Утискивачи су углавном од дијаманата, осим код наноутискивача (утискивачима са оптерећењем у наноњутнима), где се због проблема око полирања дијаманта и храпавости оштрице, поред дијаманта користи Si₃N₄.



Слика 73. Врх призме код AFM (Atomic force microscope); а) утискивач од дијаманта, б) утискивач од Si_3N_4

Тврдоћа се одређује на основу:

- величине отиска (класичне методе тј. „ex situ“ методе),
- директним мерењем померања утискивача („in situ“ методе).

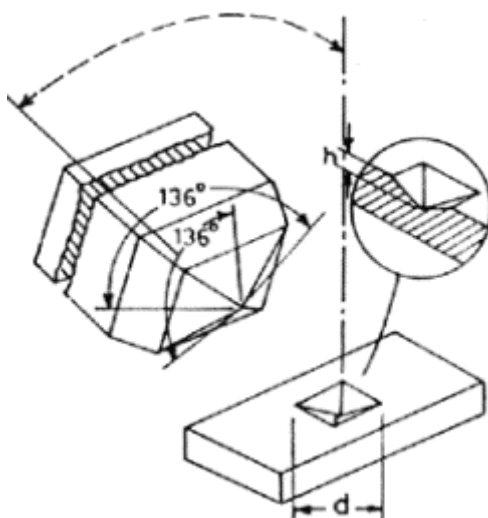
Према геометрији врха, утискивачи се деле на:

- Викерсов (Vickers),
- Кнупов (Кпоор),
- Берковичев (Berkovich).

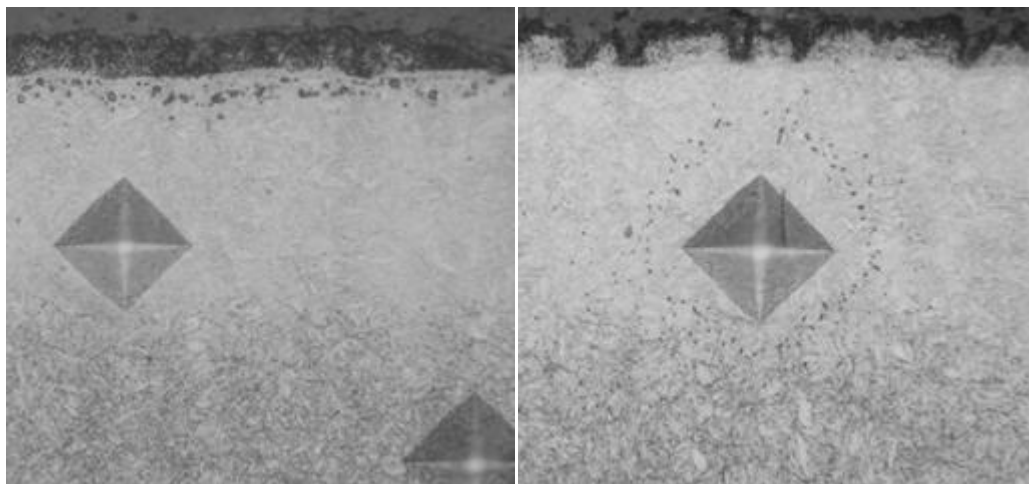
Сваки тип утискивача се користи за одређени опсег оптерећења према томе колики отисак остављају или каква је геометрија врха утискивача. Најчешће коришћене су Викерсова и Кнупова метода.

Тврдоћа се код утискивања Викерсовом призмом изражава на основу величине отиска утискивача (класичне методе):

$$H = 1,854 \frac{F}{d^2}$$



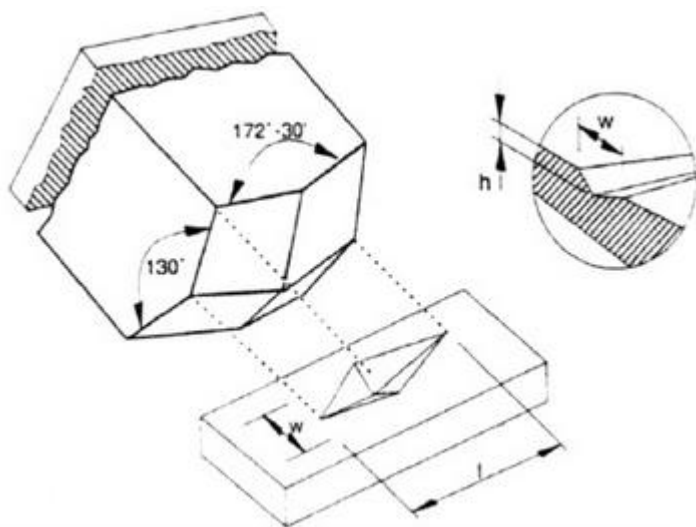
Слика 74. Геометрија Викерсовог утискивача



Слика 75. Одређивање микротврдоће нитрираног слоја (отисак Викерсове призме при увећању од 400 пута) [20]

За мања оптерећења обично се користи Кнупов утискивач, пошто оставља отисак веће ширине, те га је лакше мерити. Тврдоћа се код утискивања Кнуповом призмом изражава на основу величине отиска утискивача (класичне методе):

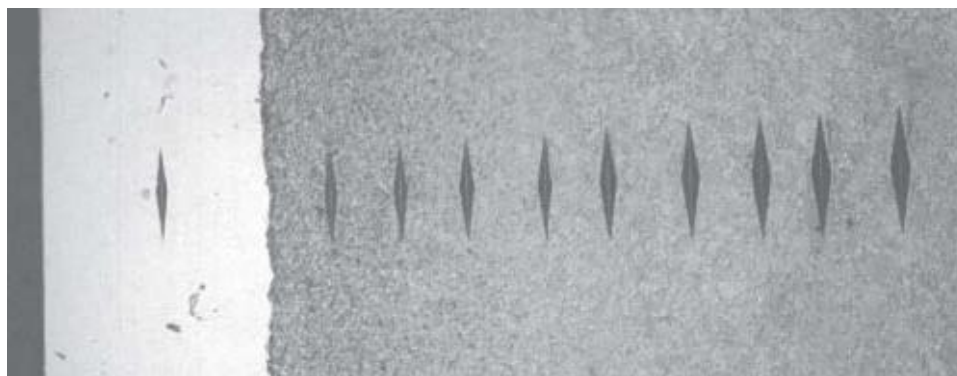
$$H = 1,423 \frac{F}{w \cdot l}$$



Слика 76. Геометрија Кнуповог утискивача

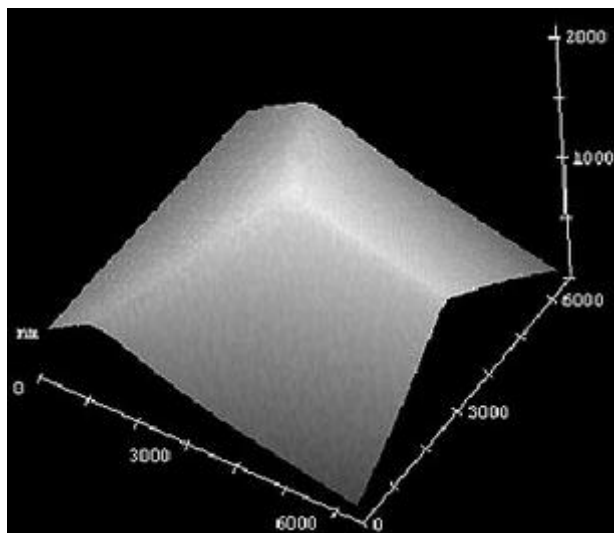


Слика 77. Отисак Кнуповог утискивача на превлаци тврдог хрома

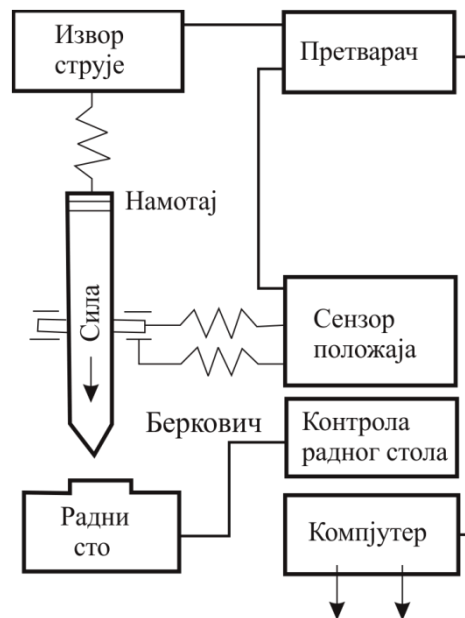


Слика 78. Испитивање микротврдоће каљеног челика са нанешеним слојем тврдог хрома

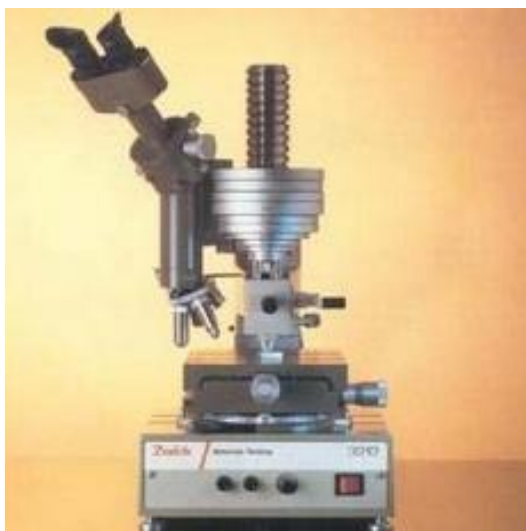
Берковичев утискивач се користи за најмања оптерећења тзв. нано и пико утискивања зато што се не мери величина отиска већ директно померање, а још један од разлога је и тај што поседује највећу прецизност геометрије врха. Геометрију Берковичевог утискивача представља троугаона призма где је свака страница у односу на заједничку осу под углом од 65° .



Слика 79. Негатив отиска Берковичевог утискивача



Слика 80. Схема уређаја за мерење тврдоће „in situ“



Слика 81. Аналогни тестер (Викерс, Бринел и Кнуп) са додацима за микро и макро оптерећења



Слика 82. Дигитални тестер са малим оптерећењима (Викерс, Бринел и Кнуп)

Основни проблем приликом мерења тврдоће превлаке јесте то што се оптерећење преко превлаке преноси и на супстрат, тако да вредности тврдоће у већој или мањој мери доприноси и супстрат, а не сама превлака. Због тога измерена тврдоћа не представља тврдоћу саме превлаке, већ система превлака/супстрат који се може третирати као композит. Управо зато се овако измерена тврдоћа назива и „композитна“ тврдоћа (H_{comp}) [17].

Да би се што више елиминисао утицај подлоге на измерену тврдоћу превлаке оптерећење мора бити тако подешено да дубина утискивања износи максимално 5 до 10% од дебљине превлаке. Међутим, и са малим дубинама утискивања добијеним наноутискивањем, и даље постоји утицај супстрата, а меродавност измерене тврдоће доводи у питање велики удео еластичних деформација, тзв. „ефекат величине отиска“.

Одређивање нано тврдоће

За одређивање тврдоће наноутискивањем користе се ННТ (*Nano Hardness Tester*) уређаји. Ови уређаји омогућују мерење тврдоће при дубинама продирања од свега 15 nm, поред тврдоће могу се користити за одређивање модула еластичности, жилавости лома, отпорности на замор и пузање. Приказана схема (сл. 83) представља новије решење које укључује референтни прстен који омогућава мерење дубине продирања од горње површине узорка што има низ предности:

- велика тачност мерења дубине продирања,
- кратко време мерења,
- занемарљива термална одступања,
- заштита зоне мерења од струје ваздуха и акустичних сметњи,
- заштита мерног пипка (утискивача) од механичких оштећења.



Слика 83. Изглед и схема ННТ (*Nano Hardness Tester*) уређаја

Постоји више фактора због којих се вредност измерене тврдоће треба узети са резервом, управо због тога што се често даје само вредност тврдоће без података о околностима под којим је добијена. Најважнији од тих фактора су:

- тачкасте грешке у материјалу и дислокације,
- величина зрна, која има утицај због дејства границе зрна (утицај границе је већи код мање величине зрна),
- утицај супстрата,
- адхезија превлаке за супстрат,
- еластично враћање након утискивања.

Све то говори о деликатности одређивања коректне вредности тврдоће саме превлаке, проблема за који се наизглед може рећи да је тривијалан [17].

10.3.1.6 Испитивање адхезије превлаке

Опште је прихваћена тврдња да је адхезија превлаке за супстрат једна од кључних особина депоноване превлаке. Превлака одговара некој примени ако су задовољавајуће њене функционалне особине и адхезија. Карактеристике тврдох

превлака су одређене њиховим функционалним особинама. Гранична област, превлака/основни материјал, преноси површинско оптерећење на основни материјал и прихвата пораст напона који настаје због различитих особина превлака и супстрата.

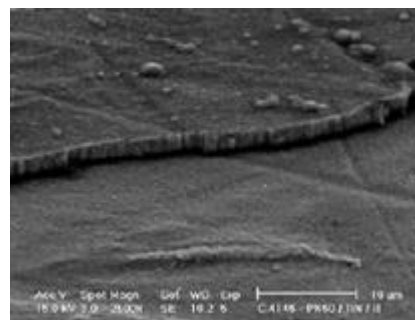
Механизми адхезије могу да се поделе у три групе:

- механичко спајање,
- физичко повезивање,
- хемијско повезивање.

Без одговарајуће адхезије, и у случају веома добрих функционалних особина, превлака неће вршити своју функцију. Развијен је велики број метода одређивања адхезије. Постоје методе којима се само региструје измерена вредност и оне које након мерења укључују математичку анализу и интерпретацију.

Најчешће коришћене методе су:

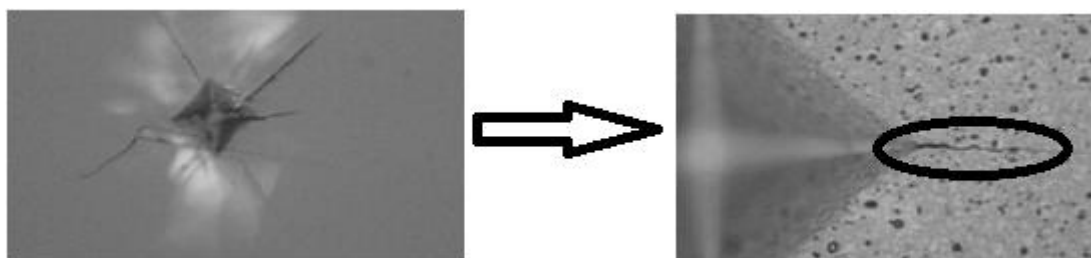
- метода утискивања и
- scratch test (запаравање).



Слика 84. Пример одвојене (деламинаране) превлаке

Метода утискивања

Поступак је исти као код мерења тврдоће, а прати се ширење прслина око отиска, као код анализе жилавости превлаке. Простирање прслина указује на лошу адхезију превлаке.

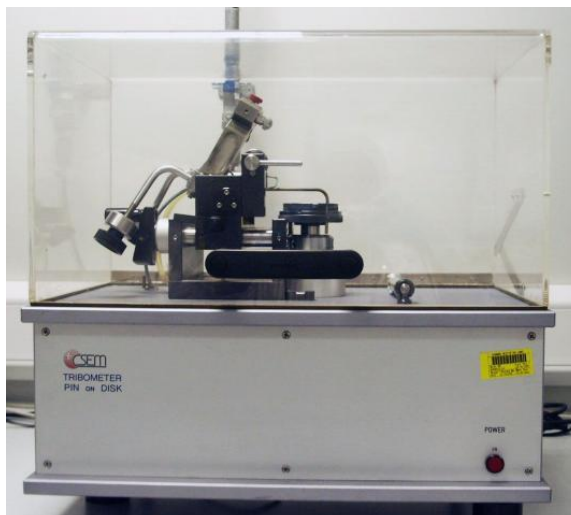


Слика 85. Пример простирања прслина на превлаци са лошом адхезијом

Добар начин контроле превлака би могао бити поређење прслина са еталоном који има довољну адхезију. Ово би посебно било корисно у уходаној производњи.

Scratch test (запаравање)

Утискивач са континуално растућим оптерећењем запарава површину превлаке и оптерећење у тренутку деламинације се сматра за критично оптерећење [17].



Слика 86. Схема и изглед уређаја за испитивање адхезије превлака (scratch-tester)

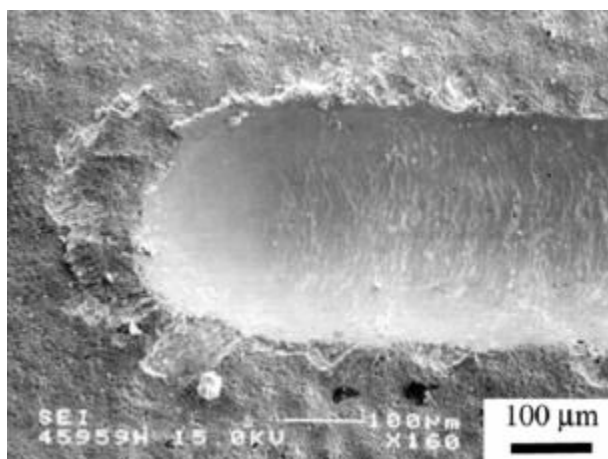
Постоје две врсте тестова:

- за танке превлаке (испод $20 \mu m$) и
- за дебеле превлаке (преко $30 \mu m$).

Утискивач је најчешће дијамантски врх Роквелове геометрије са радијусом на врху $200 \mu m$. Користе се и друге геометрије утискивача, као и разни пинови.

Код дебелих превлака се запаравање врши константним оптерећењем на попречном пресеку у правцу нормалном на површину узорка и то од супстрата ка превлаци.

Примена испитивања адхезије запаравањем код танких превлака је много чешћа. Утискивач са континуално растућим оптерећењем запарава површину превлеке и оптерећење у тренутку деламинације се сматра за критично оптерећење. Најчешћа брзина утискивача је $10 mm/min$, док је брзина раста оптерећења $10 N/mm$. Трагови запаравања се крећу најчешће око $10 mm$.



Слика 87. Scratch test превлаке тврдог хрома [19]

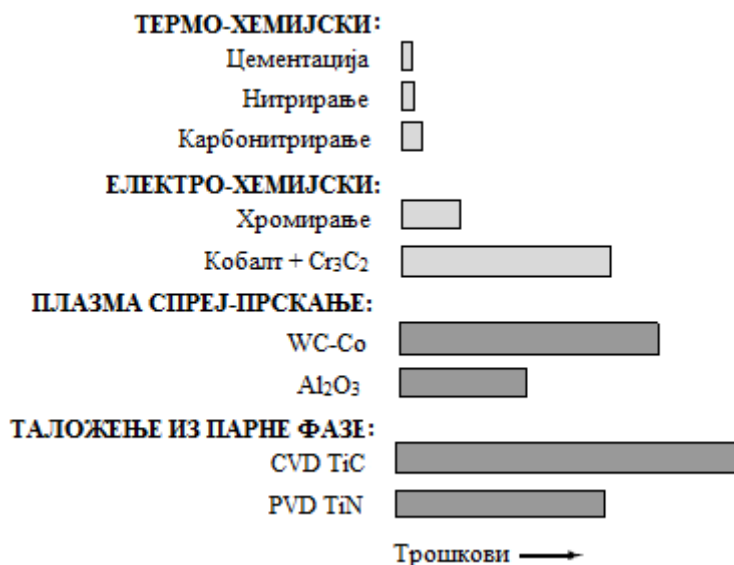
Пример веома добре адхезије превлаке тврдог хрома приказан је на слици 87. Снимак је са краја трага запаравања, када је оптерећење достигло $100 N$.

10.4 ПОРЕЂЕЊЕ ОСНОВНИХ КАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМИЧКИХ ТРЕТМАНА ЕЛЕМЕНАТА АЛАТА (МАТРИЦА И ИЗВЛАКАЧ)

При избору термичке односно хемијско-термичке обраде елемената алата, мора се водити рачуна о многим факторима који би нашли оптималан однос између цене и функционалности термички обрађених компоненти. Практично, ако се жели да елементи алата буду израђени квалитетно и да њихов експлоатациони век буде што већи, мора се занемарити економски фактор тј. цена основног материјала и цена термичког третмана. Уколико се жели да компоненте алата (матрица и извлакач) поседују минималне функционалне карактеристике, онда није неопходно изводити хемијско-термичку обраду, што би, свакако, појефтинило сам процес израде. Овакав приступ, где се елементи алата израђују само уз основне термичке обраде (каљење + отпуштање) појашњен је у првом делу рада и резултира добијању релативно квалитетног алата, са добрим антихабајућим карактеристикама, тврдоће 660 HV. Ако је неопходно вршити хемијско-термичку обраду, онда је при одабиру третмана потребно, поред економског аспекта, размотрити и крајње триболошке, механичке и технолошке карактеристике, које се након третмана добијају. У даљем делу рада разматрани су поменути фактори са посебним акцентом на компарацију јонског нитрирања и тврдог хромирања.

Економски аспект

Уколико је економски аспект пресудан за избор поступка, онда је евидентно да је поступак нитрирања економски прихватљивији од поступка хромирања (сл. 88).



Слика 88. Апроксимација трошкова појединих хемијско-термичких обрада [21]

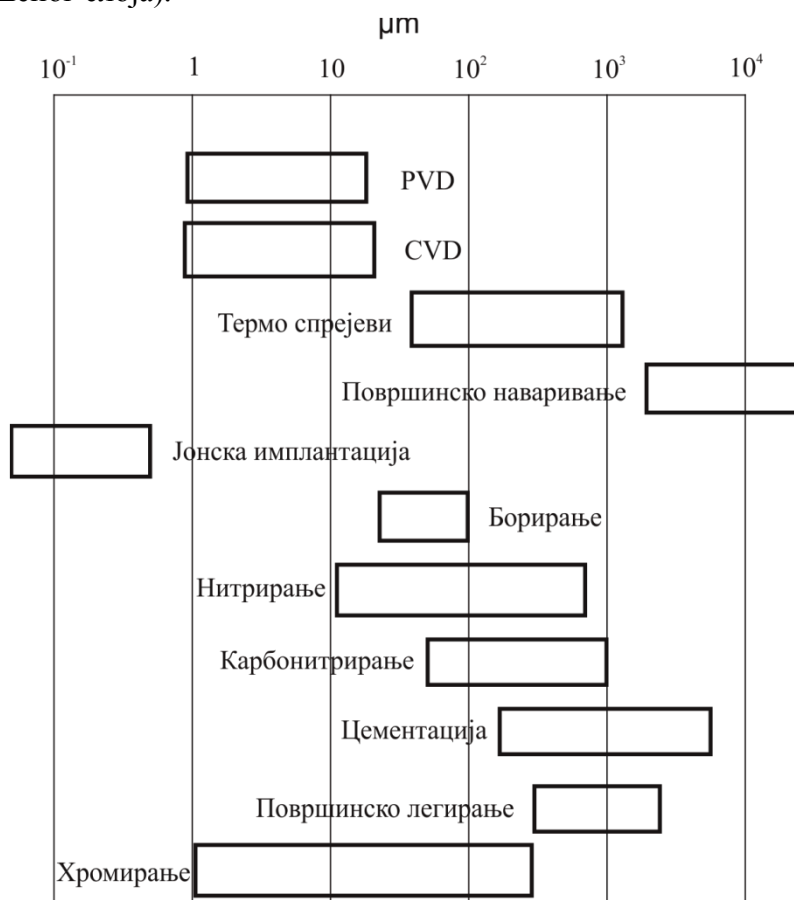
Међутим, предност хромираног слоја је, у томе што се он, у случају хабања, може заменити новом превлаком, што се мора узети у обзир приликом разматрања економског аспекта јер је у већини случајева много јефтиније урадити репарацију превлаке него правити нове елементе алата.

Поређење основних механичких и триболошких карактеристика

Поступак нитрирања се најчешће примењује на специјалним челицима за нитрирање (види поглавље 10.1.2). Како је објашњено у наведеном поглављу, примена оваквих, специјалних челика је пожељна због погодног распореда тврдоће нитрираног слоја (нема оштрог прелаза између модификованог слоја и супстрата). Међутим, управо из поменутог разлога, тврдоћа нитрираног слоја на челику Č4735 (један од челика за нитрирање) не може бити тако висока као нпр. код брзорезних челика или челика за рад на топло (око 1300 HV) који би били подвргнути нитрирању. Очекивана, минимална, тврдоћа нитрираног слоја, који има високу отпорност на адхезивно и абразивно хабање, на челику Č4735 је 850 HV. Поређење тврдоће нитрираног и хромираног слоја доноси велику предност тврдом хромирању. Ова предност се, пре свега, огледа у знатно већој површинској тврдоћи (око 1200 HV) и нижем коефицијенту трења што додатно доприноси повећању антихабајућих карактеристика.

Анализа и поређење технолошких и осталих карактеристика

Што се тврдог хромирања тиче, битно је истакнути да су већи слојеви хрома, осим што су економски неисплативи, лошији у погледу антихабајућих карактеристика јер имају грубљу структуру. Обично се наноси нешто дебљи слој од потребног због брушења и довођења на тачну меру што није случај са нитрирањем. Код нитрирања се делови доводе на тачну меру пре самог почетка поступка и у току процеса долази до незнатне промене димензија радног предмета (повећавају се димензије за око 3% од дебљине нанесеног слоја).



Слика 89. Приказ дубине слојева појединих хемијско-термичких третмана [21]

Тзв. „бели слој“ који се јавља на површини нитрираног предмета је изузетно мале дебљине ($<1 \mu m$) и пожељно га је одстранити јер је изузетно крт и порозан. За разлику од хромирања, где се препоручује нискотемпературно отпуштање након извођења процеса, поступак нитрирања не изискује никакву накнадну термичку обраду. Након процеса хромирања потребно је делове подвргнути контроли ради откривања евентуалних прслина (што није случај са нитрирањем уколико је вршена контрола пре извођења самог процеса). Оно што је заједничко за оба поступка јесте да се не препоручују код елемената изложених концентричним ударима.

11. ЗАКЉУЧАК

Израда алата за обраду деформисањем – матрице и извлакача за обраду дубоким извлачењем са стањењем дебљине зида, мора да задовољи строге захтеве који се при њиховом конструисању постављају. Захтеви се, пре свега, односе на високу тачност елемената алата и повишену отпорност на хабање, што би, у великој мери, продужило експлоатациони период алата.

На основу детаљне анализе алатних челика, која је у раду извршена, за израду поменутих елемената алата одабран је челик Č4150. Поменути челик спада у групу висококвалитетних алатних челика са високом отпорношћу према хабању и најчешће се испоручује у меко жареном стању. У циљу постизања потребних механичких карактеристика, које изискује примена овог челика за обраду у хладном стању, дефинисани су параметри каљења и отпуштања као и потребна опрема за извођење процеса наведених термичких обрада. Након каљења и отпуштања, уз поштовање дефинисаних параметара, очекује се да елементи алата имају високу димензиону тачност и релативно високу тврдоћу од око 660 HV.

Често се при изради алата примењују и разне хемисјко-термичке обраде које су у раду разматране. Акценат је стављен на јонско нитрирање и тврдо хромирање као процесе који би могли да доведу до постизања изузетно високих тврдоћа површинских слојева и достизању потребних триболошких и механичких карактеристика елемената алата.

У случају јонског нитрирања, најпре је извршена детаљна анализа групе специјалних челика за нитрирање, након чега су дефинисани параметри и ток извођења процеса јонског нитрирања. Приказан је изглед потребне опреме и структура нитрираног слоја на челику Č4735. Очекивана, минимална, тврдоћа нитрираног слоја је 850 HV.

Превлака тврдог хрома наноси се галванским путем, тј. коришћењем опреме која је у раду детаљно описана. Такође, дефинисан је састав електролита и остали параметри тврдог хромирања који би обезбедили добијање функционалне превлаке тврдоће од око 1200 HV.

Сваки од наведених поступака израде елемената алата има своје предности и недостатке који се пре свега односе на крајњи постављени критеријум израде. Уколико се жели да се елементи алата израде брзо и уз минималне трошкове, онда је први случај израде (каљење + отпуштање) најповољнији. Челик Č4150 са својим физичким, механичким и структурним особинама, као и високим процентуалним садржајем карбида, апсолутно одговара свим постављеним критеријумима (висока отпорност на хабање, димензиона постојаност, цена). Уколико је крајњи циљ израда квалитетног алата са још бољим, експлоатационим и свим осталим, карактеристикама онда се процес израде алата знатно компликује јер је поред примене каљења и отпуштања потребно извршити јонско нитрирање односно, тврдо хромирање. У раду је учињен покушај да се укаже на све предности и недостатке који се јављају приликом примене ова два вида хемијско-термичке обраде а као крајњи закључак се намеће чињеница да елементи алата са слојем тврдог хрома имају најбоље триболошке, механичке и конструктивне карактеристике. Посебна погодност која иде у прилог тврдом хромирању јесте могућност репарације тј. поправке превлаке тврдог хрома што доноси низ конструктивних и економских предности. Уколико се разматрају само трошкови поменутих хемијско-термичких обрада, онда је блага предност на страни процеса јонског нитрирања.

12. ЛИТЕРАТУРА

- [1] **Јовановић М., Адамовић Д. и други:** *Машински материјали*, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
- [2] **Видојевић Н.:** *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1973.
- [3] **Пантелић И.:** *Технологија термичке обраде челика – I део*, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.
- [4] **Пантелић И.:** *Технологија термичке обраде челика – II део*, Раднички универзитет „Радивој Ћирпанов“, Нови Сад, 1974.
- [5] *Копирани материјали и материјали у електронском облику*
- [6] **Ђорђевић В.:** *Машински материјали – први део*, Машински факултет, Београд, 1999.
- [7] *Термичка обрада метала – Металбиро*, Загреб 1971.
- [8] **Ђукић В., Недић Б.:** *Алатни челици*, Научна књига, Београд, 1990.
- [9] **Ђорђевић С.:** *Металне превлаке*, Техничка књига, Београд, 1970.
- [10] www.koposteel.com (приступљено: фебруар 2013)
- [11] **Александровић С., Стефановић М.:** *Технологија пластичног обликовања метала*, Машински факултет, Крагујевац, 2010.
- [12] **Терзић П.:** *Испитивање материјала*, Институт за испитивање материјала, Београд, 1972.
- [13] <http://www.planit.rs> (приступљено: мај 2013)
- [14] <http://www.metalac-cacak.co.rs> (приступљено: мај 2013)
- [15] www.fsb.unizg.hr (приступљено: фебруар 2013)
- [16] www.tribology.fink.rs (приступљено: фебруар 2013)
- [17] **Какаш Д.:** *Инжењерство површина – вежбе*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [18] **Кожух С.:** *Специјални челици – скрипта*, Металуршки факултет, Загреб, 2010.
- [19] **Jyh-Wei Lee, Jenq-Gong Duh:** *Evaluation of microstructures and mechanical properties of chromized steels with different carbon contents*, Department of Materials Science and Engineering, Hsinchu, Taiwan, 2004.
- [20] **Yang M.:** *Nitriding – fundamentals, modeling and process optimization*, Dissertation, Worchester polytechnic institute, 2012.
- [21] **Altan T.:** *Selection of die materials and surface treatments for increasing die life in hot and warm forging*, ERC for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, USA.
- [22] <http://www.uk-finishing.org.uk/N-COAT70/nitriding.htm> (приступљено: јун 2013)
- [23] http://www.journalamme.org/papers_amme06/1253.pdf (приступљено: мај 2013)
- [23] **Стефановић С.:** *Машински материјали*, Висока школа примењених струковних студија, Врање, 2009.