

Факултет инжењерских наука Универзитет у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Термичка обрада

Број индекса: 425/2018

Милош М. Делић

Термичка обрада алатних челика

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану

1. Проф. др Драган Адамовић – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Тема рада: ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТНИХ ЧЕЛИКА

Задатак: У оквиру овог мастер рада студент треба да да основне поставке о различитим врстама алатних челика и њиховим особинама. Затим описати различите врсте термичких обрада које се изводе код алатних челика. За конкретан алатни челик или групу алатних челика прописати одговарајућу термичку обраду. Извршити поређење особина анализираних челика пре и после термичке обраде. На крају дати преглед коришћене литературе и закључна разматрања.

Оријентациони садржај рада:

1. Увод
2. Алатни челици
3. Термичка обрада алатних челика
4. Експериментална испитивања и дискусија
5. Закључак
6. Литература

Препоручена литература:

- [1]. George Roberts, George Krauss, Richard Kennedy.: Tool Steels 5th Edition, (1998)
- [2]. Rafael A. Mesquita.: Tool steels Properties and Performance, 6000 Broken Sound Parkway NW, (2017)
- [3]. Видојевић Н.: Термичка обрада метала, Технолошко-металуршки факултет у Београду, 1973.
- [4]. Пантелић И.: Технологија термичке обраде челика, Машински факултет у Новом Саду, 1974.
- [5]. Габрић И, Шитић С.: Материјали II, Свеучилиште у Сплиту, 2015.
- [6]. Јовановић М, Адамовић Д, Лазић В, Ратковић Н.: Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.

Крагујевац, 28.04.2020

Ментор:

Проф. др Драган Адамовић

Резиме: У оквиру рада извршено је прикупљање, систематизација и анализа знања везаних за термичку обраду алатних челика. Описане су врсте алатних челика, као и начини њихове термичке обраде. Основни принципи који представљају суштину поступка термичке обраде алатних челика које је неопходно применити описани су детаљно. Посебна пажња је посвећена експерименту и његовим резултатима.

Кључне речи: алатни челици, каљење, отпуштање, аустенизација, хлађење

Abstract: Within the work, the collection, systematization and analysis of knowledge related to heat treatment of tool steels was performed. The types of tool steels are described, as well as the methods of their heat treatment. The basic principles that represent the essence of the process of heat treatment of tool steels that need to be applied are described in detail. Special attention is paid to the experiment and its results.

Key words: tool steels, hardening, tempering, austenization, cooling

Садржај

1. УВОД	1
1.1 Историјски развој алатних челика	1
2. АЛАТНИ ЧЕЛИЦИ	3
2.1 Класификација и општи захтеви од алатних челика	3
2.2 Основна својства алатних челика	5
2.2.1 Механичка својства	5
2.2.2 Технолошка својства	5
2.2.3 Структурна својства	5
2.3 Утицај легирајућих елемената на својства алатних челика	6
2.4 Производња и прерада алатних челика	8
2.5 Нелегирани (угљенични) алатни челици	13
2.6 Легирани алатни челици	14
2.6.1 Нисколегоирани алатни челици за хладан рад	14
2.6.2 Високолегирани алатни челици за хладан рад	15
2.6.3 Алатни челици за топли рад	16
2.6.4 Брзорезни алатни челици	18
2.6.5 Синтеровани алатни челици	19
3. ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТНИХ ЧЕЛИКА	21
3.1 Принципи термичке обраде алатних челика	21
3.2 Практични аспекти термичке обраде алатних челика	23
3.3 Термичка обрада нелегираних алатних челика	29
3.4 Термичка обрада алатних челика за хладан рад	33
3.4 Термичка обрада алатних челика за топао рад	36
3.5 Термичка обрада брзорезних алатних челика	41
3.7 Термичка обрада синтерованих алатних челика	47
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И ДИСКУСИЈА	49
4.1 Концепција, циљ и планирање експерименталних испитивања	49
4.2 Експериментална опрема и уређаји	50
4.3 Средства за хлађење	52
4.4 Узорци за испитивање	54
4.5 Режији термичке обраде	58
4.6 Резултати експерименталних испитивања	65
5. ЗАКЉУЧАК	79
6. Литература	81

УВОД

Алатни челици су специјална врста челика који се претежно користе за израду алата за резање и деформисање. Није могуће тачно дефинисати шта су алатни челици због великих разлика које постоје у њиховим структурама, хемијском саставу и примени. Алатни челици могу бити: угљенични, нисколегирани челици за хладан рад, високолегирани за хладан рад, челици за топао рад, брзорезни челици и синтеровани челици. Према хемијској структури алатни челици се међусобно много разликују, па се на основу хемијског састава не могу дефинисати. Према многим ауторима алатни челици се дефинишу кроз три особине челика, као челици који су погодни за термичку обраду, као челици који се добијају специјалним поступцима и челици који се користе за израду разних врста алата. Сви алатни челици се могу термички обрадити, заједничко за све алатне челике је да се могу калити и високо отпуштати чиме се могу побољшати њихове структурне, механичке и технолошке особине. Алатни челици су једини челици који могу да секу сами себе, након термичке обраде побољшања алатни челици могу да секу исту врсту челика којој припадају, нарочито ако је обрађивани челик у жареном стању. Друга особина која дефинише алатне челике је процес њиховог добијања. Алатни челици се производе у знатно мањим количинама у односу на друге врсте челика. Мање количине произведених алатних челика су последица специјалних метода њиховог добијања. Алатни челици се производе уз велике мере контроле како би се осигурао њихов тачан хемијски састав како би ти челици били адекватни за послове за које су намењени. Производња алатних челика се изводи у електро пећима које су погодне за лакшу контролу температуре у току процеса добијања челика. Последња особина којом се дефинишу алатни челици је њихова примена, ови челици се користе за израду алата који се користе у условима високих оптерећења и високих температура чак до 1200°C, па морају да поседују знатно боље особине од обичних челика.

1.1 Историјски развој алатних челика

Алатни челици данас представљају врхунац развоја металургије, и чине незаменљиви део многих обрадних процеса. Широка примена алатних челика је почела тек у 20. веку, пре тога алатни челици су коришћени изузетно ретко.

Историјски употреба првих челика почиње неких 5000 година п.н.е. када је од метеоритског гвожђа почела израда примитивних средстава за лов. Како би се метеоритско гвожђе обиковало било га је потребно загрејати, једини извор топлоте у то време је била ватра. У току загревања на ватри долази до контакта са угљеником и на тај начин је настао први алат израђен од челика.

Алатни челици настају у другој половини 19. века, али археолошки налази показују да су у одређеним деловима света алатни челици користили и много раније. Најстарији археолошки налази потичу из Кине и Јапана, где су пронађени алати настали у 13. веку п.н.е. Нађени предмети су неке врсте алата израђени од челика који су каљени и хлађени у води. Битан доказ коришћења алатних челика су катане, мачеви јапанских самураја које су израђене неких 900. година. п.н.е. Анализе су показале да су се ови мачеви производили од нискоугљеничних и високоугљеничних челика, а да су у процесу

обликовања били ковани и каљени. Поред Кине и Јапана битни докази о постојању неке врсте алатних челика долазе са блиског истока из данашње Сирије и са Индијског подконтинента, то су Дамаски челик и Вутз челик. Ови челици су имали знатно боље карактеристике од осталих примитивних челика, боље карактеристике нису последица процеса производње, већ хемијског састава руда које су коришћене у производњи, а нарочито позитиван утицај на квалитет ових челика има присуство молибдена и волфрама [1].

1740. године британски произвођач опруга и сатова Бенџамин Хантсмен почиње производњу челика поступком који доста личи на процес добијања Дамаског челика. Џулијус Баур 1865. године проналази начин легирања челика хромом. Британски металург Роберт Форестер Машет 1868. године проналази машет челик који је претеча данашњих брзорезних челика. Овај челик је садржао 2% угљеника, 2.5% мангана и 7% волфрама. Главна карактеристика овог челика је способност отврдњавања и ојачања приликом хлађења на ваздуху. 1898. године Фридрих Тејлор и Мануел Вајт су извели низ експеримената где су термички обрађивали велики број челика. Ове челике су загревали на температуре које су знатно више од температура на које су се ти челици раније загревали и хладили их на ваздуху. Резултати ових експеримената представљају прекретницу у производњи брзорезних челика. Челици који су термички обрађени на овај начин су имали способност да задрже своју тврдоћу на много вишим температурама. Способност задржавања тврдоће при повишеним температурама представља једну од основних карактеристика брзорезних челика [1].

1910. године је произведена прва легура која је класификована као брзорезни челик, овај челик је произведен у Америци и према AISI систему означавања челика носи ознаку T1. Такође, исте године у Америци почиње развој алатног челика за топли рад који је лигиран вофлрамом. 1912. године почиње развој мартензитних нерђајућих челика. Даљи развој челика је био везан за светске ратове, 1920. године настаје 12 нових врста алатних челика. Након Другог светског рата се за производњу брзорезних челика уводи молибден уместо скупљег волфрама. Увођење молибдена у састав брзорезних челика довело је до стварања два типа легура, са ознаком М су означавани молибденски брзорезни челици, а са ознаком Т су означавани волфрамови брзорезни челици. Процес добијања алатних челика металургијом праха почиње да се користи 1970. године, исте године почиње и примена хемијског и физичког депоновања превлака на површину алатних челика. 1973. године произведен је брзорезни челик са повећаним садржајем силицијума ознаке M7, овакав приступ изради алатних челика је знатно повећао тврдоћу. 1980. године почиње производња серије алатних челика који у себи не садрже кобалт. 1982. године почиње производња алатних челика легираних алуминијумом [1].

2. АЛАТНИ ЧЕЛИЦИ

Као што им само име каже, алатни челици су намењени за израду разних врста алата. За све типове алата се тражи да поседују велику тврдоћу, жилавост, отпорност на хабање и димензиону стабилност. Специфично за ову групу челика је то да им се хемијски састав међусобно доста разликује и да припадност групи алатних челика не зависи само од хемијског састава челика. Поред овога, сви алатни челици су погодни за извођење термичке обраде. Подвргавањем алатних челика процесу термичке обраде каљења и високог отпуштања постижу се знатно боље механичке карактеристике. Добре механичке карактеристике су главни услов добрих технолошких карактеристика алата израђених од алатних челика.

2.1 Класификација и општи захтеви од алатних челика

Класификација алатних челика се може извршити на више начина, један од основних начина класификације алатних челика је према температурском опсегу коришћења. Према овој подели постоје алатни челици намењени за хладни рад и алатни челици намењени за топао рад. Разлика између ове две подгрупе алатних челика је у температурском интервалу коришћења који дели алатне челике на оне који се користе на температурама испод 200°C и на оне који се користе изнад наведене температуре. Поред наведених подгрупа челика групи алатних челика припадају још и брзорезни челици и синтеровани челици.

Поред ове поделе постоји и подела према AISI стандарду, AISI (American Iron and Steel Institute) је амерички институт за гвожђе и челик који се бави израдом и регулациом стандарда везаних за челик.

Табела 2.1. Класификација алатних челика према AISI стандарду [1]

Врста	AISI–SAE ознака	Значење карактеристике
Отврдњавање у води	W	Каљење у води
Алатни челик за хладни рад (< 200 °C)	O	Каљење у уљу
	A	Каљење на ваздуху
	D	Висок садржај С, висок садржај Cr
Отпорни на ударе	S	
Брзорезни челици	T	На бази волфрама
	M	На бази молибдена
Алатни челик за топли рад (> 200 °C)	H	H1-H19: на бази Cr H20-H39: на бази W H40-H59: на бази Mo
Челици за израду калупа за ињекционо бризгање пластике	P	P1 -P19: нискоугљенични P20-P39: остали

Табела 2.2 Класификација алатних челика према светским стандардима

AISI	Бројна ознака EN	Словна ознака EN	DIN	JUS
Угљенични алатни челици				
W1	1.1545	C105U	C105W1	Č1940
W2	1.2833	/	100V1	Č1941
W3	1.3505	100Cr6	100Cr6	Č4146
Нисколегирани алатни челици за хладан рад				
O1	1.2510	95MnWCr5	100MnCrW4	/
O2	1.2841	/	90MnCrV8	Č3840
Високо легирани алатни челици за хладан рад са 5% хрома				
A2	1.2363	X100CrMoV5	X100CrMoV5	Č4756
Високолегирани алатни челици за хладан рад са 12% хрома				
D2	1.2379	X153CrMoV12	X155CrVMo12	Č4850
D3	1.2080	X210Cr12	X210Cr12	Č4150
Алатни челици за топао рад легирани хромом				
H10	1.2365	/	32CrMoV12-28	Č7450
H11	1.2343	X37CrMoV5-1	X38CrMoV5-1	Č4751
H12	1.2605	/	X35CrWMoV5	/
H13	1.2344	X40CrMoV5-1	/	Č4753
Алатни челици за топао рад легирани волфрамом				
H21	1.2581	/	X30WCrV9-3	Č6451
Брзорезни челици легирани молибденом				
M1	1.3346	HS2-9-1	S2-9-1	Č7880
M2	1.3343	HS6-5-2	S6-5-2	Č7680
M33	1.3249	HS2-9-2-8	S2-9-2-8	/
M34	/	/	/	/
M35	1.3243	HS6-5-2-5	S6-2-5	Č9780
M42	1.3247	/	/	/
Брзорезни челици легирани вилфрамом				
T1	1.3355	/	HS18-0-1	Č6880
T4	1.3255	/	S18-1-2-5	Č6980
T5	1.3265	HS18-1-2-10	S18-1-2-10	Č9682
T15	1.3202	HS12-1-4-5	S12-1-4-5	Č9681

Класификација алатних челика према AISI стандарду је најраширенија у свету, међутим на бази ове поделе може се исказати још једна подела заснована на примени и хемијском саставу челика [6]:

- Класа W алатних челика према AISI стандарду представља групу угљеничних алатних челика;
- Класа O алатних челика према AISI стандарду представља групу нисколегираних алатних челика за хладан рад;
- Класа A алатних челика према AISI стандарду представља групу високолегираних алатних челика за хладан рад са садржајем хрома од 5%;
- Класа D алатних челика према AISI стандарду представља групу високолегираних алатних челика за хладан рад са садржајем хрома од 12%;

- Класа Т алатних челика према AISI стандарду представља групу брзореzних алатних челика код којих је главни легирајући елемент волфрам;
- Класа М алатних челика према AISI стандарду представља групу брзореzних алатних челика код којих је главни легирајући елемент молибден;
- Класа Н алатних челика према AISI стандарду представља групу алатних челика за топао рад.

Алатни челици морају да испуњавају све карактеристике засноване на намени челика. Алатни челици за топао рад морају да буду постојани на високим температурама како би испунили функцију циља за који су намењени. Главна особина коју сви алатни челици треба да поседују је њихова термичка обрадивост. Сви алатни челици морају бити каљиви како би се могао обавити поступак побољшања. На тај начин се у многоме могу побољшати физичке и механичке карактеристике челика. Успешним поступком термичке обраде може се остварити некад незамисливо, да се за обраду једног челика користи алат израђен од истог материјала.

2.2 Основна својства алатних челика

Особине алатних челика се у великој мери разликују од осталих челика, разлог разлике особина су другачија механичка, технолошка и структурна својства. Све поменуте разлике су последица другачије структуре алатних челика.

2.2.1 Механичка својства

Све врсте алатних челика се термички обрађују, нарочито је честа термичка обрада каљења и побољшања. Оваквим поступцима се добијају делови од алатних челика који поседују високе вредности тврдоће, као и добре особине чврстоће. Високе вредности тврдоће су веома повољне за процесе у којим се од алата захтева отпорност на хабање. Добра отпорност на хабање је један од основних захтева приликом израде разних алата.

2.2.2 Технолошка својства

Алатни челици су једина група челика од којих се израђују алати који након термичке обраде могу да обрађује свој основни материјал. Алатни челици су пре термичке обраде релативно повољни за све врсте механичке обраде. Могу се резати или деформисати, док је заваривање отежано. Технолошка особина која карактерише све алатне челике је могућност термичке обраде. Након термичке обраде алатни челици више нису пободни за обраду резањем или деформисањем. Једина могућност механичке обраде је обрада брушењем.

2.2.3 Структурна својства

Са хемијског аспекта алатни челици имају знатно другачиси састав од других врста челика. Другачији хемијски састав доприноси стварању другачијих структура челика, пре свега карбида легирајућих елемената који се у великој мери разликују од карбида гвожђа. Након каљења алатних челика зависно од њиховог хемијског састава и врсте термичке обраде њихову структуру могу чинити: мартензит, карбиди гвожђа и легирајућих елемената, заостали аустенит, бејнит и перлит. Присуство бејнита и перлита је знак лоше изведене термичке обраде алатних челика. Велика тврдоћа алатних челика је последица мартензитне структуре и присуства карбида, нарочито карбида легирајућих

елемената. Од алатних челика за топао рад и брзорезних алатних челика се поред високих вредности тврдоће на нижим температурама очекује да ту тврдоћу задржи и на вишим температурама. Овакве особине поменути алатни челици поседују због високог садржаја легирајућих елемената који формирају карбиде са високом отпорношћу на пад тврдоће на повишеним температура.

2.3 Утицај легирајућих елемената на својства алатних челика

Особине челика зависе од његовог хемијског састава, хемијски састав челика није могуће значајније променити по завршетку процеса његове производње. У челику се поред гвожђа и угљеника налазе и други елементи, то су примесе и легирајући елементи.

Са дијаграма метастабилног стања челика може се закључити да са порастом количине угљеника у челику долази до промене структуре челика, од феритне ка перлитно-цементитној. На основу претходног се може закључити да механичка својства, нарочито код угљеничних челика зависе од садржаја угљеника.

Осим угљеника као саставног хемијског елемента у челику се могу наћи и други хемијски елементи попут силицијума, мангана, алуминијума, азота, сумпора, фосфора.

Примесе у челику могу бити пратеће, скривене и случајне.

У пратеће примесе спадају хемијски елементи који се налазе у саставу челика, а њихово присуство је последица процеса производње челика. Пратеће примесе најчешће значајније не мењају физичке и механичке особине. Промене ових особина пратећим примесима су најчешће негативне али понекад могу бити и позитивне. Најчешће пратеће примесе су силицијум, манган, сумпор, фосфор и алуминијум. Сумпор као примеса челика је веома штетан по физичке и механичке особине челика. Растворљивост сумпора у гвожђу је мала, али и веома мали садржај сумпора доводи до образовања штетног сулфида гвожђа. Присуство сумпора у челику често доводи до кртог лома, овакав лом изазван присуством сумпора се назива црвени лом. У одређеним ситуацијама присуство сумпора у челику може бити и корисно, његово присуство је корисно у челицима за аутомате јер ствара крту и ломљиву струготину. Поред сумпора штетан утицај на челике има и фосфор који гради фосфате који негативно утичу на деформабилност челика, нарочито у хладном стању. Манган и силицијум повећавају чврстоћу челика, али у исто време смањују његову пластичност и жилавост. Повољан утицај присуства алуминијума у челику се огледа кроз уситњавање металног зрна, а негативан утицај се везује за присуство оксида алуминијума нарочито Al_2O_3 .

Скривене примесе у челику су они хемијски елементи који улазе у састав челика док је у течном стању. Растоп челика у контакту са ваздухом поприма у одређеној мери гасове из ваздуха, најчешће азот, кисеоник и воденик. Кисеоник се у челику налази у облику разних оксида који неповољно утичу на карактеристике челика. У челику азот образује нитриде који повећавају тврдоћу, али смањују жилавост, па неповољно утичу на особине челика. Водоник је штетна примеса у челицима, водоник ствара поре које после ковања или ваљања постају прслине [6].

Легирајући елементи су они хемијски елементи који се свесно додају челику како би се побољшале неке његове особине. Сви легирајући елементи не доприносе подједнако променама особина челика, легирајући елементи позитивно утичу на део особина челика,

а негативно на друге особине. Процес адекватног легирања челика се заснива на доброј анализи потребних физичких и механичких особина жељеног челика и схватања негативног утицаја одабраних хемијских елемената.

Према броју легирајућих елемената челици се деле на једноструко и вишеструко легиране. Према укупном садржају легирајућих елемената челици се дела на:

- Нисколегиране челике који садрже мање од 5% легирајућих елемената;
- Високолегиране челике који садрже више од 5% легирајућих елемената.

Нисколегирани челици имају исту структуру и сличне особине као нелегирани угљенични челици. Неке особине ових челика побољшавају легирајући елементи који се у челику налазе у малим количинама. Предности нисколегираних челика у односу на угљеничне су већа чврстоћа на повишеним температурама, већа жилавост при истој чврстоћи и мања склоност ка стварању прелина. Специјална својсва по којима се високолегирани челици разликују од нисколегираних су ватроотпорност, отпорност на хабање, способност резања при високим температурама корозиона постојаност.

Сваки хемијски елемент који улази у састав челика има границу садржаја који одваја хемијске елементе који су примесе челика и хемијске елементе који су легирајући елементи. У табели 2.2 су приказани минимални садржаји хемијских елемената у челику да би били легирајући елементи.

Табела 2.3 Минимални садржаји легирајућих елемената у челику [1]

Елемент	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Co	Ti	Cu	Ni	Al
Мин. садржај(%)	0.6	0.8	0.3	0.1	0.08	0.01	0.1	0.05	0.4	0.3	0.1

Табела 2.4 Облик присуства легирајућих елемената у челику [6]

Елемент	Чврсти раствор	Легирани елементи	Карбиди	Једињење	Елементарно стање
Никл	Ni			Ni_3Al	
Силицијум	Si			$SiO_2M_xO_y$	
Манган	Mn	$(Fe, Mn)_3C$		$MnS, MnOSiO_2$	
Хром	Cr	$(Fe, Cr)_3C$	$Cr_{17}C_3, Cr_{23}C_6$		
Молибден	Mo		Mo_2C		
Волфрам	W		W_2C		
Ванадијум	V		VC		
Титан	Ti		TiC		
Ниобијум	Nb		NbC		
Алуминијум	Al			Al_2O_3, AlN	
Олово					Pb

Легирајући елементи у челику могу да:

- се растварају у α и γ гвожђу и стварају чврсти раствор;
- стварају сопствене карбиде или се растварају у цементиту;
- стварају интерметална једињења или једињења са неметалима;
- буду у елементарном облику.

Присуство различитих легирајућих елемената на различите начине утиче на челик. Хемијски елементи утичу на следећи начин [6], [3]:

- са повећањем садржаја *мангана* повећавају се затезна чврстоћа и тврдоћа, у мањој мери и напон течјења, док се жилавост смањује;
- са повећањем садржаја *силицијума* повећавају се напон течјења и затезна чврстоћа, а смањују се деформабилност и жилавост;
- са садржајем *хрома* до 5% у челику се повећавају затезна чврстоћа, напон течјења и деформабилност, а изнад тог садржаја ова својства опадају. Садржај хрома изнад 1% у челику доводи до пада жилавости, а са повећањем садржаја хрома у челику повећавају се и отпорност према оксидацији на повишеним температурама и отпорност према корозији;
- до садржаја од 10% *никла* у челику повећавају се напон течјења и затезна чврстоћа, а незнатно се смањује деформабилност. Никл има изузетно повољан утицај на деформабилност челика у хладном стању;
- *молибден, ванадијум и волфрам* као легирајући елементи имају сличан утицај који се огледа кроз повећање напона течјења, затезне чврстоће и тврдоће, уз смањење жилавости. Такође, ови елементи поправљају механичке особине челика на повишеним температурама, као и отпорност према корозији;
- мала количина *алуминијума* у челику повећава затезну чврстоћу, али смањује пластичност и жилавост. Хром, силицијум и алуминијум повећавају отпорност челика према оксидацији на повишеним температурама;
- са повећањем садржаја *бакра* повећавају се затезна чврстоћа и напон течјења, као и отпорност према атмосферској корозији и корозији коју проузрокује морска вода, али битно смањује жилавост;
- *олово* повећава кртост струготине, па се користи код челика за аутомате.

2.4 Производња и прерада алатних челика

Процес производње алатних челика се у великој мери разликује од процеса производње других врста челика. Разлог ове разлике у производњи лежи у чињеници да алатни челици имају другачији хемијски састав, који се мора постићи у изузетно уским толеранцијама. Алатни челици се могу произвести на два начина: конвенционалним поступком и металургијом праха.

Конвенционални поступак добијања алатних челика се састоји из три фазе: топљења полазног материјала у који спадају и отпадни челици за рециклажу, рафинације истопљеног челика и ливења истопљеног и рафинисаног челика у калупе. Топљење челика се обавља у електролучним пећима које су једине пећи које се могу користити у модерној производњи алатних челика. Електролучне пећи у производњи алатних челика имају искључиво улогу топљења полазног материјала без утицаја на крајњи хемијски

састав излазног материјала. Као полазни материјал користи се челик који има хемијски састав сличан хемијском саставу материјала који се добија и коме се додаје челични отпад. Овај отпад такође треба да има што је могуће сличнији хемијски састав излазном материјалу. Електролучна пећ поседује три електроде које топе полазни материјал, на слици 2.1 приказана је електролучна пећ са електродама [1].



Слика 2.1 Електролучна пећ [1]

Топљење челика у електролучним пећима са металуршког аспекта се састоји од фазе оксидације, фазе оксидације угљеника и других елемената као што су силицијум и магнезијум, како би хемијски састав био константан. Електролучне пећи су пројектоване за еколошки чисту производњу и економичан рад. Економичан рад се нарочито односи на уштеду легирајућих елемената као што су хром, молибден, ванадијум и волфрам. Приликом избора полазног материјала треба избегавати материјале који у садрже веће количине бакра, никла и калаја, ови елементи нису подложни оксидацији па их није могуће одстранити у каснијем процесу оксидације. Постоји више фактора који могу утицати на процес топљења челика[1]:

- Хемијски састав полазног челика;
- Крајњи садржај скупих елемената као што су: хром, молибден и волфрам;
- Густина полазног челика.

Да би се постигао висок садржај хрома растопу челика се додају легуре гвожђа са високим садржајем хрома у комбинацији са отпадним челиком са високим садржајем хрома. Густина отпадног челика који се додаје растопу утиче на потрошњу енергије у електричном луку у току топљења. Густина отпада може да варира од 0.7 t/m^3 до 2 t/m^3 . Такође, поред густине делова који се топе на потрошњу енергије утиче и њихова величина. Из ових разлога је најповољније у електролучној пећи топити отпадне челике мале густине и у малим комадима. Топљење малих комада често није могуће, разлог томе

је чињеница да добар део отпада долази из самих топионица, најчешће се користе лоше изливени инготи, слабови и блумови, док се ређе користе шипкасти и плочасти материјали [1].

У процесу производње алатних челика битну улогу у току рафинације има троска која настаје током топљења полазног материјала. Могућност настајања пенушаве троске зависи од односа CaO/SiO_2 који треба да буде у опсегу од 2-10%, битну улогу има и садржај FeO . На слици 2.2 је приказан тернарни дијаграм пенушавости троске и са њега се може уочити да висок садржај оксида хрома у истопљеном челику лоше утиче на његову вискозност и генерише пену која није у оптималном делу дијаграма. Оксид хрома поседује висок афинитет према кисеонику, па је изизетно непожељан у процесу производње алатних челика [1].



Слика 2.2 Квалитативни трокраки дијаграм пенушавости троскев [1]

Ако се поменути елементи од којих зависи формирање пенушаве троске не налазе у одређеној равнотежи долази до формирања чврсте троске са високом вискозношћу и ниском тачком топљења, што доводи до ниског капацитета настајања пене и мале ефикасности легирајућих додатака.

Други процес у поступку израде алатних челика је рафинација и легирање. Овај поступак почиње након потпуног топљења сировине у електролучној пећи. Када се сировина истопи и настане хомогена смеша почиње рафинација. Процес рафинације се обавља помоћу специјалне врсте ливачког лонца и уређаја за вакуумско уклањање гасова.

Рафинација почиње пресицањем истопљеног челика из електролучне пећи у специјални ливачки лонац. У току пресицања долази до примарне дезоксидације истопљеног челика. Секундарни процес рафинације се одвија у ливачком лонцу применом угљеника, а затим и алуминијума.

Након завршеног поступка рафинације и легирања истопљеног челика приступа се процесу изливања челика у инготе разних облика, тежина и димензија. Ливени инготи се могу поделити на [1]:

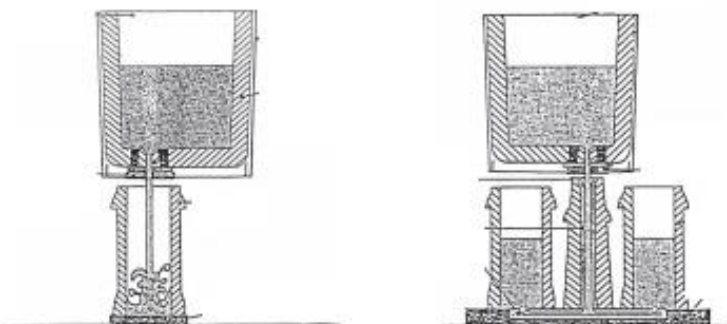
- Мале инготе до 5 тона, који се користе за топло обликовање ваљањем;
- Велике инготе до 100 тона, који се кују до жељених димензија.

Облик и величина ингота може бити различит, најчешће се користе инготи [1]:

- Квадратног или правоугаоног попречног пресека који се даље обрађују ваљањем;
- Осмоугаони и вишеугаони попречни пресеци који се даље обрађују ковањем;
- Кружног попречног пресека који се користе за израду цеви и електрода за електролучне пећи.

Главни параметар конструкције ливачког калупа за ливење ингота је однос висине и пречника или ширине калупа. Овај однос има посебну важност код легираних челика, нарочито код алатних. Са аспекта сегрегације штетних елемената облик има пресудан значај за добијање одливака задовољавајућег квалитета [1].

Постоје два поступка изливања ингота, ливење са горње стране и ливење са доње стране. У процесу ливења ингота са горње стране калуп за ливење ингота се пуни одозго без икакве додатне опреме. Због прскања током ливења долази до контакта између зидова калупа и течног метала, па након отврдњавања површина ингота најчешће није глатка. Такође, у поступку ливења ингота са горње стране због контакта са ваздухом може доћи од поновне оксидације. Због могућности појаве поновне оксидације инготи алатних челика се не лију поступком ливења са горње стране [1].



Слика 2.3 Схематски приказ ливења ингота (са горње стране-лево, са доње стране-десно) [1]

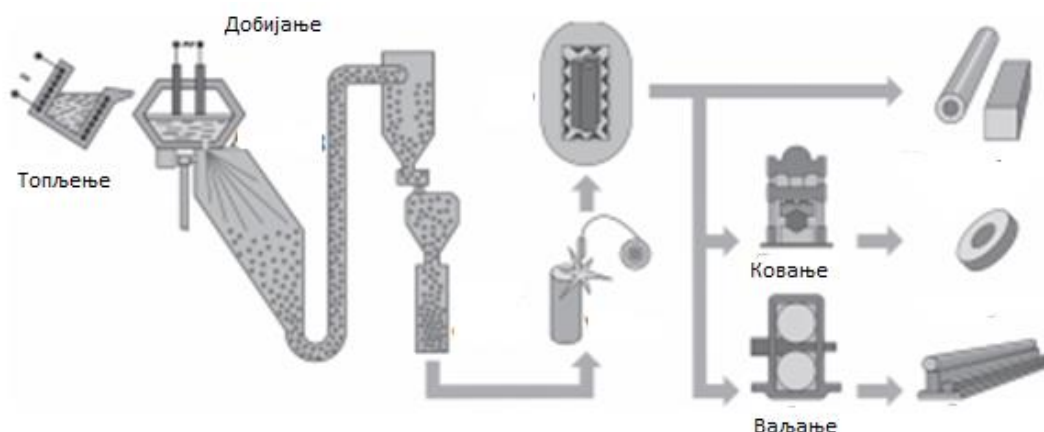
У поступку ливења ингота са доње стране течни челик се сипа са доње стране у ливачки калуп, па изливени ингот има глатке површине због одсуства поновне оксидације. Ливењем ингота са доње стране се могу излити инготи тежине од 0.5 до 100 тона који су намењени за даљу обраду ваљањем и ковањем. Овим поступком се одједном може изливати више калупа [1].

Да би се постигао бољи квалитет изливеног ингота потребно је контролисати реакцију течног метала и ватросталног материјала калупа као и брзину ливења која треба да буде константна. Ватростални материјали калупа треба да буду израђени од квалитетног материјала, најбоље је користити керамику са преко 60% Al_2O_3 . Брзина ливења у овом поступку треба да буде спора и константна како би течни челик полако испуњавао

калупну шупљину и површина течног лива у калупу треба да буде покривена ливачим прахом како би се спречио контакт лива и ваздуха [1].

У новије време металургија праха све више потискује конвенционални начин производње алатних челика, нарочито у производњи алатних челика за хладан рад и брзорезних челика. Алатни челици добијени применом технологије металургије праха у односу на алатне челике добијене конвенционалним поступцима поседују знатно боље карактеристике чврстоће, деформабилности и знатно су отпорнији на хабање. Разлог ових предности лежи у структури добијених материјала, алатни челици добијени технологијом металургије праха поседују рафинисану структуру која је у потпуности хомогена. Технологија производње алатних челика поступком металургије праха омогућује производњу широког спектра материјала, и овим поступком се знатно лакше могу производити нове врсте материјала различитих хемијских структура. У овом поступку сегрегација је елиминисана због велике брзине отврдњавања добијених челика. Структура оваквих челика је хомогена и сачињена од финих и ситних зрна [2].

Основа металургије праха је добијање полазног материјала у облику праха приближно лоптастог облика. Овај прах се добија из загрејаног легираног растопа челика који се у прах претвара гасним процесом. Прах се сакупља у специјалне металне контејнере, загрева до температуре погодне за топло ковање и затим пребацује у калупе у којима се подвргава великом притиску и високим температурама. У већини случајева добијени билети се ваљају или кују док се не добију шипке разних димензија [2].



Слика 2.4 Схематски приказ добијања алатних челика синтерованом [1]

Прва генерација челика добијених поступком металургије праха је показала знатне предности у односу на челике добијене конвенционалним поступцима, али и мане које се највише односе на неметалне укључке. Неметални укључци у оваквим челицима су величине $5-15\mu m$, а карбиди $2-4\mu m$, што показује да главни изазивачи дефеката у структури овако добијених челика нису карбиди већ неметални укључци. У другој и трећој генерацији поступака добијања челика металургијом праха су овакви дефекти у највећој мери одстрањени.

Након израде алатних челика једним од наведених поступака, након потпуног отврдњавања почиње даља обрада чији је циљ добијање материјала разних облика и димензија. Обликовање се обавља у топлом стању, најчешће ваљањем и ковањем. Ковање у топлом стању као начин обликовања се најчешће користи за израду комада великих

попречних пресека. Ковање се обавља на ковачким чекицима или ковачким пресама. Предност ковачких преса лежи у чињеници да ковачке пресе обликују обрађивани део по целој његовој дужини, док ковачки чекићи могу само парцијално. Топло ваљање се користи за израду дугих и равних производа као што су челичне плоче и лимова тањих од 10 mm. Због постојања више врста полупроизвода који се добијају ваљањем постоје и различити типови ваљака специјализованих за уску област полупроизвода [1].

2.5 Нелегирани (угљенични) алатни челици

Нелегирани алатни челици у свом саставу имају веома мали проценат легирајућих елемената. Тако мале количине легирајућих елемената немају значајан утицај на физичке и механичке особине алатних челика. Главни хемијски елемент од кога зависе карактеристике ових челика је угљеник. Угљенични алатни челици чине око 10% укупне светске производње алатних челика. Угљенични алатни челици имају знатно лошије особине од легираних алатних челика, али се и даље користе у великим количинама. Разлог широке примене угљеничних алатних челика везан је за [1]:

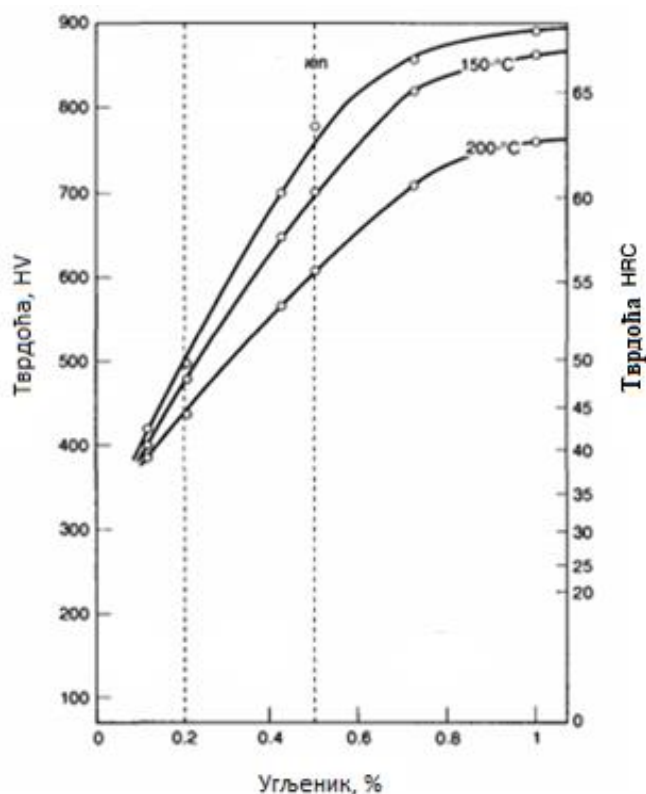
- цену, угљенични алатни челици су најјефтинији у групи алатних челика;
- доступност различитих облика полуфабриката ;
- једноставност термичке обраде;
- малу осетљивост према разугљеничењу површина у току термичке обраде;
- лаку обрадивост резањем;
- могућност израде локалног отврдњавања;
- жилавост, угљенични алатни челици су најжилавији алатни челици.

Угљенични алатни челици у свом саставу имају од 0.5 до 1.5% угљеника. Поред угљеника у састав ових челика улазе и веома мале количине легирајућих елемената најчешће силицијума и мангана. Са порастом садржаја угљеника расте и његова тврдоћа, а опада жилавост. Пораст тврдоће је везан за постојање већег удела секундарног цементита услед пораста садржаја угљеника.

Табела 2.5 Хемијски састав угљеничних алатних челика [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
W1	0.7-1.5	0.1-0.4	0.1-0.4	0.15	0.2	0.1	0.15	0.1
W2	0.8-1.5	0.1-0.4	0.1-0.4	0.15	0.2	0.1	0.15	0.1-0.03
W3	1.1-1.2	0.1-0.4	0.1-0.4	0.4-0.6	0.2	0.1	0.15	0.1

На слици 2.5 приказан је дијаграм зависности тврдоће угљеничних алатних челика од садржаја угљеника након каљења и ниског отпуштања. Може се закључити да је тврдоћа након термичке обраде знатно већа код челика са већим садржајем угљеника. Такође, са датог дијаграма се може видети да тврдоћа зависи и од температуре настанка мартензитне структуре. Што је температура почетка мартензитне трансформације нижа то је тврдоћа дела виша [1].



Слика 2.5 Дијаграм зависности тврдоће угљеничних алатних челика након термичке обраде од садржаја угљеника [1]

Због малог садржаја легирајућих елемената угљенични челици имају малу прокаљивост која износи до 10 mm. Угљенични челици због ниске прокаљивости имају бољу жилавост па су погодни за израду делова који захтевају средње вредности тврдоће и високу жилавост, јер се каљењем добија тврда мартензитна структура у површинском делу, док у језгру остаје структура велике жилавости. Ова група алатних челика се кали са релативно ниских температура аустенизације. Хлађење се обавља у води, због неопходне велике критичне брзине хлађења. Најчешће се пре каљења делови израђени од алатних челика подвргавају меком жарењу како би настала глобуларна структура која је погодна за обраду резањем [1].

2.6 Легирани алатни челици

Легирајући елементи значајно побољшавају карактеристике свих челика. Присуство легирајућих елемената у већој количини је посебно важно код алатних челика. Број присутних легирајућих елемената као и њихова количина знатно могу да варирају зависно од врсте и намене челика.

2.6.1 Нисколегоирани алатни челици за хладан рад

Нисколегирани алатни челици за хладан рад се према америчком AISI стандарду обележавају словом О које представља хлађење челика уљем приликом каљења. Ова група челика своју тврдоћу и отпорност на хабање заснива на високом садржају угљеника. Поред угљеника у састав ових челика улази и одређена количина легирајућих елемената чији укупни садржај не прелази 5%. Оволики садржај легирајућих елемената није

довољан за стварање потребне количине карбида чиме би се створили услови за одржање тврдоће при повишеним температурама. Нисколегирани алатни челици се за хладан рад нису предвиђени за процесе обраде у којима се генерише велика количина топлоте. Уколико би се ови челици применили за поступке обраде на повишеним температурама дошло би до драстичног пада тврдоће и оштећења алата.

Табела 2.6 Хемијски састав нисколегираних алатних челика за хладан рад [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
O1	0.85-1	1-1.4	0.5	0.4-0.6	0.3	/	0.4-0.6	0.3
O2	0.85-0.9	1.4-1.8	0.5	0.5	0.3	0.3	/	0.3
O3	1.2-1.55	0.3-1.1	0.55-1.5	0.3	0.3	0.2-0.3	/	/
O4	1.1-1.3	1	0.6	0.3-0.85	0.3	0.3	1-2	0.4

Висок садржај угљеника омогућује аустенизацију на релативном ниским температурама из чега произилази да загревање до температуре каљења није велико. На таквим температурама могућа је коегзистенција аустенита и карбида легирајућих елемената. У оваквим околностима садржај угљеника у аустениту је смањен, али и даље довољан за стварање мартензитне структуре. Комбинацијом мањих количина легирајућих елемената постижу се различите вредности тврдоће и осталих карактеристика [1].

2.6.2 Високолегирани алатни челици за хладан рад

Високолегирани алатни челици за хладан рад се могу поделити у две групе, на основу садржаја хрома у челицима [1]:

- Високолегирани алатни челици за хладан рад са садржајем хрома од око 5%;
- Високолегирани алатни челици за хладан рад са садржајем хрома од око 12%.

Табела 2.7 Хемијски састав високолегираних алатних челика за хладан рад са 5% хрома [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
A2	0.9-1.1	1	0.5	4.7-5.5	0.3	0.9-1.4	/	0.1-0.5
A3	1.2-1.3	0.4-0.6	0.5	4.5-5.5	0.3	0.9-1.4	/	0.8-1.4
A4	0.9-1.1	1.8-2.2	0.5	0.9-2.2	0.3	0.9-1.4	/	/
A6	0.6-0.8	1.8-2.5	0.5	0.9-1.2	0.3	0.9-1.4	/	/
A7	2-2.85	0.8	0.5	5-5.75	0.3	0.9-1.4	0.5-1.5	/
A8	0.5-0.6	0.5	0.7-1.1	4.7-5.5	0.3	1.1-1.6	1-1.5	/
A9	0.4-0.5	0.5	0.9-1.1	4.7-5.5	1.2-1.7	1.3-1.8	/	0.8-1.4
A10	1.2-1.5	1.6-2.1	1-1.5	/	1.5-2.0	1.2-1.7	/	/

Високолегирани алатни челици за хладан рад са садржајем хрома од 5% су према америчком AISI стандарду означени ознаком А, која потиче од процеса хлађења приликом каљења на ваздуху. Ова група челика обезбеђује тврдоћу комбинацијом високог садржаја угљеника и релативно високог садржаја легирајућих елемената. Релативно висок садржај легирајућих елемената је довољан да обезбеди довољну количину карбида и равномерну расподелу по читавој запремини челика. Ови карбиди легирајућих елемената имају високу тврдоћу која позитивно утиче на тврдоћу самог челика. Тврдоћа ових карбида је већа од тврдоће мартензита и цементита. Већа тврдоћа челика директно доводи до високе отпорности челика на хабање. Садржај легирајућих

елемената у високолегираним челицима за хладан рад није довољан, па се не препоручују за израду алата код којих се током експлоатације генерише велика количина топлоте [1].

Главна предност ових челика у односу на остале легиране челике је начин хлађења при каљењу. Ова група челика се приликом каљења хлади на ваздуху за разлику од осталих алатних челика који се хладе у води или уљу. Овакав начин хлађења је знатно спорији и доприноси сигурнијој термичкој обради у којој су смањене шансе за пуцање делова због наглих термичких промена. Хлађење на ваздуху могуће је због добре комбинације легирајућих елемената као што су магнезијум, хром и молибден. Неки челици из ове групе имају већи садржај силицијума који позитивно утиче на чврстоћу [1].

Високолегирани алатни челици за хладан рад са садржајем хрома од 12% су према америчком AISI стандарду означени ознаком D. Ови челици су највише легирани алатни челици за хладан рад код којих је главни легирајући елемент хром. Поред хрома чији је садржај у овим челицима око 12% присутне су и одређене количине молибдена, ванадијума, никла, магнезијума, волфрама и кобалта [1].

Табела 2.8 Хемијски састав високолегираних алатних челика за хладан рад са 12% хрома [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
D2	1.4-1.6	0.6	0.6	11-13	0.3	0.7-1.2	/	1.1
D3	2-2.35	.06	0.6	11-13.5	0.3	/	1	1
D4	2.05-2.4	0.6	0.6	11-13	0.3	0.7-1.2	/	1
D5	1.4-1.6	0.6	0.6	11-13	0.3	0.7-1.2	/	1
D7	2.15-2.5	0.6	0.6	11.5-13	0.3	0.7-1.2	/	3.8-4.4

Ова класа челика је развијена као могућа замена за брзорезне челике, али је приликом експлоатације резних алата закључено да немају довољну тврдоћу на повишеним температурама и да су при таквим температурама склони пуцању. Међутим установљено је да на ниским температурама ови челици имају високу тврдоћу и изузетну отпорност на хабање. Овакве особине су последица велике количине легирајућих елемената који формирају карбиде велике тврдоће [1].

2.6.3 Алатни челици за топли рад

Алатни челици за топао рад су означени као челици H класе према америчком AISI стандарду. Сви челици ове класе имају заједничку особину да приликом дугог или учесталог загревања задржавају вредности тврдоће на високим нивоима. Овакве особине челика су потребне алатима за топло ковање и калупима за ливење разних легура метала. Челици H класе су подељени у три групе према саставу легирајућих елемената и њиховом утицају на тврдоћу [1]:

- Алатни челици за топао рад код којих је главни легирајући елемент хром, садржај хрома је око 5%. Поред хрома у састав ових челика у мањој мери улазе силицијум, молибден и ванадијум;
- Алатни челици за топао рад код којих је главни легирајући елемент волфрам;
- Алатни челици за топао рад код којих је главни легирајући елемент молибден.

Табела 2.9 Хемијски састав алатних челика за топао рад [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
Алатни челици за топао рад легирани хромом								
H10	0.35-0.4	0.25-0.7	0.8-1.2	3-3.75	0.3	2-3	/	0.2-0.75
H11	0.3-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	0.3	1.1-1.6	/	0.3-0.6
H12	0.3-0.4	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	0.3	1.2-1.75	1-1.7	0.5
H13	0.3-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	0.3	1.1-1.75	/	0.8-1.2
H14	0.3-0.45	0.2-0.5	0.8-1.2	4.75-5.5	0.3	/	4-5.25	/
H19	0.3-0.45	0.2-0.5	0.2-0.5	4-4.75	0.3	0.3-0.55	3.75-4.5	1.75-2.2
Алатни челици за топао рад легирани волфрамом								
H21	0.-0.35	0.15-0.4	0.15-0.5	3-3.75	0.3	/	8.5-10	0.3-0.6
H22	0.3-0.4	0.15-0.4	0.15-0.4	1.75-3.7	0.3	/	10-11.7	0.25-0.5
H23	0.25-0.3	0.15-0.4	0.15-0.6	11-12.7	0.3	/	11-12.7	0.75-1.2
H24	0.4-0.55	0.15-0.4	0.15-0.4	2.5-3.5	0.3	/	14-16	0.4-0.6
H25	0.2-0.3	0.15-0.4	0.15-0.4	3.75-4.5	0.3	/	14-16	0.4-0.6
H26	0.4-0.55	0.15-0.4	0.15-0.4	3.75-4.5	0.3	/	17-19	0.75-1.2

Сви алатни челици за топао рад морају да поседују следеће карактеристике [1]:

- Отпорност према деформацији на радној температури. Ова карактеристика је најважија за дату групу челика, такође ова особина челика директно одваја челике за топао рад од других врста алатних челика који на собној температури могу имати више вредности тврдоће док на повишеним температурама вредност тврдоће опада.
- Отпорност на термички и механички шок. Термички шок представља наглу промену температуре, таква промена доводи до промена у структури дела, па може изазвати и механичка оштећења. Такође, алатни челици за топао рад су отпорни и на механичке ударе, поседују високу жилавост и чврстоћу.
- Отпорност на хабање при високим температурама. Ова особина је веома важна за дуг радни век алата израђеног од овог типа челика.
- Отпорност према деформацији у току термичке обраде. Димезниона тачност алата је кључна за израду делова нарочито приликом топлог ковања. Алата за топло ковање не смеју мењати димензије током термичке обраде.
- Отпорност на прслине изазване честим загревањем и хлађењем у експлоатацији алата. Након настанка ових прслина у даљој експлоатацији долази до њиховог ширења и пуцања алата.

Тврдоћа угљеничних и нисколегираних алатних челика знатно опада при порасту температуре на преко 230°C, тврдоћа алатних челика за топао рад легираних хромом не опада до температуре од 425°C, док алатни челици за топао рад легирани волфрамом задржавају високе вредности тврдоће све до 620°C [1].

Ако постоји могућност прегревања алата израђених од челика за топао рад може се применити хлађење протоком воде кроз унутрашњост алата како би се избегао пад тврдоће алата. У случају коришћења алата код којих се примењује систем воденог хлађења боље је алат изградити од алатног челика за топао рад који је легиран хромом, јер су ови челици отпорнији на настанак пукотина од челика легираних волфрамом. Челици легирани волфрамом се такође могу користити за израду алата са воденим

хлађењем, али водено хлађење мора бити циркулационо и алатни челици за топао рад легирани волфрамом не смеју садржати веће количине хрома у структури [1].

Алатни челици за топао рад легирани хромом су најчешће коришћена врста челика за израду алата за ковање и ливење. Ова врста челика је првенствено креирана за израду алата за ливење легура алуминијума, али је накнадно почела да се користи и за израду алата за деформисање челика. Ову врсту челика карактерише отпорност на топлотне промене и висока тврдоћа на повишеним температурама. Вредности тврдоће на повишеним температурама су високе, али су ниже од вредности тврдоће алатних челика за топао рад легираних волфрамом [1].

Алатни челици за топао рад легираних волфрамом су били први високолегирани алатни челици за топао рад који су коришћени у индустрији. Садрже 9-19% волфрама, поседују мали садржај угљеника и мање количине хрома и ванадијума. Ови челици поседују више вредности тврдоће од свих алатних челика за топао рад, а уз то су отпорни на пад тврдоће на вишим температурама. Међутим, карбиди који се налазе у саставу алатних челика за топао рад легираних волфрамом и који су битни за тврдоћу на повишеним температурама смањују чврстоћу и повећавају кртост. Како би се избегло смањење чврстоће и повећање кртости тежи се смањењу садржаја угљеника. И поред тежње за смањењем садржаја угљеника у овим челицима они су мање отпорни на нагле топлотне промене од челика легираних хромом [1].

Алатни челици за топао рад легирани молибденом су најмање заступљени у индустрији. Широко је примењен само челик ознаке H42. Алатни челици за топао рад легирани молибденом су настали за време другог светског рада услед несташнице волфрама. Развијено је више типова ових челика али након рата нису имали значајнију примену. Особине челика легираног молибденом су између карактеристика челика легираних хромом и челика легираних волфрамом. Челик H42 садржи 5% молибдена, 6% волфрама, 2% ванадијума и 4% хрома и мањи садржај угљеника [1].

2.6.4 Брзорезни алатни челици

Брзорезни челици имају заједничку особину да на високим температурама задржавају високе вредности тврдоће, 52 HRC на 540°C и 48 HRC на 595°C. Назив брзорезни челици потиче из чињенице да се ови челици користе за израду резних алата који се користе за велике брзине резања приликом чега се ослобађа велика количина топлоте. Неки брзорезни челици су у стању да задрже тврдоћу и при температурама на којима настаје такозвано црвено усијање, које је последица присуства значајне количине легирајућих елемената. Поред легирајућих елемената брзорезни челици садрже и значајне количине угљеника чија је улога стварање карбида који знатно повећавају тврдоћу након термичке обраде [1].

Брзорезни челици се према AISI стандарду обележавају са М или Т зависно од главно легирајућег елемента, молибдена или волфрама. Брзорезни челици легирани волфрамом су први произведени, док су брзорезни челици легирани молибденом настали за време другог светског рата услед несташнице волфрама. Обе групе челика имају сличне експлоатационо карактеристике. Данас се више користе брзорезни челици легирани молибденом, разлог веће примене молибденских брзорезних челика је њихова цена која је знатно нижа од волфрамових брзорезних челика. Разлика у цени проистиче из

чињенице да је густина волфрама око два пута веће од густине молибдена, што значи да је за израду истог алата потребно два пута више волфрама, поред тога је добијени резни алат знатно тежи. Волфрам и молибден поседују сличан атомски распоред, па је могућа производња челика сличних карактеристика заменом волфрама молибденом [1].

У табели 2.8 дате је хемијски састав брзорезних алатних челика према AISI стандарду.

Табела 2.10 Хемијски састав брзорезних челика [1]

AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V
Брзорезни челици легирани молибденом								
M1	0.7-0.8	0.1-0.4	0.2-0.5	3.5-4	0.3	8.2-9.2	1.4-2.1	1-1.35
M2	0.7-0.8	0.1-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	4.5-5.5	5.5-6.7	1.7-2.2
M30	0.7-0.8	0.1-0.4	0.2-0.4	3.5-4.2	0.3	7.7-9	1.3-2.3	1-1.4
M33	0.8-0.9	0.1-0.4	0.1-0.5	3.5-4	0.3	9-10	1.3-2.1	7.7-8.7
M34	0.8-0.9	0.1-0.4	0.2-0.4	3.5-4	0.3	7.7-9.2	1.4-2.1	7.7-8.7
M35	0.8-0.9	0.1-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	4.5-5.5	5.5-6.7	1.7-2.2
M36	0.8-0.9	0.1-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	3.2-4.2	6.3-7	1.7-2.2
M41	1-1.15	0.2-0.6	0.1-0.5	3.5-4.2	0.3	3.2-4.2	1.7-2.2	0.9-1.7
M42	1-1.15	0.1-0.4	0.1-0.6	3.5-4.2	0.3	9-10	1.1-1.8	1.5-1.7
M43	1.1-1.2	0.2-0.4	0.1-0.6	3.5-4.2	0.3	7.5-8.5	2.2-3	1.5-1.7
M44	1.1-1.2	0.2-0.4	0.3-0.5	4-4.7	0.3	6-7	5-5.7	1.8-2.2
M46	1.2-1.3	0.2-0.4	0.4-0.6	3.7-4.2	0.3	8-8.5	1.9-2.2	3-3.3
M47	1-1.2	0.1-0.4	0.2-0.4	3.5-4	0.3	9.2-10	1.3-1.8	1.1-1.3
M48	1.4-1.5	0.1-0.4	0.1-0.4	3.5-4	0.3	4.7-5.5	9.5-10	2.7-3.2
M62	1.2-1.3	0.1-0.4	0.1-0.4	3.5-4	0.3	10-11	5.7-6.5	1.8-2.1
Брзорезни челици легирани волфрамом								
T1	0.6-0.8	0.1-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	/	17-19	/
T2	0.8-0.9	0.2-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	1	17.5-19	/
T4	0.7-0.8	0.1-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	0.4-1	17.5-19	4.2-5.7
T5	0.7-0.8	0.2-0.4	0.2-0.4	3.7-5	0.3	0.5-1.2	17.5-19	7-9.5
T6	0.7-0.8	0.2-0.4	0.2-0.4	4-4.7	0.3	0.4-1	18.5-21	11-13
T8	0.7-0.8	0.2-0.4	0.2-0.4	3.7-4.5	0.3	0.4-1	13-14	4.2-5.7
T15	1.5-1.6	0.1-0.4	0.1-0.4	3.7-5	0.3	1	11.7-13	4.5-5.2

2.6.5 Синтеровани алатни челици

Синтеровани алатни челици су најновија група алатних челика, ови челици су настали тек у другој половини двадесетог века. Синтеровани челици имају потпуну изотропију микроструктуре, својстава и сопствених напрезања. Овакве особине синтерованих челика су последица примене праха састављеног од честица сличног облика и малих димензија које у процесу израде формирају хомогену структуру. Синтеровани челици су погодни за термохемијску обраду и за обраду превлачењем нарочито за PVD и CVD поступке, јер је изотропна микроструктура знатно повољнија за дифузију од анизотропне. Поред добрих особина синтеровани челици имају и одређене мане, највећа мана синтерованих челика је велика кртост [1].

Синтеровани алатни челици су настали као даљи напредак поступака синтеровања тврдих метала и керамичких материјала. Основни проблем приликом израде

синтерованих алатних челика због кога ови челици временски знатно заостају за осталим врстама алатних челика је немогућност челичног праха који је основна сировина приликом производње. Механичким млевењем се нису добијале честице довољно ситних и униформних честица потребног за синтеровање алатних челика. Овај проблем је решен почетком примене распршавања течног челика у струји воде или инертног гаса, на овај начин се добијају честице довољно малих димензија. Након распршивања течног челика око добијених честица се формира оксидни слој који се отклања поступком жарења у средини без кисеоника. Главни разлог веће отпорности на хабање синтерованих алатних челика у односу на друге алатне челике је постојање двоструких молибденових, волфрамових и ванадијумових карбида у структури синтерованог челика. Карбиди настали у синтерованим челицима су знатно квалитетнији од карбида у другим челицима, имају већу тврдоћу [1].

У току производње синтерованих алатних челика челични прах се подвргава високим температурама и високом притиску у дугом временском интервалу како би се формирала адекватна структура. Са порастом температуре и притиска расте и квалитет добијене структуре. Услед недовољних вредности температуре, притиска или времена трајања процеса добијања синтерованих челика може се добити структура која је веома мека и крта. Разлог добијања лоше структуре је мала вредност унете енергије кроз топлоту и притисак која није довољна за раскидање старих и формирање нових веза између честица [1].

Процесом синтеровања се често производе брзорезни челици који имају знатно финију структуру која доприноси већој тврдоћи и отпорности на хабање. Мања величина зрна не дозвољава стварање сегрегација и на тај начин не дозвољава формирање унутрашњих или површинских грешака које могу довести до лома алата израђеног поступком синтеровања [1].

3. ТЕРМИЧКА ОБРАДА АЛАТНИХ ЧЕЛИКА

Термичка обрада је процес у коме се применом различитих параметара загревања и хлађења мењају физичке, механичке и хемијске особине обрађиваног дела. Сви поступци термичке обраде имају добру и лошу страну, процес термичке обраде побољшава одређене параметре, док одређене погоршава. Правилном термичком обрадом се карактеристике обрађиваног материјала могу значајно побољшати.

3.1 Принципи термичке обраде алатних челика

Поступци термичке обраде алатних челика су веома слични поступцима термичке обраде осталих челика. Разлика између ових поступака је у тачности вредности параметара термичке обраде који код алатних челика морају стриктно поштовати. Поштовање параметара термичке обраде је нарочито важно у поступцима који захтевају аустенизацију челика. Аустенизација алатних челика мора бити изузетно прецизна, или ће параметри челика деградирати. У односу на остале челике алатни челици имају вишу температуру аустенизације која је код угљеничних алатних челика у рангу осталих челика, док се код брзорезних алатних челика температуре аустенизације креће и до 1300°C.

Поступци термичке обраде алатних челика су [4]:

- Жарење;
- Каљење;
- Отпуштање.

Поступци термичке обраде алатних челика код којих се челични делови загревају до одређене температуре на којој се задржавају извесно време и затим хладе спорије у односу на каљење се називају се жарење. Поступци жарења се могу класификовати у две групе поступака зависно од постојања фазних трансформација у току процеса жарења. У групу поступака жарења са фазним променама спадају: дифузионо жарење, нормализационо, меко жарење и потпуно жарење. Сви ови поступци жарења осим дифузионог жарења имају заједничку карактеристику да постизање одговарајућих карактеристика жареног дела није нужно повезано са загревањем челика до температура при којима долази до фазних промена [4].

Поред процеса жарења у којим долази до фазних промена постоје и процеси жарења у којима фазне промене нису саставни део процеса жарења. У ову групу процеса жарења спадају: рекристализационо жарење и жарење ради попуштања напона. Температуре при којима се обављају наведени процеси жарења не прелазе температуре при којима настају фазне промене челика. Након постизања потребне температуре се подвргавају спором хлађењу [4].

Хомогенизација је процес у коме се радни комад загрева до температуре од 1100-1200°C, а период загревања треба да буде веома дуг, често и преко десет сати. Након достизања жељене температуре радни комад се држи на тој температури још одређено време, након чека следи споро хлађење на ваздуху. Висока температура и дуго време држања челика на предвиђеној температури треба да омогући што потпуније протицање дифузионих

процеса који уклањају хемијске нехомогености из челика. Основни циљ дифузионог жарења је уклањање сегрегација у кристалним решеткама [4].

Процесом меког жарења добија се структура која се састоји из глобуларног карбида који се налази у феритној основи, оваква структура се назива зрнасти перлит. Меким жарењем челика се добија структура која има минималну тврдоћу, али има максималну пластичност. Челици који су подвргнути меком жарењу имају добре особине при пластичном деформисању на хладно и при машинској обради челика чији садржај угљеника прелази 0.5% [4].

После пластичне обраде алатних челика у хладном стању долази до појаве ојачања уз смањивање жилавости. Ако овакво стање не одговара даљим поступцима обраде или примени комада, особине се у одређеним случајевима могу поправити уклањањем ојачаног стања жарењем изнад температуре рекристализације. По правилу рекристализацијом ће настати нова структура која ће имати финија зрнца уколико је степен деформације био већи. Неравномерност крупноће зрнаца као и грешка са грубим зрнцима могу се отклонити само неким од поступака са потпуном трансформацијом. Рекристализационо жарење се обавља у области температура нижих од температуре почетка трансформације A_1 , најчешће на температурама 550-720°C [4].

Неравномерним хлађењем одливака, отковака, ваљаних делова, термички обрађених делова и заварених делова може доћи до појаве значајних напрезања која могу достићи и вредности границе развлачења. Настала напрезања се у току експлоатације дела комбинују са радним напрезањима и постају изузетно непожељна. Да би се настала напрезања уклонила потребно је да се челични радни комад загреје до температуре од 450°C и више. Након жарења за уклањање напона потребно је остварити што спорије хлађење како не би дошло до настанка нових напона [4].

Каљење је процес термичке обраде челика који се састоји из загревања челика до температура које леже изнад A_{C3} и A_{C1} линија, задржавања на овој температури до потпуног прогревања, завршетка фазне промене и хлађења великом брзином. Главни циљ каљења је постизање велике тврдоће обрађеног дела. За алатне челике битно да се каљењем постигне тврдоћа уз што је могуће више вредности жилавости. Успешност процеса каљења зависи од избора параметара процеса каљења. Најважнији параметри процеса каљења су: температура аустенизације челика, време загревања и време држања на температури аустенизације, брзина хлађења и средство за хлађење. Сви параметри термичке обраде каљењем се добијају експерименталним путем, и зависе од хемијског састава челика. Параметри као што су температура аустенизације и брзина хлађења се могу очитати са дијаграма континуалног хлађења. На основу читавања потребне критичне брзине хлађења може се пронаћи и адекватно средство за хлађење. Битна чињеница приликом загревања алатних челика је о време држања на температури аустенизације. Алатни челици не трпе предуго задржавање на температури аустенизације, на дуго држање на поменутој температури су посебно осетљиви високолегирани алатни челици [4].

Челик након термичке обраде каљењем поседује високу тврдоћу, али је веома крт и поседује знатна унутрашња напрезања. Да би се челику после каљења смањила кртост и умањили унутрашњи напони потребно је челик подвргнути отпуштању. Главни параметри отпуштања су температура и време и они зависе од захтеваних особина дела.

Процес отпуштања се према температури може поделити на *ниско*, *средње* и *високо* отпуштање [4].

Ниско отпуштање је саставни део термичке обраде каљења, ниско отпуштање без утицаја на тврдоћу смањује унутрашње напоне настале током каљења и повећава жилавост. Примењује се после површинског каљења, каљења алатних челика и цементираних челичних делова. Температура при којој се одвија ниско отпуштање код алатних челика је између 100-250°C.

Средње отпуштање се примењује када се захтевају висока чврстоћа и еластичност, као и довољна жилавост. Код угљеничних челика средње отпуштање се обавља на температури од 350-450°C. Користи се у процесу израде опруга.

Високо отпуштање или побољшање се примењује при изради конструкционих елемената. Температура при којима се обавља високо отпуштање је блиска A_1 температури. Побољшањем се постижу довољно дисперзна феритно-карбидна структура која обезбеђује добру комбинацију механичких особина челика. Побољшањем се у односу на обраду жарењем постижу веће вредности затезне чврстоће и границе развлачења.

Температура при којој се одвија побољшање зависи од вредности механичких параметара који се захтевају за тај део након термичке обраде, то су: чврстоћа, пластичност и жилавост. Са порастом температуре у процесу отпуштања долази до пада чврстоће, на супрот чврстоћи параметри пластичности и ударне жилавости расту.

3.2 Практични аспекти термичке обраде алатних челика

Сви поступци термичке обраде алатних челика се састоје из две фазе: загревања и хлађења. Загревање челика за термичку обраду се може остварити на више начина, у пећима за загревање, у загрејаном флуиду или растопљеном металу [5].

Загревање радних комада у процесима термичке обраде се најчешће обавља у пећима, чије се карактеристике, енергетски нивои и конструкција разликују у зависности од намене.

Према начину загревања, пећи за загревање се могу поделити на пећи дисконтинуалним процесом загревања и пећи са континуалним процесом загревања. У пећи са дисконтинуалним процесом загревања спадају: коморна пећ, муфолна пећ, вертикална пећ и звонаста пећ. Код ових пећи нема сталног протицања радних комада, делови за термичку обраду се убацују у пећ и у њој стоје све док се процес загревања не заврши након чега се ваде из пећи [5].

Већину алатних челика је потребно термички обрадити у некој од заштитних атмосфера како не би дошло до нежељених појава. У таквим ситуацијама највише се користе пећи са атмосфером инертног гаса, вакум пећи и сона или метална купатила [4].

Пећи код којих се челици загревају у атмосфери инертног гаса су веома скупе скупе за експлоатацију због велике потрошње инертног гаса. Ове пећи су по конструкцији и особинама загревања диста сличне обичним пећима, са разликом састава гасова

атмосфере у којој се делови загревају. Оваквим начином загревања се елиминише могућност оксидације термички обрађиваних делова [5].

Вакум пећи имају херметички затворену комору, грејачи су постављени са унутрашње стране пећи па је загревање директно. Пре почетка процеса загревања пумпом се ваздух испумпава ван коморе и настаје вакум. Хлађење након достигнуте жељене температуре се одвија упумпавањем инертног гаса или хлађењем у уљној купки. Површина обрађених предмета врло мало оксидира, па површина задржава метални сјај. Загревање се одвија зрачењем јер у атмосфери пећи постоји врло мало честица које могу да преносе топлоту конвекцијом [4].

Сона купатила спадају у групу топлих купатила код којих се загревање врши у специјалним солима. Нашла су примену у већем броју различитих операција термичке обраде. Посебно су погодна затермичку обраду алатних челика, пре свега оних алата који се не могу брусити након калења или оних алата код којих се захтева врхунски квалитет површине и оштре резне ивице [5].

Модерна сона купатила користе се за већи број различитих поступака термичке обраде [6]:

- предгревање се препоручује код загревања алатних челика у аустенитну област како би се избегла појава пукотина и кривљења. Предгревање се најчешће обавља у тројним еутектичким мешавина махлорида које се топе на око 540 °C, а користе се у опсегу радних температура од 600 до 1010 °C. Ове соли обезбеђују предгревање челика без опасности од разутљеничења, уз незнатну појаву талога. Брзина загревања у оваквим солима је велика. Обично је довољно 10 минута за загревање већине алата. Дуже време загревања није штетно за челик и помаже успостављање температурне равнотеже чиме се скраћује време загревања у аустенитној области;
- степенасто каљење се обавља на температури нешто вишој или нижој од температуре почетка мартензитне трансформације. Користе се нитрати, соли у највећем броју случајева. Натријум нитрат и калијум нитрат користе се за степенасто каљење алатних челика;
- изотермно каљење обавља се на температури изнад почетка мартензитне трансформације. За овај вид обраде користе се нитратне соли.

Предности примене сонних купатила су [6]:

- велики коефицијент преноса топлоте, висока брзина загревања, велика продуктивност, загревање у сонним купатилима одвија се три до четири пута брже у односу на остале начине загревања;
- равномерна расподела температура у купатилу која доприноси уједначеном загревању. Као последица уједначеног загревања настанак пукотина, кривљење и пуцање комада се ређе јављају. Приликом урањања комада растопљена со се стврдњава на површини комада и изољује га док површина не достигне температуру топљења соли чиме се смањују топлотни шокови;
- смањена деформација комада, деформације су мање због дејства потисне силе соли;

- заштита површине од оксидације и разугљеничавања, површина комада заштићена је од оксидације у току процеса термичке обраде јер се ваздух потискује током урањања. Након урањања, танак слој соли на комаду штити метал од оксидације;
- свестраност, постоји могућност делимичног урањања комада, променљиво време трајања поступка термичке обраде за различите комаде, убацивање и вађење комада из купатила у било ком тренутку времена;
- прецизна контрола, тачност одржавања температуре соног купатила;
- могућност аутоматизације, у случају великосеријске производње постављањем робота за руковање радним комадима могуће је постићи високу ефикасност преноса делова, чиме се повећава продуктивност и смањују трошкови. Међутим, недостатак представља чињеница да се процес пуњења и пражњења соног купатила не може аутоматизовати.

Недостаци примене соних купатила су [6]:

- загађење околине, загађење ваздуха, загађење воде, проблем уклањања отпада;
- велики специфичан утрошак енергије, услед топлотних губитака са огледала купатила. Ови губици могу се значајно смањити применом одговарајућих поклопаца;
- избор радне температуре се контролише избором састава соли. Температуру ратопљење соли и радна температура зависе од састава купатила, па је за прелазак са једне на другу радну температуру потребно извршити промену састава соли;
- тешки услови рада, изнад соног купатила јављају се тешка испарења па је неопходно обезбедити квалитетну вентилацију;
- утицај оператера је велики утицај на тачност и поновљивост;
- непрестан рад купатила, рад соног купатила се врло ретко прекида због сложеност, а пре свега дуготрајног пуштања у рад.

Постоји више врста средстава за хлађење при термичкој обради, два најважнија средства су вода у уље. Вода има већу брзину хлађења и користи се за каљење угљеничних челика, а уље се користи за каљење легираних. Легирани челици се хладе мањим брзинама хлађења.

Најважнија средства за хлађење су [4]:

- уље;
- вода и раствори соли;
- топла купатила са солима или металима;
- гасови.

За хлађење се могу користити и комбинована средства, попут емулзија воде са уљем.

Идеално средство за хлађење при термичкој обради каљењем било би средство које би омогућило максималну брзину хлађења у температурском интервалу 650-400°C пошто је аустенит у овом подручју веома нестабилан. Поред наведеног, средство за хлађење треба да обезбеди минималну брзину хлађења у мартензитном подручју да не би настала велика термичка напрезања која би довела до појаве пукотина на каљеном делу. За средство за хлађење је могуће користити широк спектар средстава као што су: вода,

раствори различитих соли у води, струја ваздуха или инертног гаса, растопи соли, различите врсте уља и растопи одређених метала. Моћ хлађења течних средстава за хлађење зависи од: количине средства за хлађење, специфичне топлоте средства за хлађење, топлотне проводљивости, вискозитета, температуре кључања, латентне топлоте испаравања и почетне температуре средства за хлађење. Количина течности за хлађење при каљењу и њена специфична топлота одређују количину топлоте коју је та количина средства за хлађење може да прими за одређено повећање њене температуре. Вискозност средства за хлађење утиче на способност течења течности и на способност течности да преноси топлоту по њеној целој запремини. Температура кључања одређује тренутак када ће течност услед уплива одређене количине топлоте прећи у парно стање и створити мехуриће на површини метала који отежавају даље хлађење. Латентна топлота испаравања одређује количину топлоте по јединици тежине коју течност узима из околине за своје испаравање на температури кључања. Почетна температура средства за хлађење одређује брзину преношења топлоте из загрејаног дела, што је температура средства за хлађење мања то је брзина преношења топлоте већа [4].

Постоје две основне групе средстава за хлађење, у прву групу средстава за хлађење спадају средства код којих у току хлађења не долази до промене агрегатног стања средства за хлађење, у другу групу спадају средства код којих у процесу хлађења долази до промене агрегатног стања. Прву групу средстава за хлађење чине: растопи соли, растопи метала, ваздух и различите друге гасне средине. Наведена средства која припадају првој групи средстава за хлађење одузимају топлоту загрејаном делу путем конвекције и кондукције. Моћ хлађења ових средстава зависи од коефицијента преноса топлоте. Средства за хлађење из прве групе се одликују великим расхладним дејством при високим температурама. У другу групу средстава за хлађење спадају: вода, водени раствори соли и уља. Ова средства за хлађење одузимају топлоту загрејаном делу путем испаравања. Процес хлађења другом групом средстава за хлађење се састоји из три фазе. У првој фази се око загрејаног челичног дела формира слој прегрејане паре мале дебљине. У току формирања парног слоја долази до веома брзог хлађења површинског слоја. У даљем току се хлађење одвија веома споро и даљи процес се одвија путем зрачења паре. Хлађење је могуће убрзати мешањем или покретањем дела који се кали, ови поступци доводе до премештања запремина воде и прекид парног слоја. У другој фази која се зове фаза кључања долази до прекидања парног слоја и појаве парних мехурова. У овој фази је дејство хлађења веома велико услед велике потрошње топлоте загрејаног дела која се троши на испаравање. Средство за хлађење кључа све док се температура дела који се хлади не спусти испод температуре кључања расхладног средства. У трећој фази долази до даљег хлађења загрејаног дела. У овој фази се топлота из загрејаног дела одводи путем конвекције и кондукције [4].

Воду као средство за хлађење карактеришу: велика склоност ка стварању парног слоја, интензивно хлађење у мартензитном подручју и изразита зависност дејства хлађења од температуре воде. Максимална брзина хлађења у води је у температурском интервалу 400-200°C . Загревањем воде опада њен интензитет хлађења, а брзина хлађења не опада знатно у мартензитном подручју, па се не смањује могућност настанка пукотина. Поред чисте воде користе се и емулзије разних уља и воде, као и водени раствори соли и глицерина [4].

Уље се као средство за хлађење користи због: већег вискозитета, више температуре кључања и мање латентне топлоте испаравања. Због знатног пада брзине хлађења у уљу у мартензитном подручју смањује се ризик од настанка пукотина. Некада су се користила природна уља као средства за хлађење, а данас су доминантна синтетичка уља због ниже цене и побољшаних карактеристика хлађења [4].

Површина загреваног дела може у многоне променити ток хлађења дела. Неравнине на површини дела потпомажу задржавање парних мехурова и на тај начин не дозвољавају наставак хлађења у адекватном обиму. Неметални укључци који се налазе на површини дела такође успоравају хлађење, али у случају када је средство за хлађење вода код које се испаравање интензивно врши неметални укључци ометају стварање парног слоја па убрзавају процес [4].

Устајала вода је најповољнија за хлађење приликом каљења из разлога што таква вода има најмању количину растворених гасова, па постоји најмања опасност од лепљења паре. Ако постоји опасност од прегревања воде, онда се она може хладити посредно циркулационом водом. Гранична температура воде за хлађење је 50°C јер изнад ове температуре период лепљења паре је веома дуг, па је каљење онемогућено [4].

Услед лоших параметара загревања и хлађења долази до појаве грешака у структури алатних челика која за последицу има пад механичких карактеристика. Због температурских интервала у којима се обављају процеси каљења и жарења су најопаснији са аспекта настајања грешака услед загревања и хлађења [4].

Хлађење челичних делова у току процеса каљења је неравномерно, површина обрађиваног дела је у директном контакту са средством за хлађење па се хлади знатно брже од унутрашњости дела. Разлика у брзини хлађења површине и унутрашњих слојева зависи углавном од хемијског састава челика, димензија обрађиваног дела, облика и средства за хлађење. У току хлађења прво долази до скупљања површинских слојева, њихово скупљање ометају унутрашњи слојеви код којих хлађење није интензивно као у површинским слојевима. Када се површински слој у потпуности охлади долази до интензивнијег хлађења унутрашњих слојева и њиховог скупљања. Ово скупљање је отежано због спољашњег потпуно охлађеног слоја који омета скупљање унутрашњих слојева. Услед овога ће напони у спољним и унутрашњим слојевима променити знак, па ће се на крају процеса хлађења на површини јавити напрезања на притисак, а у унутрашњим напрезања на затезање [4].

Основне грешке које се могу јавити при каљењу су [4]:

- прегревање;
- појава оксидације;
- промена облика комада;
- појава пукотина;
- недовољна тврдоћа;
- неравномерна тврдоћа.

Прегревање је последица високе температуре загревања пред каљење, која настаје због дугог времена држања. Манифестује се кроз појаву грубо игличастог мартензита и грубозрног прелома. Прегревање је повезано са великом крстошћу закаљених делова и

великим унутрашњим напрезањима, тако да већ при самом каљењу могу настати пукотине.

Оксидација је веома непожељна појава која може настати при каљењу, разлог настајања оксидације је најчешће фина машинска обрада којој се део подвргава након процеса каљења. Механичком обрадом се скида део површинског слоја чиме се деградира површина каљеног дела.

Појава пукотина може бити изазвана: високом температуром каљења, превеликим интензитетом хлађења у моменту мартензитне трансформације и неправилно изведеним каљењем.

Недовољна тврдоћа представља изузетно грубу грешку, посебно када каљења алата, изазивају је: недовољна брзина хлађења, недовољно време држања на температури каљења, ниска температура каљења и висока температура каљења.

Неравномерна тврдоћа каљеног челика настаје због: разутљеничења површине, парног слоја насталог приликом хлађења који нема сталну дебљину, неправилно изведеним каљењем и хватањем комада хладним или недовољно загрејаним машицама. Спречавање неравномерности тврдоће односно настанка меких места се може спречити довођењем средства за хлађење под притиском.

До појаве грешака у жареној структури челика може доћи услед [5]:

- неправилно вођењем загревања;
- неодговарајуће температуре жарења;
- дугог времена жарења;
- непогодне атмосфере пећи за загревање;
- неправилног хлађења.

У случају превисоке температуре жарења или дугог времена држања на високој температури долази до пораста аустенитног зрна. Ово прегревања има за последицу пораст зрна секундарне структуре настале разлагањем аустенита, погодује и стварању Видманштатове структуре. Ово доводи до смањења пластичности и ударне жилавости жареног челика док се затезна чврстоћа обично не мења. Пораст зрна изазван прегревањем може да се отклони нормализацијом или потпуним жарењем [4].

Прегревање на температури од приближно 1200°C и више може да доведе не само до израженог повећања зрна, него и до промена на границама аустенитних зрна које се манифестују кроз појаву врло финих оксидних и сулфидних укључака. Ова појава се не може отклонити нормализацијом, јер издвојени укључци фиксирају границе некадашњих аустенитних зрна које представљају слаба места чак и у случају чак и у случају када се зрно уситни нормализацијом. Жилавост је ниска јер до прелома долази по границама некадашњих аустенитних зрна. Појава прегревања са променом стања јавља се: под утицајем кисеоника сумпора који на високим температурама жарења продиру из атмосфере пећи у челик и то претежно дуж граница зрна, или на рчун кисеоника и сумпора присутних у виду неметалних укључака у самом челику који се на високим температурама жарења делимично растварају да би се при хлађењу поново издвојили пограницама зрна. Брзим загревањем челика до високих температура аустенитног подручја и довољно брзим хлађењем успева некада да се делимично уклони

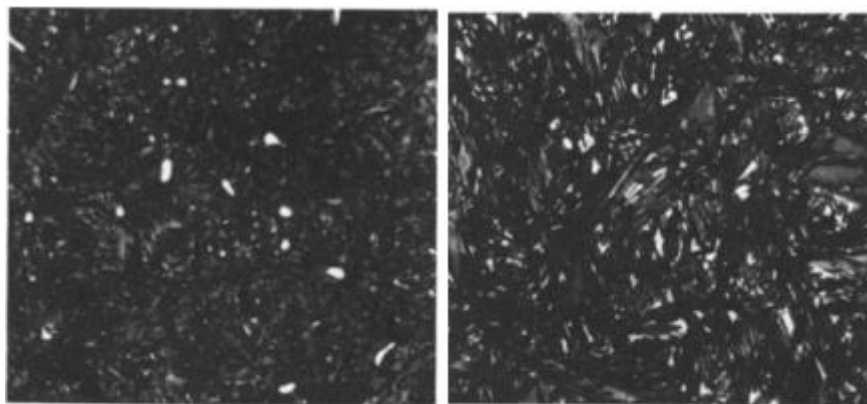
ова појава везана за границе аустенитних зрна, путем ковања уз степен деформације од 20-30% ово прегревање се у потпуности одстрањује [4].

Недовољно висока температура жарења не осигурава потпуну рекристализацију тако да у случају подеутектоидних челика један део ферита се не трансформише. Ферит настао при хлађењу аустенита разликује се по способности нагризања од ферита који при загревању није претрпео никакве промене. Ова појава се заснива на разлици у саставу до које долази за време жарења у хетерогеној области [4].

Оксидациона атмосфера у пећи за жарење доводи до појаве разугљеничења. При разугљеничењу челика са већим процентом угљеника на температурама које леже у интервалу $A_1 - A_3$, често се у површинском слоју јављају стубасти кристали ферита. Последица разугљеничења је слабљење особина површинског слоја [4].

3.3 Термичка обрада нелегираних алатних челика

Велика тврдоћа која се постиже након термичке обраде каљењем угљеничних челика је последица избора оптималних температура аустенизације и брзог хлађења у води. Избором адекватне температуре аустенизације која омогућује потпуну аустенизацију радног комада, а која не лежи знатно изнад температуре при којој долази до почетка аустенизације челика добија се структура код које је склоност ка лому знатно смањена. Карбиди који настају у процесу хлађења загрејаног челика смањују садржај угљеника у аустениту, ова појава као последицу има повећање температуре почетка мартензитне промене [1].

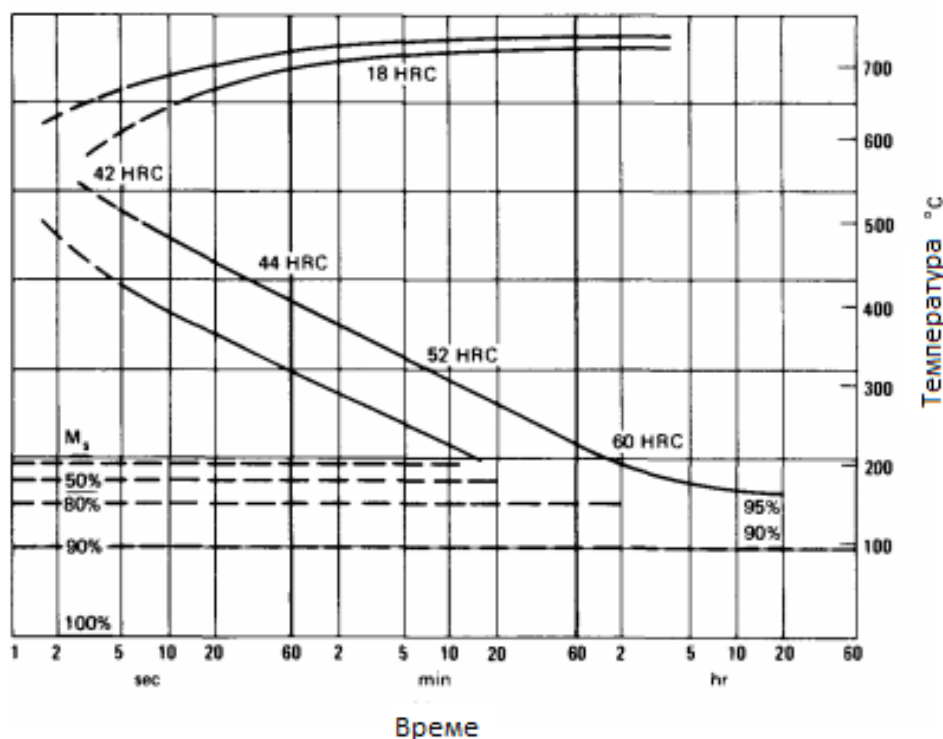


Слика 3.1 Микроструктуре каљеног угљеничног челика са различитих температура [1]

На слици 3.1 приказане су две микроструктуре W1 алатног челика након каљења. Каљење је обављено са две различите температуре, једна температура испод а друга изнад A_{cm} . Када се ова врста челика кали са температуре од око 790°C добија се структура састављена од врло финог мартензита и лоптастог карбида. Оваквим каљењем се добија микроструктура која не садржи заостали аустенит. Са друге стране каљењем истог челика са температуре од 855°C добија се структура коју чине игличасти мартензит, заостали аустенит и мала количина карбида издуженог облика. На слици 3.1 приказана је микроструктура каљеног W1 челика, лево са 790°C , десно 855°C . Разлог настанка лоше структуре каљењем са више температуре је прегревање челика у току аустенизације током чега долази до брзог повећања величине челичног зрна. Пораст челичног зрна доводи до смањења хомогености челика што за директну последицу има повећану

вероватноћу настанка пукотина. Пукотине настају као последица унутрашњих напона који настају у унутрашњости материјала током температурских промена. Унутрашњи напони углавном настају у току хлађења када интензитет хлађења спољашњости дела не одговара интензитету хлађења унутрашњости обрађиваног дела. На површини је брзина хлађења знатно виша, па се све промене брже одвијају. Спољашњи део се трансформише у мартензит, док унутрашњи део касни са трансформацијом. Када се у унутрашњости дела заврши мартензитна трансформација долази до повећања запремине што је директен повод за настајање унутрашњих напона [1].

Прокаљивост угљеничних алатних челика је мала због постојања изузетно мале количине легирајућих елемената. Легирајући елементи треба да успоре трансформацију аустенита у мартензит како би се створила повољна структура током хлађења. На слици 3.2 приказан је дијаграм изотермалног хлађења угљеничног челика W1. Криве почетка и краја трансформације имају типичан С облик [1].

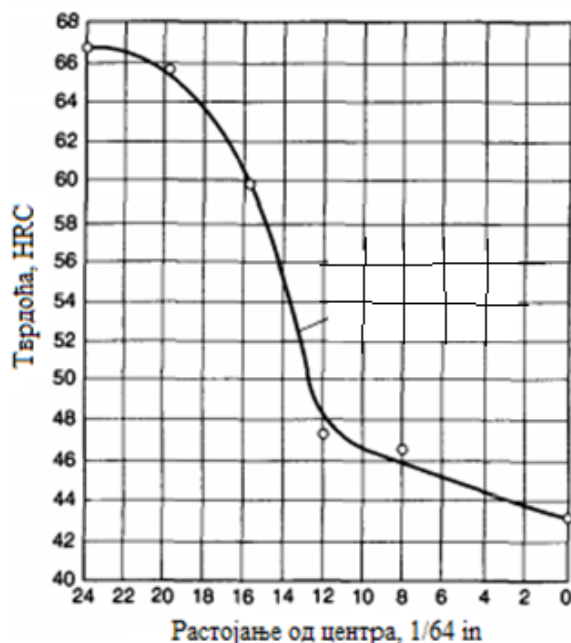


Слика 3.2 Дијаграм изотермалног хлађења аустенита угљеничног алатног W1 челика [1]

Нос С криве представља највећу брзину трансформације аустенита у овој зони трансформација аустенита траје свега неколико секунди. Због тога, како не би дошло до трансформације нежељене врсте брзина хлађења мора бити изузетно велика како би настала само мартензитна структура. У делу изнад носа С криве аустенит се трансформише у перлит, а испод носа се аустенит трансформише у различите типове бејнита. Релативно ниска прокаљивост угљеничних челика узрокује немогућност каљења дела било којих димензија по целој запремини [1].

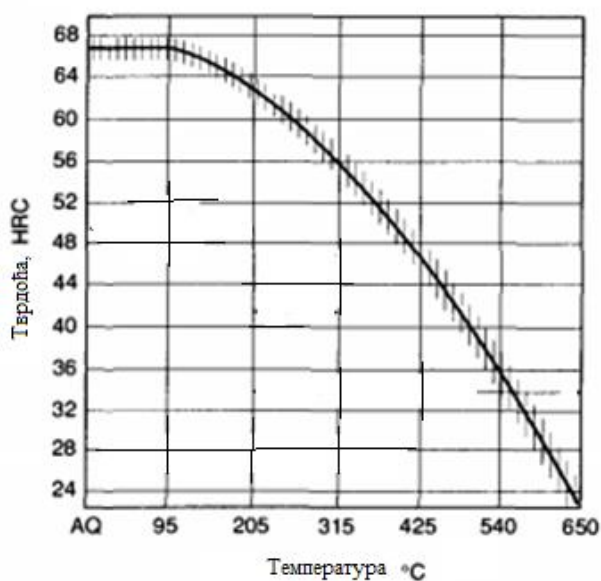
На слици 3.3 дат је дијаграм који показује колико је мала прокаљивост угљеничних челика. Прокаљивост је испитивана на челичним шипкама од угљеничног алатног челика. Шипка је окаљена према оптималним режимима, затим је исечена по дужини и

мерена јој је тврдоћа по разним пресецима. На површини дела тврдоћа достиже вредност од 67 HRC, док је око само осе симетрије шипке тврдоћа свега 43 HRC [1].



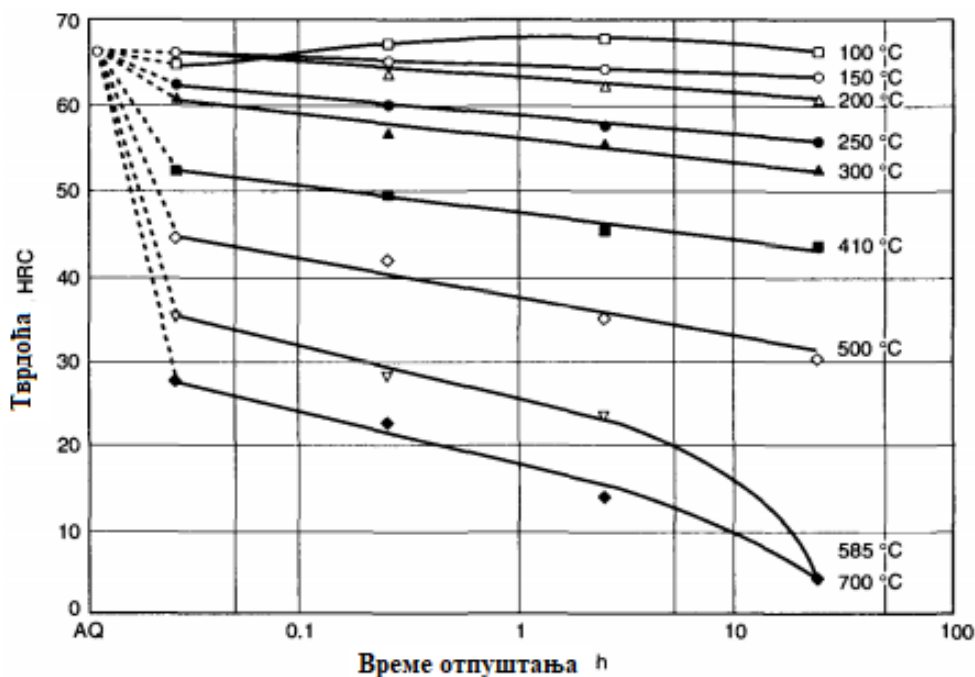
Слика 3.3 Приказ наглог пада тврдоће каљеног комада од угљеничног челика [1]

Каљени угљенични алатни челик има малу чврстоћу и висок ниво заосталих напона, па се због тога угљенични челици одмах након каљења подвргавају отпуштању. Отпуштање је неопходно урадити што пре након каљења, најбоље пре него што челик достигне собну температуру како не би дошло до настанка прелина. Тврдоћа каљених угљеничних алатних челика драстично опада са порастом температура отпуштања [1].



Слика 3.4. Дијаграм отпуштања, пад тврдоће угљеничних алатних челика са порастом температуре отпуштања [1]

На слици 3.4 приказан је дијаграм тврдоће и температуре отпуштања са кога се закључује да тврдоћа изузетно нагло пада са порастом температуре отпуштања. Дати дијаграм је урађен за угљенични алатни челик са 1% С, време отпуштања је износило 2 сата [1].



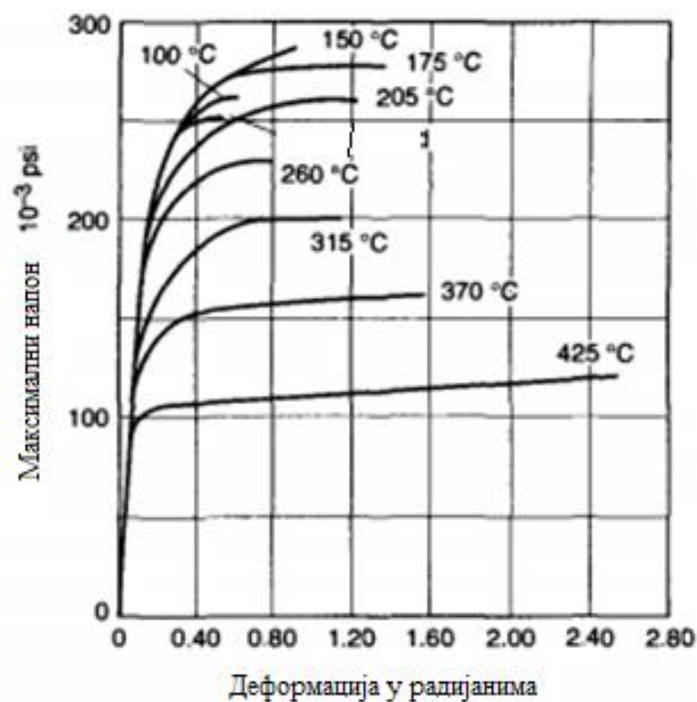
Слика 3.5 Дијаграм отпуштања, пад тврдоће угљеничних алатних челика са порастом времена отпуштања [1]

Поред температуре отпуштања на тврдоћу утиче и време отпуштања. Након извесног времена отпуштања делови од каљеног угљеничног алатног челика од вредности тврдоће након каљења долазе до драстично мањих вредности тврдоће за јако кратко време, а након тога долази до даљег али знатно блажег пада тврдоће [1].

Са порастом садржаја легирајућих елемената у челику долази и до повећања отпорности на пад тврдоће током отпуштања. Порастом температуре аустенизације више угљеника остаје у аустениту, па се након каљења добија мартензит чија је тврдоћа виша од тврдоће угљеничних алатних челика са нижом температуром аустенизације [1].

Отпуштање угљеничних алатних челика на температури од 150°C до 200°C повећава чврстоћу и деформабилност, док отпуштање на температури од 250°C смањује чврстоћу и деформабилност челика. Даљим повећањем температуре отпуштања се наставља смањивање чврстоће док деформабилност расте. На слици 3.6 дат је дијаграм који приказује утицај пораста температуре отпуштања на деформабилност угљеничног алатног челика [1].

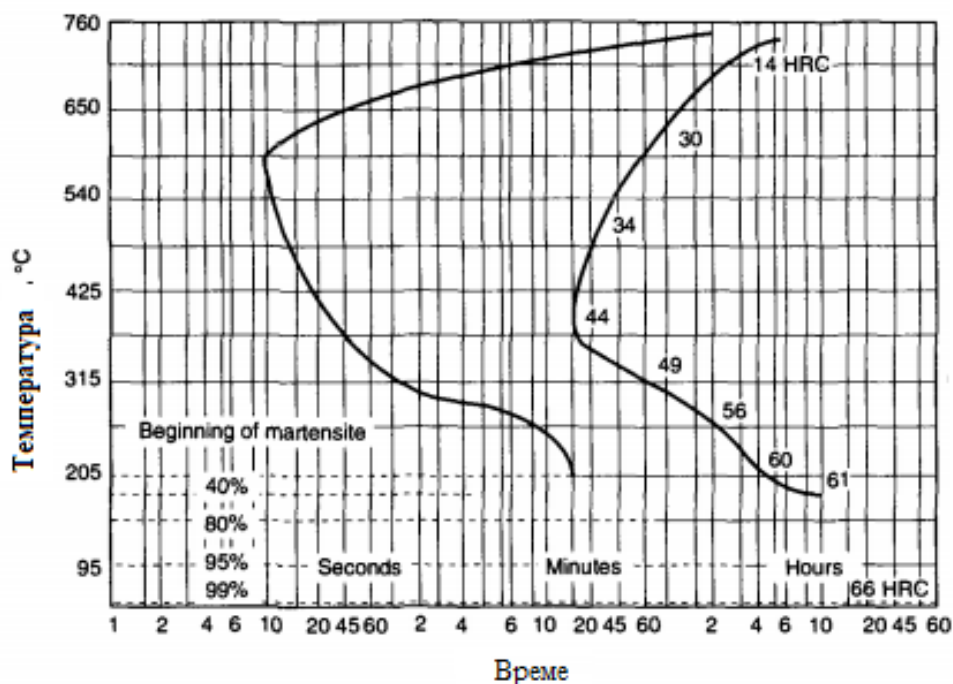
Криве су добијене увијањем челичних шипки након каљења и отпуштања се може видети да чврстоћа константно опада са порастом температуре док деформабилност опада само у температурском интервалу од 200°C до 300°C. Порастом температуре отпуштања на преко 300°C наставља се и раст деформабилности угљеничних алатних челика [1].



Слика 3.6 Дијаграм односа температуре отпуштања и завојне деформабилности [1]

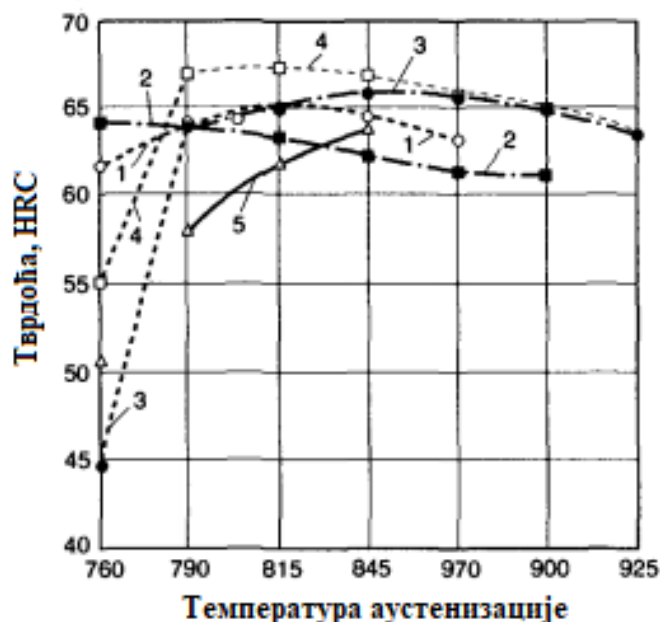
3.4 Термичка обрада алатних челика за хладан рад

Дијаграм изотермалног хлађења нисколегираног алатног челика за хладан рад О1 дат је на слици 3.7. Са слике се види да перлитно и бејнитно подручје није међусобно раздвојено што је одлика нисколегираних челика.



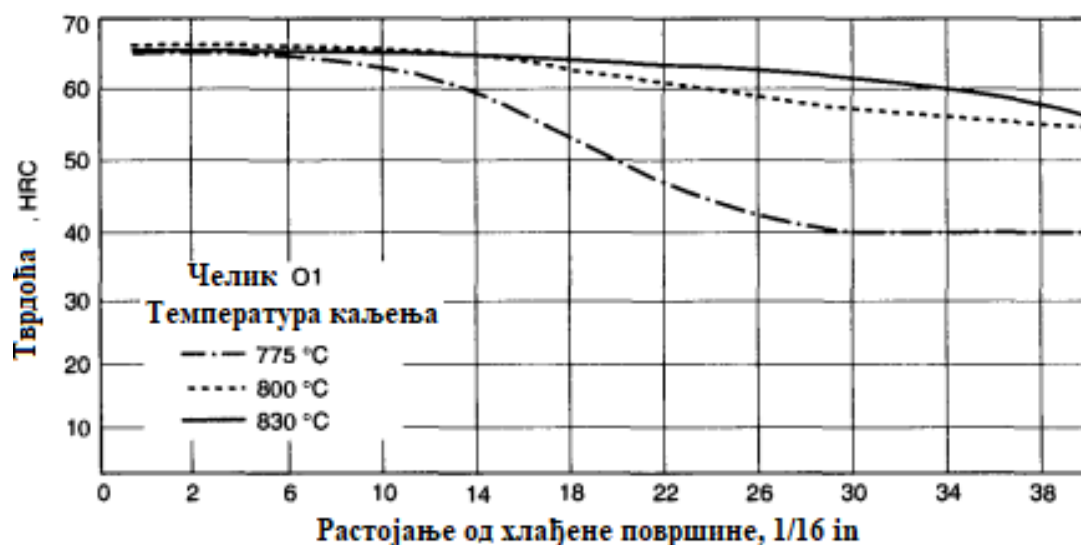
Слика 3.7 Дијаграм изотермалног хлађења нисколегираног алатног челика за хладан рад О1 [1]

Температура аустенизације је релативно ниска, то је последица присуства магнезијума у овој врсти челика који стабилизује аустенит, смањује A_1 температуру и на тај начин омогућује каљење при нижим температурама. Повећана тврдоћа каљеног дела је последица присуства заосталог аустенита у каљеној структури. На слици 3.8 дат је дијаграм зависности тврдоће каљеног нисколегираног алатног челика за хладан рад у зависности од температуре аустенизације [1].



Слика 3.8 Дијаграм утицаја температуре аустенизације на тврдоћу каљених нисколегираних алатних челика за топао рад (1- O1, 2-O2, 3-O3, 4-O4) [1]

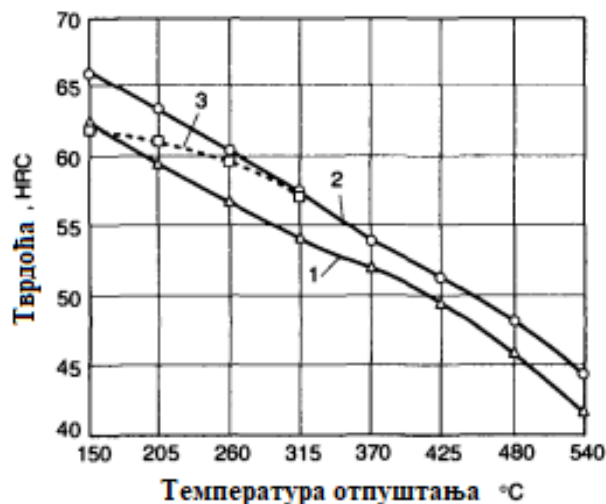
Највеће вредности тврдоће након каљења нисколегираних алатних челика за хладан рад се постижу са температуром аустенизације у интервалу од 790°C-890°C. Температура аустенизације утиче и на дубину прокаљивости код ове врсте челика. На слици 3.9 дат је Џомини дијаграм прокаљивости O1 челика у зависно од температуре аустенизације.



Слика 3.9 Дијаграм прокаљивости нисколегираног алатног челика за хладан рад O1 у зависности од температуре аустенизације [1]

Са дијаграма се може приметити да је пораст проваљивости директно везан за пораст температуре аустенизације челика.

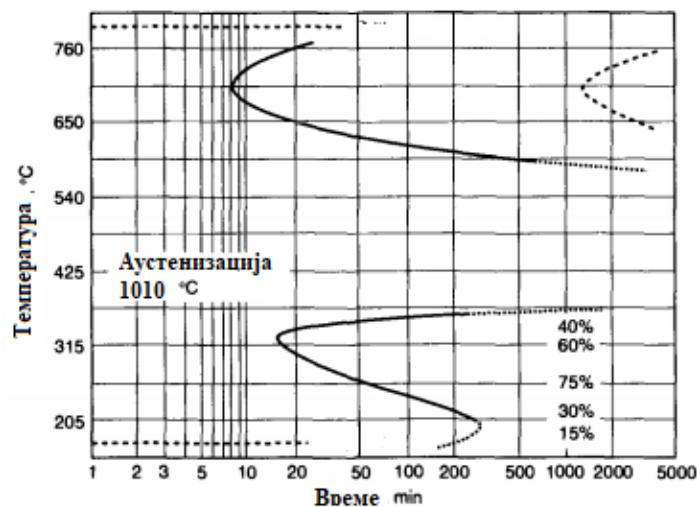
На слици 3.10 приказан је дијаграм отпуштања 3 врсте нисколегираних алатних челика за хладан рад.



Слика 3.10 Дијаграм отпуштања нисколегираних алатних челика за хладан рад (1 – O1, 2 – O2, 3 – O7) [1]

Порастом температуре отпуштања опада и тврдоћа челика. Пад тврдоће је константан и брз. На основу дијаграма отпуштања се може закључити да нисколегирани алатни челици за хладан рад нису адекватни за рад на температурама од 300°C. Како би се након отпуштања задржала што виша тврдоћа уз повећану чврстоћу потребно је отпуштање извести на температурама од 150°C-260°C [1].

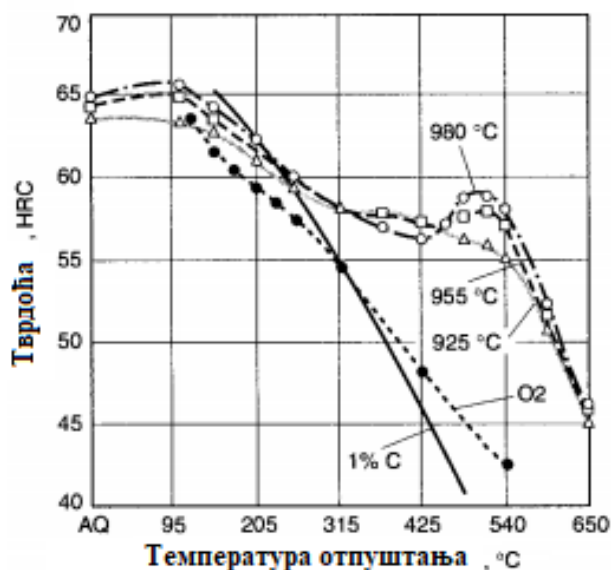
Висок садржај легирајућих елемената у високолегираним алатним челицима за хладан рад са 5% хрома има веома спору перлитну трансформацију приликом хлађења аустенита. На слици 3.11 дат је дијаграм изотермалног хлађења високолегираног алатног челика за хладан рад са 5% хрома А2 [1].



Слика 1.11 Дијаграм изотермалног хлађења високолегираног алатног челика за хладан рад са 5% хрома А2 [1]

На дијаграму се виде две С криве, једна за перлит и друга за бејнит. Овај тип челика је склон разугљеничењу током процеса аустенизације. Разугљеничење челика доводи до знатног пада тврдоће површине обрађиваног дела након каљења. Делови израђени од ове врсте челика се требају загревати у вакум пећима, соним купатилима или другим врстама пећи са неутралном или атмосфером богатом угљеником. Стопа разугљеничења се повећава са порастом времена и температуре аустенизације. Разугљеничење се може смањити употребом предгревања челика пре загревања за каљење. Адекватна контрола параметара загревања за аустенизацију је кључна за добијање структуре оптималне тврдоће. Превише ниска температура аустенизације доводи до високог садржаја угљеника и легирајућих елемената у карбидима што смањује каљивост челика што даље води до ниже тврдоће као последица формирања структуре која није мартензитна. Превише висока температура аустенизације ће створити превелику количину угљеника и легирајућих елемената из растворених карбида у аустениту што смањује температуру почетка мартензитне трансформације. Смањење температуре мартензитне трансформације смањује се и тврдоћа каљеног дела услед превелике количине заосталог аустенита у мартензитној структури [1].

На слици 3.12 дат је дијаграм отпуштања високолегираног алатног челика за хладан рад са 5% хрома.



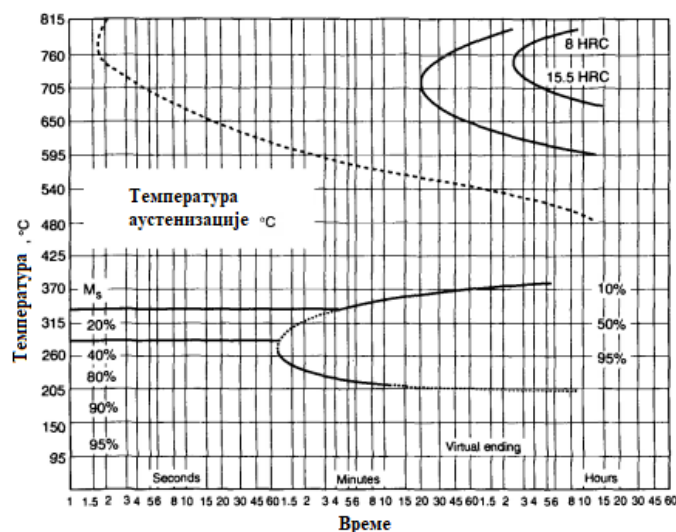
Слика 3.12 Дијаграм утицаја температуре аустенизације на отпуштање високолегираног алатног челика за хладан рад са 5% хрома A2 и угљеничног челика 1% C [1]

Отпорност A2 челика према паду тврдоће при отпуштању је знатно већа него код угљеничног челика са 1% C. На око 200°C почиње константан пад температуре, док при око 400°C долази до скока тврдоће. Скок тврдоће је везан за процес старења челика и траје од 400°C до 500°C након чега следи даљи пад тврдоће [1].

3.4 Термичка обрада алатних челика за топао рад

Сви алатни челици за топао рад имају сличне дијаграме изотермалног разлагања аустенита, које карактерише као и све високо легране алатне челике одвојене перлитне и

бејнитне области. На слици 3.13 приказан је дијаграм изотетмалног хлађења алатног челика за топао рад H11.



Слика 3.13 Дијаграм изотермалног разлагања аустенита алатног челика за топао рад H11 [1]

Због релативно малог садржаја угљеника у алатним челицима за топао рад легираним хромом тврдоћа настале структуре перлита је ниска, док је температура почетка мартензитне трансформације релативно висока. Због високе температуре почетка мартензитне трансформације након каљења структуру челика ће чинити искључиво мартензит уз мање количине заосталог аустенита [1].

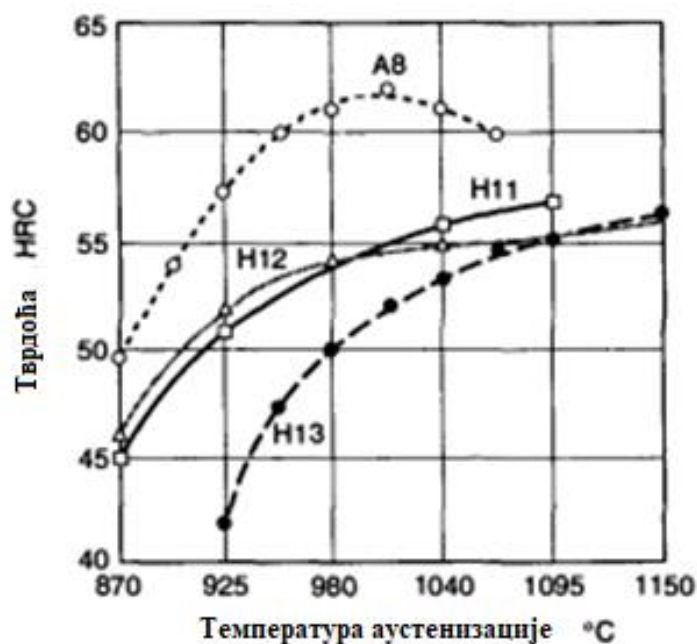
Сви алатни чеици за топао рад легирани хромом су каљиви и њихова прокаљивост је велика. На слици 3.14 да је дијаграм прокаљивости добијен Џомини методом, испитивана су два алатна челика за топао рад легирана хромом, један са додатком молибдена и један без [1].



Слика 3.14 Дијаграм прокаљивости алатног челика за топао рад легираног хромом H12 (1) и његове модификације без додатка молибдена (2) [1]

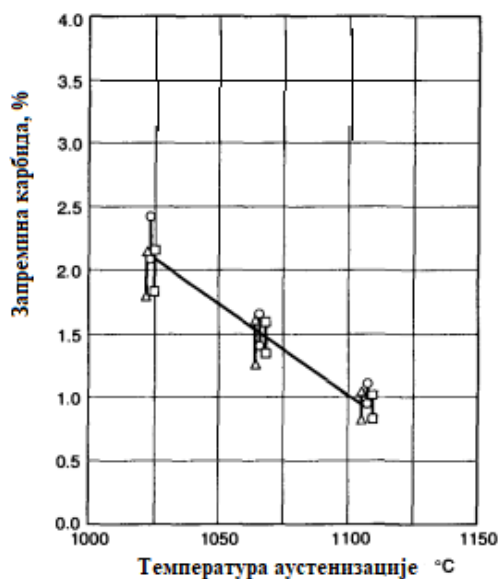
Са дијаграма се може закључити да челик (1) са додатком молибдена поседује знатно бољу прокаљивост од модификације истог челика без додатка молибдена. Може се закључити да молибден изузетно повољно утиче на прокаљивост. Ванадијум и волфрам код ове врсте челика немају изражен утицај [1].

Као и код осталих високолегираних алатних челика температура аустенизације има велики утицај на карактеристике обрађиваног дела. На слици 3.15 дат је дијаграм утицаја температуре аустенизације на тврдоћу каљеног дела.



Слика 3.15 Дијаграм утицаја температуре аустенизације на тврдоћу термички обрађеног дела [1]

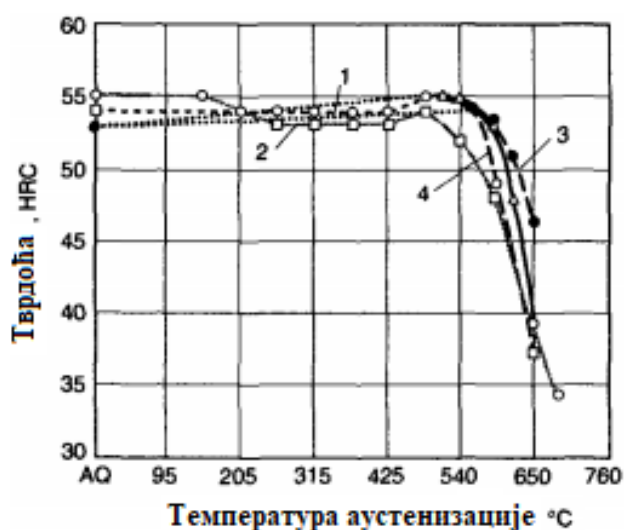
Мања тврдоћа каљеног челика са ниже температуре аустенизације је последица смањене каљивости челика услед другачије структуре решетке аустенита која садржи доста легирајућих елемената у свом саставу. Овакав састав тежи настајању грубих карбида, према проценама количина таквих карбида на нижим температурама износи 3.5-4.5%. Настанак ових карбида има за последицу смањење доступне количине легирајућих елемената потребних за каљење и старење током отпуштања. Порастом температуре аустенизације до одређене границе овај проблем нестаје. Повећањем температуре аустенизације смањује се проценат карбида у структури. На слици 3.16 дат је дијаграм утицаја температуре на садржај карбида.



Слика 3.16 Утицај пораста температуре аустенизације на смањење садржаја карбида алатног челика за топао рад легираног хромом H13 [1]

Са дијаграма се види да проценат карбида у челика са 3.5-4.5% на температури од 800-950°C опада на 2% на 1025°C и на око 1% карбида на температури од 1105°C. Смањени садржај карбида је последица њиховог разлагања на вишим температурама. На нижим температурама аустенизације постоје три типа карбида, MC који је богат ванадијумом, M_6C богат молибденом или гвожђем и M_7C_3 који је богат хромом или гвожђем. На вишој температури аустенизације од око 1100°C постојан је само ванадијумом богат карбид MC , док се остали карбиди растарају. Такође, порастом температуре аустенизације расте и аустенитно зрно [1].

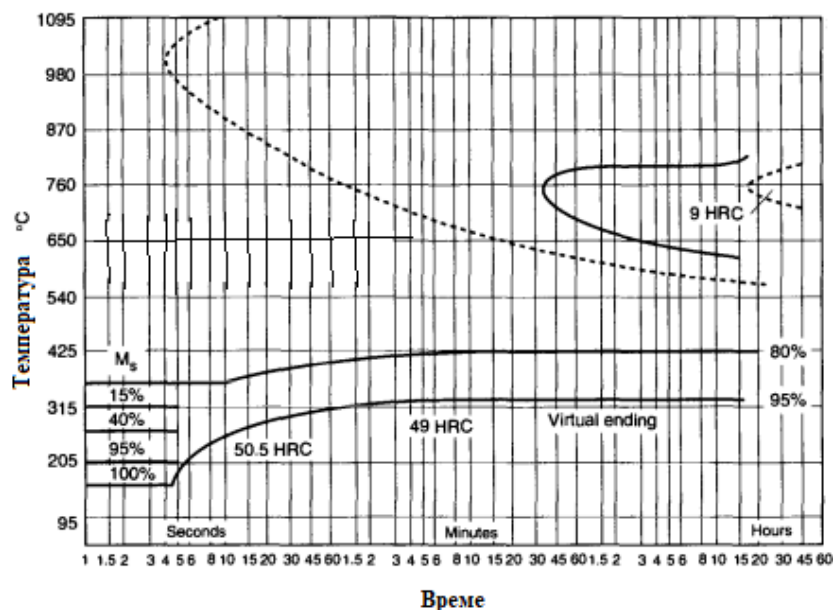
Алатни челици за топао рад легирани хромом имају добру отпорност према пада тврдоће на повишеним температурама. На температурама отпуштања су постојани што их чини идеалним за израду алата за топао рад. На слици 3.17 дат је дијаграм отпуштања за четири врсте алатних челика легираних хромом.



Слика 3.17 Дијаграм отпуштања алатних челика за топао рад легираних хромом (1-H12, 2-H13, 4-H10) [1]

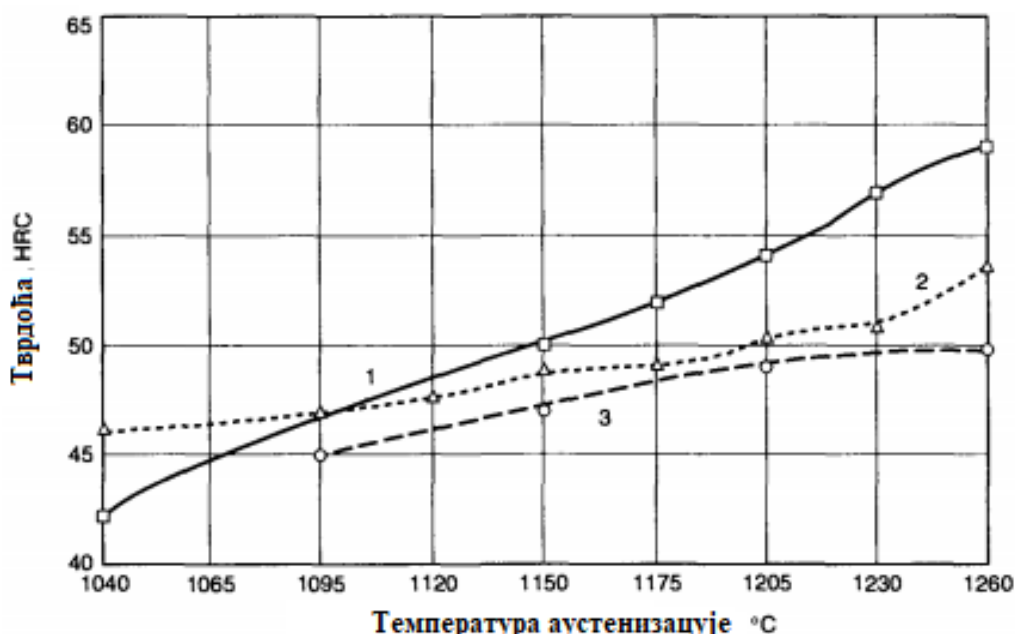
Криве отпуштања су са порастом температуре отпуштања константне праве линије које имају вредност тврдоће каљеног челика. На температури од око 540°C примећује се раст тврдоће челика услед старења челика. Кључни елемент овоквог пораста тврдоће је ванадијум који је растворен из карбида током аустенизације који на поменутој температури отпуштања гради fine карбиде класе MC . Алатни челици за топао рад легирани хромом се подвргавају отпуштању два пута до тврдоће од 44-50 HRC [1].

Алатни челици за топао рад легирани волфрамом имају највећу тврдоћу на повишеним температурама од свих алатних челика за топао рад. Веће вредности тврдоће су последица присуства карбида које граде легирајући елементи, нарочито волфрам. Мана карбида који повећавају тврдоћу је смањење чврстоће челика који су легирани волфрамом. Настали карбиди волфрама су M_6C који постоји у више варијанти од Fe_4W_2C до Fe_3W_6C који су стабилни на температурама отпуштања и аустенизације. На слици 3.18 дат је дијаграм изотермалног хлађења алатног челика за топао рад легираног волфрамом H21.



Слика 3.18 Дијаграм изотермалног хлађења алатног челика за топао рад легираног волфрамом H21 [1]

Као и код већине легираних алатних челика приметна је раздвојеност перлитног и мартензитног пордучја. Трансформација аустенита у перлит је изузетно спора, док је бејнитна трансформација знатно бржа. Након каљења се може очекивати структура мартензита са одређеном количином бејнита. Мали садржај угљеника утиче на повећање температуре почетка мартензитне трансформације. Због високе температуре почетка мартензитне промене садржај заосталог аустенита у челику након каљења ће бити мали. На слици 3.19 дат је дијаграм утицаја температуре аустенизације на тврдоћу [1].



Слика 3.19 Утицај температуре аустенизација на тврдоћу (1-H21, 2-H22) [1]

За разлику од раније поменутих врста алатних челика пораст тврдоће услед повећања температуре аустенизације код алатних челика за топао рад легираних волфрамом је последица не само растварања карбида већ и због повећања садржаја слободног

угљеника. Настанак слободног угљеника је последица постојања ферита у овој врсти челика који је стабилан при нижим температурама и трансформише се у аустенит тек на веома високим температурама [1].

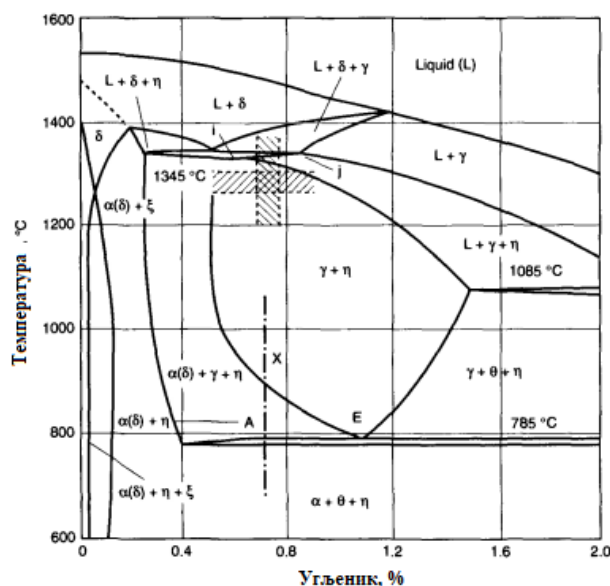
Алатни челици за топао рад легирани волфрамом имају добру прокаљивост, за каљење делова већих пречника потребна је примена бржих метода хлађења [1]:

- Директно хлађење у уљу загрејаном на 65°C;
- Хлађење у уљу које се прекида када површина хлађеног дела поцрни, тада се део вади из уља и хлађење се наставља на ваздуху;
- Хлађење у соном купатилу температуре 540°C-595°C, и након тога хлађење на ваздуху;
- Хлађење ваздушним млазом.

Како би се избегле потенцијалне прслине на алату током загревања потребно је алат прво загрејати на температуру од 815°C-900°C пре загревања до температуре потребне за каљење. Висока температура аустенизације доводи до бржег растварања карбида. Како би се постигла максимална тврдоћа обрађиваног дела температура аустенизације треба бити што је могуће виша. Након каљења делове треба што пре отпустити. Како би се избегло настајање прслина део треба споро загревати. У циљу што већег повећања чврстоће делови од алатног челика за топао рад легирани волфрамом се отпуштају два или три пута [1].

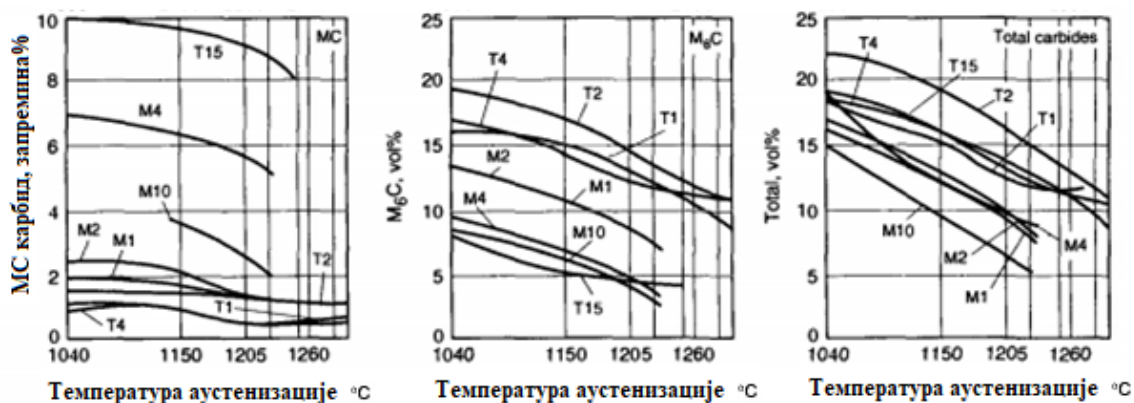
3.5 Термичка обрада брзоребрих алатних челика

Саставни део сваког процеса термичке обраде почиње загревањем обрађиваног материјала. Параметри загревања у великој мери утичу на квалитет изведене термичке обраде. Код брзоребрих челика је веома битан процес загревања, утицај загревања на аустенизацију има изузетан значај. На слици 3.20 дат је фазни дијаграм брзоребриг Т1 челика са кога се може видети да се процес аустенизације одвија на веома високим температурама које су нешто ниже од температуре топљења.



Слика 3.20 Фазни дијаграм брзоребриг Т1 челика [1]

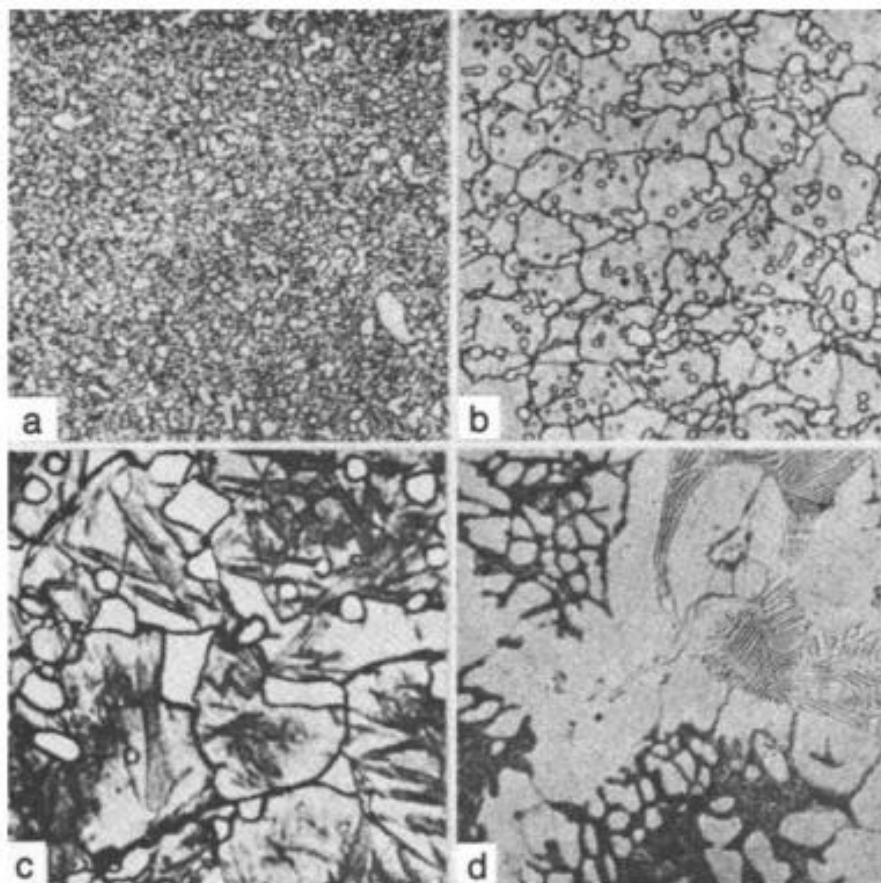
Процес аустенизације је веома кратак, износи 2-5 минута. Због изузетно високе потребне температуре аустенизације процес загревања се изводи у више узастопних загревања. Овакав начин загревања се користи како би се смањио топлотни шок услед кога се јављају пукотине. Као и код свих других челика процес аустенизације им за циљ да прерасподели садржај угљеника и створи оптималне услове за извођење термичке обраде. За разлику од других челика код брзоребричних челика легирани карбиди су веома стабилни. Код брзоребричних челика доминирају $M_{23}C_6$, M_6C , MC карбиди, од којих се $M_{23}C_6$ у потпуности раствара на 1095°C . Остала два карбида легирајућих елемената су стабилни до знатно виших температура, у стварности се ни при изузетно високим температурама не растварају у потпуности. На слици 3.21 приказани су дијаграми на којима се види пораст растворљивости поменутих карбида легирајућих елемената са порастом температуре аустенизације [1].



Слика 3.21 Пораст растворљивости M_6C и MC карбида са порастом температуре [1]

Сви брзоребрични челици садрже поменуте карбиде, разлика је само у њиховој количини, количина одређених карбида коју садрже одређује вредности тврдоће. M_6C карбиди имају већу склоност ка растворљивости при високим температурама од MC карбида. Вишу температуру топљења имају брзоребрични челици легирани волфрамом и они се загревају на скоро 1290°C како би се постигла потпуна аустенизација. Брзоребрични челици легирани молибденом имају нижу тачку топљења и како би се потпуно аустенизовали потребно их је загрејати на температуру од 1220 - 1230°C [1].

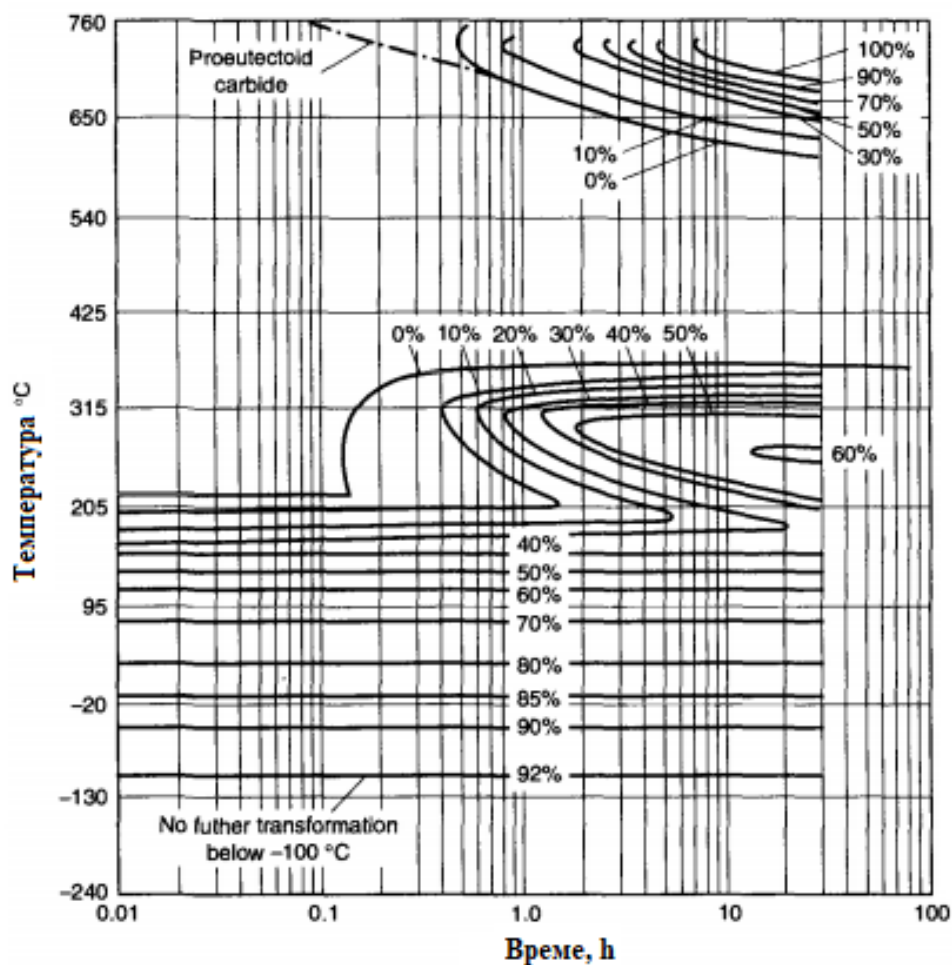
Процес загревања и аустенизације челика је неопходан како би се након каљења добила структура повољних карактеристика. Поред повећане тврдоће која је главни аспект термичке обраде каљења неопходно је створити и што бољу структуру челичних зрна. Као што је познато крупна зрна су повољна приликом механичке обраде, нарочито обраде резањем, али како би се добио део који има добре карактеристике тврдоћи и чврстоће потребно је формирање ситнозрне структуре. Ситнозрна структура је нарочито битна код алата, због веће отпорности на хабање и веће отпорности на настајање пукотина услед термо-механичког дејства. Поред температуре аустенизације на величину зрна велики утицај имају карбиди легирајућих елемената, њихов састав и количина. На слици 3.22 приказане су четири различите структуре брзоребричног челика Т6. Разлике у структури су последица различитих температура загревања за термичку обраду.



Слика 3.22 Структуре брзорезног челика Т6 (а-1260°C-, б-1290°C, с-1300°C, d-1315°C) [1]

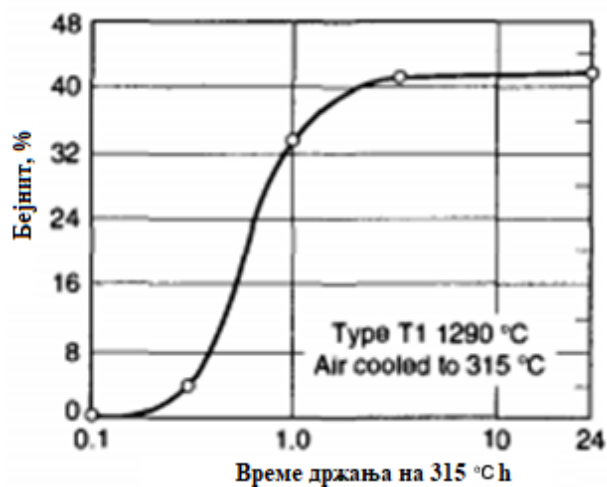
Величина аустенитног зрна које настаје при температури од 1260-1300°C има изразито фину структуру, али порастом температуре аустенитно зрно константно расте са порастом температуре загревања и количине карбида. Хомогеност структуре аустенита зависи од распореда карбида, ако су карбиди легирајућих елемената равномерно распоређени по целој запремини аустенит је хомоген. Фина структура настаје у зонама у којима су присутни карбиди легирајућих елемената, док груба структура настаје у зонама у којима нема карбида. Уколико је потребно брзорезни челик поново загрејати након каљења и отпуштања може доћи до настанка изузетно грубе структуре која има малу чврстоћу и која је веома крта. Због овога брзорезни челици након поновног загревања до температуре аустенације више нису повољни за коришћење [1].

Каљивост и прокаљивост високолегираних алатних челика је одлична, па су брзорезни алатни челици као представници групе високолегираних алатних челика изузетни са аспекта каљивости и прокаљивости. На слици 3.23 дат је дијаграм изотермалних хлађења брзорезног челика Т1 који је типичан за све брзорезне челике.



Слика 3.23 Дијаграм изотермалног хлађења брзорезног челика Т1 [1]

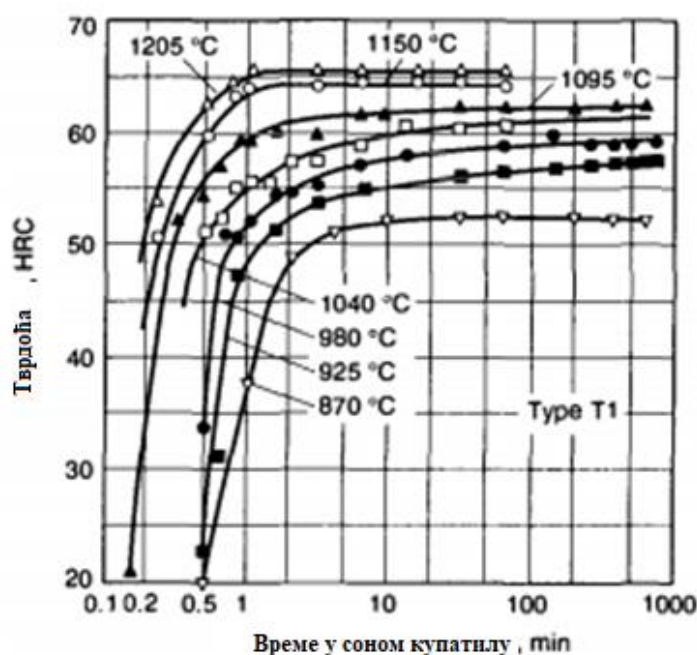
Са дијаграма се види да промене аустенита засноване на дифузији одвијају прилично споро и да перлитно и бејнитно подручје раздваја велики температурски опсег који раздваја С криву на два дела. На слици 3.24 дат је дијаграма трансформације аустенита у бејнит у функцији времена при изотермалном држању на 315°C.



Слика 3.24 Дијаграм формирања бејнита у функцији времена челика Т1 при изотермалном држању на 315°C [1]

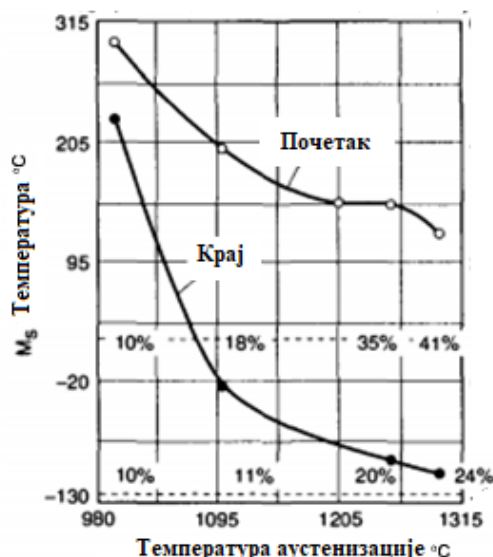
Изотермална трансформација аустенита у бејнит престаје када садржај бејнита достигне 40%. Преостали аустенит се не трансформише у бејнит током даљег изотермалног држања и у даљем току хлађења до собне температуре не трансформише се у мартензит.

Иако се брзорежни челици могу калити приликом хлађења на ваздуху често се примењује хлађење у соним или металним купатилима чија је температура 540-650°C. Поменути велики температурски опсег хлађења у соним и металним купатилима осигурава трансформацију карбида без губитка тврдоће. Највећа предност изотермалног држања везана је за постизање константне температуре по целој запремини каљеног дела. На слици 3.25 дат је дијаграм тврдоће брзорезног челика Т1 у функцији времена при изотермалног хлађења у зависности од температуре аустенизације.



Слика 3.25 Дијаграм тврдоће у функцији времена изотермалног држања брзорезног челика Т1 у зависности од температуре аустенизације [1]

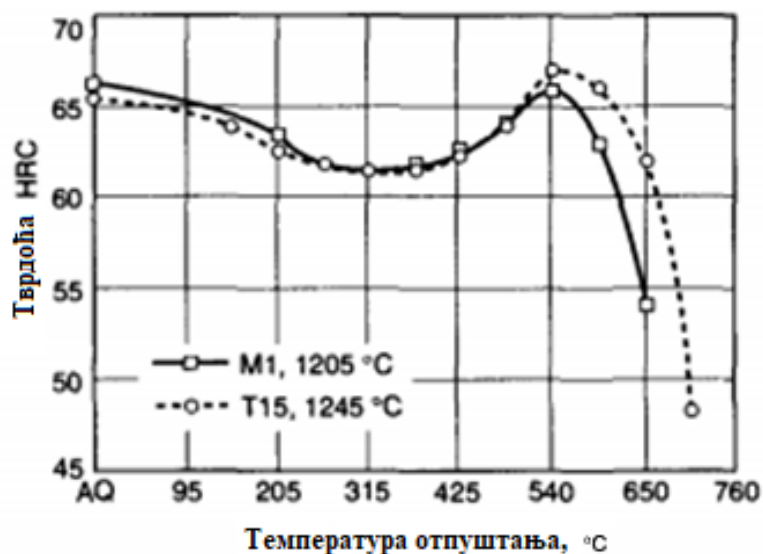
Приликом изотермалног хлађења брзорезног челика Т1 са било које температуре аустенизације висока вредност тврдоће се добија врло брзо, за свега неколико минута. Добијене вредности тврдоће се разликују, са порастом температуре аустенизације расте и тврдоћа. Повећањем температуре аустенизације долази до повећаног разлагања карбида што доводи до повећања количине угљеника у аустениту, због чега приликом хлађења долази до појаве заосталог аустенита. Повећани садржај заосталог аустенита је везан за нижу температуру почетка процеса трансформације аустенита у мартензит. На слици 3.26 дат је дијаграм утицаја температуре аустенизације на почетак и крај температуре трансформације аустенита у мартензит [1].



Слика 3.26 Утицај температуре аустенизације на почетак и крај мартензитне трансформације [1]

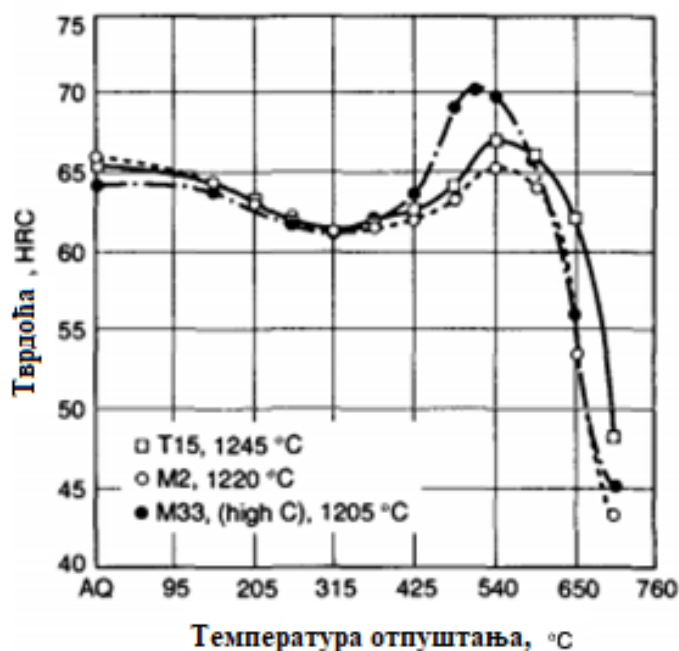
Што је температура аустенизације брзорезних челика виша и ближа температури топљења то је негативан утицај заосталог аустенита у мартензитној структури мањи. Различите количине заосталог аустенита може бити хлађење са прекидом.

Отпуштање је последњи критични аспект успешне термичке обраде брзорезних алатних челика. Структура брзорезног челика после каљења, а пре отпуштања се састоји од карбида, мартензита и заосталог аустенита чије количине зависе од легирајућих елемената и поступка обраде и најчешће су карбиди 10%, мартензит 70% и заостали аустенит 20%. Релативно груби карбиди остају непромењени на нижим температурама отпуштања. Мартензит и заостали аустенит једног челика имају различите кристалне решетке али исти хемијски састав, ово је последица не мењања хемијског састава аустенита при хлађењу. Мартензит и заостали аустенит су веома нестабилни на температурама отпуштања, при чему се одвија дифузија угљеника и легирајућих елемената. На слици 3.27 дат је дијаграм отпуштања брзорезних челика М1 и Т15.



Слика 3.27. Дијаграм отпуштања брзорезних челика М1 и Т15 [1]

Дијаграм отпуштања брзореzних челика се разликује од дијаграма других алатних челика са мањим садржајем легирајућих елемената. Код брзореzних челика је изражен ефекат седундарног отврдњавања или старења челика. На нижим температурама отпуштања брзореzни челици се не разликују знатно од осталих алатних челика, долази до константног пада тврдоће услед разлагања карбида. Порастом температуре формирају се карбиди fine структуре услед чега расте тврдоћа. При константим временима отпуштања од 1 и 2 сата пораст тврдоће почиње на температури од 315°C и достиже највећу вредност на 510-565°C. Сви брзореzни челици имају сличне дијаграме отпуштања [1].



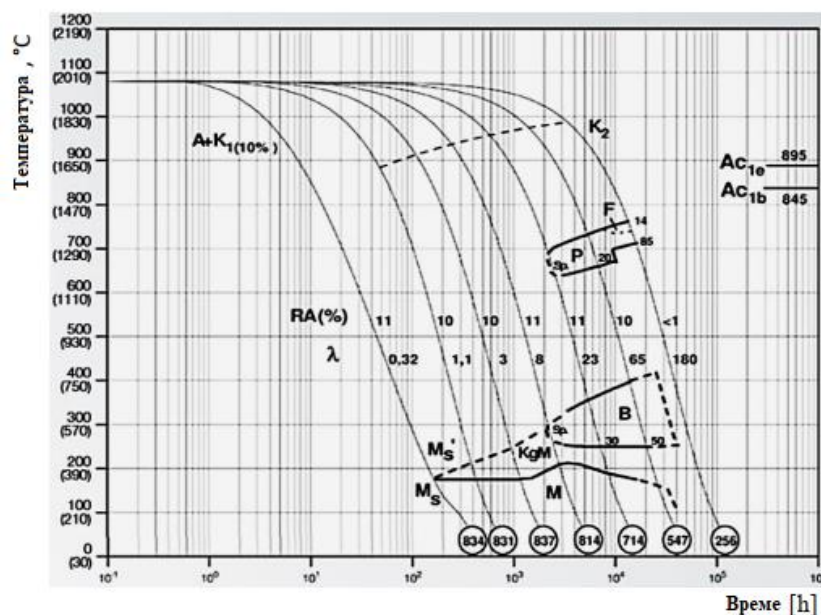
Слика 3.28 Утицај температуре отпуштања на тврдоћу три врсте брзореzних челика [1]

Промене микроструктуре брзореzних челика које доводе до промене тврдоће су везане за процесе дифузије и због тога директно зависи од температуре и времена отпуштања.

Главна разлика процеса отпуштања брзореzних челика и других алатних челика са мањим садржајем легирајућих елемената је висока стабилност заосталог аустенита у брзореzном челику. У току отпуштања заостали аустенит се не мења, али приликом хлађења се трансформише у мартензит. Настали мартензит није отпуштен и има мању чврстоћу од остатка мартензита што доводи до укупног пада чврстоће обрађиваног дела. За брзореzне челике је потребно извести два процеса отпуштања како би се мартензит настао од заосталог аустенита отпустио и како би му се повећала чврстоћа и обрађивани део хомогенизовао [1].

3.7 Термичка обрада синтерованих алатних челика

Термичка обрада синтерованих алатних челика је према поступку обраде слична поступцима обраде других алатних челика. Термичка обрада синтерованог алатног челика K490MC који синтеровани алатни челик намењен за хладан рад је слична термичкој обради високолегираних алатних челика за хладан рад са 5% хрома. Температура аустенизације је слична и 1030-1080°C [6].



Слика 3.29 Дијаграм континуалног хлађења синтерованог алатног челика K490MC [6]

Након каљења челика К490МС његову структуру чине мартензит и заостали аустенит као и карбиди. Заостали аустенит с трансформира у мартензит у току процеса отпуштања [6].

Поступак препоручене термичке обраде се састоји из жарења, каљења и отпуштања. Жарење се користи као средство за смањење напона насталих током процеса синтеровања, због могућег настајања прелина током загревања. Каљење и отпуштање се користе како би се добила структура са великом тврдоћом и добрим параметрима чврстоће [6].

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА И ДИСКУСИЈА

Експериментална испитивања алатних челика су извођена на челицима 1.2379, 1.2343 и 1.2842. Сва три челика припадају групи алатних челика и биће подвргнути термичкој обради каљења и отпуштања. У експерименту су коришћене по четири епрувете од сваке врсте челика, које су обрађиване различитим режимима.

Експеримент треба да покаже пре свега утицај брзине хлађења на тврдоћу обрађиваног материјала коришћењем разних средстава за хлађење, као и утицај температуре отпуштања на тврдоћу.

4.1 Концепција, циљ и планирање експерименталних испитивања

Разноврсност материјала и средстава за хлађење коришћених у експерименту треба да покаже утицај више параметара који су веома важни за термичку обраду алатних челика. Како би настао алат који треба да обавља своју функцију у променљивим условима експлоатације неопходно је коришћењем разних параметара термичке обраде којима постижу одговарајући параметри алата. Експеримент треба да покаже утицај великог броја параметара на обрађивани део и да се на основу добијених резултата тврдоће оцени који параметри највише одговарају термичкој обради алатних челика.

У табели 4.1 дат је табеларни приказ експеримента са материјалима, средствима за хлађење појединачних епрувета и њихове температуре отпуштања.

Табела 4.1 Табеларни приказ експеримента

Експеримент		
Материјал 1 Високолегирани алатни челик за хладан рад са 12% хрома 1.2379	Материјал 2 Алатни челик за топао рад легиран хромом 1.2343	Материјал 3 Нисколегирани алатни челик за хладан рад 1.2842
Каљење 1. Вода 2. Вода уз мешање 3. Раствор соли у води 4. Раствор соли у води уз мешање	Каљење 1. Уље 2. Уље уз мешање 3. Ваздух 4. Вода 65°C	Каљење 1. Вода уз мешање 2. Раствор соли у води уз мешање 3. Уље уз мешање 4. Ваздух
Отпуштање 1. Вода на 250°C 2. Вода уз мешање на 650°C 3. Раствор соли у води на 450°C 4. Раствор соли у води уз мешање на 650°C	Отпуштање 1. Уље на 450°C 2. Уље уз мешање на 650°C 3. Вода 65°C на 250°C	Отпуштање 1. Вода уз мешање на 450°C 2. Раствор соли у води уз мешање на 650°C 3. Уље уз мешање на 250°C

У експерименту су коришћена три алатна челика: високолегирани алатни челик за хладан рад са 12% хрома 1.2379, алатни челик за топао рад легиран хромом 1.2343 и

нисколегирани алатни челик за хладан рад 1.2842. Од сваке врсте челика су израђене по четири епрувете. Епрувете ће се загревати до температуре потребне за каљење и затим се калити у неком од средстава за хлађење. Епрувете направљене од истог материјала су хлађене у различитим средствима за хлађење како би се упоредио њихов утицај у процесу термичке обраде. Након каљења све епрувете осим оних које су каљене на ваздуху се подвргавају отпуштању. Слично као и код каљења епрувете од једног материјала се неће отпуштати на истој температури осим у случају челика 1.2379 ког кога ће две епрувете бити отпуштане на истој температури. Температуре отпуштања ће износити 250°C, 450°C и 650°C.

4.2 Експериментална опрема и уређаји

За извођење експеримента су коришћене две коморне електро пећи, једна је коришћена за загревање пре каљење, док је друга коришћена за отпуштање. Разлог примене две пећи је краће време експеримента, смањење времена између каљења и отпуштања као и мање напрезање самих пећи.

Пећ која је коришћена за загревање до температура потребних за каљење је обављала загревање до 1040°C и 840°C. Ова пећ је приказана на слици 4.1.



Слика 2.1 Пећ коришћена за загревање до температуре каљења приликом убацивања епрувета

Друга коморна пећ је коришћена за отпуштање, коришћена су три режима отпуштања. На свакој од три коришћене температуре епрувете су држане у пећи пола сата. На слици 4.2 приказана је коморна пећ коришћена за отпуштање.



Слика 4.2. Коморна пећ коришћена за отпуштање

Након каљења и отпуштања свим епруветама је мерена тврдоћа како би се добили резултати примењене термичке обраде. Мерења су обављана на уређају за испитивање тврдоће по Роквелу, уређај је пре мерења баждарен. На слици 4.3 приказан је механички уређај за мерење тврдоће по Роквелу који је коришћен у експерименту.



Слика 4.3. Механички уређај за мерење тврдоће по Роквелу

Укупно је измерено 75 вредности тврдоће епрувета, мерења су обављана пре термичке обраде, након каљења и након отпуштања.

4.3 Средства за хлађење

Као средства за хлађење у овом експерименту коришћена су вода, вода на 65°C , раствор соли у води, минерално уље и ваздух. Средства за хлађење као што су вода, раствор соли у води и уље су у неким процесима хлађења епрувета коришћени уз константно мешање. Мешање је изазивао сам комад који се из помоћ кљешта кружно кретао кроз средство за хлађење и тиме повећавао брзину хлађења.

Према наведеном коришћено је пет средстава за хлађење, помоћу којих је могуће постићи осам различитих брзина хлађења. У табели 4.2 дате су брзине хлађења коришћених средстава за хлађење.

Табела 4.2 Брзина хлађења коришћених средстава за хлађење

Средство за хлађење	Брзина хлађења, °C/s
Вода на 20°C	70
Раствор соли (20% NaCl)	75
Вода на 65°C	20
Минерално уље	25
Ваздух	1

Као средства за хлађење са највећим брзинама хлађења истичу се вода и раствор соли са брзином хлађења од око 70°C/s, вода угрејана на 65°C и минерално уље имају сличне брзине хлађења од око 20°C/s. Средство за хлађење са најмањом брзином хлађења коришћено у експерименту је ваздух, чија је брзина хлађења нешто испод 1°C/s.

На слици 4.4 приказан је процес хлађења епрувете у раствору соли у води.



Слика 4.4 Посуда са средством за хлађењем (раствор соли у води)

4.4 Узорци за испитивање

У експерименту су коришћене епрувете цилиндричног облика које су добијене из шипкастих профила. Обрада епрувета је урађена на стругу, како би се добиле тачније димензије и како би чеоне површине биле равне и погодне за мерење. У табели 4.3 дате су димензије коришћених епрувета.

Табела 4.3 Димензије коришћених епрувета

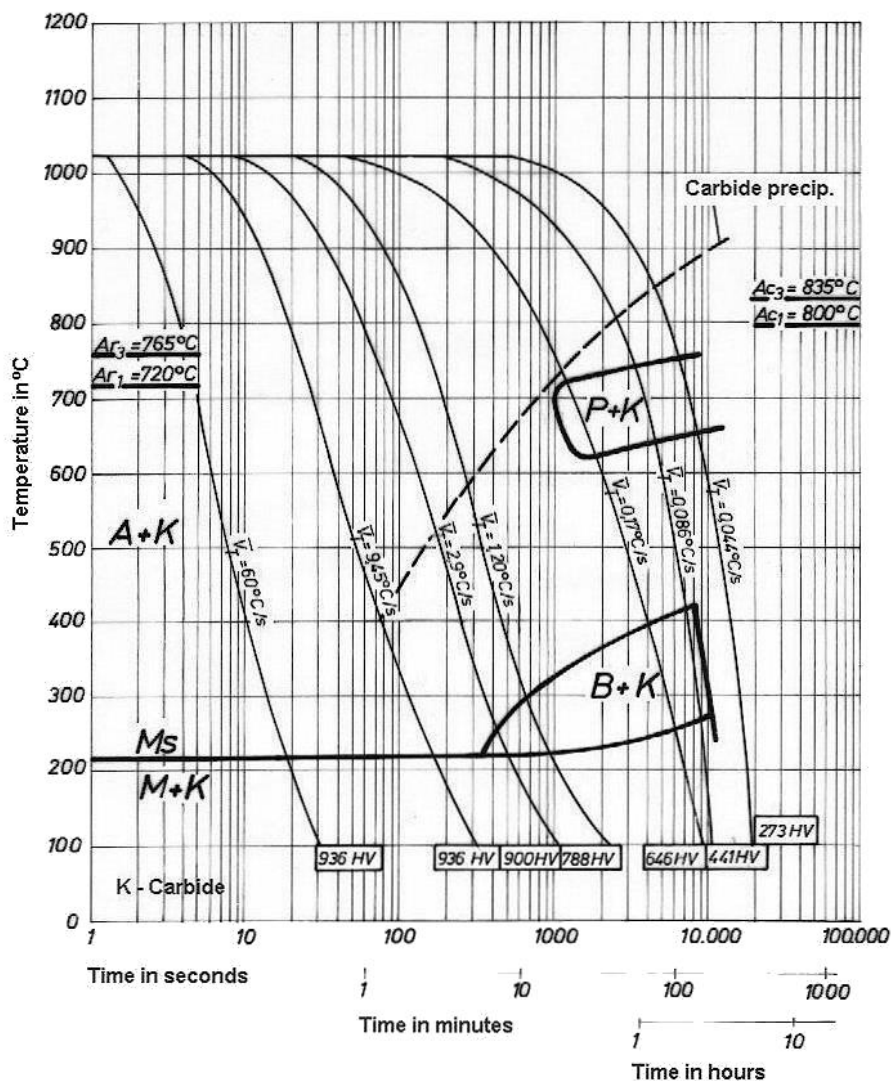
Материјал епрувете	Димензије епрувете, mm
1.2379	Ø20 x 15
1.2343	Ø21 x 15
1.2842	Ø25 x 15

На слици 4.5 су приказане епрувете сва три материјала коришћена у експерименту.



Слика 4.5. Епрувете коришћене у експерименту (са лева на десно 1.2379, 1.2343 и 1.2842)

Челик 1.2379 спада у групу високолегираних алатних челика за хладан рад са 12% хрома, према америчком AISI стандарду носи назив D2. Користи се за израду алата за деформисање код којих је отпорност на хабање изузетно битна. Тврдоћа овог материјала пре термичке обраде износи 26 HRC.



Слика 4.6 Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2379

Табела 4.4 Хемијски састав високолегираног алатног челика за хладан рад са 12% хрома 1.2379

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.53	0.35	0.43	12	1	0.85

Табела 4.5 Класификација обрађиваног челика према светским стандардима

Mat. No	DIN	EN	AISI	JUS
1.2379	X155CrVMo12-1	X153CrVMo12	D2	Č4850

Температура аустенизације челика 1.2379 се креће у температурском интервалу 1020-1060°C. Са дијаграма континуалног хлађења се види да температура почетка мартензинте трансформације износи 210°C.

Челик 1.2343 спада у групу алатних челика за топао рад легираних хромом, према америчком AISI стандарду носи назив H11. Наменен је за израду делова који су

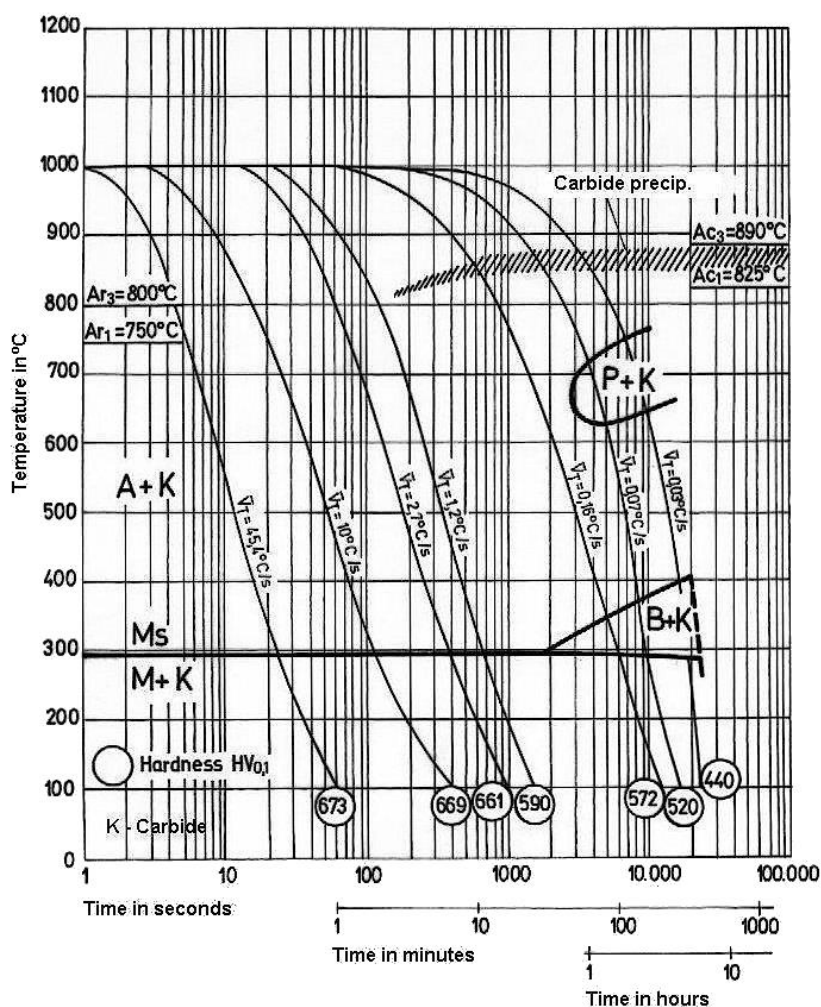
изложени учесталим променама температуре. Постојани су до 537°C. Такође, користе се за израду алата за топло ковање. Тврдоћа овог материјала пре термичке обраде износи 25 HRC.

Табела 4.6 Хемијски састав алатног челика за топао рад легираног хромом 1.2379

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.37	1	0.38	5.15	1.3	0.4

Табела 4.7 Класификација обрађиваног челика према светским стандардима

Mat. No	DIN	EN	AISI	JUS
1.2343	X38CrMoV5-1	X38CrMoV5-1	H11	Č4751



Слика 4.7 Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2343

Температура аустенизације челика 1.2343 се креће у температурском интервалу 1000-1040°C. Са дијаграма континуалног хлађења се види да температура почетка мартензинте трансформације износи 290°C.

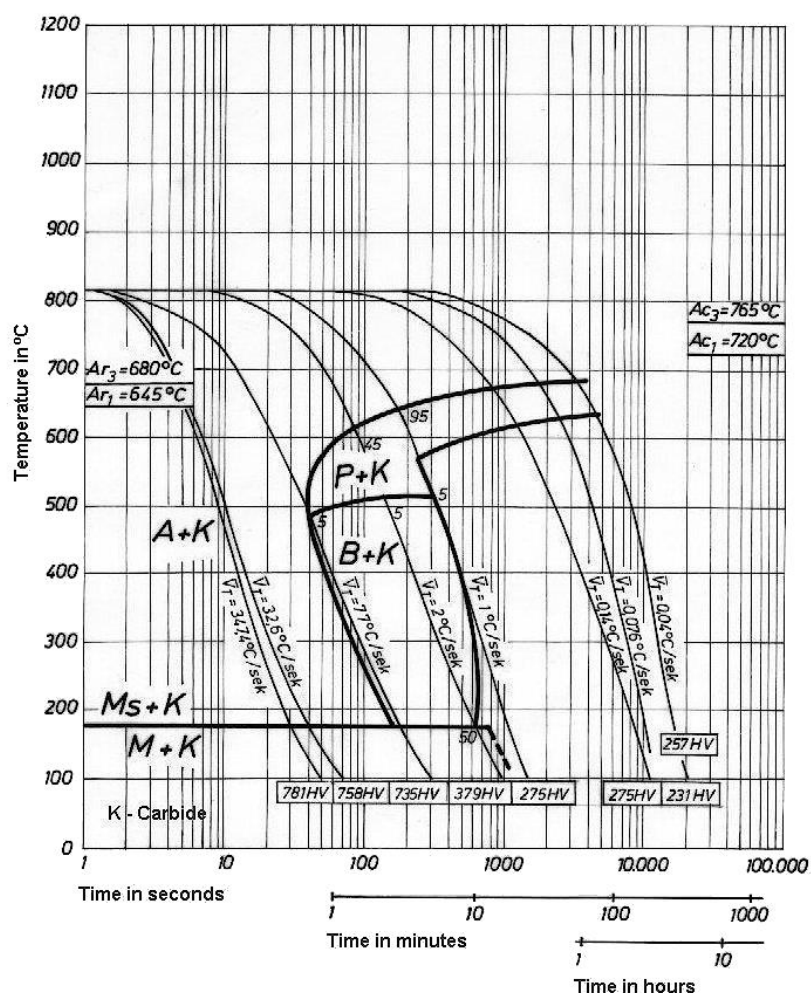
Челик 1.2842 спада у групу нисколегираних алатних челика за хладан рад, према америчком AISI стандарду носи назив О2. Овај челик се користи за израду мерних инструмената и разних врста ножева за обраду дрвета. Тврдоћа овог материјала пре термичке обраде износи 20 HRC.

Табела 4.8 Хемијски састав алатног челика за топао рад легираног хромом 1.2842

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.9	0.25	2	0.35	0.1	0.13

Табела 4.9 Класификација обрађиваног челика према светским стандардима

Mat. No	DIN	EN	AISI	JUS
1.2842	/	90MnCrV8	O2	Č3840



Слика 4.8 Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2842

Температура аустенизације челика 1.2842 се креће у температурском интервалу 790-820°C. Са дијаграма континуалног хлађења се види да температура почетка мартензинте трансформације износи 180°C.

4.5 Режији термичке обраде

Челици 1.2379 и 1.2343 имају готово идентичне температуре аустенизације па су њихове епрувете загреване заједно. Жељена температура аустенизације је 1040°C. Када пећ достигне жељену температуру убацују се епрувете и држе на тој температури око 10 минута. Време загревања је добијено коришћењем методе Каменичког. Загрејани делови се ваде из пећи и хладе у различитим средствима за хлађење. У табелама 4.10 и 4.11 приказана су средства за хлађење загрејаних епрувета и времена хлађења.

Табела 4.10 Средства за хлађење епрувета од челика 1.2379 и време њиховог хлађења

Редни број епрувете	Средство за хлађење	Време хлађења, s
1	Вода	15
2	Вода уз мешање	15
3	Раствор соли у води	10
4	Раствор соли у води уз мешање	15

Табела 4.11 Средства за хлађење епрувета од челика 1.2343 и време њиховог хлађења

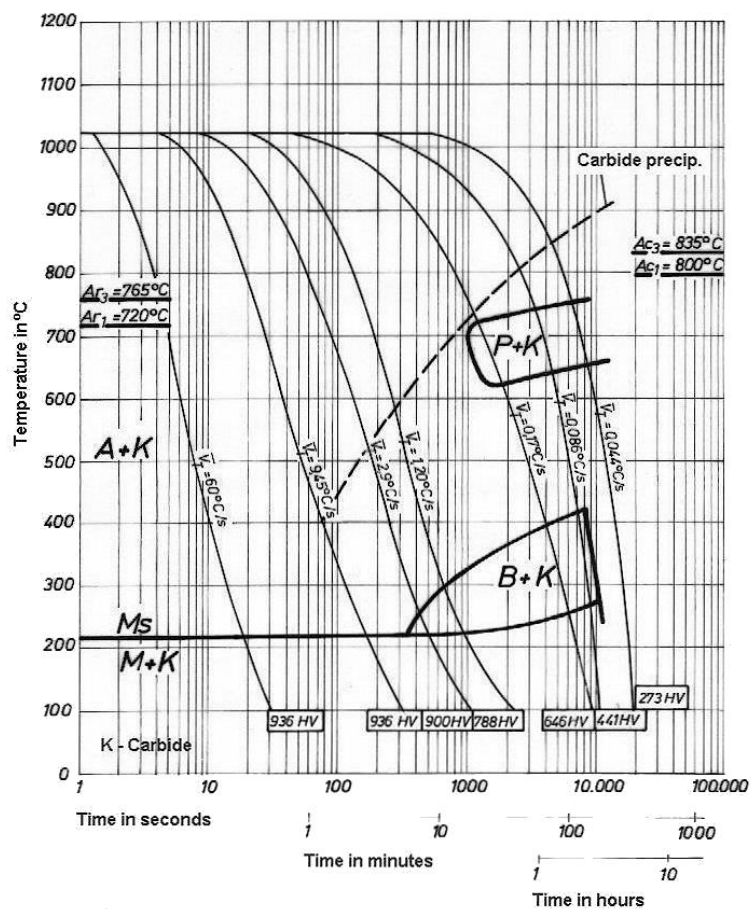
Редни број епрувете	Средство за хлађење	Време хлађења, s
1	Уље	95
2	Уље уз мешање	90
3	Ваздух	900
4	Вода на 65°C	55

За челик 1.2842 жељена температура аустенизације износи 820°C. Када пећ достигне жељену температуру убацују се епрувете и држе на тој температури око 10 минута. Време загревања је добијено коришћењем методе Каменичког. Загрејани делови се ваде из пећи и хладе у различитим средствима за хлађење. У табели 4.12 су приказана су средства за хлађење загрејаних епрувета и времена хлађења.

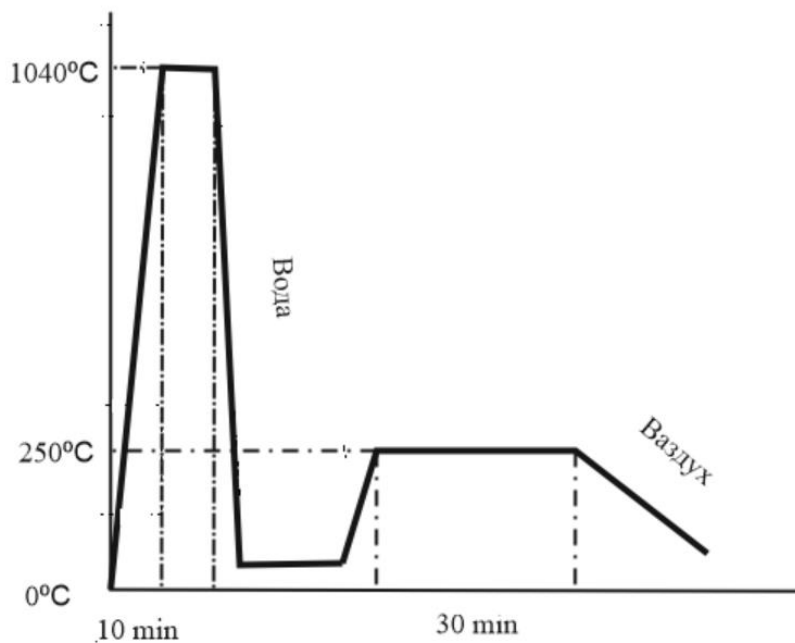
Табела 4.12 Средства за хлађење епрувета од челика 1.2842 и време њиховог хлађења

Редни број епрувете	Средство за хлађење	Време хлађења, s
1	Вода уз мешање	12
2	Раствор соли у води уз мешање	12
3	Уље уз мешање	80
4	Ваздух	450

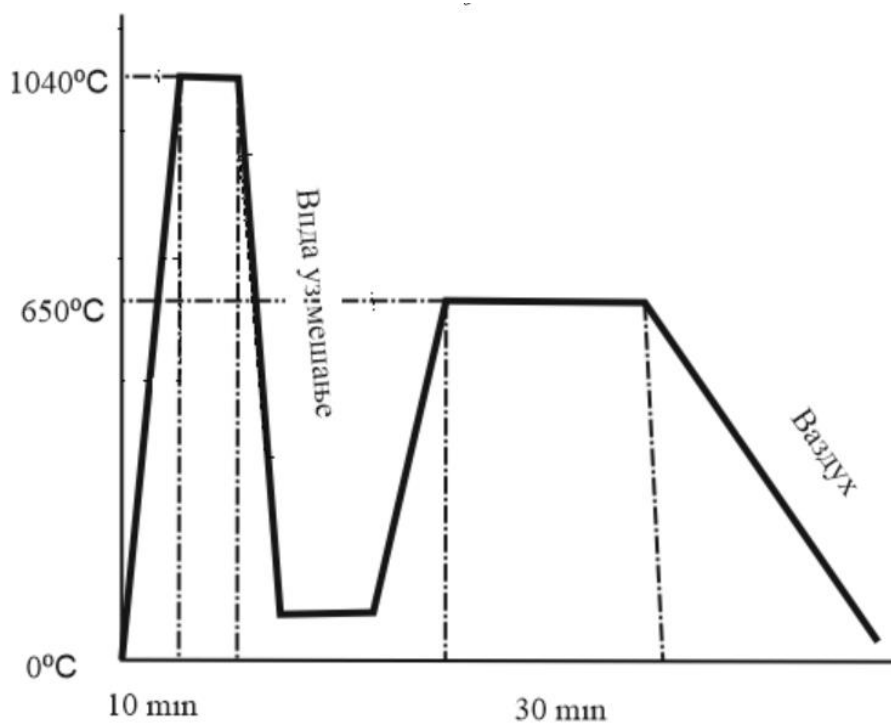
Челик 1.2379 се према КХ дијаграму датом на слици 4.9 загрева до температуре аустенизације која износи 1040°C и затим хлади у одређеном средству за хлађење. Све епрувете се након каљења отпуштају на одређеним температурама. На сликама 4.10, 4.11, 4.12 и 4.13 дати су схематски прикази процеса термичке обраде епрувета израђених од челика 1.2379.



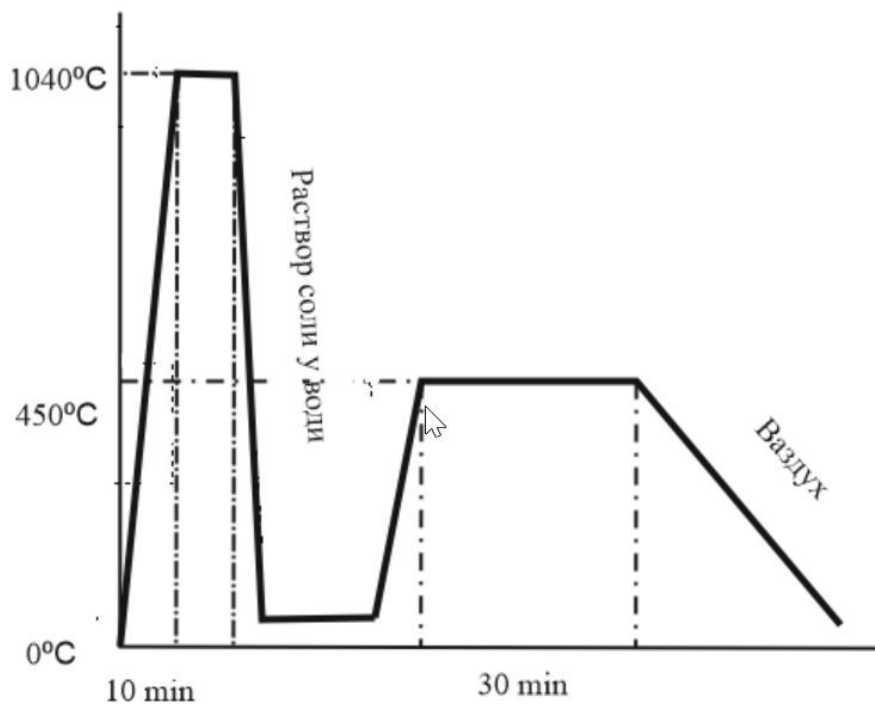
Слика 4.9. Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2379



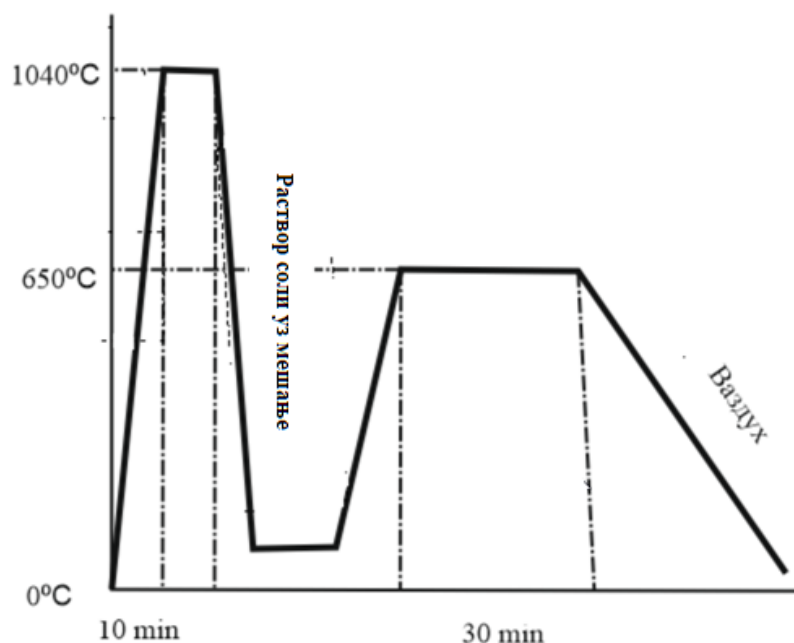
Слика 4.10. Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2379 каљеног у води



Слика 4.11 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2379 каљеног у води са мешањем

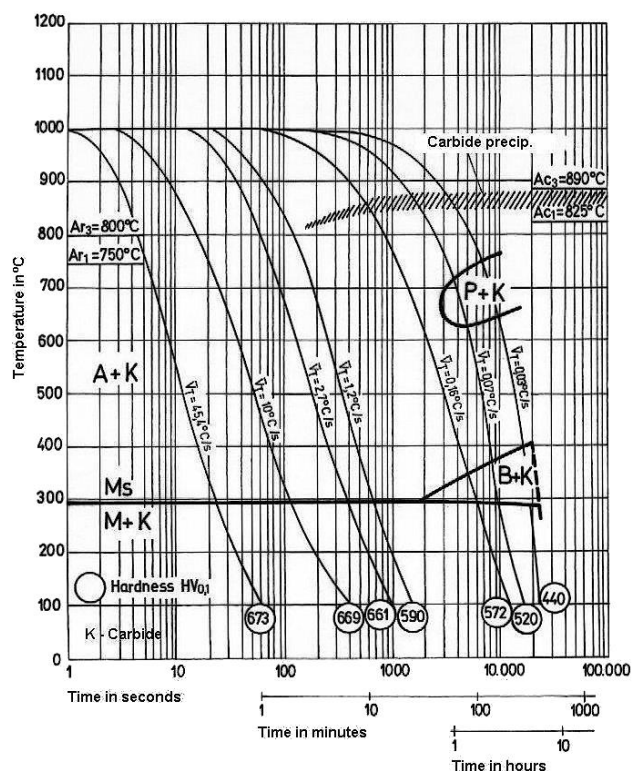


Слика 4.12 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2379 каљеног у раствору соли у води

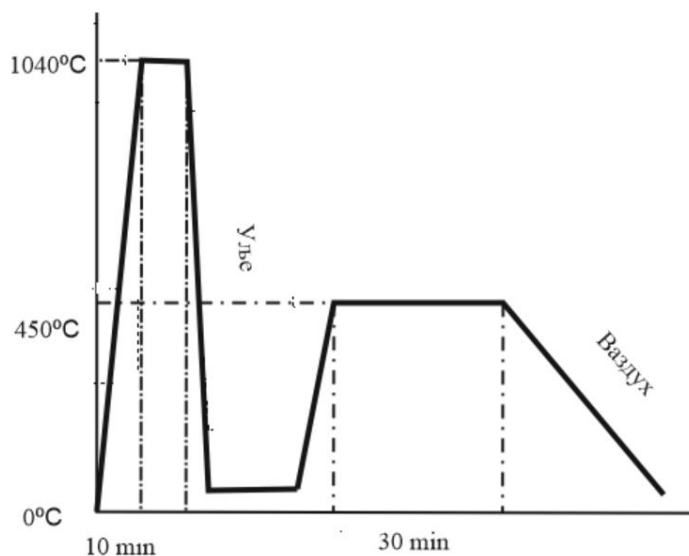


Слика 4.13 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2379 каљеног у раствору соли у води са мешањем

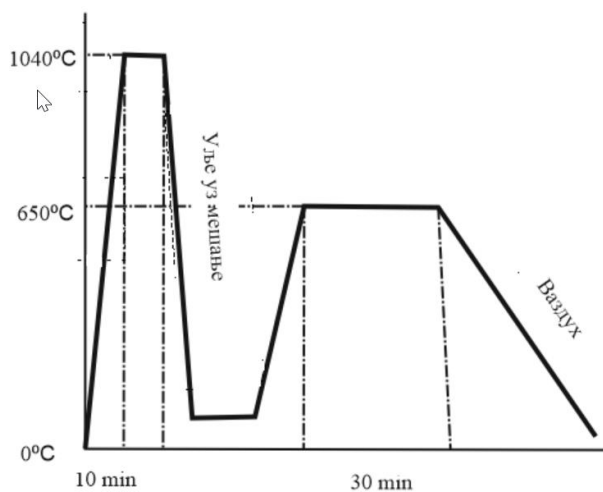
Челик 1.2343 се према КХ дијаграму датом на слици 4.14 загрева до температуре аустенизације која износи 1000°C и затим хлади у одређеном средству за хлађење. Све епрувете се након каљења отпуштају на одређеним температурама. Процесу отпуштања се не подвргава епрувета каљена на ваздуху. На сликама 4.15, 4.16, 4.17 и 4.18 дати су схематски прикази процеса термичке обраде епрувета израђених од челика 1.2343.



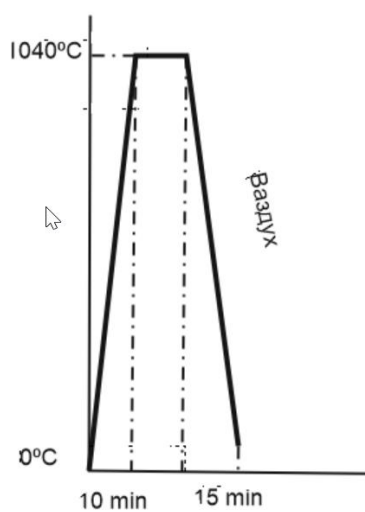
Слика 4.14 Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2343



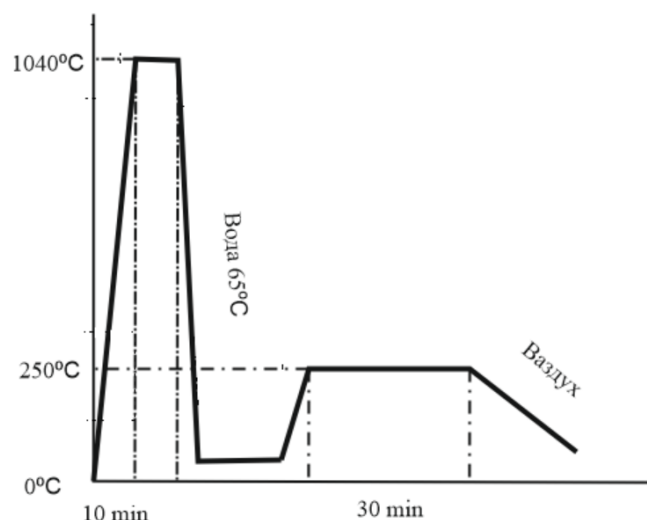
Слика 4.15. Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2343 каљеног у уљу



Слика 4.16 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2343 каљеног у уљу уз мешање

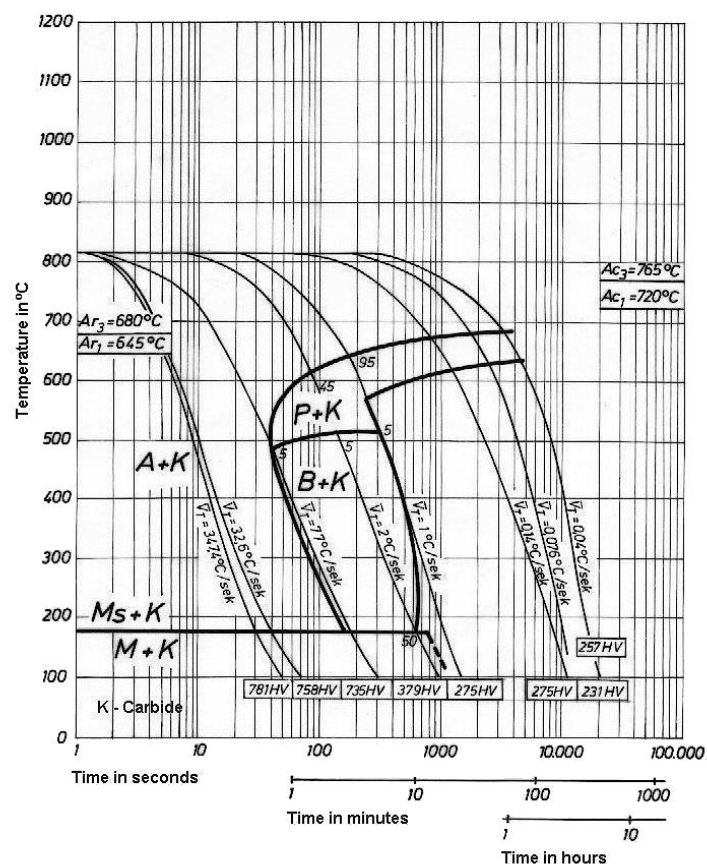


Слика 4.17 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2343 каљеног на ваздуху

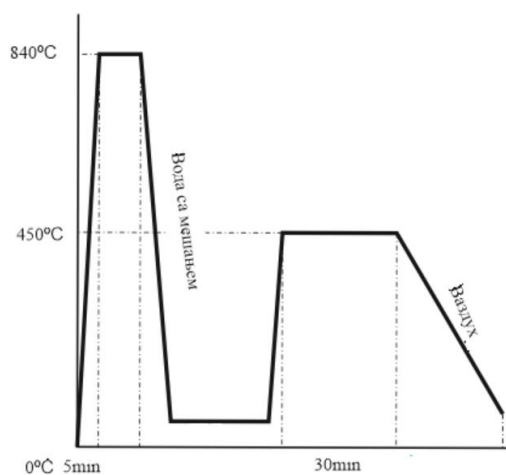


Слика 4.18 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2343 каљеног у води загрејаној на 65°C

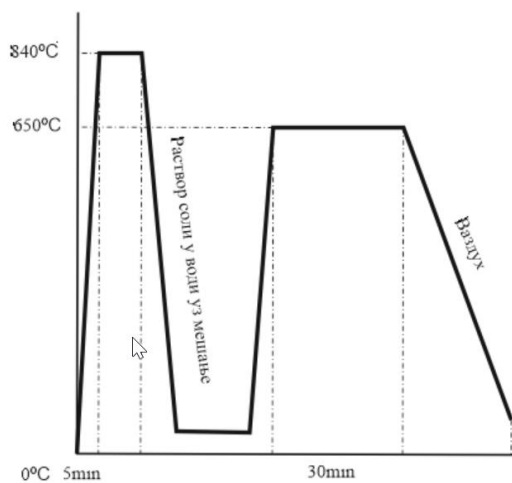
Челик 1.2842 се према КХ дијаграму датом на слици 4.19 загрева до температуре аустенизације која износи 840°C и затим хлади у одређеном средству за хлађење. Све епрувете се након каљења отпуштају на одређеним температурама. Процесу отпуштања се не подвргава епрувета каљена на ваздуху. На сликама 4.20, 4.21, 4.22 и 4.23 дати су схематски прикази процеса термичке обраде епрувета израђених од челика 1.2842.



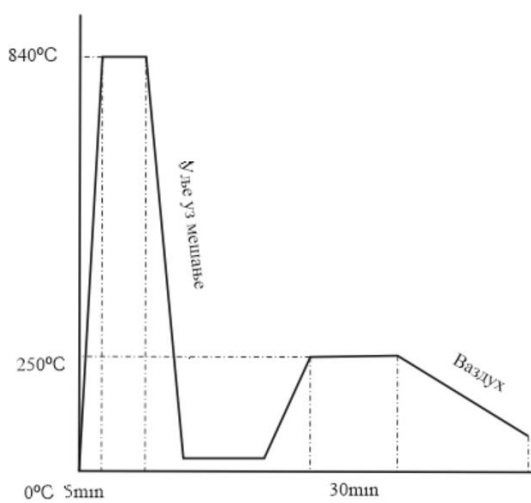
Слика 4.19 Дијаграм континуалног хлађења челика 1.2842



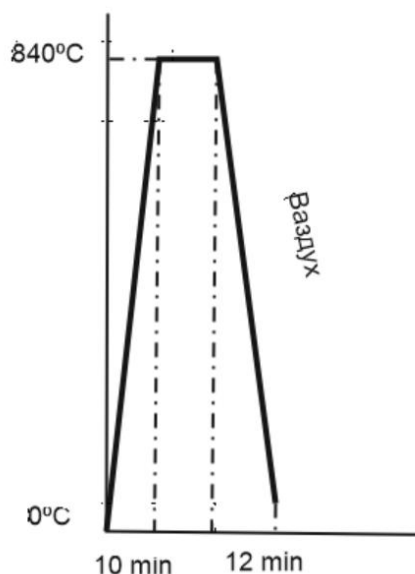
Слика 4.20 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2842 каљеног у води уз мешање



Слика 4.21 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2842 каљеног у раствору соли у води уз мешање



Слика 4.22. Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2842 каљеног у уљу уз мешање



Слика 4.23 Схематски приказ поступка термичке обраде челика 1.2842 каљеног на ваздуху

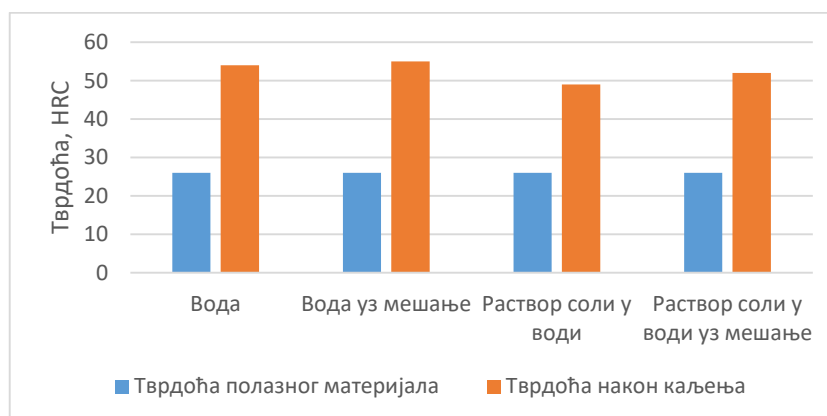
Након постигнуте температуре епрувета које су потребне за каљење није препоручљиво даље их задржавати на тој температури, већ их је након минут до два након постизања температуре потребно извадити из пећи и хладити брзином већом од критичне.

4.6 Резултати експерименталних испитивања

Након хлађења измерена је тврдоћа свих обрађиваних епрувета, у табели 4.13 су дати резултати мерења тврдоће окаљених епрувета челика 1.2379.

Табела 4.13 Резултати мерења тврдоће челика 1.2379 у HRC након каљења у различитим средствима хлађења

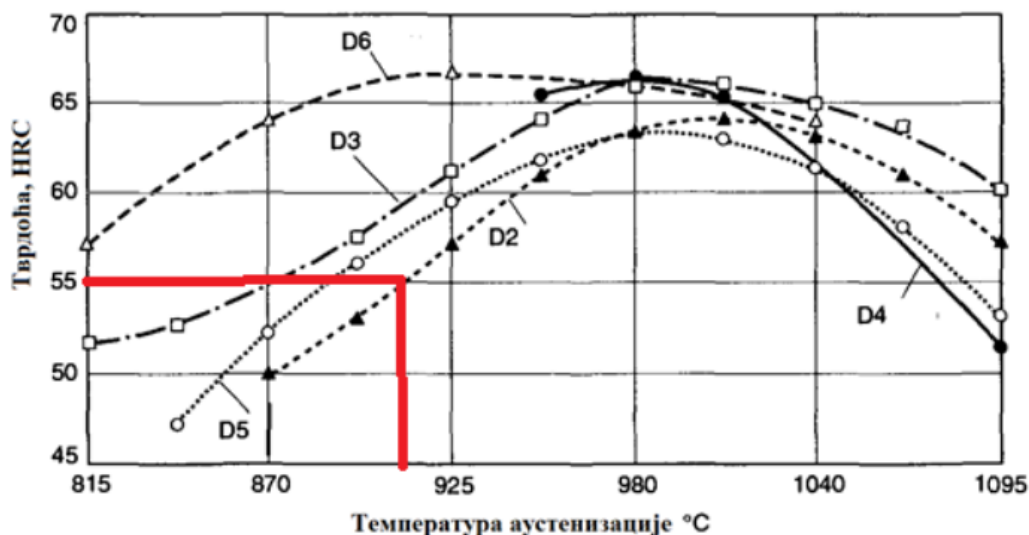
Редни број епрувете / Средство за хлађење	1	2	3	Просечна тврдоћа
Вода	56.5	53.5	53.5	54.5
Вода уз мешање	53	56.5	55	55
Раствор соли у води	48	48.5	51	49
Раствор соли у води уз мешање	52	52	52.5	52



Слика 4.24. Хистограм тврдоће челика 1.2379 након каљења у различитим средствима за хлађење

Тврдоћа челика 1.2379 каљеног у води износи 54.5 HRC. Са дијаграма континуалног хлађења овог челика се види да измерена тврдоћа одговара брзини хлађења од око 1°C/s , што је далеко ниже од брзине хлађења у води.

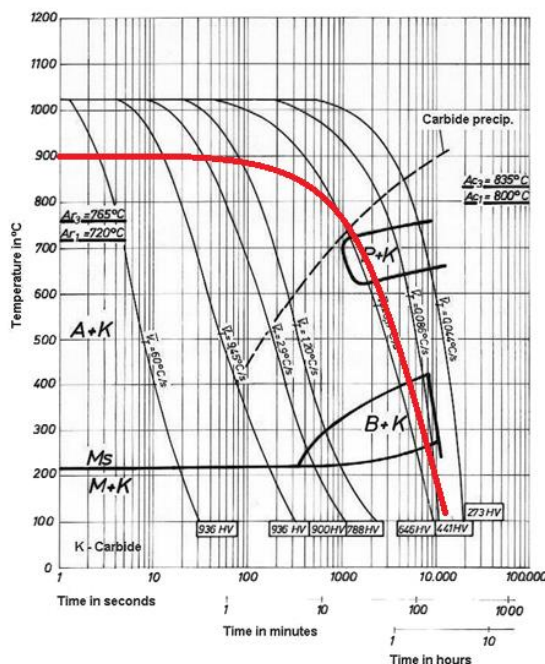
Разлог овакве вредности тврдоће каљене епрувете једино може бити неадекватна температура аустенизације. Приликом загревања није достигнута температура при којој ће по целој запремини загреваног дела настати аустенитна структура. Уз помоћ дијаграма са слике 4.25 може се приближно одредити стварна температура на коју су епрувете загрејане.



Слика 4.25 Утицај температуре аустенизације на тврдоћу високолегираних алатних челика за хладан рад са 12% хрома

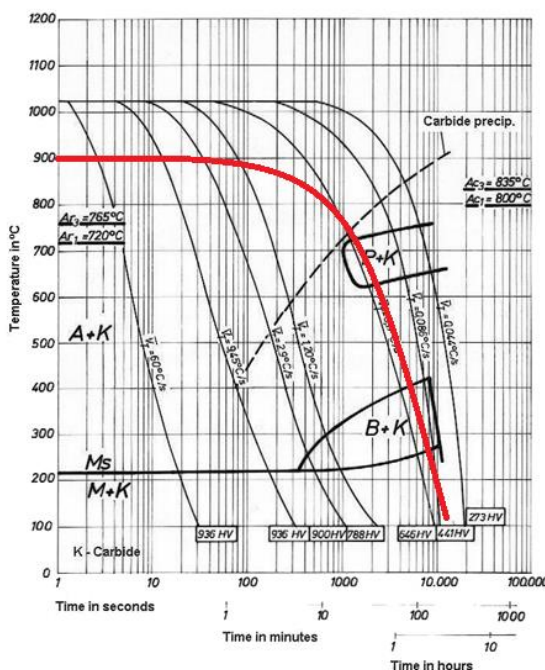
Са датог дијаграма се на основу добијених вредности тврдоће може закључити да је температура загревања износила око 900°C , што није довољно за потпуну аустенизацију епрувете. Оваква температура аустенизације не дозвољава потпуни настанак аустенитне структуре, што након хлађења брзином већом од критичне доводи до настанка мање количине мартензита. Мањи садржај мартензита у каљеном делу има за последицу мању тврдоћу челика због нехомогености дела и присуства перлита.

На дијаграму континуалног са слике 4.26 хлађења црвеном бојом је означен ток хлађења који одговара измереној тврдоћи након каљења и постигнутој температури аустенизације.



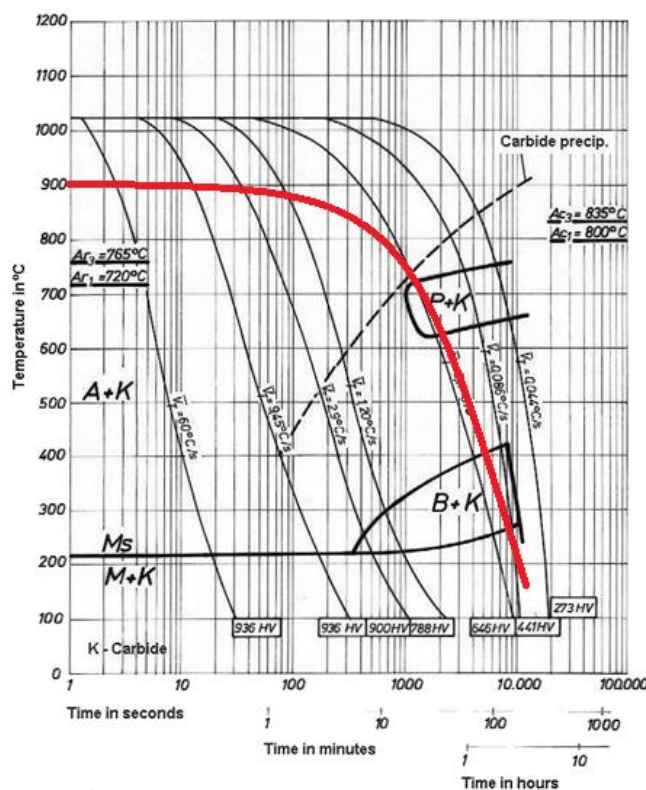
Слика 4.26 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2379 у води

Хлађењем епрувете од истог материјала у води уз константно мешање добијена је нешто виша тврдоћа која износи 55 HRC. Разлог нешто више тврдоће приликом хлађења у води са мешањем у односу на хлађење у води је чињеница да се мешањем разбија парни слој који настаје око хлађеног дела. Разбијањем парног слоја се ствара могућност његовог поновног настанка, поновни настанак парног слоја одузима велику количину топлоте од каљеног дела чиме се смањује и његова температура. Крива континуалног хлађења челика 1.2379 у води са мешањем дата је слици 4.27.



Слика 4.27 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2379 у води са мешањем

Епрувете челика 1.2379 које су хлађене у раствору соли у води са мешањем и без мешања имају тврдоћу од око 50 HRC. На слици 4.28 дата је крива континуалног хлађења која одговара наведеним поступцима хлађења.

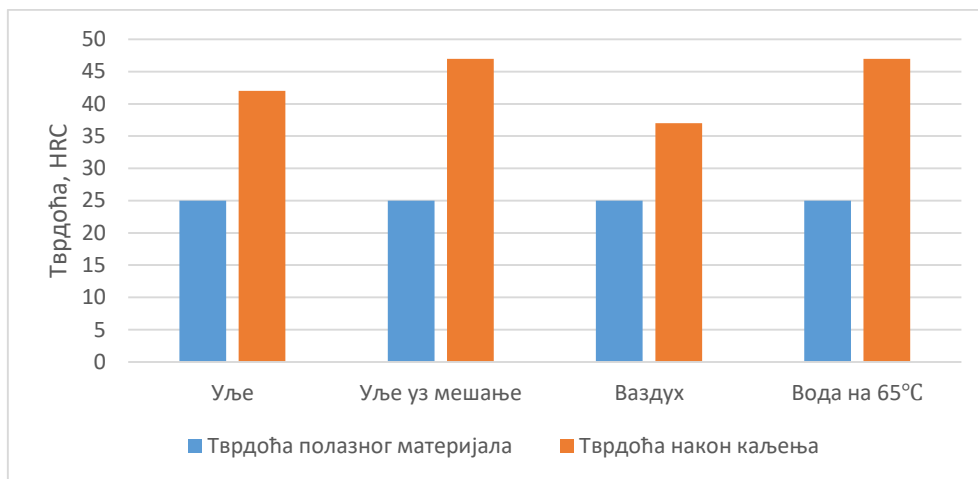


Слика 4.28 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2379 у раствору соли у води са мешањем

Након хлађења измерена је тврдоћа свих обрађиваних епрувета, у табели 4.14 су дати резултати мерења тврдоће окаљених епрувета челика 1.2343.

Табела 4.14 Резултати мерења тврдоће челика 1.2343 у HRC након каљења у различитим средствима хлађења

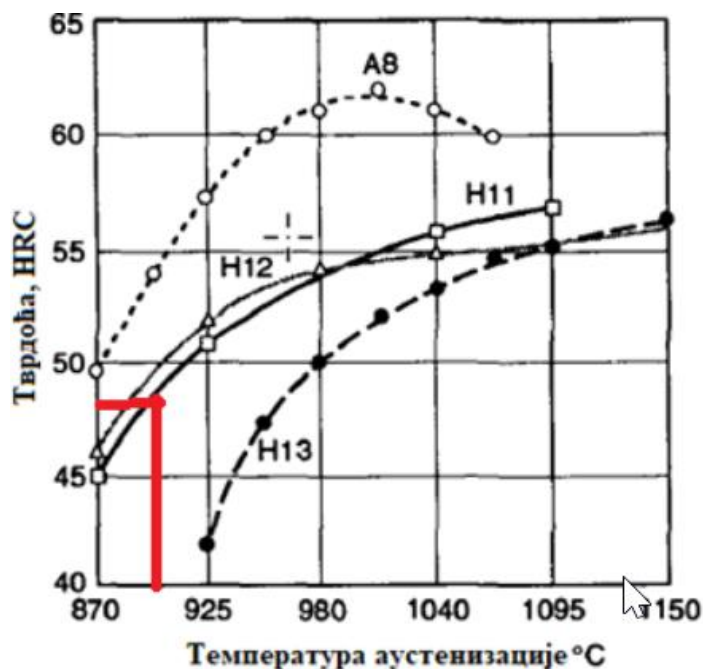
Редни број епрувете / Средство за хлађење	1	2	3	Просечна тврдоћа
Уље	40	42	43	42
Уље уз мешање	48	48	45	47
Ваздух	37	37	36	37
Вода на 65°C	44	48	48	47



Слика 4.29. Хистограм тврдоће челика 1.2343 након каљења у различитим средствима за хлађење

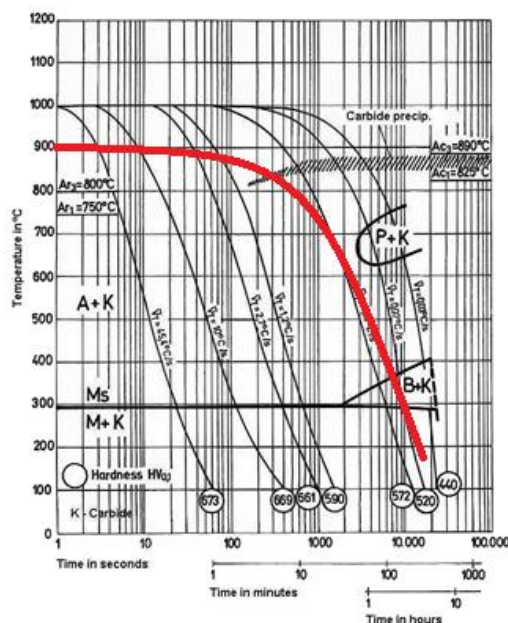
Оптимална температура аустенизације челика 1.2343 је нешто виша од 1000°C, хлађењем великом брзином постиже се тврдоћа од око 55 HRC. Међутим, епрувете овог челика су због сличне температуре аустенизације загреване са епруветама челика 1.2379 који је због техничких проблема загрејан до 900°C.

Највећа тврдоћа је добијена хлађењем у води на 65°C, измерена је тврдоћа од 47 HRC. Са дијаграма на слици 4.30 се види да та тврдоћа одговара температури аустенизације од око 900°C, што потврђује претпоставку о температури аустенизације која је нижа од предвиђене.



Слика 4.30 Утицај температуре аустенизације на тврдоћу челика за топао рад легираних хромом

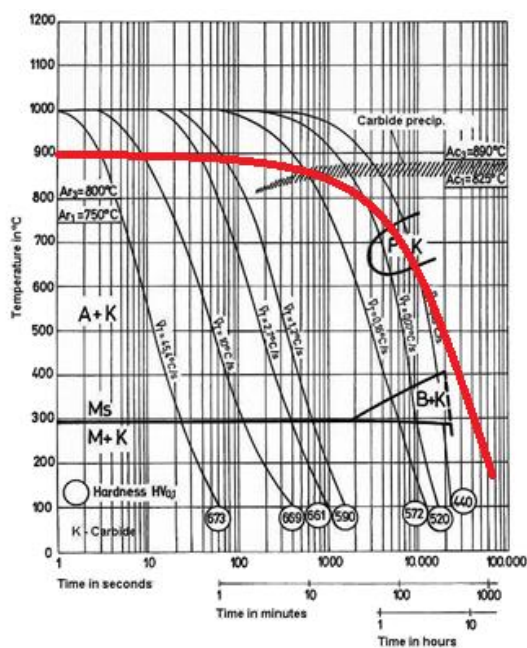
На слици 4.31 дат је дијаграма континуалног хлађења овог челика са додатом кривом која је добијена на основу добијених вредности тврдоће и температуре аустенизације.



Слика 4.31 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2343 у води на 65°C

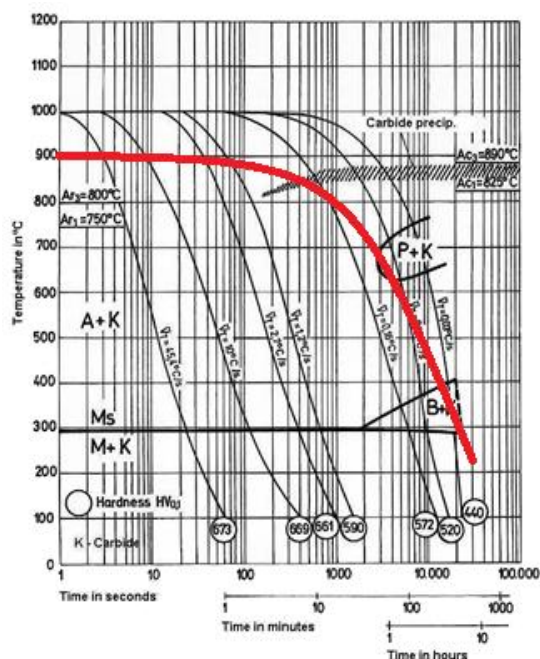
Због ниске температуре аустенизације није дошло до аустенитне трансформације по читавој запремини епрувете, па при хлађењу брзином већом од критичне не настаје хомогена мартензитна структура.

Тврдоћа епрувете након каљења у уљу износи 42 HRC, крива континуалног хлађења овог поступка је дата на слици 4.32.



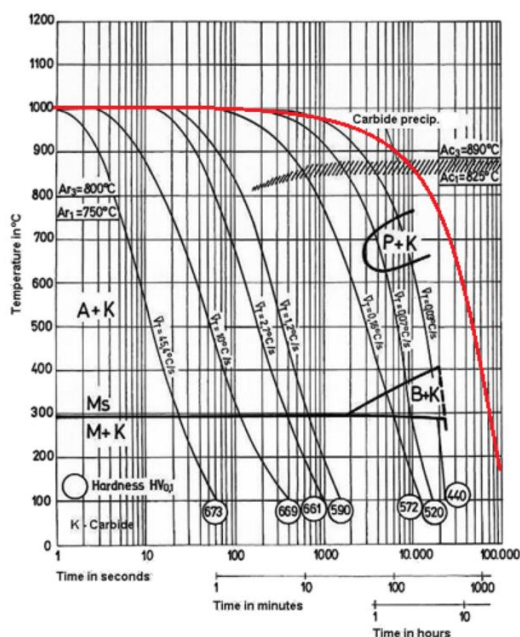
Слика 4.32. Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2343 у уљу

Тврдоћа епрувета каљења у уљу уз константно мешање износи 47 HRC. Већа тврдоћа епрувете која је хлађења у уљу са мешањем је узрок разбијања парног слоја слично као и код хлађења у води са мешањем. На слици 4.33 дата је крива која одговара процесу хлађења челика 1.2343 у уљу са мешањем.



Слика 4.33 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2343 у уљу са мешањем

Тврдоћа епрувете која је хлађена на ваздуху износи 37 HRC, што говори о могућности настајања одређене количине мартензита и при веома малим брзинама хлађења. Крива која одговара процесу хлађења ове епрувете дата је на слици 4.34.

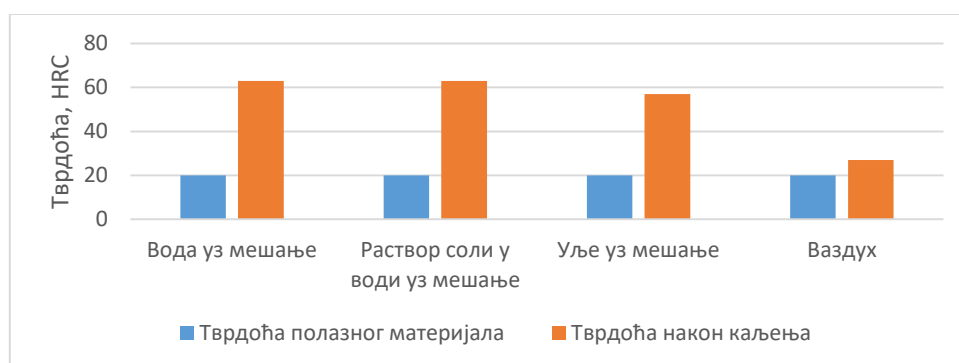


Слика 4.34 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2343 на ваздуху

Након хлађења измерена је тврдоћа свих обрађиваних епрувета, у табели 4.15 су дати резултати мерења тврдоће окаљених епрувета челика 1.2842.

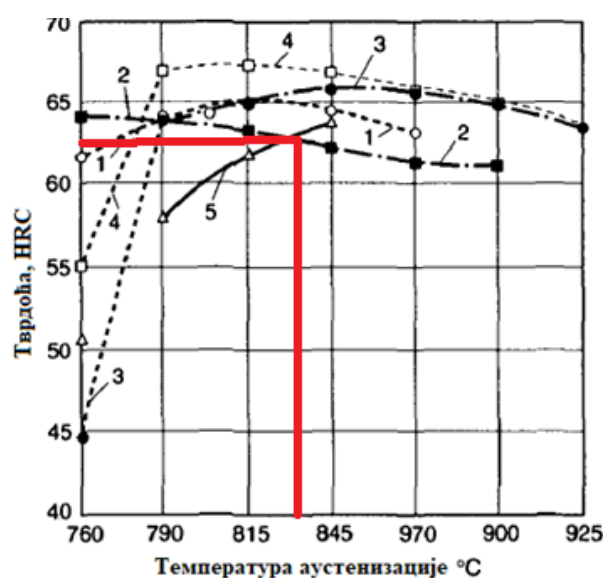
Табела 4.15 Резултати мерења тврдоће челика 1.2842 у HRC након каљења у различитим средствима хлађења

Редни број епрувете / Средство за хлађење	1	2	3	Просечна тврдоћа
Вода уз мешање	63.5	63	64	63
Раствор соли у води уз мешање	61	66	66	63
Уље уз мешање	58	55	57.5	57
Ваздух	26.5	25	30	27



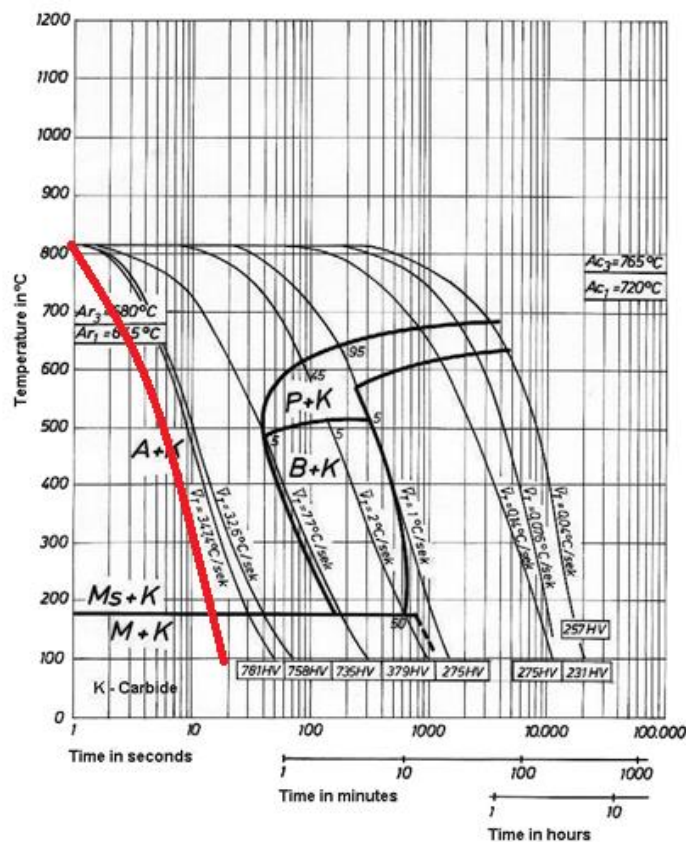
Слика 4.35 Хистограм тврдоће челика 1.2842 након каљења у различитим средствима за хлађење

Тврдоћа епрувете челика 1.2842 каљеног у сланој води уз мешање износи 63 HRC. Са дијаграма на слици 4.36 се може видети да та тврдоћа одговара идеалној температури аустенизације од око 840°C. При оваквој температури епрувета од челика 1.2842 се у потпуности састоји од аустенита што повољно утиче на тврдоћу. Након хлађења брзином већом од критичне постиже се потпуно мартензитна структура која поседује високе вредности тврдоће



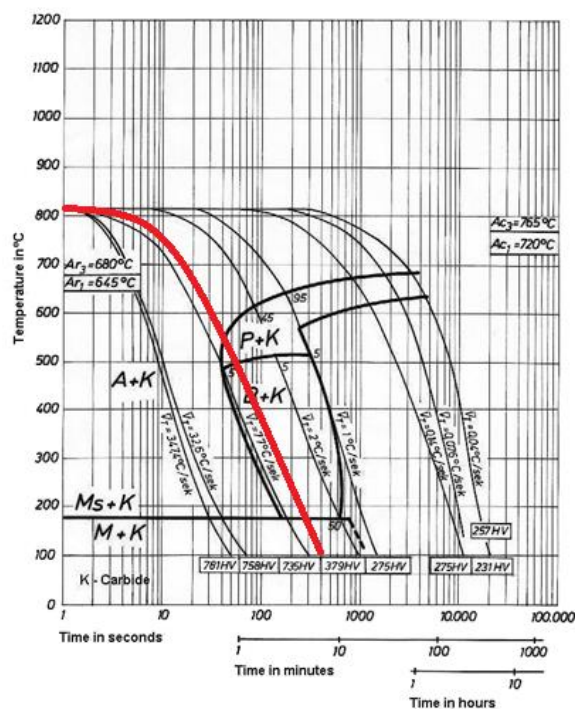
Слика 4.36 Утицај температуре аустенизације на тврдоћу нисколегираних алатних челика за хладан рад 1.2842 (1 – O1, 2 – O2, 3 – O4, 4 -O7)

Тврдоће након хлађења у води са мешањем и раствору соли у води са мешањем су идентичне, па су им дијаграми континуалног хлађења такође идентични. На слици 4.37 дата је крива континуалног хлађења челика 1.2842 хлађеног у води са мешањем и у раствору соли у води са мешањем.



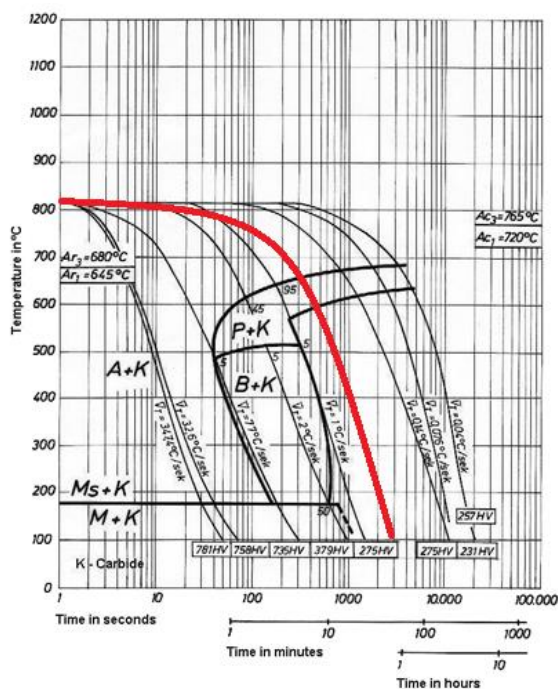
Слика 4.37 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2842 у води са мешањем

Тврдоћа епрувете каљене у уљу са мешањем је нешто нижа и износи 57 HRC, овај пад тврдоће у односу на каљење у води са мешањем и сланој води са мешањем је последица мање брзине хлађења уља. Брзина хлађења уља је нешто нижа и структура није у потпуности мартензитна, али су напони у епрувети каљеном у уљу нижи у односу на епрувету каљену у води. Крива хлађења овог челика у уљу са мешањем дата је на слици 4.38.



Слика 4.38 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2842 у уљу са мешањем

Тврдоћа спрувете која је хлађена на ваздуху износи 27 HRC, што показује да је за хлађење овог челика потребно користити средство са што већом брзином хлађења како би се добила већа вредност тврдоће. Крива хлађења челика 1.2842 на ваздуху дата је на слици 4.39.



Слика 4.39 Дијаграм континуалног хлађења са додатом кривом за процес каљења челика 1.2842 на ваздуху

Након каљења и мерења постигнуте тврдоће све епрувете осим оних који су хлађени на ваздуху се подргавају отпуштању. У експерименту су епрувете отпуштане на температурама од: 250°C, 450°C и 650°C. Време отпуштања за све три температуре је износило пола сата. Након отпуштања се свим епруветама мери тврдоћа, вредности тврдоће су дате у табелама 4.17, 4.18 и 4.19.

Табела 4.17 Тврдоћа епрувета након отпуштања на 650°C

Редни број епрувете / Средство за хлађење и челик	1	2	3	Просечна тврдоћа, HRC
Вода челик, 1.2379	41.5	38	38	39
Раствор соли у води уз мешање, челик 1.2379	36.5	36	41	38
Уље уз мешање челик, 1.2343	31	27.5	32.5	30
Раствор соли у води уз мешање челик, 1.2842	33.5	33.5	35	34

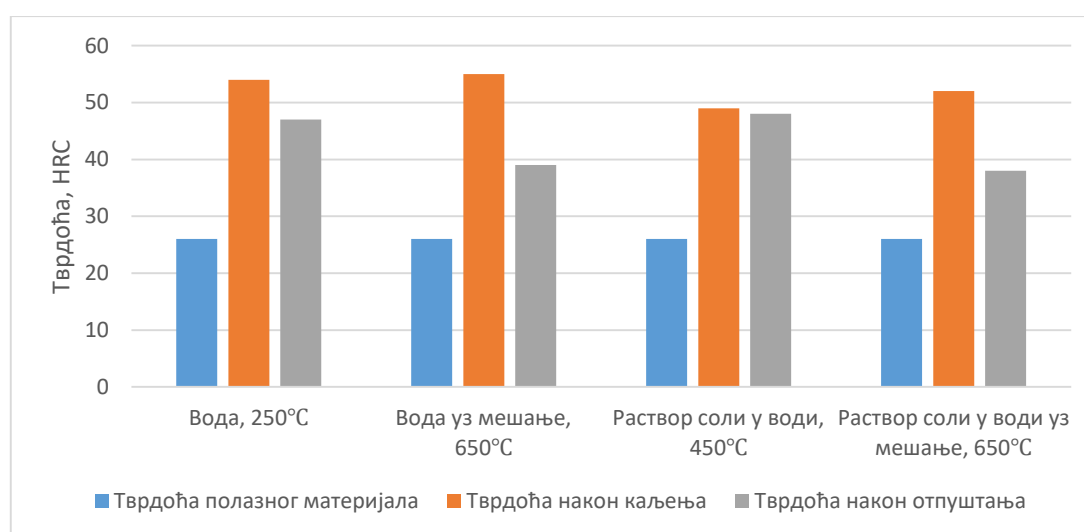
Табела 4.18 Тврдоћа епрувета након отпуштања на 450°C

Редни број епрувете / Средство за хлађење и челик	1	2	3	Просечна тврдоћа, HRC
Раствор соли у води, челик 1.2379	47	49.5	47.5	48
Уље, челик 1.2343	48.5	45	44.5	46
Вода са мешањем, челик 1.2842	47.5	49	46.5	47

Табела 4.19 Тврдоћа епрувета након отпуштања на 250°C

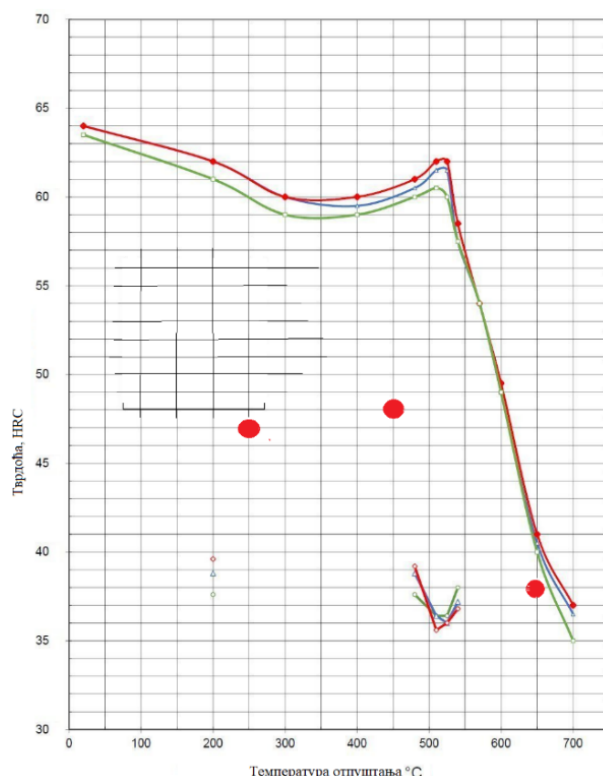
Редни број епрувете / Средство за хлађење и челик	1	2	3	Просечна тврдоћа, HRC
Вода, челик 1.2379	47	47.5	46.5	47
Вода на 65°C, челик 1.2343	44.5	48	43	45
Уље са мешањем, челик 1.2842	50.5	51.5	49	50

Епрувете челика 1.2379 су након каљења подвргнуте отпуштању на различитим температурама, на хистограму тврдоће након отпуштања челика 1.2379 на слици 4.40 се могу видети вредности тврдоће након отпуштања.



Слика 4.40 Хистограм тврдоће челика 1.2379 након отпуштања на различитим температурама

На слици 4.41 приказан је дијаграм отпуштања челика 1.2379. Црвеним тачкама су обележене тврдоће три епрувете које су отпуштане на различитим температурама.

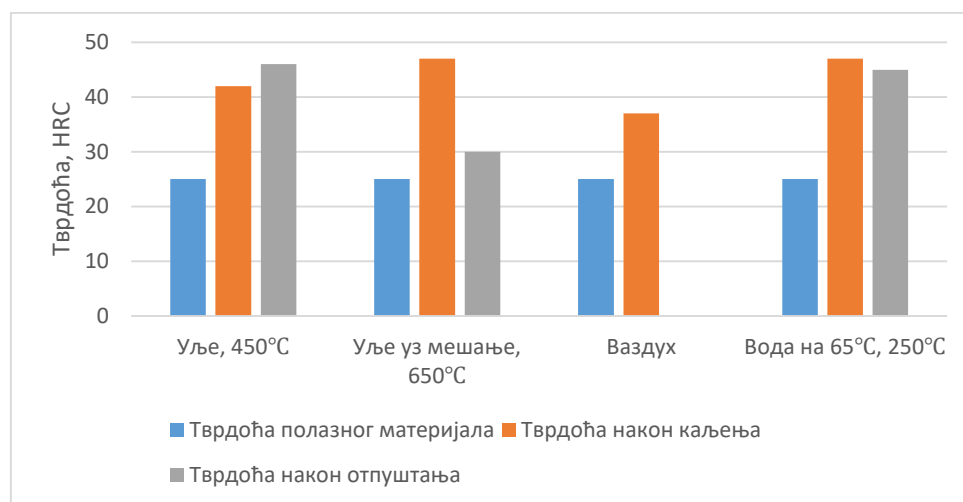


Слика 4.41 Дијаграм отпуштања челика 1.2379

Вредности тврдоће све три епрувете су ниже од вредности тврдоће приказаних на дијаграму отпуштања челика 1.2379. Епрувете које су отпуштане на 250°C и 450°C имају тврдоћу која је за око 10 HRC нижа у односу на вредности приказане на дијаграму. Епрувета која је отпуштана на 650°C има тврдоћу која је нижа у односу на тврдоћу са дијаграма отпуштања на тој температури за 2-3 HRC. Ниже вредности тврдоће су последица ниже температуре аустенизације челика при термичкој обради каљењем.

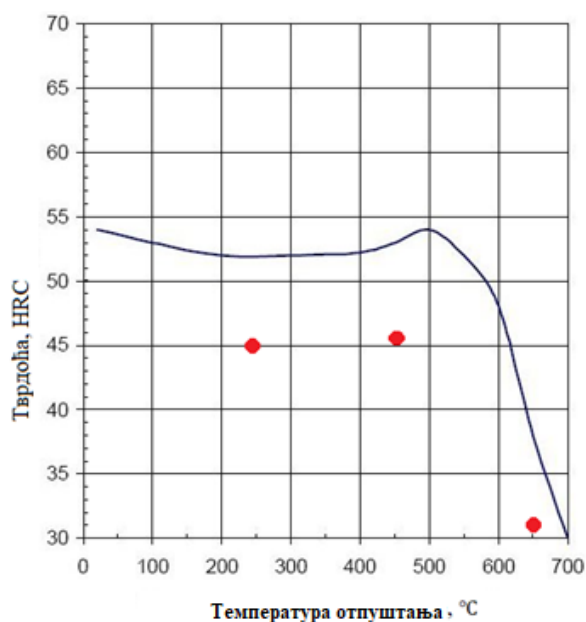
Ако би се ове три тачке повезале добио би се крива који би доста подсећала на дату криву отпуштања челика 1.2379, што говори о повезаности експеримента и дијаграма отпуштања. Вредности тврдоће на правом дијаграму отпуштања су добијене након процеса отпуштања који је трајао сат и по, док је отпуштање експерименталних епрувета трајало пола сата. Разлика у времену отпуштања није у већој мери утицала на изглед криве из разлога мањег присуства мартензита у експерименталним епруветама, па је потребно време отпуштања знатно краће.

Епрувете челика 1.2343 су након каљења подвргнуте отпуштању на различитим температурама, на хистограму тврдоће након отпуштања челика 1.2343 на слици 4.42 се могу видети вредности тврдоће након отпуштања.



Слика 4.42. Хистограм тврдоће челика 1.2343 након отпуштања на различитим температурама

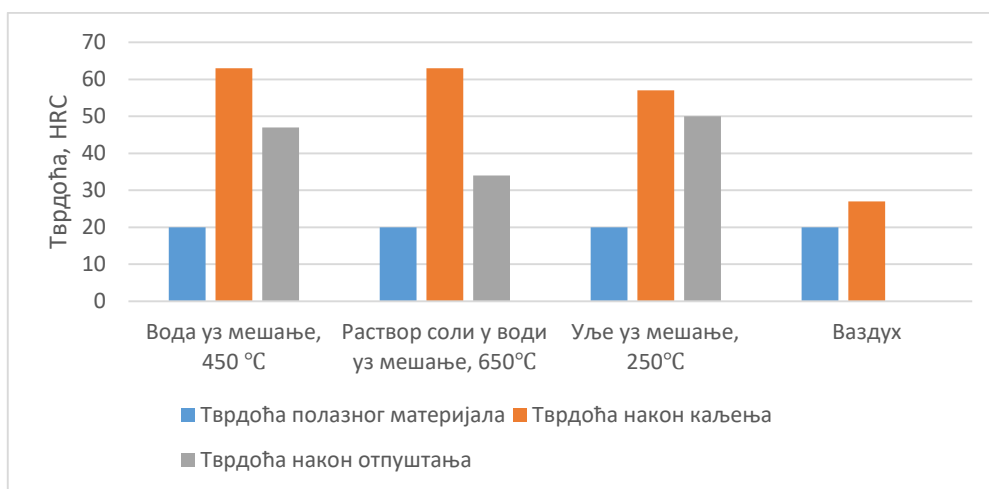
На слици 4.43 приказан је дијаграм отпуштања челика 1.2343. црвеним тачкама су обележене вредности тврдоће три епрувете које су отпуштане на различитим температурама.



Слика 4.43 Дијаграм отпуштања челика 1.2343

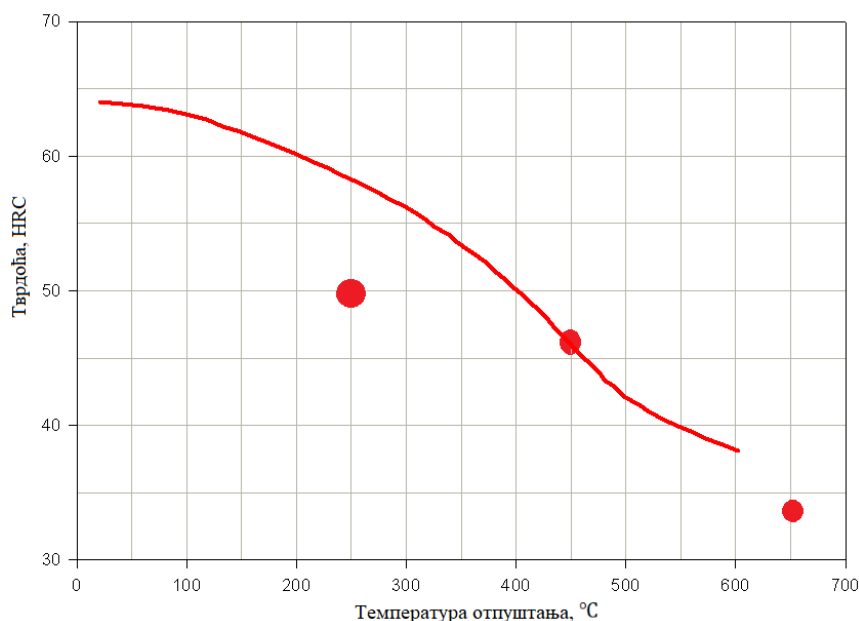
Слично као и код челика 1.2379 након отпуштања епрувете имају мању тврдоћу у односу на тврдоће са дијаграма отпуштања. Разлог нижих вредности тврдоће је нижа температура аустенизације приликом термичке обраде каљењем. Ако би се вредности добијених тврдоћа повезале линијом добила би се крива која подсећа на криву отпуштања челика 1.2343.

Епрувете челика 1.2842 су након каљења подвргнуте отпуштању на различитим температурама, на хистограму тврдоће након отпуштања челика 1.2842 на слици 4.44 се могу видети вредности тврдоће након отпуштања.



Слика 4.44 Хистограм тврдоће челика 1.2842 након отпуштања на различитим температурама

Вредности тврдоће епрувета челика 1.2842 након отпуштања су веома сличне вредностима тврдоће са правог дијаграма отпуштања, највећа разлика је приметна за вредност тврдоће епрувете која је отпуштана на 250°C. На слици 4.45 црвеним тачкама су дате измерене вредности након отпуштања.



Слика 4.45 Дијаграм отпуштања челика 1.2842

Разлог овог одступања је нижа вредност тврдоће епрувете након каљења. Вредност тврдоће након каљења је због хлађења у уљу износила 57 HRC, а након отпуштања 50 HRC што је потврда сличности кривих отпуштања добијених повезивањем тврдоћа отпуштених експерименталних епрувета и праве криве отпуштања.

5. ЗАКЉУЧАК

Термичка обрада алатних челика има доста сличности са поступцима термичке обраде других врста челика, једина разлика су знатно другачији режими обраде. Више температуре загревања су најевидентније у процесу загревања челика за процес каљења, где је обрађивани комад потребно загрејати до температуре аустенизације које су веома високе. Високе температуре аустенизације алатних челика су последица присуства карбида легирајућих елемената за чију је разградњу потребна изузетно висока температура, док неке од карбида нарочито волфрамових скоро и није могуће разградити. Важност температуре аустенизације и разградње карбида легирајућих елемената је у чињеници да је за настанак аустенита потребна додатна количина угљеника како би се феритно-перлитна фаза трансформисала у аустенитну фазу. Постизање аустенитне структуре обрађиваног комада је почетни корак у успешном процесу термичке обраде алатних челика. Брзина хлађења алатних челика зависи од њиховог хемијског састава и жељених карактеристика обрађиваног комада. Више вредности брзина хлађења доприносе већој тврдоћи, док са друге стране смањују жилавост. Брзине хлађења у потпуности зависе од средства за хлађење. Утицај средства за хлађење на структуру каљеног дела је пресудан. Коришћењем средства за хлађење са превеликом брзином хлађења добија се изузетно тврда структура која је у исто време и веома крта. Коришћењем средства за хлађење са малом брзином хлађења добијају се структуре мале тврдоће које нису повољне за алате. Компромис између добијене тврдоће и жилавости представља кључ успеха термичке обраде алатних челика. Термичка обрада свих алата подразумева отпуштање након каљења што је и једна од карактеристика алатних челика. Отпуштање алатних челика је у великој мери слично отпуштању других врста челика и искључиво зависи од температуре обраде и времена држања обрађиваног комада на жељеној температури. Тврдоћа обрађиваних делова након отпуштања опада, пад тврдоће не мора бити константан, већ може доћи до извесних скокова тврдоће при одређеним температурама.

Експериментална испитивања су показала значај температуре аустенизације и њену важност за постизање високих вредности тврдоће у поступцима термичке обраде. То је посебно видљиво у поступку термичке обраде челика 1.2379 где је температура до које је епрувета загрејана више од 100°C нижа од потребне. Нижа температура загревања епрувете пре каљења као последицу има мањи проценат разграђених карбида легирајућих елемената што даље доводи до немогућности формирања аустенитне фазе по целој запремини обрађиваног комада чије је присуство неопходно за успешну термичку обраду. Крајња последица ниже температуре загревања је смањена тврдоћа која не одговара захтевима израђиваних алата. Утицај параметара отпуштања на тврдоћу обрађиваних епрувета је веома сличан утицају отпуштања на остале врсте челика. Експеримент је показао да и поред ниже температуре аустенизације крива отпуштања обрађиваних челика прати ток праве криве отпуштања. То је посебно видљиво код кривих отпуштања челика 1.2378 и 1.2343 код којих на температурама отпуштања од 450°C долази до благог скока тврдоће као и код праве криве отпуштања.

Поред температуре аустенизације веома важну улогу има и брзина хлађења, брзина хлађења се повећава и смањује применом различитих средстава за хлађење. Велике

брзине хлађења доприносе високој тврдоћи, али поред постизања високе тврдоће долази до пада жилавости, па се велика пажња мора посветити избору средства за хлађење.

На термичу обраду, посебно алатних челика велики утицај имају параметри обраде, међу њима је најзначајнија температура аустенизације. Од ове температуре у великој мери зависи успешност процеса. Брзина хлађења такође има велики утицај на параметре тврдоће, али нешто мање од температуре аустенизације која је почетни корак термичке обраде без које процес термичке обраде алатних челика не може бити адекватно реализован. За успешност термичке обраде алатних челика потребно је познавати хемијски састав обрађиваног материјала од кога зависе параметри обраде који су кључни у сваком од процеса термичке обраде.

6. Литература

- [1] George Roberts, George Krauss, Richard Kennedy.: Tool Steels 5th Edition, (1998)
- [2] Rafael A. Mesquita.: Tool steels Properties and Performance, 6000 Broken Sound Parkway NW, (2017)
- [3] Nøjerslev, C.: Tool steels. Risø National Laboratory. Denmark (2001).
- [4] Видојевић Н.: Термичка обрада метала, Технолошко-металуршки факултет у Београду, 1973.
- [5] Пантелић И.: Технологија термичке обраде челика, Машински факултет у Новом Саду, 1974.
- [6] Габрић И, Шитић С.: Материјали II, Свеучилиште у Сплиту, 2015.
- [7] Јовановић М, Адамовић Д, Лазић В, Ратковић Н.: Машински материјали, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.