



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PROKALITELNOSTI
HLINÍKOVÝCH SLITIN**

HARDENABILITY OF ALUMINIUM ALLOYS AND ITS EXPERIMENTAL DETERMINATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Weiss

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	Bc. Andrej Weiss
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Stavba letadel
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Klement, CSc.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální stanovení prokalitelnosti hliníkových slitin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prokalitelnost ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti hliníkových polotovarů v závislosti na jejich průměru, resp. tloušťce. U ocelí je prokalitelnost dobře charakterizovaná křivkami nebo pásy prokalitelnosti, které se určují většinou čelní zkouškou prokalitelnosti. Tyto křivky nejsou pro hliníkové slitiny zpracovány a není známo, zda čelní zkouška prokalitelnosti je pro tyto slitiny vhodná a použitelná. Hlavní řešený problém spočívá v ověření čelní zkoušky prokalitelnosti pro vybrané konstrukční slitiny hliníku.

Cíle diplomové práce:

Experimentální stanovení křivek prokalitelnosti základních konstrukčních hliníkových slitin (2017/2014, 6082, 7075) pomocí čelní (Jominyho) zkoušky prokalitelnosti pro různá kalící prostředí. Měřítkem prokalitelnosti bude tvrdost slitiny po kompletním precipitačním vytvrzení. Součástí práce bude pokus o vytvoření vazby křivek prokalitelnosti s diagramy ekvivalentní rychlosti ochlazování.

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook, vol. 02. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International, 1992.

ASM Handbook, vol. 04. Heat treating. ASM International, 1991.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá overením vhodnosti Jominyho čelnej skúšky pri analýze prekaliteľnosti hliníkových zliatin. Problém bol riešený experimentálne, stanovením kriviek prekaliteľnosti vybraných zliatin. Merítkom prekaliteľnosti je tvrdosť zliatiny po kompletom precipitačnom vytvrdení. Z hliníkových zliatin, zastupujúcich bežne používané konštrukčné zliatiny v letectve boli pripravené vzorky, ktoré boli podrobené skúškam prekaliteľnosti v rôznych kaliacich prostrediach. Na základe vykonaných experimentov bola zistená vhodnosť skúšky pre porovnanie prekaliteľnosti zliatin. Súčasťou práce je vytvorenie diagramov ekvivalentných rýchlostí ochladzovania za pomoci stanovených kriviek prekaliteľnosti.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

čelná skúška prekaliteľnosti, krivky prekaliteľnosti, precipitačne vytvrditeľné hliníkové zliatiny

ABSTRACT

The Diploma thesis deals with the verification of Jominy end-quench test when analysis of hardenability of aluminium alloys is considered. The problem was solved experimentally, by developing end-quench curves of selected grades of aluminium alloys. Degree of hardenability of alloy is hardness after complete strengthening heat treatment. Samples of aluminium alloys commonly used for aircraft structures were prepared and then subjected to end-quench tests in various quenchants. On the basis of performed experiments, suitability of Jominy end-quench test for comparison of hardenability of alloys was found. Part of the thesis deals with the creation of equivalent cooling rate diagrams using the developed end-quench curves.

KEYWORDS

end-quench test, hardenability curves, precipitation-hardenable aluminium alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

WEISS, A. *Experimentální stanovení prokalitelnosti hliníkových slitin*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Josef Klement, CSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 26. mája 2017

.....

Andrej Weiss

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel poďakovať svojmu vedúcemu práce doc. Ing. Josef Klement, CSc. za odbornú pomoc a priateľský prístup počas riešenia diplomovej práce.

Zároveň chcem vysloviť poďakovanie pánovi Krpálkovi za pomoc s úpravou vzoriek.

OBSAH

Úvod	11
1 Precipitačné vytvrdzovanie hliníkových zliatin	12
1.1 Rozpúšťací ohrev	13
1.2 Kalenie	14
1.3 Starnutie	15
2 Prekaliteľnosť a faktory ktoré ju ovplyvňujú	19
2.1 Rýchlosť ochladzovania	19
2.2 Kaliace prostredia	24
3 Jominyho čelná skúška prekaliteľnosti	28
3.1 Charakteristika skúšky	28
3.2 Prekaliteľnosť a optimalizácia postupov tepelného spracovania	29
4 Precipitačne vytvrdzované zliatiny hliníku	32
4.1 Trieda 2xxx	33
4.2 Trieda 6xxx	33
4.3 Trieda 7xxx	34
4.4 Označovanie stavov tepelného spracovania	35
5 Analyzovaná veličina – tvrdosť	37
5.1 Skúšky tvrdosti zliatin hliníku	37
6 Príprava experimentu	38
6.1 Analyzované zliatiny	38
6.2 Návrh vzoriek	41
6.3 Príprava vzoriek	41
6.4 Označovanie vzoriek	42
7 Meranie tvrdosti	43
7.1 Príprava vzoriek na meranie tvrdosti	43
7.2 Metodika merania tvrdosti	43
7.3 Metodika spracovania nameranej tvrdosti	45
8 Prvý súbor experimentov	46
8.1 Kaliace prostredie, použité vzorky	46
8.2 Tepelné spracovanie	46
8.3 Výsledky prvého súboru experimentov	49
9 Druhý súbor experimentov	54
9.1 Voľba kaliaceho prostredia	54
9.2 Voľba zliatin	54
9.3 Tepelné spracovanie	54

9.4	Výsledky druhého súboru experimentov.....	55
10	Tretí súbor experimentov	58
10.1	Voľba kaliaceho prostredia.....	58
10.2	Voľba zliatin.....	58
10.3	Tepelné spracovanie	58
10.4	Výsledky druhého súboru experimentov	60
11	Vytvorenie diagramov ekvivalentných rýchlostí ochladzovania	64
11.1	Pomocou priemerných rýchlostí ochladzovania	64
11.2	Pomocou mechanických vlastností polotovarov	66
12	Diskusia.....	68
12.1	Efekt poklesu tvrdosti blízko kaleného čela	68
12.2	Vlastnosti v závislosti na hrúbke polotovaru.....	69
12.3	Možnosti ďalšej práce.....	69
	Záver	70
	Zoznam použitých skratiek a symbolov.....	72
	Zoznam príloh.....	73

ÚVOD

Precipitačným vytvrdzovaním je možné do značnej miery meniť mechanické a fyzikálne vlastnosti vytvrditeľných hliníkových zliatin. Vysoké nároky na mechanické vlastnosti v leteectve, automobilovej doprave a pod. predstavujú hlavný predpoklad pre použitie vytvrdzovaných hliníkových zliatin.

Vytvrdzovanie dielov väčšej hrúbky so sebou často prináša problém dostatočného vytvrdenia materiálu v celej jeho hĺbke. Preto je prekaliteľnosť, teda schopnosť materiálu získať po vytvrdení určitú tvrdosť v uvažovanej hĺbke pod ochladzovaným povrchom dôležitým parametrom danej zliatiny. Známa prekaliteľnosť zliatiny umožňuje optimalizovať procesy tepelného spracovania výrobku pre dosiahnutie požadovaných vlastností v celom priereze dielu.

Stanovenie prekaliteľnosti zliatiny predstavuje zložitý problém. U hliníkových materiálov sa zvyčajne zisťuje na rade polotovarov o rôznych hrúbkach. Realizácia skúšky tohto typu je veľmi pracná. Na druhej strane pri určovaní prekaliteľnosti ocelí sa používa tzv. Jominyho skúška čelnej prekaliteľnosti ktorá je svojim charakterom pomerne rýchla a spoľahlivo poskytuje informáciu o prekaliteľnosti daného materiálu. Vhodnosť tejto skúšky pre hliníkové zliatiny a jej prípadné zavedenie do praxe by teda umožnilo rýchlejšie určovať a porovnávať prekaliteľnosť rôznych materiálov, poprípade i kaliacich prostredí. Krivky prekaliteľnosti hliníkových zliatin však nie sú touto metódou spracované a otázkou je teda vhodnosť tejto metódy pre použitie u týchto zliatin.

Výhodou skúšok prekaliteľnosti je s určitou presnosťou možnosť experimentálne stanovenej prekaliteľnosti na jednoduchom skúšobnom telese priradiť priebeh tvrdosti kaleného výrobku. Za týmto účelom bývajú vytvorené tzv. krivky ekvivalentných rýchlostí ochladzovania.

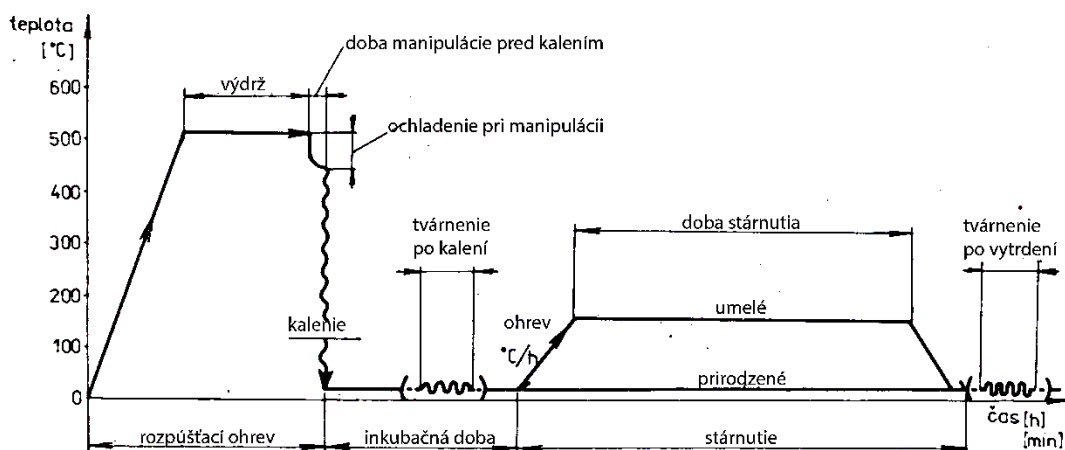
Cieľom práce je overenie použiteľnosti Jominyho čelnej skúšky pre vytvrditeľné zliatiny hliníku, experimentálnym stanovením kriviek prekaliteľnosti vybraných konštrukčných hliníkových zliatin za použitia tejto skúšky pre rôzne kaliace prostredia. Súčasťou práce je i pokus o vytvorenie diagramov ekvivalentných rýchlostí ochladzovania za pomoci stanovených kriviek prekaliteľnosti.

1 PRECIPITAČNÉ VYTVRDZOVANIE HLINÍKOVÝCH ZLIATIN

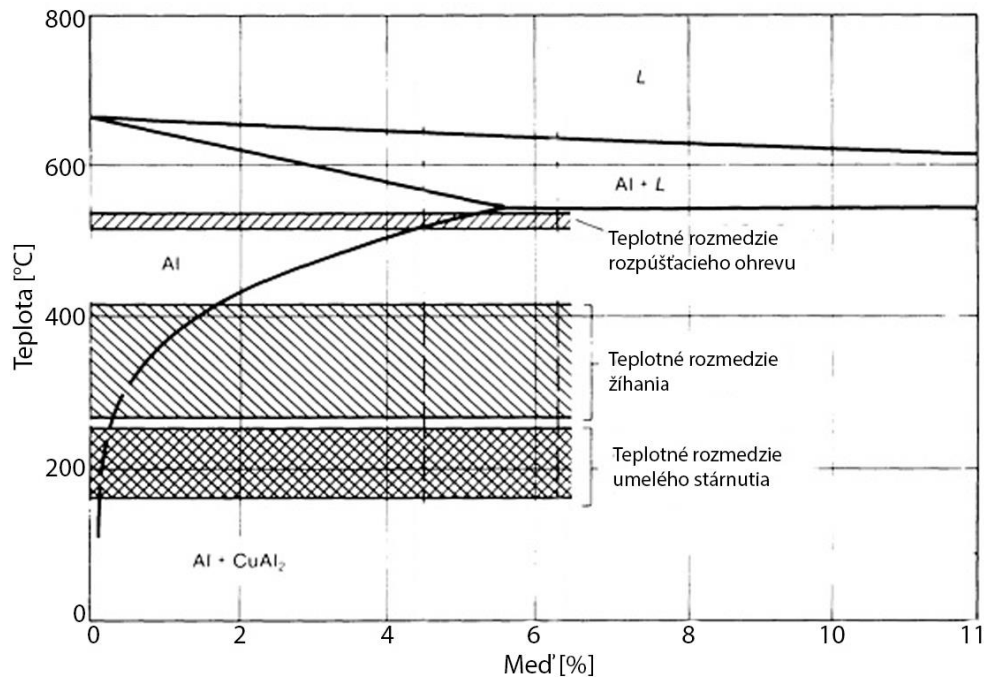
V lietadlovej technike sa všetky kovové konštrukčné materiály používajú v tepelne spracovanom stave. Súvisí to s vysokými nárokmi na mechanické vlastnosti [1]. Popri žíhaní je precipitačné vytvrdzovanie hlavným druhom tepelného spracovania hliníkových zliatin. Umožňuje do značnej miery meniť mechanické, fyzikálne i technologické vlastnosti takých zliatin, ktoré majú v rovnovážnom diagrame dostatočne výraznú zmenu rozpustnosti legujúceho prvku. Zmena rozpustnosti je teda základným predpokladom pre vznik presýteného tuhého roztoku a jeho ďalšia premena vedie k zmene vlastností, ktoré majú u zliatin hliníku prvoradý technický význam [2] [3].

Precipitačné vytvrdzovanie, znázornené na (Obr. 1), podľa [4] zahrňuje tri samostatné operácie, ktoré po sebe nasledujú v uvedenom poradí:

- rozpúšťací ohrev: rozpustenie rozpustných fáz, získanie homogénneho tuhého roztoku
- kalenie: vznik presýteného tuhého roztoku
- starnutie: rozpad presýteného tuhého roztoku, vylúčenie precipitátov



Obr. 1 Priebeh precipitačného vytvrdzovania zliatin hliníku [1]



Obr. 2 Časť binárneho fázového diagramu sústavy Al-Cu, teplotné rozmedzia používaných tepelných spracovaní hliníkových zliatin [4]

1.1 ROZPÚŠŤACÍ OHREV

Rozpúšťací ohrev je ohrev na vhodnú rozpúšťaciu teplotu a výdrž na tejto teplote po dobu nutnú k prevedeniu vytvrdzujúcich fáz do tuhého roztoku [4]. Pri rozpúšťacom ohreve sa dokonale rozpúšťajú tie fázy, ktoré sú za danej teploty v tuhom roztoku rozpustné. Zliatina, ktorá v rovnovážnom stave za normálnej teploty bola heterogénna, stáva sa behom rozpúšťacieho ohrevu homogénnou [2].

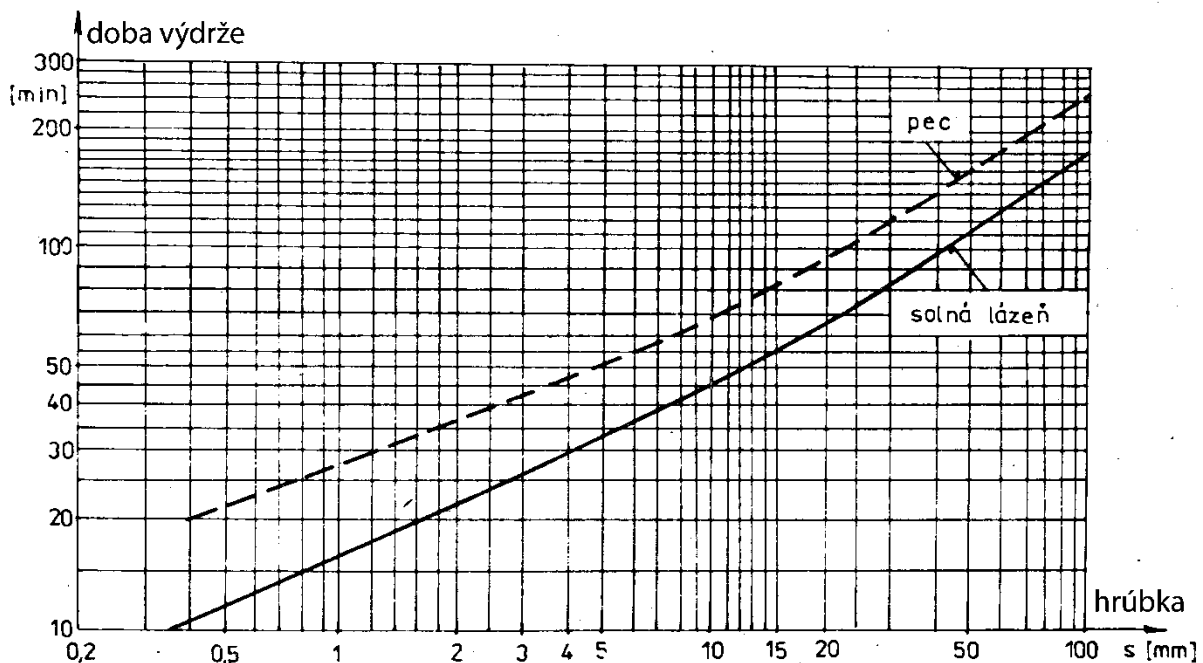
1.1.1 TEPLOTA ROZPÚŠŤACIEHO OHREUVU

Teplota rozpúšťacieho ohrevu vychádza z rovnovážneho diagramu danej zliatiny a musí sa dôsledne dodržať s presnosťou najmenej ± 5 °C. Za nižších teplôt sa totiž precipitáty dostatočne nerozpustia a materiál nebude mať po vytvrdení požadované mechanické vlastnosti. Ak však preskočí teplota hornú hranicu, materiál sa čiastočne nataví a tým celkom zničí [1]. Dôjsť môže k zhoršeniu ťahovej pevnosti, ťažnosti a lomovej húževnatosti. Znamky natavenia hraníc zŕn nie je možné odhaliť vizuálnou alebo nedeštruktívnou kontrolou [4]. Preto leží horná hranica teplôt pre rozpúšťací ohrev asi 10 °C pod teplotou solidu danej zliatiny [2].

1.1.2 VÝDRŽ NA TEPLOTE

Výdrž na teplote býva meraná od chvíle dosiahnutia dolnej hranice teploty rozpúšťacieho ohrevu a môže sa pohybovať od menej ako jednej minúty pre tenké

plechy až po 20 hodín pre veľké odliatky [4]. Závisí na rôznych okolnostiach, predovšetkým na hrúbke materiálu a druhu a veľkosti fáz, ktoré je nutné v tuhom roztoku rozpustiť. Jemne vylúčené fázy v tvárnených zliatinách sa rozpúšťajú podstatne rýchlejšie ako fázy vylúčené v hrubých útvaroch v odliatkoch. Po vyrovnaní teploty sa totiž musia dokonale rozpustiť všetky precipitáty a difúzne zhomogenizovať tuhý roztok. Preto dĺžka ohrevu závisí na predchádzajúcom tepelnom spracovaní zliatiny, predovšetkým na tom, či zliatina už bola vytvrdená alebo homogenizačne žíhaná [2]. Minimálnu dobu výdrže je možné stanoviť pomocou nasledujúceho diagramu:



Obr. 3 Diagram pre stanovenie minimálnej doby výdrže na teplote rozpúšťacieho ohrevu [1]

Obvykle je snahou skrátiť dobu ohrevu na minimum. Jej zbytočné predlžovanie má za následok hrubnutie kryštalickej štruktúry a zhoršenie vlastností zliatiny. Naopak prílišné skrátenie doby ohrevu spôsobuje, že nie je dosiahnuté predpokladaných mechanických hodnôt [2].

1.2 KALENIE

Do istej miery predstavuje kalenie najdôležitejšiu operáciu precipitačného vytvrdzovania hliníkových zliatin. Účelom kalenia je rýchlim schladením zliatiny získať presýtený tuhý roztok za normálnej teploty, teda zabrániť segregácii fáz, ktoré tuhý roztok presycujú. Tento proces je dôležitý nie len z hľadiska zachytenia rozpustených fáz v tuhom roztoku, ale aj z dôvodu udržania určitého počtu vakancií v kryštalickej mriežke, ktoré sú za nízkych teplôt potrebné pre priebeh difúzných procesov [4].

Kaliacim médiom je až na výnimky voda (20 °C), ktorá zaručuje optimálnu rýchlosť chladnutia v kritickom intervale teplôt (450 °C až 260 °C) a potlačí nežiadúcu predčasnú tvorbu precipitátov alebo oddifundovanie vakancií [1].

Tvarovo komplikované výrobky, u ktorých môžu vznikajú deformácie vplyvom tepelných prnutí po rýchlom ochladzovaní, sa kalia do teplej vody (približne 40 až 80 °C). Potrebná rýchlosť ochladzovania závisí na zložení a druhu zliatiny. Na vzduchu sa ochladzujú zliatiny s vysokou stabilitou presýteného tuhého roztoku.

Rýchlo ochladená zliatina je v stave nerovnovážnom a je tvorená presýteným tuhým roztokom. Na rozdiel od heterogénneho stavu má zliatina v homogénnom stave za normálnej teploty nižšie pevnostné vlastnosti, vyššiu ťažnosť a vyššiu húževnatosť. Ak je zliatina ochladzovaná menšou rýchlosťou alebo nie je zliatina po vybratí z pece ochladená ihneď, poprípade dôjde k prerušeniu ochladzovania, môže dôjsť čiastočne k segregácii na hraniciach zŕn. Segregované fázy vyvolávajú chemickú heterogenitu a zliatina má menšiu odolnosť proti korózii, nižšiu pevnosť i ťažnosť [2].

1.2.1 DOBA MANIPULÁCIE PRED KALENÍM

Je teda samozrejmom požiadavkou, rýchlo ochladzovať čo najskôr po vybratí z pece. Doba manipulácie pred kalením je meraná od okamihu otvorenia pece (popr. od začiatku vynárania vsádzky zo soľnej lázne) do chvíle, kedy sa posledný kus vsádzky ponorí do kaliacej lázne. Behom manipulácie materiál vyžaruje teplo a je ochladzovaný vzduchom. Prekročenie istej hraničnej hodnoty spôsobuje nežiadajú tvorbu precipitátov v povrchovej vrstve spojenú s negatívnymi dôsledkami na mechanické vlastnosti materiálu [1].

Pre eliminovanie precipitácie počas manipulácie je teda dôležité aby nastalo len mierne ochladenie vsádzky na teplotu kedy začína rýchla precipitácia. Táto teplota je typická pre každý typ zliatiny. Pre vysokopevnostnú zliatinu 7075 s najvýraznejšou C-krivkou bola stanovená na 415 °C, kedy prudko narastá precipitácia. Ostatné zliatiny teda môžu dosiahnuť aj nižších teplôt, špecifikovaných C-krivkou charakteristickou pre konkrétnu zliatinu. (C-krivky vid. 2.1.1 Kritická rýchlosť ochladzovania). Maximálna doba manipulácie však závisí aj od teploty a rýchlosti prúdenia okolitého vzduchu a v neposlednej miere na objeme vsádzky. Tieto časy je možné prekročiť za predpokladu merania teploty vsádzky termočlánkami umiestnenými vo vsádzke. Musí sa teda preukázať že počas manipulácie nedošlo k prekročeniu stanovenej hraničnej teploty [4].

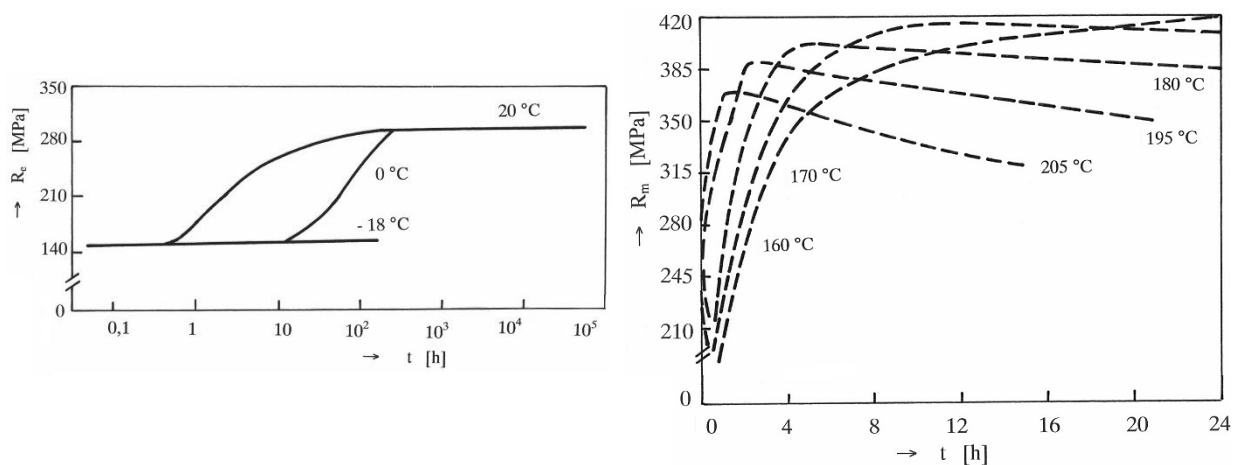
1.3 STARNUTIE

Základným predpokladom precipitačného vytvrdzovania presýteného tuhého roztoku je tvorba jemne rozptýlených precipitátov vylúčených počas starnutia [4], kedy dochádza k zmene subštruktúry a v dôsledku toho i k zmene mechanických, fyzikálnych a technologických vlastností. U niektorých zliatin rozpad presýteného tuhého roztoku, prebieha samovoľne už za izbovej teploty behom niekoľkých dní alebo týždňov a je označované ako prirodzené starnutie. U iných zliatin sa rozpad pri izbovej teplote nerealizuje, teda je potrebné zvýšenie teploty. Jedná sa o umelé starnutie a zvyčajne trvá niekoľko hodín. Niekedy sa realizuje i stupňovité starnutie, čo je proces uskutočnený postupne pri rôznych teplotách [3].

1.3.1 KINETIKA ROZPADU PRESÝTENÉHO TUHÉHO ROZTOKU

Kinetika rozpadu je súhrnný názov pre proces vnútorných zmien, ku ktorým počas starnutia nepretržite dochádza. Podľa kriviek kinetiky rozpadu je možné určiť presne teplotu a čas nutný pre získanie požadovaných vlastností danej zliatiny, keďže každý typ zliatin ma osobitnú charakteristiku rozpadu presýteného tuhého roztoku. Čas za ktorý sa rozpad presýteného tuhého roztoku uskutoční, závisí predovšetkým na chemickom zložení zliatiny.

Ako príklad je možné uviesť krivky kinetiky rozpadu zliatiny Al-Cu-Mg. Z uvedených závislostí (Obr. 4 vľavo) je zrejmé, že pri normálnej teplote začína precipitácia už po necelej hodine. Znížením teploty na 0 °C sa inkubačná doba predlžuje na 10 h, pri teplote -18 °C nedochádza k precipitácii ani po 100 h.



Obr. 4 Krivky kinetiky rozpadu zliatiny 2024 pre vľavo: prirodzené starnutie; vpravo umelé starnutie [3]

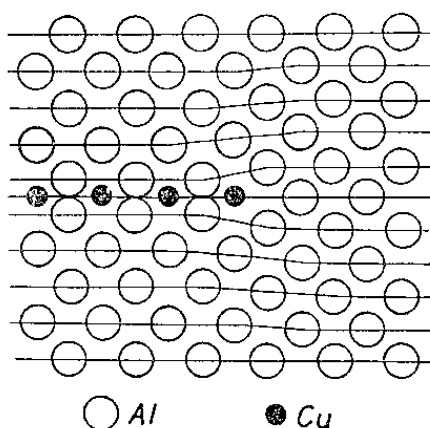
Z uvedených kriviek umelého starnutia pri zvýšených teplotách (Obr. 4 vpravo) je možné určiť zákonitosti, platiace pre všetky hliníkové zliatiny podrobené tomuto tepelnému spracovaniu. Zvýšením teploty umelého starnutia sa dosahuje maximálnych pevnostných vlastností v kratšom čase a naopak znížením teploty v čase dlhšom. Zvýšenie teploty zároveň väčšinou znižuje maximálne dosiahnuteľné pevnostné hodnoty [3].

1.3.2 PRIEBEH ROZPADU PRESÝTENÉHO TUHÉHO ROZTOKU

Rozpad presýteného tuhého roztoku prebieha už za normálnej teploty. V miestach koncentračných rozdielov prebieha nukleácia novej fázy, ktorá je bohatšia na prísadu než základný tuhý roztok. Rastom týchto zárodokov vznikajú koherentné precipitáty, ktoré sú označované ako Guinier-Prestonové pásma (GPI) [2]. V zliatine takto vznikajú napätia spôsobené rozdielnou veľkosťou atómov základného tuhého roztoku a vylúčených precipitátov. Vzniknuté precipitáty a vysoké lokálne napätové polia v okolitom tuhom roztoku dávajú zliatine vyššiu pevnosť tým, že spôsobujú spomalenie pohybu dislokácií [4].

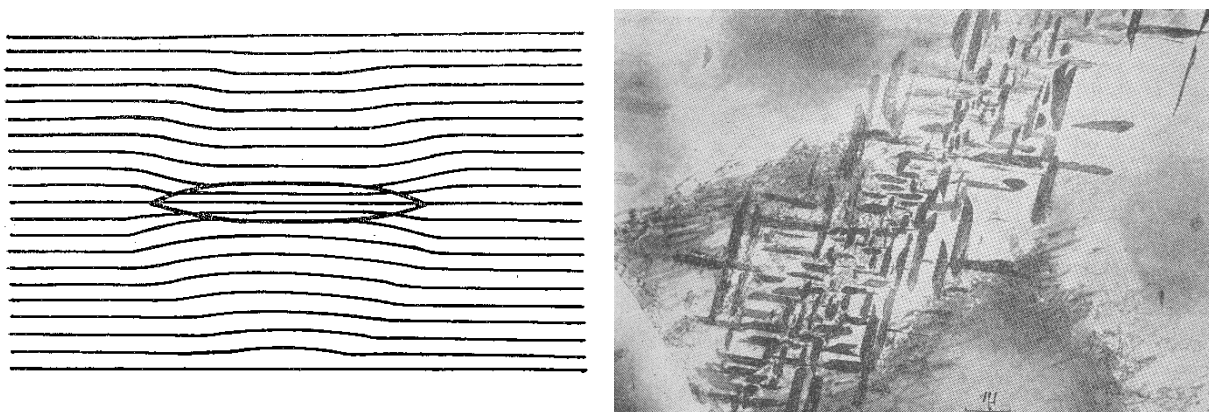
Za zvýšenej teploty tieto koherentné precipitáty ďalej rozrastajú a ich počet sa znižuje. Pri ďalšom vzostupe teploty vznikajú čiastočne koherentné a nekoherentné precipitáty.

Rozpad presýteného tuhého roztoku je všeobecne možné popísať na zliatine Al-Cu podľa [2]. V prvej fáze starnutia dochádza v presýtenom tuhom roztoku k difúznemu pohybu atómov medi, čím vznikajú oblasti s vyššou koncentráciou medi. Toto štádium je spojené s rozsiahlym pohybom vakancií a ich sústreďovaním v určitých kryštalografických smeroch a rovinách. V oblastiach s vyššou koncentráciou medi následne dochádza ku koherentnej precipitácii monoatomárnych vrstiev medi (pásma GPI) (Obr. 5).



Obr. 5 Usporiadanie atómov medi v pásme GPI [2]

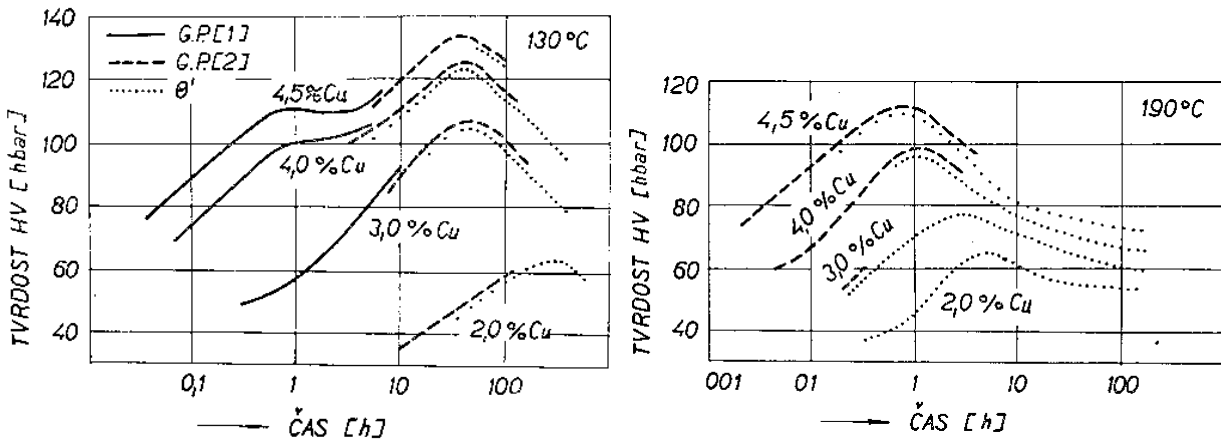
V ďalšej fáze starnutia vznikajú viacvrstevné doštičkové útvary pravidelne striedajúcich sa vrstiev medi. Sú označené ako Guinier-Prestonové pásma II (Obr. 6). Majú zreteľnú tetragonálnu stavbu a sú koherentné s mriežkou základnej kovovej hmoty.



Obr. 6 Znázornenie pásma GPII – vľavo schematicky; vpravo v zliatine Al-Cu [2]

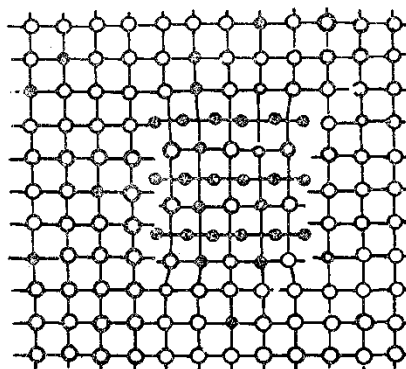
Koherentné pásma GPI a GPII sa tvoria v rovinách rovnobežných s plochami elementárnej kubickej mriežky. Ich vznikom je prirodzené starnutie zliatiny Al-Cu skončené.

Pri starnutí za zvýšených teplôt (Obr. 7) nastávajú určité rozdiely. U zliatin s vyšším obsahom medi spočiatku vznikajú pásma GPI, následne sa objavujú taktiež pásma GPII, ktorých počet vzrastá, kdežto pásma GPI sa postupne rozpúšťajú. Neskôr sa v štruktúre zliatiny objavuje čiastočne koherentná fáza Θ' (Obr. 8).



Obr. 7 Priebeh precipitácie za rôznych teplôt [2]

Precipitácia môže začať priamo tvorbou koherentných precipitátov GPII, ich vznik nie je podmienený predchádzajúcou prítomnosťou pásem GPI. Ak je obsah medi nízky (napr. 2%), tvorí sa priamo fáza Θ' . Zvýšením objemu tejto fázy sprevádzané zmenšujú jej disperzitosťou sa tvrdosť zliatiny znižuje. Tento jav je označovaný ako prestarnutie zliatiny.



Obr. 8 Schematické znázornenie čiastočne koherentného precipitátu [2]

Z priebehu starnutia pri normálnej a zvýšenej teplote je zrejmé, že precipitačný rozpad presýteného tuhého roztoku zliatiny Al-Cu je značne komplikovaný a prechádza niekoľkými fázami, ktorých vznik nie je vzájomne podmienený.

2 PREKALITEĽNOSŤ A FAKTORY KTORÉ JU OVPLYVŇUJÚ

Medzi priebehom ochladzovania povrchu a jadra kaleného kusu existujú veľké rozdiely, ktoré vzrastajú s jeho hrúbkou. Po vložení kaleného predmetu do kaliaceho prostredia sa rýchlo znižuje teplota povrchových vrstiev, vzniká teplotný spád medzi povrchom a jadrom predmetu, ktoré i pri dobrej tepelnej vodivosti hliníkových zliatin je ochladzované pomalšie ako povrch. Tak v dobe, kedy na začiatku ochladzovania klesá teplota povrchu veľkou rýchlosťou, v jadre sa mení teplota len nepatrne [5].

Prekaliteľnosť zliatin je preto kritickým parametrom u výrobkov väčšej hrúbky. Pokiaľ je diel v prevádzke namáhaný osovými silami a pri kalení sa nedosiahne v jeho ose potrebnej rýchlosti ochladzovania, potom nenastáva ani požadovaný nárast pevnosti, čo môže pri zaťažovaní viesť k lokálnemu prekročeniu medze klzu spolu so vznikom plastickej deformácie [1].

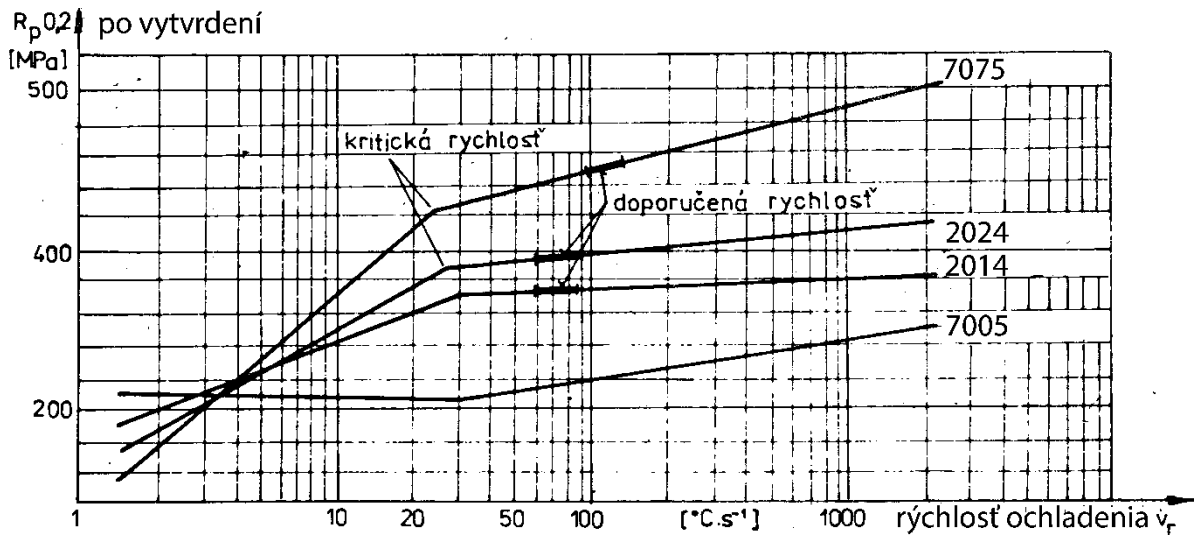
Ochladzovanie vo väčšej hĺbke pod povrchom je limitované tepelnou vodivosťou materiálu a u danej súčasti sa dá zvýšiť len nepriamo a síce zvýšením rýchlosti ochladzovania na povrchu. Rýchlosť ochladzovania je teda hlavným parametrom ovplyvňujúcim prekaliteľnosť [1].

2.1 RÝCHLOSŤ OCHLADZOVANIA

Rýchlosť ochladzovania po skončenom rozpúšťacom ohreve ovplyvňuje popri prekaliteľnosti i ďalšie vlastnosti vytvrdzovaných súčastí. Malá rýchlosť, pri ktorej dochádza k čiastočnej segregácii, zhoršuje odolnosť proti korózii, veľké rýchlosti zaručujú vyššie pevnosti no môžu spôsobiť zdeformovanie rozmernejších súčastí [2].

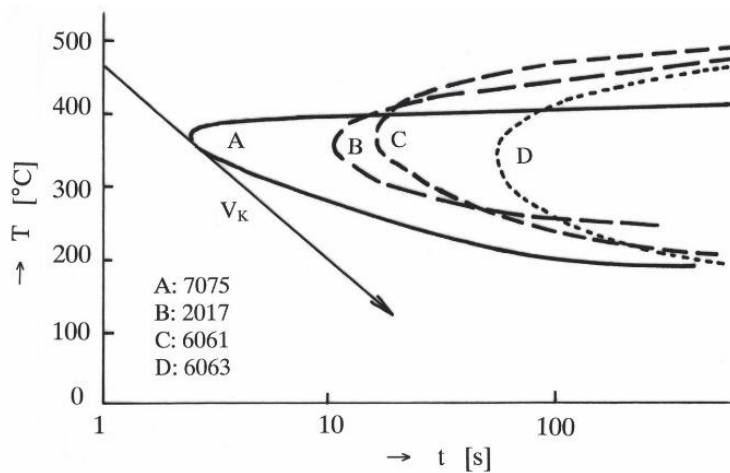
2.1.1 KRITICKÁ RÝCHLOSŤ OCHLADZOVANIA

Cieľom zakalenia predmetu je zachytiť homogénny tuhý roztok s vysokou hustotou vakancií rýchlim preklenutím istého kritického intervalu teplôt. K tomuto je potrebné ochladzovanie tzv. kritickou rýchlosťou, tj. najmenšou rýchlosťou ochladzovania z rozpúšťacieho ohrevu, pri ktorej nenastáva rozpad presýteného tuhého roztoku. Zlomy na (Obr. 9) odpovedajú práve kritickej rýchlosti ochladzovania. Pri nižších rýchlostiach sa predčasne tvoria precipitáty a rýchlo klesá dosiahnutá pevnosť po vytvrdení [1].



Obr. 9 Vplyv rýchlosti ochladzovania pri kalení na medzu klzu po vytvrdení [1]

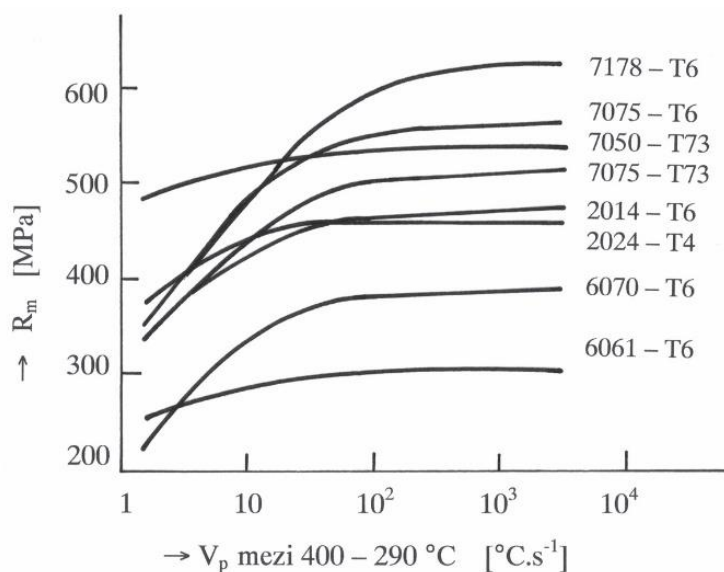
„C“ krivky (Obr. 10) rovnako súvisia s kritickou rýchlosťou ochladzovania a pri tepelnom spracovaní majú veľké uplatnenie. Z uvedených diagramov (Obr. 9, Obr. 10) je zrejmé, že rôzne typy zliatin majú rôznu kritickú rýchlosť ochladzovania. Na rýchlosť ochladzovania sú často citlivé zliatiny triedy 2xxx (Al-Cu-Mg) a triedy 7xxx (Al-Zn-Mg). Zliatiny triedy 6xxx (Al-Mg-Si) majú nižšiu citlivosť na kritickú rýchlosť ochladzovania. Zliatina 7005 (AlZn4Mg1) je takmer necitlivá (samokaliteľná) [1].



Obr. 10 „C“ rôznych zliatin; kritická rýchlosť pre zliatinu 7075 [3]

2.1.2 PRIEMERNÉ RÝCHLOSTI OCHLADZOVANIA [4]

Priemerné rýchlosti ochladzovania rovnako umožňujú vzájomné porovnanie citlivosti zliatin na rýchlosť ochladzovania.

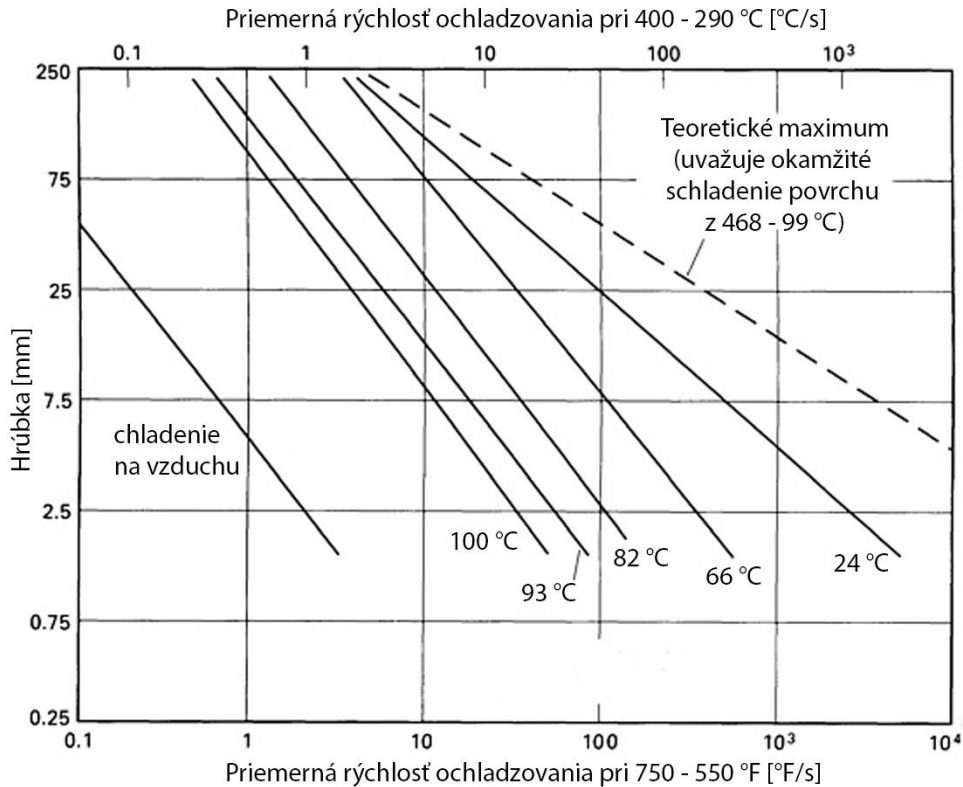


Obr. 11 Pevnosť po vytvrdení v závislosti na priemernej rýchlosti ochladzovania pre rôzne zliatiny [3]

U zliatin s vysokou citlivosťou (spomínané triedy 2xxx a 7xxx) je pre dosiahnutie maximálnej pevnosti po precipitačnom vytvrdení nutná v teplotnom intervale medzi 400–290 °C priemerná rýchlosť ochladzovania približne 300 °C/s, poprípade vyššia (Obr. 11). Naopak u zliatin, ktoré nevykazujú vysokú citlivosť na rýchlosť ochladzovania (trieda 6xxx) je dosiahnutie maximálnej pevnosti možné už rýchlosťou ochladzovania približne 100 °C/s.

Priemerné rýchlosti ochladzovania sú vhodné aj pri porovnávaní výsledkov rôznych metód kalenia. Dochádza však k zrovnaniu len v istom „kritickom“ rozmedzí teplôt, kedy je najvyšší predpoklad precipitácie. Táto metóda môže byť teda značne nepresná, pretože precipitácia môže vo vysokej miere prebiehať aj mimo tohto tepelného rozmedzia.

Závislosť priemernej rýchlosti ochladzovania na hrúbke kaleného predmetu je zreteľná z (Obr. 12). S rastúcou hrúbkou kaleného predmetu (v tomto prípade dosky) priemerná rýchlosť ochladzovania jadra prudko klesá (uvedená stupnica je logaritmická). Zmenu rýchlosti ochladzovania je možné doceliť použitím prostredia s rôznou intenzitou, poprípade zmenou jeho teploty. Čiarkovaná čiara predstavuje teoreticky maximálnu rýchlosť ochladzovania v stredovej rovine dosky pri uvažovanom nekonečnom súčiniteli prestupu tepla.



Obr. 12 Vplyv hrúbky a kaliaceho prostredia na priemernú rýchlosť ochladzovania v strede kalenej dosky [4]

2.1.3 DOPORUČENÉ RÝCHLOSTI OCHLADZOVANIA

Rýchlosť ochladzovania má veľký vplyv na pevnostné vlastnosti po vytvrdení, ako napokon znázorňuje (Obr. 9). Najvyššími rýchlosťami ochladzovania sa spravidla dosahuje najvyšších pevností, najlepšej kombinácie pevnosti a húževnatosti, ďalej vysokej odolnosti voči korózii a korózii pod napätím [4]. Doporučené rýchlosti ochladzovania sú preto často podstatne vyššie než kritické, nielen preto, že sa ďalej zvyšuje pevnosť (zachytí sa v tuhom roztoku viac vakancií), ale hlavne sa zvyšuje spomínaná korózná odolnosť a mení sa charakter korózneho poškodenia [1].

Rýchlosť ochladzovania je napriek tomu vždy kompromisom. S ohľadom na pevnosť a koróznou odolnosť by mala byť čo najväčšia. Vysoké rýchlosti na druhej strane zväčšujú tepelné rozdiely medzi povrchom a jadrom a tým spôsobujú tepelné prnutia, ktoré vyvolávajú deformácie kalených predmetov [1].

Nižšie rýchlosti ochladzovania sú z tohto dôvodu často používané pri kalení súčastí zložitých tvarov s veľkými prierezmi a premenlivou hrúbkou stien ako napr. odliatky, výkovky, alebo výtlačky. Dôvodom je zamedzenie vzniku deformácií, zvýšenie rozmerovej stability a minimalizovanie zbytkových vnútorných napätí spôsobených nerovnomerným rozložením teplôt na povrchu a vo vnútri počas chladenia. Neschladené vnútorné časti materiálu sa počas chladnutia sťahujú, čím ťahajú už schladený vonkajší obal. V prípadoch pomalého ochladzovania je efekt precipitačného vytvrdzovania do istej miery limitovaný, avšak kalenie vyššími

rýchlosťami by prinášalo spomínané problémy. Zníženie rýchlosti ochladzovania v tomto prípade prináša výrazné zníženie požiadaviek na rovnanie dielcov po kalení. Ako vyplýva z vyššie uvedených diagramov kritických rýchlostí ochladzovania, zliatiny ako napr. 6063 a 7005 sú obzvlášť vhodné pre pomalé ochladzovacie rýchlosti (napr. kalenie na vzduchu), kedy ich pevnostné vlastnosti nie sú do veľkej miery ovplyvnené rýchlosťou ochladzovania [4].

2.1.4 SKUTOČNÁ RÝCHLOSŤ OCHLADZOVANIA KALENÉHO PREDMETU [5]

Ako už bolo naznačené, počas kalenia dochádza k intenzívnemu ochladzovaniu povrchu telesa priamym stykom s kaliacim prostredím. Vnútorne časti telesa sú ochladzované vedením tepla povrchovými vrstvami a rýchlosť ochladzovania klesá s rastúcou vzdialenosťou od povrchu telesa. Pokiaľ má byť predmet prekalený v celom priereze, musí byť skutočná rýchlosť ochladzovania v celom priereze väčšia než kritická rýchlosť. Miera do akej bude teleso prekalené preto závisí na vzťahu medzi kritickou rýchlosťou kalenia danej hliníkovej zliatiny a skutočnou rýchlosťou ochladzovania uvažovanej vrstvy.

Skutočná rýchlosť ochladzovania v ľubovoľnom mieste prierezu kaleného predmetu závisí na týchto veličinách:

Tvar a hmota kaleného predmetu. So vzrastajúcim objemom súčasti vzrastá i množstvo tepla, ktoré je nutné odvieť povrchom súčasti. Objem predmetu vzrastá s treťou mocninou a povrch len s druhou. Preto masívnejšie súčasti majú pomer povrchu k objemu menej priaznivý než súčasti drobné.

Tepelná vodivosť danej hliníkovej zliatiny. Ochladzovanie vnútorných vrstiev je dôsledok vedenia tepla povrchovými vrstvami. Preto tepelný spád v kalenej zliatine s dobrou tepelnou vodivosťou je menší než u zliatin, ktorých vodivosť je malá.

Kaliace prostredie. Intenzívne kaliace prostredie odníma veľmi rýchlo teplo povrchu kalenej súčasti. S vzrastajúcou intenzitou kalenia (tvrdšie pôsobiace kaliace prostredie, intenzívnejší pohyb) sa zväčšuje hĺbka vrstvy pod povrchom, ktorá je ochladzovaná nadkritickou rýchlosťou [5].

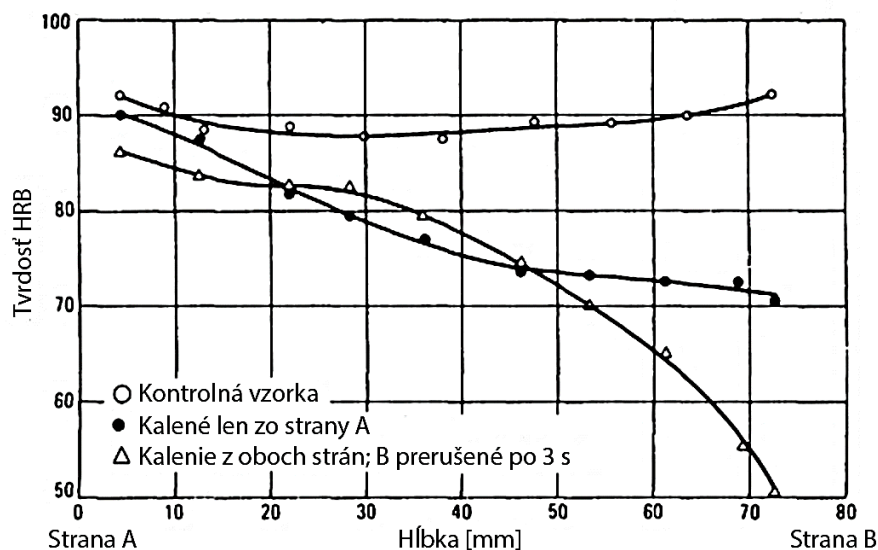
2.1.5 ĎALŠIE FAKTORY OVPLYVŇUJÚCE RÝCHLOSŤ OCHLADZOVANIA [4]

Rýchlosť ochladzovania je vo vysokej miere závislá na stave povrchu dielu. Najnižšie rýchlosti sa dosahujú u výrobkov s čerstvo obrobeným povrchom alebo produkty povrchovo upravené povlakmi znižujúcimi prechod tepla. Naopak prítomnosť oxidickej vrstvy rýchlosť ochladzovania zvyšuje. Zvýšenie je možné dosiahnuť aj aplikáciou antireflexných povlakov. Povrchová drsnosť vplýva na stabilitu vytvoreného parného vankúša.

Pri zložitých odliatkoch alebo výkovkoch má na rýchlosť ochladzovania vplyv aj spôsob vkladania súčasti do kaliaceho prostredia, kedy sa podstatne mení rýchlosti ochladzovania v rôznych častiach výrobku, tým aj mechanické vlastnosti,

zbytkové napätia spôsobené kalením. Umiestnenie a medzery medzi hromadne kalenými súčasťami môžu výrazne určovať rýchlosti chladenia. Kaliace lázne musia poskytovať dostatočný objem kaliaceho média aby sa zabránilo jeho nadmernému ohrievaniu. Pokiaľ sa k vytvoreniu prúdenia kaliaceho prostredia používajú trysky je dôležité aby priamy prúd nezasahoval súčasti, čím by vznikal lokálny rapidný pokles teploty.

Opätovné lokálne ohriatie zliatiny na teploty kedy nastáva segregácia, môže nastať pokiaľ dôjde k akémukoľvek prerušeniu chladenia. Lokálne zvýšenie teploty vzniknuté v prvých sekundách kalenia, spôsobené napr. prerušením prúdu z chladiacej trysky je obzvlášť nežiadúce. Teplo obsiahnuté vo vnútorných častiach materiálu môže byť dostatočné na opätovné vyhrievanie povrchu. Takto kalený materiál vykazuje v oblastiach prerušeného kalenia značné straty pevnosti (Obr. 13). Takýto pokles pevnosti môže byť dokonca vyšší než pokles spôsobený nedostatočnou rýchlosťou ochladzovania. Dôležitou požiadavkou pri kalení je preto nutnosť dodržania dostatočného objemu, objemovej tepelnej kapacity a rýchlosti prúdenia kaliaceho média, aby počas chladnutia zliatiny precipitácia nastávala v najmenej možnej miere.



Obr. 13 Efekt poklesu tvrdosti pri prerušení kalenia [4]

2.2 KALIACE PROSTREDIA

Z predošlých častí textu vyplýva že prekaliteľnosť telesa závisí na vzťahu medzi kritickou rýchlosťou kalenia danej hliníkovej zliatiny a skutočnou rýchlosťou ochladzovania v uvažovanej časti pod povrchom. Voľba kaliaceho prostredia o danej intenzite priamo ovplyvňuje rýchlosť ochladzovania v danej vrstve pod povrchom a teda aj mieru prekalenia.

2.2.1 INTENZITA KALENIA

Intenzitu kalenia je možné meniť buď zmenou teploty lázne alebo zmenou rýchlosti prúdenia média; tým sa mení gradient teplôt v medznej vrstve i množstvo odvádzaného tepla. Mierenejšie je kalenie do kľudného prostredia alebo do ohriatej lázne. Prudšie je kalenie ak sa kalený dielec voči lázni pohybuje; zavesená súčiastka sa v lázni zdvíha a spúšťa, alebo sa lázeň uvedie do pohybu napr. čerpadlom [1].

Ochladzovacia účinnosť rôznych prostredí závisí predovšetkým na tepelnej vodivosti, mernom teple, výparnom teple a viskozite kaliaceho prostredia. Značný vplyv má i množstvo rozpustených plynov, ktoré spolu s parami lázne vytvárajú okolo kaleného predmetu parný vankúš a jeho tepelná vodivosť a stálosť. Vplyv má taktiež množstvo rozpustených minerálnych látok, ktoré môžu vytvoriť na kalenom predmete izolačnú vrstvu. S ohľadom na vznik pár a plynov je veľmi dôležitý relatívny pohyb predmetu a lázne, ktorým sa tento obal viac či menej ľahko poruší [5].

2.2.2 PRIEBEH OCHLADZOVANIA

Priebehy ochladzovaní materiálu v rôznych prostrediach sa dosť líšia. Jednoduchý priebeh je v prostrediach, ktoré v priebehu kalenia nemenia svoje skupenstvo ako napr. vzduch, výmena tepla je uskutočnená žiarením, prúdením a vedením tepla.

Najčastejšie sú však používané prostredia, u ktorých v priebehu kalenia dochádza k odparovaniu (voda a jej roztoky) a ochladzovacie účinky sú pomerne zložité. Spočiatku kalenia sa vytvára okolo kaleného predmetu stabilný parný vankúš a ochladzovanie je pomalé. Vo chvíli kedy sa teplota povrchu kaleného predmetu dostatočne znížila, sa povrch stýka priamo s kaliacim prostredím a prebieha intenzívny var. Po dosiahnutí kritickej teploty povrchu predmetu, ktorá závisí na druhu kvapaliny, sa parný vankúš stáva nestabilný, kvapalina začína zmáčať povrch a rýchlosť odvodu tepla sa zväčšuje. Tvoria sa stále nové bublinky pary, stúpajú k povrchu a tým vzniká pohyb lázne, teplo sa odvádza nielen parou, ale taktiež kvapalinou, ktorá sa stýka s povrchom. Pokiaľ teplota povrchu klesne približne na bod varu prostredia, prestávajú sa tvoriť pary a ďalší odvod tepla sa deje vedením. Vtedy je rýchlosť ochladzovania už malá; závisí najmä na rozdiely teplôt povrchu predmetu a prostredia [5].

2.2.3 VODA

Voda predstavuje vysoko efektívne a preto aj široko využívané kaliace prostredie. Jej vysoký kaliaci účinok vyplýva z pomerne veľkej tepelnej vodivosti, značnej hmotnostnej tepelnej kapacity a hlavne veľkého výparného tepla. Pri kalení do vody sa okolo kaleného predmetu tvorí obal pár, ktorý je nutné sústavne porušovať relatívnym pohybom predmetu a lázne, aby kaliaci účinok neklesol [5].

Prísada asi 5 % NaCl, NaOH, Na₂CO₃, alebo H₂SO₄ do vody potlačuje tvorbu parného vankúša a zvyšuje hlavne počiatočnú intenzitu kalenia. Naproti tomu prísada polymérov rozpustných vo vode (polyalkylen glykolu a pod.) síce tvorbu parného izolačného plášťa taktiež obmedzuje, vytvára však na povrchu dielu viskóznou vrstvičku tvoriacu tepelno-izolujúci film a pri vyššom obsahu polymérov ochladzovanie značne spomaľuje [1].

Voda je veľmi nenáročné a lacné kaliace prostredie. Časom sa nemení, nekazí sa, ale je nutné dbať, aby nebola znečistená. Jej znečistením (napr. masnotami, mydlom) značne znižuje kaliaci účinok [5].

Kaliaca lázeň sa teplotne obvykle pohybuje v rozmedzí 20 až 40 °C, pričom stanovená horná hranica sa nesmie počas kalenia prekročiť [1]. Objem lázne musí teda byť dostatočný v pomere k objemu vsádzky. Rovnako dôležitá je cirkulácia vody zabezpečujúca rovnomerné chladenie vsádzky. Najmä počas prvých sekúnd kalenia je nutné zabrániť lokálnym zvýšeniam teploty z dôvodu tvorby parných vankúšov. S ohľadom na zbytkové pnutia a deformácie dielov sa môže použiť voda o vyššej teplote 65 to 80 °C, popr. vriaca voda [4].

Trysky s tlakovou vodou predstavujú istú možnosť zvýšenia lokálnej rýchlosti ochladzovania, ktorú je možné regulovať zmenou rýchlosti a objemom vytekajúcej vody voči jednotke „zasiahnutej“ plochy kaleného materiálu. Nemenej dôležitým faktorom je rýchlosť prechodu materiálu cez trysky [4].

Kaliace sprchy sa používajú v malom rozsahu. Predstavujú spolu s vodnou hmlou menej intenzívne kaliace prostredie, ktoré má obmedzenú použiteľnosť a väčšinou sa dá nahradiť teplou kaliacou láznou. Niekedy je sprcha súčasťou kaliaceho prípravku [4].

2.2.4 OLEJ

Olej o vysokom bode vzplanutia predstavuje mierne kaliace prostredie. Pri kalení sa parné vankúše vôbec netvoria, preto ochladzuje ihneď po ponorení dielu do lázne avšak problémom je odmasťovanie súčastí a nebezpečenstvo požiaru [1].

2.2.5 PLYN

Plyn je najmiernejším kaliacim prostredím. Ochladzuje naproste rovnomerne, avšak pomaly, čo súvisí s jeho malou mernou hmotnosťou a tepelnou kapacitou, ktorá sa dá zvýšiť tlakom plynu pri kalení vo vákuovej peci. Kalenie na vzduchu popr. prúdom vzduchu za použitia vetrákov, prináša maximálnu rozmerovú stabilitu a používa sa pre niektoré výkovky a odliatky. Na vzduchu sa ochladzujú zliatiny s vysokou stabilitou presýteného tuhého roztoku. Účinné je taktiež kalenie do

tekutého dusíku, ktorý celý povrch obalí izolačnou vrstvou plynu, rýchlosť chladnutia je omnoho nižšia než vo vodnej lázni [1] [4].

2.2.6 GROSSMANNOV FAKTOR H

Pre hodnotenie intenzity kaliaceho prostredia a vyjadrenie vzťahu medzi kaliacim prostredím a kaleným materiálom zaviedol Grossmann takzvaný faktor „H“ [3]. Používanie Grossmannovho faktoru H je veľmi rozšírené. Pre presné hodnotenie kaliacich prostredí nie je vhodné, môže však byť používané pre približné zrovnávanie, lebo je názorné a jednoduché [5].

Hodnoty „H“ i pri konštantnom kaliacom médiu závisia na jeho teplote a rýchlosti prúdenia. Čím je Grossmannov faktor väčší, tým intenzívnejšie je materiál ochladzovaný [3].

Tab. 1 Grossmannov faktor pre plechy 75 mm zo zliatiny 7075

Kaliace médium	Teplota [°C]	Rýchlosť prúdenia [m.s ⁻¹]	Grossmannov faktor H
Voda	27	0	1,07
	27	0,5	1,55
	38	0	0,99
	38	0,5	1,48
	60	0	0,86
	60	0,5	1,33

Z tabuľky vidieť, že pri konštantnom médiu a materiáli má na hodnotu Grossmannovho faktoru vplyv rýchlosť prúdenia a teplota prostredia.

Analytické určenie hodnoty Grossmannovho faktoru uvádza napr. [3].

Nedostatkom tejto metódy je značná odchýlka skutočného priebehu ochladzovania od predpokladaného a preto má faktor „H“ len informatívnu hodnotu a je značne nepresný.

Vzhľadom k tomu, že nič presnejšieho neexistovalo a pracovalo sa s týmto faktorom takmer pol storočia, existuje mnoho užitočných diagramov pre optimalizáciu kaliaceho prostredia [1].

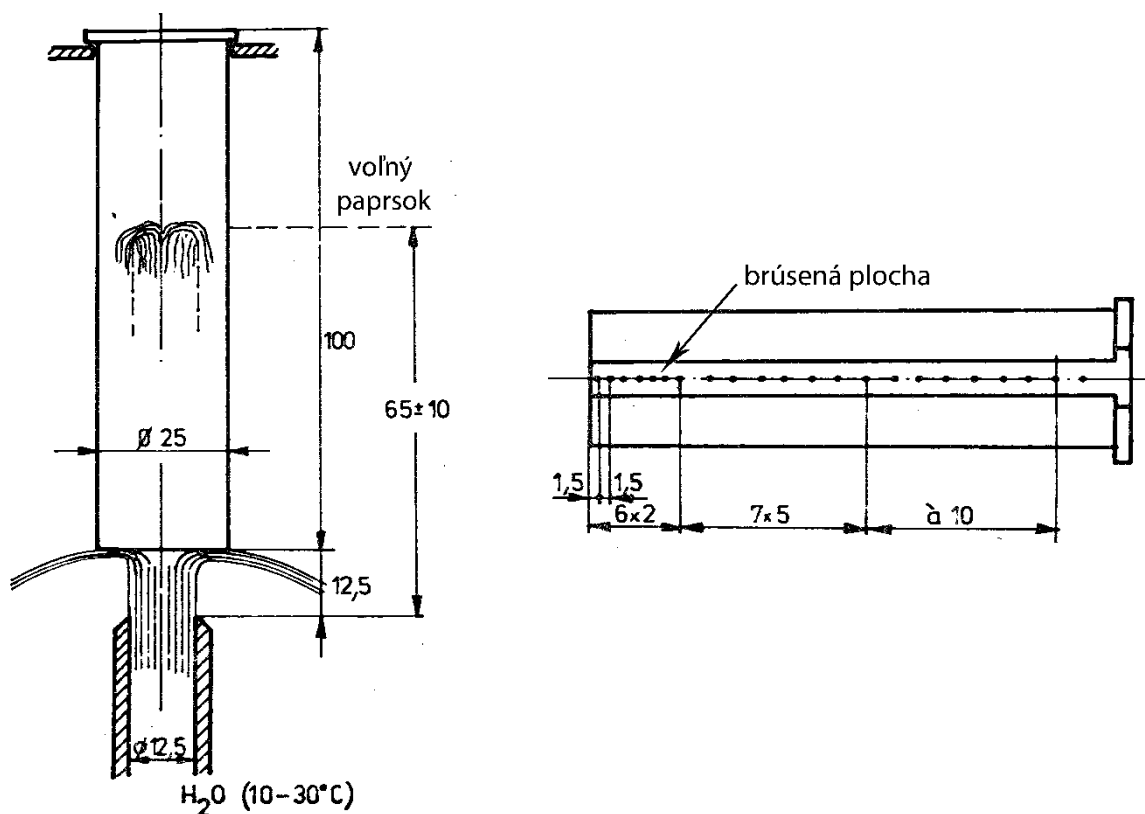
3 JOMINYHO ČELNÁ SKÚŠKA PREKALITEĽNOSTI

Diplomová práca sa zaoberá stanovením prekaliteľnosti hliníkových zliatin, avšak s využitím skúšky prekaliteľnosti používanej pre oceli. Táto kapitola sa preto venuje popisu uvedenej skúšky prekaliteľnosti a sčasti aj jej ďalšieho využitia pri tepelnom spracovaní ocelí.

3.1 CHARAKTERISTIKA SKÚŠKY

Napriek veľkému množstvu používaných skúšok prekaliteľnosti, práve Jominyho skúška je takmer univerzálne používaná pre určovanie prekaliteľnosti ocelí. Skúška je vo svojej podstate relatívne jednoduchá, vo vysokej miere opakovateľná a prináša mnoho užitočných informácií pre konštruktéra i technológa [6].

Pri Jominyho skúške sa kalí valcové teleso vo zvislej polohe prúdom vody, ktorý je vedený zospodu na jeho čelnú plochu. Nechladený koniec tyčky voľne chladne na vzduchu. Rýchlosť ochladzovania je najväčšia na kalenom čele a so vzrastajúcou vzdialenosťou L od nej sa plynule znižuje. Určitej vzdialenosti od čela sa preto dá priradiť určitá rýchlosť chladnutia [5].

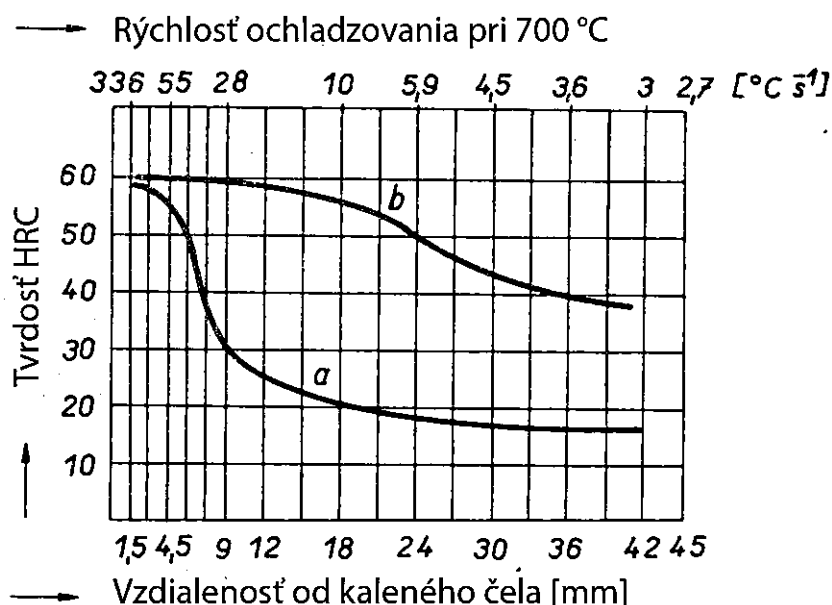


Obr. 14 Vľavo: schéma prípravku pre kalenie Jominyho tyčky; vpravo“ schéma merania tvrdosti na vybrúsenej ploche [1]

Aby boli výsledky reprodukovateľné a v medzinárodnom merítke zrovnateľné, bol presne definovaný rozmer a tvar telesa, postup ohrevu i kalenia a taktiež spôsob merania ako je znázornené na (Obr. 14).

Tyč sa po výdrži na teplote vyberie, zavesí do prípravku a najdlhšie do 5 sekúnd sa prúdom vody začne ochladzovať čelo. Intenzita ochladzovania je definovaná priemerom paprsku 12,5 mm a rýchlosťou prúdenia, ktorá sa nepriamo meria podľa výšky tryskania paprsku (65 ± 5) mm nad ústie trysky. Voda má mať 10 až 30 °C a ochladzovanie má trvať najmenej 10 minút [1].

Po zakalení sa vybrúšia na valcovom povrchu dve plôšky ležiace oproti sebe do hĺbky 0,4 až 0,5 mm (materiál sa nesmie pri brúsení vyhriať) na ktorých sa zisťuje tvrdosť HRC alebo HV v postupne sa zväčšujúcich vzdialenostiach od kaleného čela. Prípravok pevne držiaci vzorku, poskytujúci presný posuv je dôležitý pre presnosť a zvyšuje jednoduchosť merania. Zistené hodnoty tvrdosti v jednotlivých bodoch (stredné hodnoty dvoch meraní) sa vynášajú do diagramu vyjadrujúceho závislosť tvrdosti na vzdialenosti od kaleného konca tyče a ich spojením vzniká krivka, ktorá charakterizuje prekaliteľnosť skúšanej oceli (Obr. 15).



Obr. 15 Priebeh tvrdosti Jominyho skúšky oceli: a) mierne prekalujúcej; b) silno prekalujúcej [5]

U oceli s malou prekaliteľnosťou krivka tvrdosti prudko klesá (Obr. 15a), kdežto u oceli ktorá prekaluje silno je pokles tvrdosti veľmi pomalý a krivka má plochý charakter (Obr. 15b). Úplne rovná krivka predstavuje najvyššiu prekaliteľnosť, charakteristickú pre samokaliteľnú ocel' [5] [6].

3.2 PREKALITEĽNOSŤ A OPTIMALIZÁCIA POSTUPOV TEPELNÉHO SPRACOVANIA

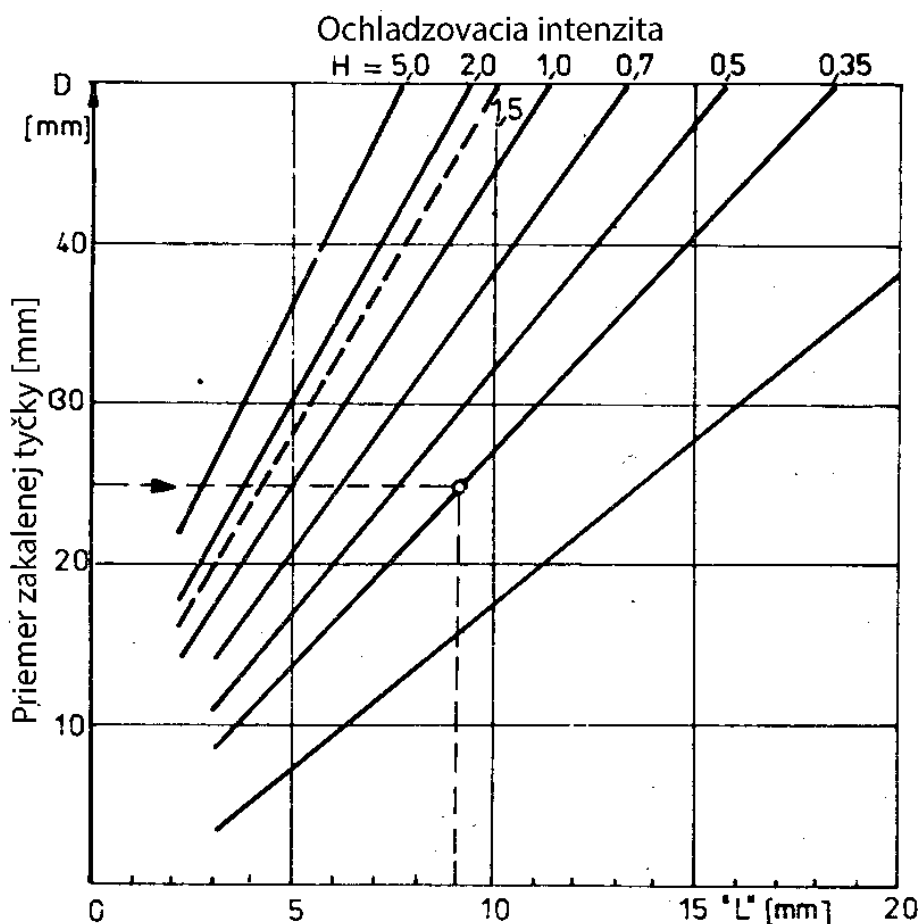
Vhodnou úpravou technologických parametrov sa dá dosiahnuť optimálneho prekalenia a tým i optimálneho rozloženia tvrdosti a pevnosti po priereze dielu. Za týmto účelom sa používajú pásy prekaliteľnosti oceli a diagramy ekvivalentných rýchlostí ochladzovania [1].

3.2.1 PÁSY PREKALITEĽNOSTI

Pásky prekaliteľnosti danej oceli predstavujú obálku všetkých kriviek prekaliteľnosti, ktoré má jej výrobca k dispozícii. Keďže prekaliteľnosť ocelí je vo vysokej miere závislá na chemickom zložení a miera legujúcich prvkov v rámci jednotlivých tavieb kolíše v rozmedzí povolenom normou, vzniká určité rozmedzie možných kriviek prekaliteľností danej ocele. Z pásu prekaliteľnosti vychádza konštruktér a obvykle sa volí stred tohto pásu, avšak je možné že dodaná ocel má krivku prekaliteľnosti v blízkosti horného alebo dolného okraju pásu [1].

3.2.2 DIAGRAMY EKVIVALENTNÝCH RÝCHLOSTÍ OCHLADZOVANIA

Dôležitou pomôckou pre optimalizáciu kalenia sú grafy, z nich je možné určiť pre ľubovoľný priemer kruhovej tyče (alebo pre iný smerodajný rozmer), v akej vzdialenosti od čela Jominyho tyčky je rovnaká rýchlosť ochladzovania ako v určitej hĺbke pod povrchom kruhovej tyče [1].



Obr. 16 Diagram ekvivalentných rýchlostí ochladzovania; tyčka o priemere 25 mm, kalená v prostredí s $H=0,5$ má rovnakú tvrdosť, aká bola zmeraná na Jominyho krivke vo vzdialenosti 9 mm [1]

Pokiaľ má byť vo dvoch sledovaných miestach rôznych telies rovnaká tvrdosť, musí byť priebeh ochladzovania oboch miest totožný. Za týchto predpokladov je možné stanoviť pomocou Jominyho skúšky napr. rýchlosť ochladzovania sledovaného miesta kaleného predmetu.

Postupuje sa tak, že sa určí tvrdosť v uvažovanom bode kaleného predmetu, prevedie sa Jominyho skúška na vzorke oceli a stanoví sa vzdialenosť od kaleného čela, v ktorej je táto tvrdosť. Pre ňu potom poznáme rýchlosť ochladzovania, ktorá je približne rovnaká ako hľadaná rýchlosť v danom bode kaleného predmetu (a teda aj jeho tvrdosť) [5].

4 PRECIPITAČNE VYTVRDZOVANÉ ZLIATINY HLINÍKU

Diplomová práca rieši problém na vybraných zliatinách hliníku, predstavujúce základné konštrukčné precipitačne vytvrdzované zliatiny používané v letectve. Jedná sa o zliatiny 2014, 6082 a 7075, čím je pokryté rozmedzie možných precipitačne vytvrdzovaných tried zliatin, ďalej uvedených v tejto kapitole.

Nevyhnutným kritériom precipitačne vytvrditeľných hliníkových zliatin je teplotne závislá zmena rozpustnosti zložiek tuhého roztoku. Toto kritérium väčšina hliníkových zliatin splňuje, avšak viaceré vykazujú len veľmi mierne zlepšenie mechanických vlastností dosiahnuteľné precipitačným vytvrdzovaním [4]. Podľa odozvy na tepelné spracovanie sa teda zliatiny hliníku delia na:

Nevytvrditeľné zliatiny u ktorých sa zmenou rozpustnosti zložiek pri ohreve a ochladzovaní nedá dosiahnuť merateľného zvýšenia pevnosti.

Vytvrditeľné zliatiny sú hlavným konštrukčným materiálom v letectve a sú legované prvkami, ktorých rozpustnosť je silno závislá na teplote a vhodným tepelným spracovaním je u nich možné dosiahnuť významných zmien mechanických vlastností [1].

Základné skupiny precipitačne vytvrditeľných hliníkových zliatin, podľa [4] sú:

- Zliatiny typu Al-Cu (vytvrdzované pomocou CuAl_2)
- Zliatiny typu Al-Cu-Mg (horčík zosilňuje precipitáciu)
- Zliatiny typu Al-Mg-Si (vytvrdzované pomocou Mg_2Si)
- Zliatiny typu Al-Zn-Mg (vytvrdzované pomocou MgZn_2)
- Zliatiny typu Al-Zn-Mg-Cu

Podľa normy ČSN EN platnej pre tvárnené výrobky sa zliatiny hliníku delia do ôsmich skupín. Každá zliatina je označená štvormiestnym číslom, pričom prvé číslo udáva skupinu zliatin definovanú hlavnými prísadovými prvkami [3].

- Trieda 1xxx – Al minimálne 99,00 % a viac
- Trieda 2xxx – zliatiny AlCu
- Trieda 3xxx – zliatiny AlMn
- Trieda 4xxx – zliatiny AlSi
- Trieda 5xxx – zliatiny AlMg
- Trieda 6xxx – zliatiny AlMgSi
- Trieda 7xxx – zliatiny AlZn
- Trieda 8xxx – zliatiny Al s rôznymi prvkami

Z uvedeného rozdelenia sú zliatiny, u ktorých je možné zvýšiť pevnosť precipitačným vytvrdzovaním zliatiny triedy 2xxx, 6xxx a 7xxx [3].

4.1 TRIEDA 2XXX

Zliatiny Al-Cu-Mg patria k najčastejšie používaným zliatinám, prekonalí zložitý vývoj a len málo zliatin bolo skúmaných do takej hĺbky [2].

Hlavnými legujúcimi prvkami podľa [3] sú: Cu 2,5 – 6,0 %; Mg 0,4 – 2,8 % a Mn 0,4 – 1,0 %.

Tieto zliatiny nemajú tak dobrú odolnosť voči korózii ako väčšina ostatných zliatin hliníku. Preto najmä v letectve bývajú plátované hliníkom o vysokej čistote, poprípade zliatinami Al-Mg-Si čím sa dosahuje vo vysokej miere zvýšenie koróznej odolnosti.

Používajú sa obzvlášť pre súčasti s požadovanou vysokou mernou pevnosťou. V letectve často ako materiál kolies, poťahové materiály krídel a iné časti konštrukcie vyžadujúce vysokú pevnosť pri teplotách do 150 °C. Zliatiny Al-Cu-Mg majú výbornú obrobiteľnosť, no limitovanú zvariteľnosť [7].

4.1.1 PRECIPITAČNÉ VYTVRDZOVANIE ZLIATIN AL-CU-MG

Pre dosiahnutie optimálnych vlastností týchto zliatin je nutné vytvrdenie, kedy dosahujú mechanické vlastnosti zhodné, alebo aj vyššie než nízkouhlíkové ocele [7]. Spôsob tepelného spracovania zliatin Al-Cu-Mg má len niektoré svoje zvláštnosti, predovšetkým pokiaľ ide o vytvrdzovanie [2].

Teplota rozpúšťacieho ohrevu sa pohybuje obvykle, podľa druhu spracovanej zliatiny, v rozmedzí od 490 do 505 °C. Najvyššia teplota rozpúšťacieho ohrevu leží obvykle asi 10 °C pod krivkou solidu. Prekročenie predpísaných hodnôt je spojené s výrazným poklesom mechanických vlastností.

U plátovaných plechov je nutné venovať veľkú pozornosť výdrži na teplote pri rozpúšťacom ohreve, kedy vplyvom zvýšenej teploty med' difunduje do povrchovej vrstvy hliníku a tým sa znižuje korózna odolnosť. Preto je dôležité, aby dĺžka výdrže na teplote rozpúšťacieho ohrevu bola čo najkratšia.

Zliatiny Al-Cu-Mg stranu prirodzene behom niekoľkých dní, no v niektorých prípadoch je do procesu vytvrdzovania týchto zliatin zahrnuté aj umelé starnutie. Maximálna pevnosť, ktorú je možné dosiahnuť po vytvrdení, závisí však v prvej rade na obsahu prísad [2].

4.2 TRIEDA 6XXX

Jedná sa o komplexné zliatiny, v ktorých vedľa horčíku a kremíku býva vždy malé množstvo mangánu, železa, popr. medi [2]. Vytvrdzovanie je umožnené v dôsledku zmeny rozpustnosti intermetallickej fázy Mg₂Si [7].

Hlavnými legujúcimi prvkami podľa [3] sú: Mg 0,2 – 1,5 %, Si 0,2 – 2,0 %.

Sú to zliatiny, ktoré na rozdiel od zliatin Al-Cu-Mg a Al-Zn-Mg majú nižšiu pevnosť, vyznačujú sa dobrými technologickými vlastnosťami ako sú tvárnosť, zvariteľnosť v ochrannej atmosfére, obrobiteľnosť a dobrou odolnosťou voči korózií. Dobrá tvárnosť umožňuje zhotovovať výrobky zložitých tvarov vytlačovaním [2] [7].

Vlastnosti sú závislé na množstve horčíku a kremíku. Zliatiny s prebytkom Mg majú zvýšenú odolnosť voči korózií a zhoršenú tvariteľnosť oproti zliatinám s prebytkom Si, ktoré majú vyššiu pevnosť a zhoršenú zvariteľnosť [3].

Použitie nachádzajú u stredne namáhaných konštrukcií, uplatňujú sa veľmi dobre vo stavbe lietadiel a v iných dopravných zariadeniach, často ako rámy bicyklov a iné zvárané konštrukcie. Ich chemickej odolnosti sa rozsiahle využíva v potravinárskom i chemickom priemysle [2] [7].

4.2.1 PRECIPITAČNÉ VYTVRDZOVANIE ZLIATIN AL-MG-SI

Zliatiny Al-Mg-Si sa vyznačujú značnou stabilitou tuhého roztoku, a preto po rozpúšťacom ohreve pri teplote 500 až 540 °C nemusia byť ochladzované takou rýchlosťou, ako napr. zliatiny Al-Cu-Mg. Stabilita tuhého roztoku je tým väčšia, čím viac sa obsah kremíku blíži stechiometrickému pomeru v zlúčenine Mg₂Si. Také zliatiny je možné ochladzovať i prúdom vzduchu. To má svoju výhodu predovšetkým znížením borenia a dielce nie je treba nákladne rovnať. Pri vyššom obsahu kremíku je však nutné ochladzovanie vo vode [2].

Zvýšená stabilita tuhého roztoku sa prejavuje veľmi výrazne i pri starnutí. Je treba, aby starnutie prebiehalo umelo, teda pri zvýšených teplotách v rozsahu 160 až 180 °C, obvykle v rozmedzí 8 – 12 hodín [2]. Z hľadiska dosiahnuteľných pevnostných vlastností sú zliatiny citlivé na prestávku medzi kalením a nasledujúcim starnutím, doporučené je preto umelé starnutie realizovať ihneď po ochladení z teploty rozpúšťacieho ohrevu [3].

4.3 TRIEDA 7XXX

Jedná sa o typického zástupcu hliníkových zliatin o vysokej pevnosti, u ktorých hlavný legujúci prvok Zn je zastúpený vždy vo väčšom množstve než Mg alebo Cu [2].

Hlavnými legujúcimi prvkami podľa [3] sú: Zn 2 – 8 %; Mg 0,5 – 4,0 % a Cu 0,0 – 3,0 %.

Zliatiny Al-Zn-Mg sa používajú predovšetkým v stave vytvrdzovanom, kedy dosahujú najvyšších mechanických hodnôt medzi všetkými zliatinami hliníku. Hodia sa preto pre vysoko namáhané súčasti vyrobené z výliskov alebo výkovkov. Vedľa zliatin Al-Cu-Mg sa zliatiny so zinkom uplatňujú v stavbe lietadiel ako napr. vrtuľové listy, časti

podvozku, pásnice; v dopravných zariadeniach a iných vysoko zaťažných súčiastiach [2] [7].

Z hľadiska korózných vlastností je odolnosť zliatin Al-Zn-Mg-Cu lepšia ako u zliatin Al-Cu-Mg. Avšak horšia než u zliatin Al-Mg-Si. Zliatiny s vysokou pevnosťou, a to predovšetkým skupiny Al-Zn-Mg, sú náchylné ku korózii pod napätím. Preto sa často používajú v mierne prestarnutom stave kvôli zlepšenej kombinácii pevnosti, odolnosti voči korózii a lomovej húževnatosti.

Zvýšenú náchylnosť ku korózii majú zliatiny aj vtedy, pokiaľ počas rozpadu presýteného tuhého roztoku došlo k segregácii fáz na hraniciach zŕn. Z tohto dôvodu je nutné čo najviac skrátiť dobu manipulácie pred ochladzovaním. Zvýšená rýchlosť ochladzovania zlepšuje odolnosť proti korózii i výsledné mechanické vlastnosti [2] [7].

4.3.1 PRECIPITAČNÉ VYTVRDZOVANIE ZLIATIN AL-ZN-MG-CU

Teplota rozpúšťacieho ohrevu sa môže pohybovať v širokom rozmedzí teplôt, obvykle 440 – 500 °C, nasleduje umelé starnutie, v intervale teplôt 120 – 140 °C. Čas starnutia je obvykle 12 – 14 hodín. Určený je predovšetkým chemickým zložením zliatiny [3].

4.4 OZNAČOVANIE STAVOV TEPELNÉHO SPRACOVANIA

Rada výrobkov sa podrobuje viac alebo menej zložitému tepelnému spracovaniu. Aby sa zjednodušilo označovanie rôznych stavov tepelného spracovania na výkresoch, prípadne v postupových kartách, zaviedlo sa značenie stavov tepelného spracovania doplnkovými číslami alebo kódmi za značkou materiálu [1]. V súčasnosti platné označovanie podľa ČSN EN 515 je prevzaté z normy ASM pôvodne zavedenej v USA a Kanade [3].

Nasledujúca tabuľka uvádza označenie vybraných stavov tepelného spracovania precipitačne vytvrdzovaných tvárnených zliatin hliníku, ktoré sú relevantné pre túto prácu.

Tab. 2 Označovanie vybraných stavov tepelného spracovania

T3	Po rozpúšťacom žíhaní, tvárnení za studena a prirodzenom starnutí.
T4	Po rozpúšťacom žíhaní a prirodzenom starnutí
T6	Po rozpúšťacom žíhaní a umelom starnutí
T73	Po rozpúšťacom žíhaní a umelom prestarnutí k dosiahnutiu najlepšej odolnosti proti korózií za napätia
W	Po rozpúšťacom žíhaní (nestabilný stav). Dobu prirodzeného starnutia (W2h, ...) je možné taktiež špecifikovať

5 ANALYZOVANÁ VELIČINA – TVRDOSŤ

Prekaliteľnosť je v tejto práci určená závislosťou tvrdosti zliatiny po kompletnom precipitačnom vytvrdení. Pokiaľ nie je uvedené inak je tvrdosťou v texte myslená tvrdosť zliatiny po vytvrdení.

5.1 SKÚŠKY TVRDOSTI ZLIATIN HLINÍKU

Na rozdiel od tepelne spracovaných ocelí nie je tvrdosť zliatin hliníku spoľahlivým merítkom pevnosti. Preto sa pri kontrole tepelného spracovania v kaliarni používa len v prípadoch, kedy sa preukázateľne jedná o celkom určitý materiál, u ktorého bolo dodržané predpísané tepelné spracovanie. Je účelné štatisticky vyhodnocovať relácie medzi výsledkami skúšok tvrdosti a skúšok ťahom.

Štandardnou metódou merania tvrdosti je metóda Brinellova (gulôčka $\phi 10$ mm, závažie o hmotnosti 500 kg), pre tenšie plechy sa používa gulôčka $\phi 2,5$ mm a závažie 31,25 kg.

Podstatne rýchlejšia a pre rutinnú kontrolu vhodnejšia je potom skúška podľa Rockwella. Určí sa spravidla hodnota HRB (gulôčka $\phi 1/16$ ", závažie 100 kg); menej často HRE (gulôčka $\phi 1,8$ ", závažie 100 kg); HRE je výhodnejšie, pretože hĺbka otlačku je menšia. Nevýhodou skúšky Rockwellovej je nelineárna závislosť medzi číslom tvrdosti a pevnosti [1].

6 PRÍPRAVA EXPERIMENTU

Problém stanovenia kriviek prekaliteľnosti vybraných hliníkových zliatin je riešený experimentálne. Výpočtové modelovanie so sebou totiž prináša problém popísania obdobia tvorby nestabilnej vrstvy pár počas kalenia vzorky. Prekaliteľnosť je posudzovaná závislosťou tvrdosti zliatiny po kompletnom precipitačnom vytvrdení. Krivky prekaliteľnosti sú stanovené pre viaceré kaliace prostredia, rozdelené do troch súborov experimentov.

6.1 ANALYZOVANÉ ZLIATINY

Pre realizáciu experimentu boli určené zliatiny hliníku, predstavujúce základné konštrukčné precipitačne vytvrdzované zliatiny používané v letectve. Jedná sa o zliatiny 2014, 6082 a 7075, čím je pokryté rozmedzie možných precipitačne vytvrdzovaných tried zliatin, bližšie špecifikovaných v kapitole 4 Precipitačne vytvrdzované zliatiny hliníku. Zliatina 2014 zastupuje zliatiny o vysokých pevnostiach, no menej priaznivej odolnosti voči korózii. Zliatina 6082 predstavuje zliatinu s výbornou koróznou odolnosťou, dobrou tvárnosťou a stredne vysokými mechanickými vlastnosťami. Napokon zliatina 7075 predstavuje zástupcu zliatin hliníku o najvyšších pevnostiach a dobrej odolnosti voči korózii.

Nasledujúce tabuľky predstavujú vybrané charakteristiky spomínaných zliatin a ich najbežnejšie spektrum použitia.

6.1.1 ŠPECIFIKÁCIA ZLIATINY HLINÍKU 2014

Tab. 3 Špecifikácie, doporučené parametre tepelného spracovania a typické mechanické vlastnosti zliatiny 2014

Značenie zliatiny podľa ČSN EN 573-3 [3]													
Číselné označenie		EN AW-2024											
Chemické označenie		EN AW-Al Cu4SiMg											
Chemické zloženie [%] [8]													
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti+Zr	Ti	Ostatné		Al
min.	0,50	-	3,9	0,40	0,20	-	-	-	-	-	jedn.	celk.	
max.	0,90	0,50	5,0	1,20	0,80	0,10	0,10	0,25	0,20	0,15	0,05	0,15	zákl.

Doporučené parametre tepelného spracovania, stav T4 [8]	
Rozpúšťací ohrev	500 až 510 °C
Kalenie	voda, max. 40 °C
Starnutie	izbová teplota, min. 5 dní

Typické mechanické vlastnosti, stav T4 [7]				
Medza pevnosti [MPa]	Medza klzu [MPa]	Šmyková pevnosť [MPa]	Tvrdosť HB	Modul pružnosti [GPa]
425	290	260	105	73

Typické použitie: vysokopevnostné výkovky, výtlačky, kolesá a hlavné konštrukčné časti lietadiel; rakety; rámy a odpruženie nákladných automobilov. Aplikácie vyžadujúce vysokú pevnosť a tvrdosť vrátane operácie za zvýšených teplôt [7].

6.1.2 ŠPECIFIKÁCIA ZLIATINY HLINÍKU 6082

Tab. 4 Špecifikácie, doporučené parametre tepelného spracovania a typické mechanické vlastnosti zliatiny 6082

Značenie zliatiny podľa ČSN EN 573-3 [3]											
Číselné označenie	EN AW-6082										
Chemické označenie	EN AW-Al Si1MgMn										
Chemické zloženie [%] [9]											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatné		Al
min.	0,7	-	-	0,40	0,6	-	-	-	jedn.	celk.	
max.	1,3	0,50	0,10	1,00	1,2	0,25	0,20	0,10	0,05	0,15	zákl.

Doporučené parametre tepelného spracovania, stav T6 [9]	
Rozpúšťací ohrev	525 až 540 °C
Kalenie	voda, max. 40 °C
Starnutie	160 až 180 °C / 6 až 30 h

Mechanické vlastnosti, stav T6 [9]			
Rozmer alebo D [mm]	Medza pevnosti [MPa]	Medza klzu [MPa]	Tvrdosť HB
do 20	min. 295	min. 255	95 (typická hodnota)
20 až 150	min. 310	min. 270	
150 až 200	min. 280	min. 240	

Typické použitie: potrubia, okná, dvere a ďalšie konštrukčné aplikácie vyžadujúce pevnosť, zvariteľnosť a odolnosť voči korózii [7].

6.1.3 ŠPECIFIKÁCIA ZLIATINY HLINÍKU 7075

Tab. 5 Špecifikácie, doporučené parametre tepelného spracovania a typické mechanické vlastnosti zliatiny 7075

Značenie zliatiny podľa ČSN EN 573-3 [3]											
Číselné označenie		EN AW-7075									
Chemické označenie		EN AW-Al Zn5.5MgCu									
Chemické zloženie [%] [10]											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatné		Al
min.	-	-	1,2	-	2,1	0,18	5,1	-	jedn.	celk.	
max.	0,40	0,50	2,0	0,30	2,9	0,28	3,1	0,20	0,05	0,15	zákl.

Doporučené parametre tepelného spracovania, stav T6 [10]	
Rozpúšťací ohrev	560 až 485 °C
Kalenie	voda, max. 40 °C
Starnutie	115 až 125 °C / 20 až 30 h

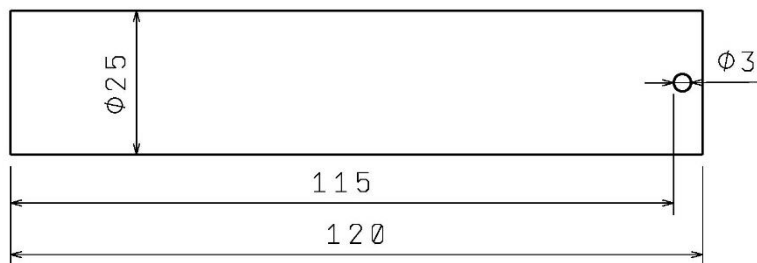
Typické mechanické vlastnosti, stav T6 [7]				
Medza pevnosti [MPa]	Medza klzu [MPa]	Šmyková pevnosť [MPa]	Tvrdosť HB	Modul pružnosti [GPa]
570	505	330	150	72

Typické použitie: časti konštrukcií lietadiel a iné vysoko namáhané konštrukcie, kde je požadovaná vysoká pevnosť a dobrá odolnosť voči korózií [7].

6.2 NÁVRH VZORIEK

Jominyho čelná skúška prekaliteľnosti uvažuje s použitím valcových vzoriek o priemere 25 mm a dĺžkou 100 mm. Pre experiment boli však pripravené vzorky dlhé 120 mm, poskytujúce lepšiu možnosť skúmania priebehu prekalenia, podchytением poklesu tvrdosti i vo väčších vzdialenostiach od kaleného čela tyčky. Priemer vzorky ostáva rovnaký ako definuje Jominyho skúška.

Pôvodná skúška ďalej uvažuje s prírubou na jednom konci vzorky, ktorá umožňuje jej uchytenie do kaliaceho prípravku. Takéto vzorky bývajú pripravené sústružením tyče väčšieho priemeru ako 25 mm, pričom koniec tyče ostáva s pôvodným priemerom. V rámci tejto práce je tento postup zjednodušený prípravou vzoriek z tyče o priemere 25 mm, čím odpadá potreba sústruženia. Uchytenie vzorky je realizované kolíkom prestrčeným cez otvor vyvrtaný do koncovej časti tyčky podľa (Obr. 17). Prestrčený kolík zároveň umožňoval jednoduché uchytenie vzoriek do klieští pri vyberaní vzoriek z pece po uskutočnenom rozpúšťacom žíhaní.



Obr. 17 Schematické znázornenie vzoriek použitých pre všetky experimenty

Polotovaram vzoriek boli kruhové tyče s priemerom 25 mm, 3000 mm dlhé, dodané v stave tepelného spracovania T6. Tyč z materiálu 2014 bola vyrobená technológiou ťahania, tyče z materiálu 6082 a 7075 boli vyrobené lisovaním. Vplyv tvárnenia pri výrobe polotovaru je však počas experimentu potlačený novým tepelným spracovaním. Rôzna technológia výroby tyčí teda nehrá rolu vo výsledkoch experimentov.

6.3 PRÍPRAVA VZORIEK

Samotná príprava vzoriek skúšky prekaliteľnosti bola vďaka pozmenenému spôsobu uchytenia vo svojej podstate jednoduchá. Tyče boli napílené pásovou pílou, pričom bolo dbané na volenie vhodného prítlaku, aby sa zabránilo nadbytočnému ohrevu oblasti v okolí rezu a tým aj nežiadúcemu tepelnému ovplyvneniu materiálu.

Rýchlosť ochladzovania je výrazne závislá na stave povrchu kaleného materiálu [4]. Pre zamedzenie rozptylu výsledkov zapríčinenému rozdielnou povrchovou drsnosťou vzoriek bol upravený povrch oboch koncov pomocou pásovej brúsky, dôraz sa opäť kládol na zabránenie nadbytočného ohrievania. Použitý bol brúsny pás o zrnitosti 240. Po úprave povrchu koncov boli naprieč tyčky vyvrtané otvory v blízkosti nekaleného konca, umožňujúce uchytenie vzoriek v kaliacom prípravku. Takto pripravené vzorky o celkovom počte 7 z každého materiálu boli následne označené.

6.4 OZNAČOVANIE VZORIEK

Kvôli zabráneniu zámeny jednotlivých vzoriek medzi sebou, bolo na nekalenom konci vyrazené dvojčísle. Prvá cifra dvojčísle je spoločná pre daný materiál, druhá predstavuje samotné číslo vzorky. Takéto označovanie so sebou prináša jednoduchosť, avšak z dôvodu názornosti sú v texte práce vzorky označované podľa názvu príslušného materiálu, doplnené o skratku rozlišujúcu vykonané tepelné spracovanie a poradové číslo vzorky.

7 MERANIE TVRDOSTI

Meranie priebehu tvrdosti po dĺžky tyčky bolo realizované až po vykonaní jednotlivých súborov experimentov (tzn. po vytvrdení). Príprava vzoriek na meranie i samotný spôsob merania je zhodný pre všetky súbory experimentov. Výsledky meraní tvrdosti sú taktiež spracované pre všetky vykonané experimenty zhodne.

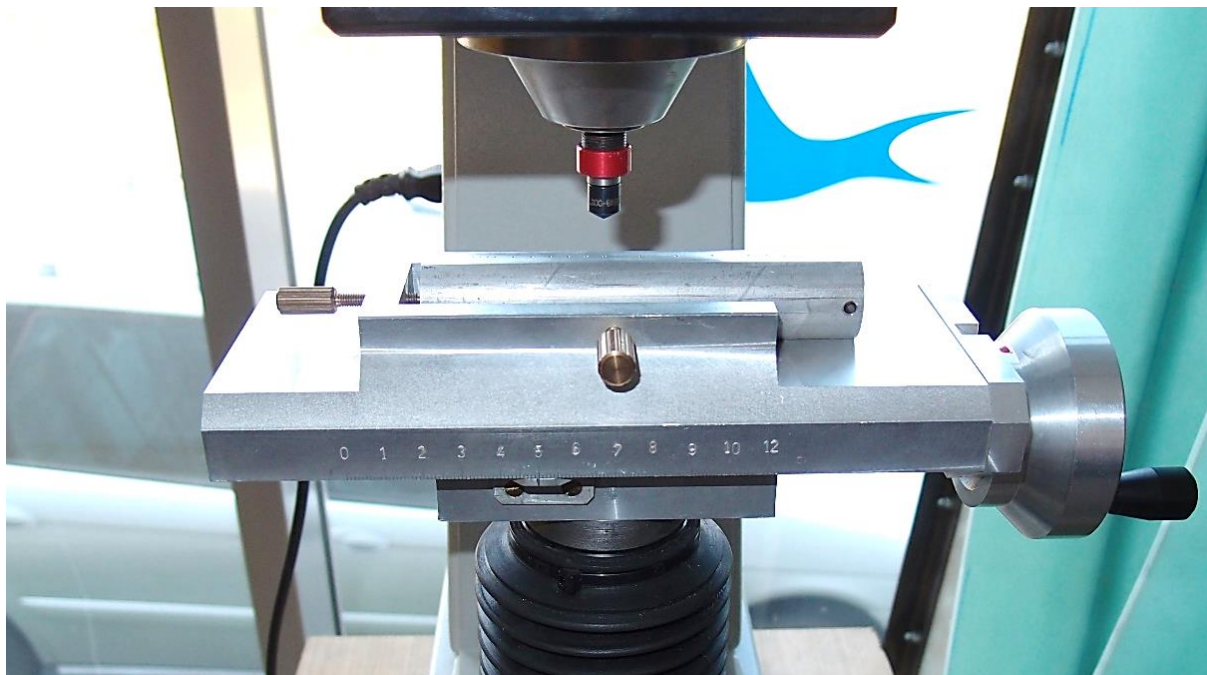
7.1 PRÍPRAVA VZORIEK NA MERANIE TVRDOSTI

Jominyho skúška uvažuje s meraním tvrdosti ocelevej tyčky na dvoch protiľahlých plochách vybrúsených do hĺbky 0,5 mm. V rámci tejto práce boli na vzorkách pripravené rovnako dve protiľahlé plochy, no frézované do hĺbky 1 mm od povrchu (Obr. 20). Frézovanie prebehlo na už vytvrdených vzorkách a s ohľadom na zamedzenie nadmerného vyhriatia materiálu a tým pádom možného znehodnotenia predchádzajúceho tepelného spracovania.

7.2 METODIKA MERANIA TVRDOSTI

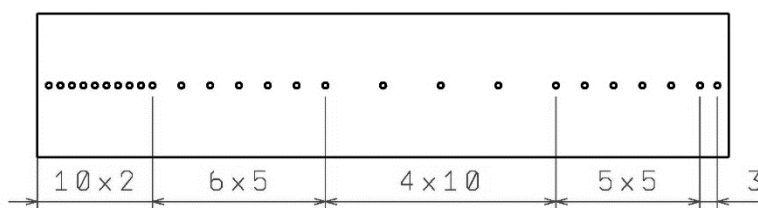
Po kompletnom tepelnom spracovaní bola meraná tvrdosť povrchu na oboch frézovaných plochách. Namiesto pôvodnej metódy merania tvrdosti oceľových vzoriek tzn. Rockwellova tvrdosť HRC, alebo Vickersova tvrdosť HV, bola použitá metóda Rockwellova HRB (gulôčka $\Phi 1/16''$, zaťaženie 980 N), ktorá je bežne používaná pri meraní tvrdosti hliníkových zliatin. Možné bolo aj meranie tvrdosti Brinellovou metódou, avšak táto metóda je v porovnaní s meraním tvrdosti HRB pomalšia, čo by pri počte uskutočnených meraní tvrdosti znamenalo výrazné predĺženie celkovej doby merania. Presnosť meracieho zariadenia bola skontrolovaná pomocou etalónu so známou tvrdosťou.

Pri meraní bol použitý prípravok (Obr. 18), umožňujúci stabilné uchytenie vzorky počas merania, vo vodorovnej rovine. Pohyb vzorky bol umožnený len v smere osy vzorky pozdĺžnym posuvom. Presná vzdialenosť otláčkov od čela vzorky bola dosiahnutá skrutkovým posuvom so stúpaním závitú 1 mm a opticky kontrolovaná milimetrovou stupnicou.

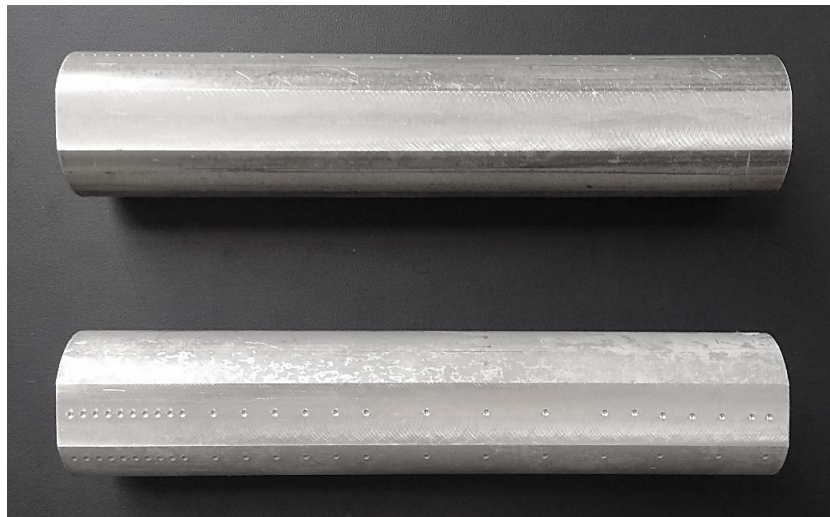


Obr. 18 Meranie tvrdosti vzoriek za použitia pomocného prípravku metódou HRB

Body merania boli zvolené tak, že na počiatkových 20 mm od kaleného čela vzorky je meraná tvrdosť s 2 mm rozstupmi, čím je v tejto oblasti umožnené určiť presnejšie prípadné poklesy tvrdosti. Oproti štandardnému postupu sú teda vynechané dva 1,5 mm rozstupy, pretože tvrdosť hliníkových zliatin je oproti oceli nižšia a hrozilo by nebezpečenstvo ovplyvnenia merania zdeformovaním okraju vzorky počas prvého otláčku. Rovnako veľkosti otláčku HRB je väčšia než u Vickersovej metódy. Ďalšie body merania sú znázornené na nasledujúcej schéme.



Obr. 19 Schéma polohy bodov merania tvrdosti na vybrúsenej ploche



Obr. 20 Hore: frézovaná vzorka po vykonanom tepelnom spracovaní; dole: vzorka po meraní priebehu tvrdosti

7.3 METODIKA SPRACOVANIA NAMERANEJ TVRDOSTI

Krivky prekaliteľnosti vzoriek sú určené z merania priebehu tvrdosti po dĺžke oboch strán vzoriek ako stredná hodnota, ktorá je ďalej uvažovaná ako hodnota reprezentujúca tvrdosť v uvažovanom mieste dĺžky danej vzorky. Krivka preložená týmito hodnotami teda reprezentuje krivku prekaliteľnosti danej vzorky.

Krivky prekaliteľnosti zliatin sú napokon určené opätovným vytvorením stredných hodnôt z troch (respektíve dvoch) vzoriek zliatiny. Krivka definovaná týmito hodnotami teda predstavuje krivku prekaliteľnosti danej zliatiny.

8 PRVÝ SÚBOR EXPERIMENTOV

Pre výrobok z hliníkovej zliatiny daných rozmerov, je hlavným faktorom ovplyvňujúcim prekaliteľnosť rýchlosť ochladzovania počas kalenia. Popri stave povrchu súčasti je voľba kaliaceho prostredia faktor ovplyvňujúci práve rýchlosť ochladzovania materiálu [4]. Táto práca rieši prekaliteľnosť vybraných hliníkových zliatin v rôznych kaliacich prostrediach.

8.1 KALIACE PROSTREDIE, POUŽITÉ VZORKY

Cieľom prvého súboru experimentov je stanovenie kriviek prekaliteľnosti použitím prúdu studenej vody ako kaliaceho prostredia Jominyho skúšky prekaliteľnosti. Voda predstavuje základné v praxi najbežnejšie používané intenzívne kaliace prostredie, zároveň voda o teplote 10 až 30 °C je používaná pri bežnej Jominyho skúške prekaliteľnosti ocelí [1]. Na realizáciu experimentu boli použité tri vzorky z každej zliatiny.

8.2 TEPELNÉ SPRACOVANIE

Tepelné spracovanie sa uskutočnilo štandardným postupom, pričom doby výdrže na teplote boli volené podľa rozmedzí uvedených v (Tab. 3, Tab. 4, resp. Tab. 5) rovnako ako teploty samotné. Hodnoty boli volené tak, aby odpovedali približne stredným hodnotám predpísaných spektier. Rozpúšťací ohrev bol uskutočnený v komorovej peci. Zliatina 2014 bola starnutá prirodzene (stav T4), zatiaľ čo zliatiny 6082 a 7075 starli umelo (stav T6).

Tab. 6 Zvolené parametre tepelného spracovania, prvý experiment

Zvolené parametre tepelného spracovania			
Zliatina, stav tepelného spracovania			
	2014-T4	6082-T6	7075-T6
Rozpúšťací ohrev	505 °C / 90 min.	535 °C / 90 min.	470 °C / 90 min.
Kalenie	prúd vody 22 C / 10 min.		
Starnutie	izbová teplota / 7 dní	170 °C / 18 hod.	120 °C / 24.30 hod.

8.2.1 ROZPÚŠŤACÍ OHREV

Doba výdrže na teplote rozpúšťacieho ohrevu vychádza z diagramu uvedeného v časti precipitačné vytvrdzovanie a vzhľadom na to že je závislá na hrúbke materiálu je rovnaká pre všetky vzorky. Doba výdrže určená podľa tohto diagramu pre vzorku hrúbky 25 mm a ohrev v peci je 100 minút, avšak v experimente bola použitá doba 90 min. keďže stanovené doby platia pre zliatiny, ktoré nie sú pred ohrevom vytvrdené. V takom prípade sa uvažuje rozpúšťanie fáz z hraníc zŕn, tzn. že difúzne

dráhy sú dlhé. Homogénny tuhý roztok je v prípade vytvrdených zliatin vytvorený rýchlejšie, keďže dochádza k rozpúšťaniu jemných precipitátov. Ďalej je nutné poznamenať, že doba výdrže na teplote 90 *min.* je platná len pre prvú vzorku uvažovaného tepelného spracovania, ďalšie vzorky zotrvali na teplote vždy dlhšie, pokiaľ bolo uskutočnené kalenie predchádzajúcej vzorky. Pri zvolenej dobe kalenia 10 *min.* je teda výdrž na teplote druhej vzorky 100 *min.*, respektíve 110 *min.* U vzorky č.1 zliatiny 6082 bola doba výdrže skrátená na 70 *min.* čím je možné dokumentovať vplyv dostatočnej doby výdrže na výsledných mechanických vlastnostiach po vytvrdení hliníkových zliatin. Určené hodnoty vzorky potom nie sú uvažované v ďalšom spracovaní meraní.

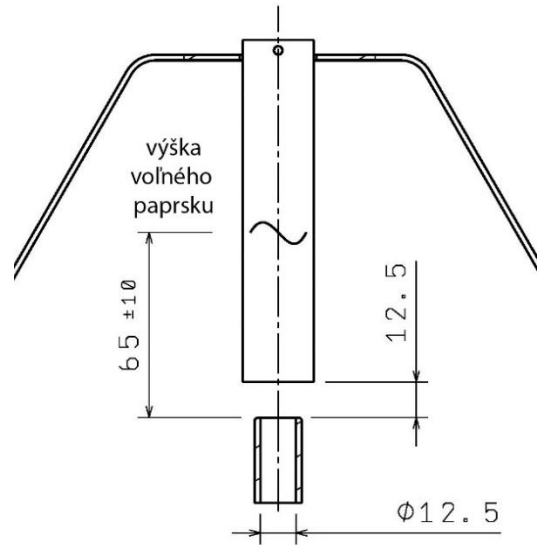
Rozpúšťací ohrev realizovaný v malej komorovej peci o výkone 3 kW. Vzorky boli v pecnom priestore uložené na izolačnej podložke, čím bol zamedzený priamy kontakt s výstelkou pece. Pri uložení bolo dbané na vytvorenie dostatočných rozstupov medzi jednotlivými vzorkami, aby nedošlo k zabráneniu cirkulácie vzduchu v miestach medzi tyčkami.

Po vložení vsádzky bola pec uvedená do chodu. Nábeh na teplotu rozpúšťacieho ohrevu prebiehal automaticky, výkon pece bol s narastajúcou teplotou postupne znižovaný, aby nedošlo k prekročeniu hraničnej teploty, opäť automaticky. Čas ohrevu bol meraný od okamihu, kedy teplota v peci prekročila dolný limit teploty rozpúšťacieho ohrevu podľa (Tab. 3).

Teplota v pecnom priestore bola kontrolovaná jednak termočlánkom zabudovaným v pecnom priestore (snímajúcim teplotu vzduchu v peci), podľa ktorého pec automaticky udržiavala požadovanú teplotu ohrevu. Druhý termočlánok bol umiestnený medzi vsádzku a to jeho priamym zavedením do kontrolnej vzorky s vyvrtaným otvorom. Priebeh teploty bol kontrolovaný opticky počas celej doby rozpúšťacieho ohrevu, čím bolo možné podchytiť prípadné nečakané výkyvy teploty a tým zabrániť znehodnoteniu vsádzky.

8.2.2 KALENIE

Pred zahájením samotného kalenia bolo pripravené kaliace zariadenie pozostávajúce z vodnej lázne o objeme 10 l, čerpadla a kaliaceho prípravku, ktorý udržiaval vzorky vo zvislej pozícii (Obr. 21). Vodné čerpadlo bolo prispôbené predpísaným podmienkam Jominyho skúšky, tzn. výtoková časť mala priemer 12,5 *mm*. Zároveň bola skontrolovaná predpísaná výška voľného vodného paprsku (65 ± 10) *mm*, ktorú bolo možné regulovať prietokom čerpadla. Nakoniec bol nad kaliacu lázeň ustavený kaliaci prípravok, tak aby výsledná vzdialenosť čela vzorky bola vzdialená 12,5 *mm* od ústia čerpadla.



Obr. 21 Schéma použitého prípravku pre kalenie vzoriek

Po vykonanom rozpúšťacom ohreve boli vzorky prípravné na kalenie. Vzorky boli postupne prenášané do predpripraveného kaliaceho prípravku pomocou klieští, so snahou udržať dobu manipulácie čo najkratšiu. Tomu bolo prispôbené vzájomné rozmiestnenie zariadení tepelného spracovania. Doba manipulácie bola u všetkých vzoriek kratšia než 10 s. Zároveň bol minimalizovaný čas vyberania vzoriek z pecného priestoru. Príliš dlho otvorené dvere pece by mohli spôsobiť výmenu veľkého množstva vzduchu za chladný a prípadný pokles teploty vsádzky. Po vložení vzorky do kaliaceho prípravku bol spustený prúd vody, zároveň sa začal merať čas.



Obr. 22 Kalenie vzorky prúdom vody; vytvorenie pravidelného „hríbiku“

Vodný paprsok po styku s čelom vzorky vytvoril pravidelný „hríbik“ (Obr. 22), značiaci súososť kalenej tyčky s vyústením čerpadla. V prvých sekundách kalenia bola zrejmá tvorba množstva pár (čo žiaľ nebolo možné vhodne zdokumentovať), pokiaľ nenastalo schladenie čela vzorky pod teplotu varu vody. Počas kalenia bola kontrolovaná teplota vodnej lázne. Vzhľadom na vysokúmernú tepelnú kapacitu vody sa jej teplota len mierne zvyšovala a to v rozmedzí ± 2 °C.

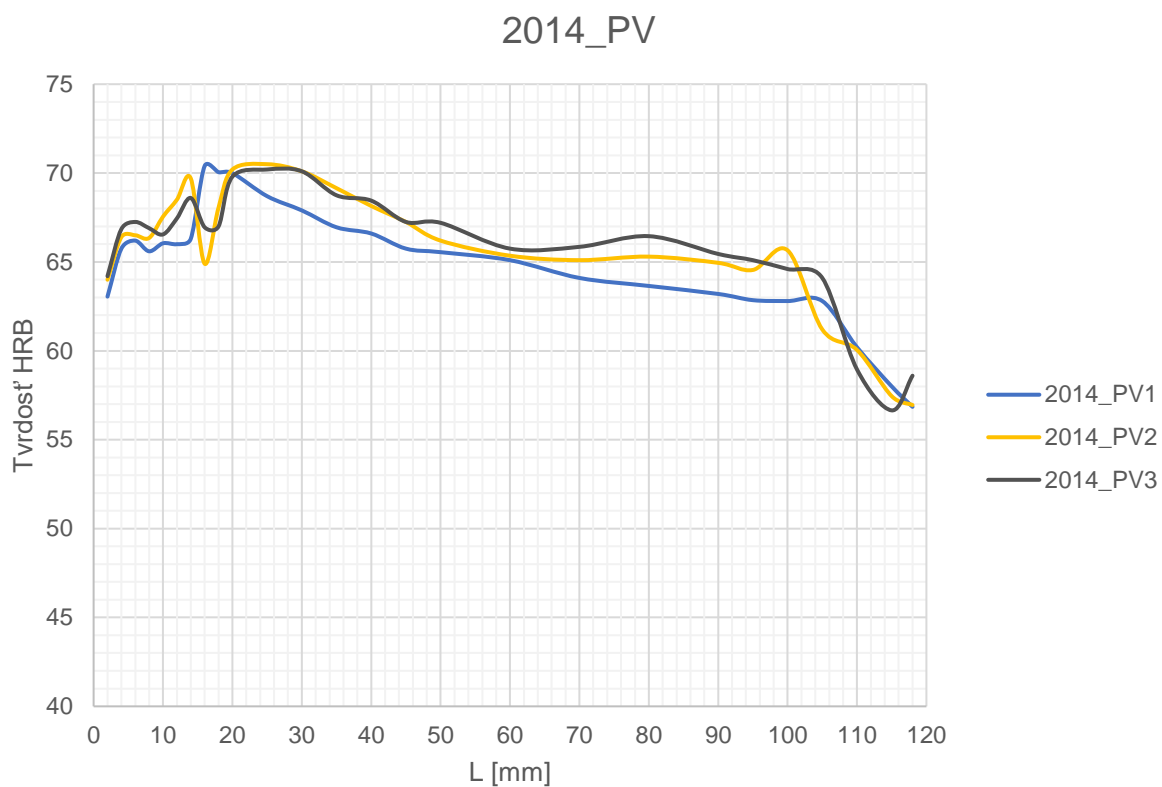
8.2.3 STARNUTIE

Zakalené vzorky zliatiny 2014 boli ponechané pri normálnej teplote po dobu minimálne 7 dní, kedy už nedochádzalo k významným zmenám tvrdosti. Umelo starnuté zliatiny boli po dokončenom kalení vždy ihneď premiestené do vyhriatej pece. Starnutie teda prebehlo pri zvýšených teplotách podľa (Tab. 6). Po uplynutí požadovanej doby, došlo k automatickému vypnutiu pece a ukončeniu umelého starnutia zliatin.

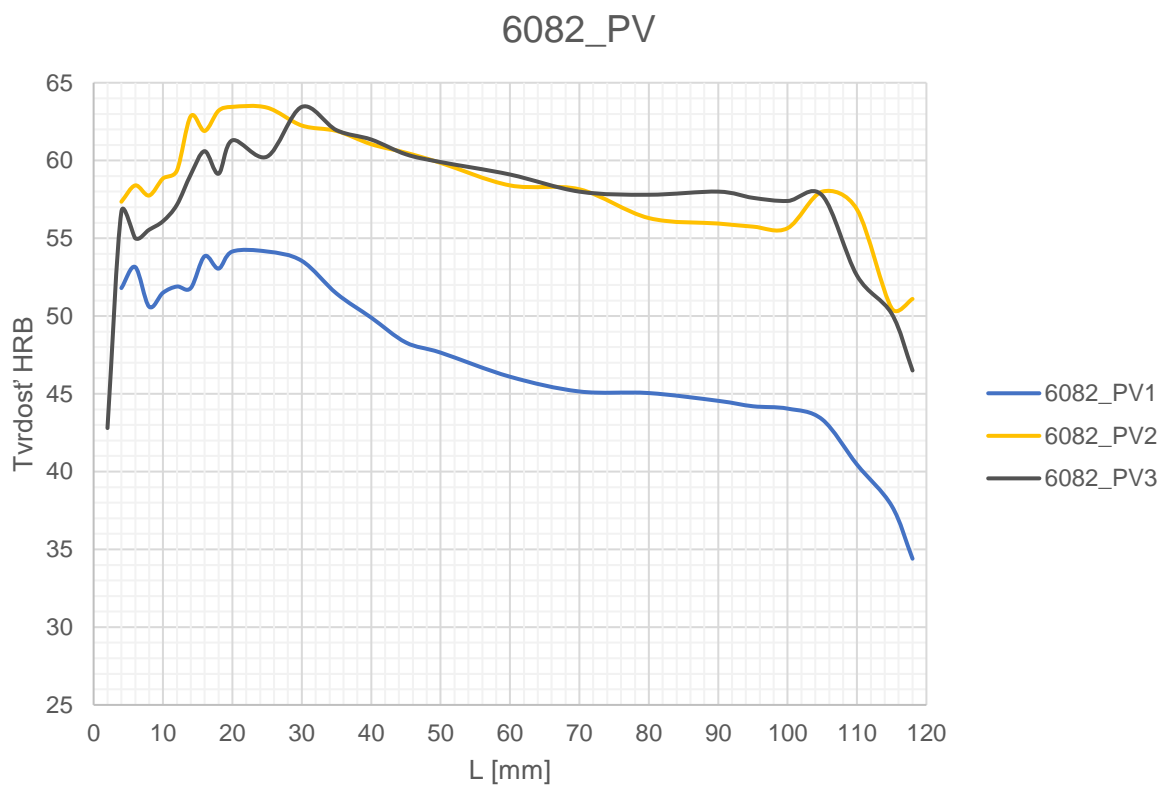
8.3 VÝSLEDKY PRVÉHO SÚBORU EXPERIMENTOV

8.3.1 KRIVKY PREKALITELNOSTI VZORIEK

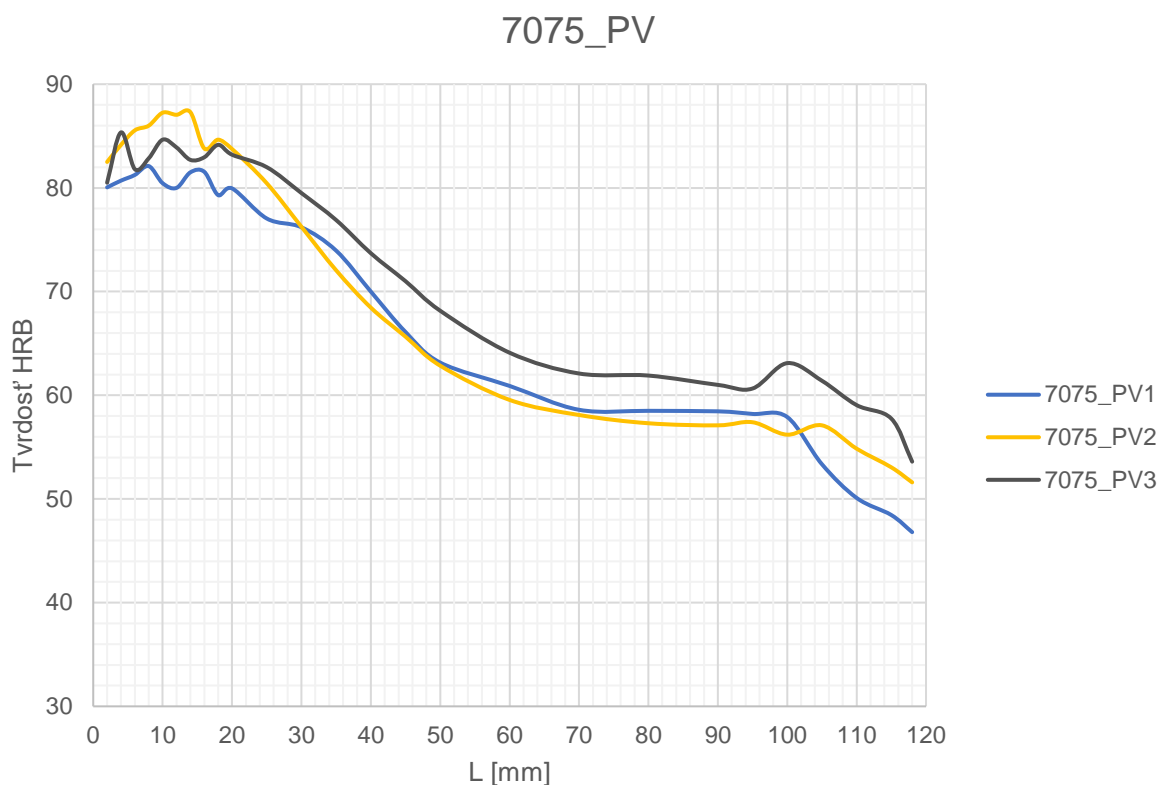
Prvým experimentom boli určené nasledujúce krivky prekaliteľnosti jednotlivých vzoriek. Meranie tvrdosti vzoriek po vytvrdení, ako aj metodika spracovania meraní je popísané v kapitole 7 Meranie tvrdosti. Vzorky sú označené číselne podľa poradia vyberania vzoriek z pece; skratka *PV* označuje kalenie prúdom vody.



Obr. 23 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 2014; kalenie prúdom vody (PV)



Obr. 24 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 6082; kalenie prúdom vody (PV)



Obr. 25 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 7075; kalenie prúdom vody (PV)

Z uvedeného grafického znázornenia kriviek prekaliteľnosti jednotlivých vzoriek je zrejmé určité kolísanie hodnôt všetkých meraní, výraznejšie najmä v oblasti do 20 mm od kaleného čela, rovnako ako v blízkosti druhého konca. V týchto miestach je určovaná tvrdosť v malých rozstupoch a výraznejšie sa prejavujú odchýlky merania.

Zaujímavý je prvotný narastajúci trend tvrdosti, ku ktorému dochádza u všetkých materiálov. Predpokladom je maximálna rýchlosť ochladzovania na chladenom konci vzorky, a teda odpovedajúca najväčšia tvrdosť. Merania však ukazujú na kalenom konci tvrdosť nižšiu, než v ďalšej časti. K tomuto javu dochádza najmä u zliatin 2014 a 6082.

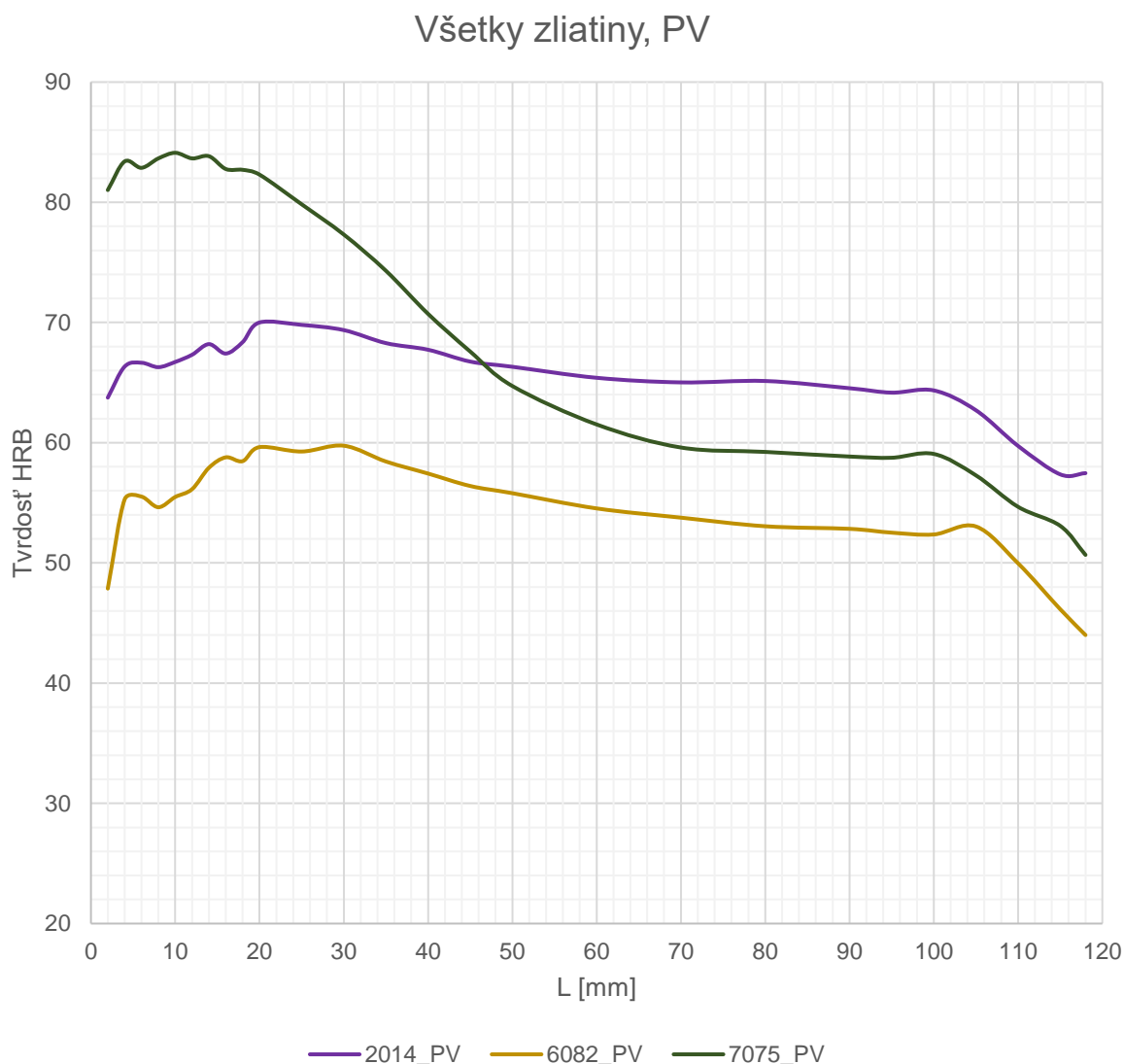
Po dosiahnutí maximálnej tvrdosti dochádza k jej poklesu s rastúcou vzdialenosťou L . K ďalšiemu poklesu tvrdosti potom dochádza v blízkosti nekaleného konca vzorky. Otázny je ďalší priebeh tvrdosti v prípade zväčšenia dĺžky vzorky.

U vzoriek 2014_PV3 a 6082_PV2 dochádza k miernemu zvýšeniu tvrdosti na konci tyčky, kde je už zrejмый predošlý klesajúci trend.

Výrazný pokles tvrdosti vzorky 6082_PV1 na celej dĺžke tyčky odpovedá predpokladanému vplyvu skrátenej doby rozpúšťacieho ohrevu. Vzorka nie je uvažovaná pri stanovovaní krivky prekaliteľnosti zliatiny 6082. Ďalšie krivky už dosahujú približne jednotné priebehy tvrdosti s menším kolísaním v rámci rozptylu

vlastností materiálu, prevedeného tepelného spracovania a merania. Je teda možné povedať že zvyšné vzorky prekročili minimálnu dobu výdrže rozpúšťacieho ohrevu.

8.3.2 KRIVKY PREKALITEĽNOSTI ZLIATIN



Obr. 26 Krivky prekaliteľnosti všetkých zliatin; kalenie prúdom vody (PV)

Stanovené krivky prekaliteľnosti zliatin sa ukazujú ako vhodné na porovnanie prekaliteľnosti jednotlivých zliatin. Porovnanie ukazuje ako sa líšia od seba zliatiny z hľadiska jednak dosiahnutej tvrdosti a jednak prekaliteľnosti.

Zliatiny 2014 a 6082 dosahujú výborného prekalenia takmer v celej dĺžke tyčky, zatiaľ čo tvrdosť zliatiny 7075 s rastúcou vzdialenosťou od kaleného čela markantne klesá, do miery kedy jej tvrdosť padá dokonca nižšie než tvrdosť zliatiny 2014. Je teda možné povedať že zliatiny 2014 a 6082 sú dobre prekaliteľné. Zliatina 7075 má zníženú prekaliteľnosť. Tento fakt je v súlade s uvedenými závislosťami kritických rýchlostí ochladzovania, charakteristických pre dané triedy zliatin (2.1.1 Kritická

rýchlosť ochladzovania), kde zliatina 7075 má najvyššiu kritickú rýchlosť, zliatiny triedy 6xxx naopak najnižšiu.

Z výsledkov prvého súboru experimentov je možné vyvodit' nasledujúce závery:

- U všetkých vzoriek dochádza k poklesu tvrdosti v tesnej blízkosti kaleného čela.
- Prekalenie všetkých zliatin výrazne klesá za hranicou približne 100 *mm*.
- Skúška ukazuje rozdielne chovanie zliatin, odpovedajúce kritickým rýchlostiam ochladzovania materiálov.

Na základe dosiahnutých výsledkov je určený priebeh ďalších experimentov.

9 DRUHÝ SÚBOR EXPERIMENTOV

Cieľom druhého súboru experimentov je stanovenie kriviek prekaliteľnosti Jominyho skúškou prekaliteľnosti u vybraných zliatin použitým **intenzívnejšieho** kaliaceho prostredia v porovnaní s prostredím použitým v súbore prvom (prúd vody o teplote 22 °C).

9.1 VOĽBA KALIACEHO PROSTREDIA

Voda izbovej teploty s dostatočnou cirkuláciou je kaliacim prostredím s vysokou intenzitou. Možným spôsobom ďalšieho zvýšenia intenzity kalenia je zvýšenie cirkulácie, kedy dochádza k efektívnejšiemu odstraňovaniu bubliniek parného vankúša v počiatkovej fázy kalenia. Ďalším spôsobom je pridanie určitého množstva NaCl, NaOH, Na₂CO₃, alebo H₂SO₄ do vody, kedy dochádza k potlačeniu tvorby parného vankúša [1]. Eventuálne je možná aplikácia kontaktného kalenia, kedy k odvodu tepla z kaleného materiálu je použitý kov s vysokou tepelnou vodivosťou (napr. meď). Nedostatkom tejto metódy je závislosť prestupu tepla na dodržaní kontaktu kaleného predmetu s chladiacim kovom, kedy pri strate kontaktu sa vzájomný prenos tepla neuskutočňuje.

Pre túto prácu bolo z uvedených možností zvolené kalenie do vody s prísadou NaCl. Oproti ďalším možnostiam je NaCl (kuchynská soľ) prístupná možnosť zvýšenia intenzity kalenia a nenesie so sebou nebezpečenstvá spojené s používaním silných kyselín alebo zásad. V porovnaní s metódou kontaktného kalenia je realizačne omnoho jednoduchšia.

9.2 VOĽBA ZLIATIN

Na základe výsledkov súboru prvých experimentov bola pre druhý súbor zvolená zliatina 7075, keďže spomedzi trojice skúmaných zliatin vykazovala najnižšiu mieru prekaliteľnosti. Preto sa ukazuje ako vhodná na kalenie v intenzívnejšom kaliacom prostredí v porovnaní s predošlým experimentom, kedy vzniká predpoklad zakalenia tyčiek do väčšej hĺbky. Experiment je doplnený aj o kalenie zliatiny 2014, kde je predpoklad len minimálneho, popřípade žiadneho zvýšenia prekalenia. Zliatina 6082 vzhľadom na to že nie je hlavným konštrukčným materiálom leteckých konštrukcií v druhom súbore experimentov zahrnutá nie je. Na realizáciu experimentu boli z každého materiálu použité dve vzorky.

9.3 TEPELNÉ SPRACOVANIE

Parametre tepelného spracovania s výnimkou kalenia ostávajú zhodné s použitými v prvom súbore experimentov. Vo výsledkoch je teda premietnutá len zmena kaliaceho prostredia. Postup rozpúšťacieho ohrevu a starnutia sú zhodné s predošlým experimentom a sú popísané v časti (8.2 Tepelné spracovanie). Použité

teploty pre rozpúšťací ohrev a starnutie, rovnako výdrže na teplote pre zliatiny 2014 a 7075 sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tab. 7 Zvolené parametre tepelného spracovania, druhý experiment

Zvolené parametre tepelného spracovania		
Zliatina, stav tepelného spracovania		
	2014-T4	7075-T6
Rozpúšťací ohrev	505 °C / 90 min.	470 °C / 90 min.
Kalenie	NaCl, 10% vodný roztok 22 °C / 10 min.	
Starnutie	izbová teplota / 7 dní	120 °C / 24.30 hod.

9.3.1 KALENIE

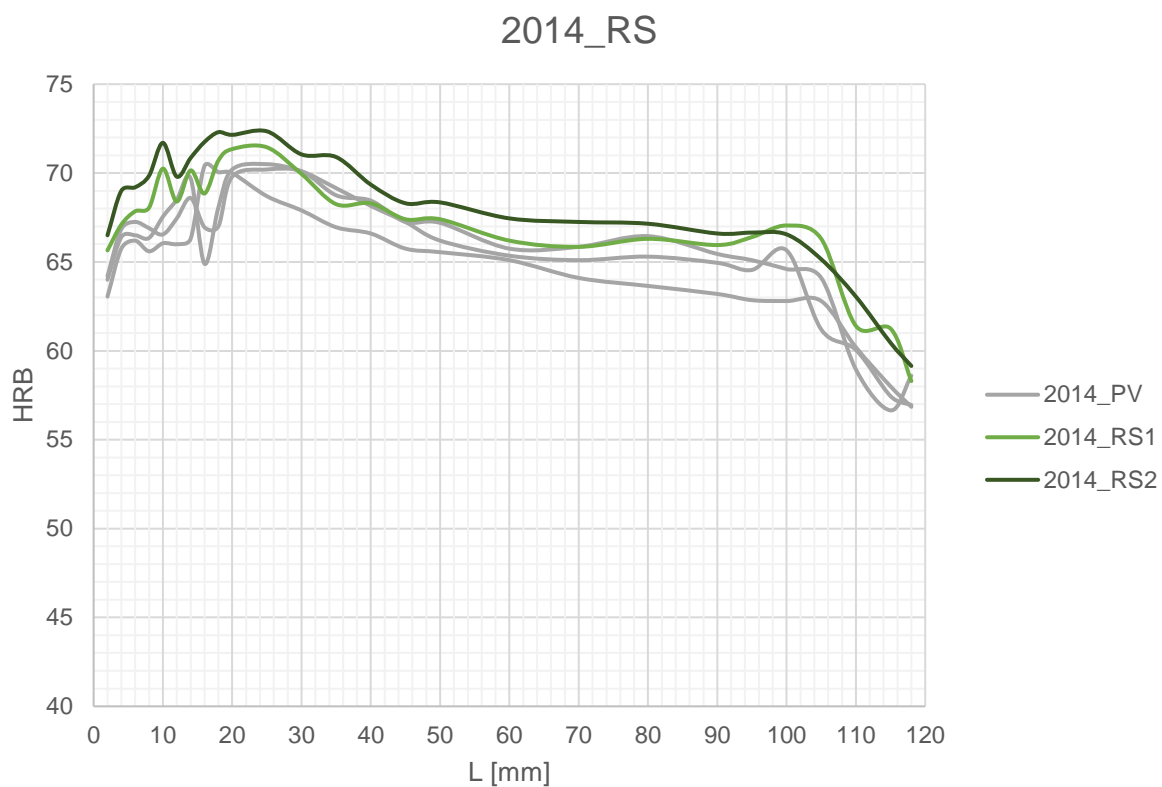
Kalenie bolo uskutočnené v rovnakom kaliacom zariadení ako v predošlom experimente. Zachovaná bola geometria výtoku čerpadla, výška vodného paprsku i vzdialenosť vzorky od ústia čerpadla. Kaliaca lázeň bola pripravená prídavkom 1 kg kuchynskej soli do 10 l vody, čím bolo dosiahnuté roztoku s koncentráciou 10 % NaCl.

Manipulácia so vzorkami bola zhodná s predošlým experimentom. Po vložení vzorky do kaliaceho prípravku nastalo vytvorenie pravidelného „hríbiku“. Počiatok chladenia bol sprevádzaný intenzívnou tvorbou pár. Vyparený soľný roztok zanechal prstenec NaCl v tesnej blízkosti kaleného čela. Počas kalenia bola kontrolovaná teplota vodnej lázne.

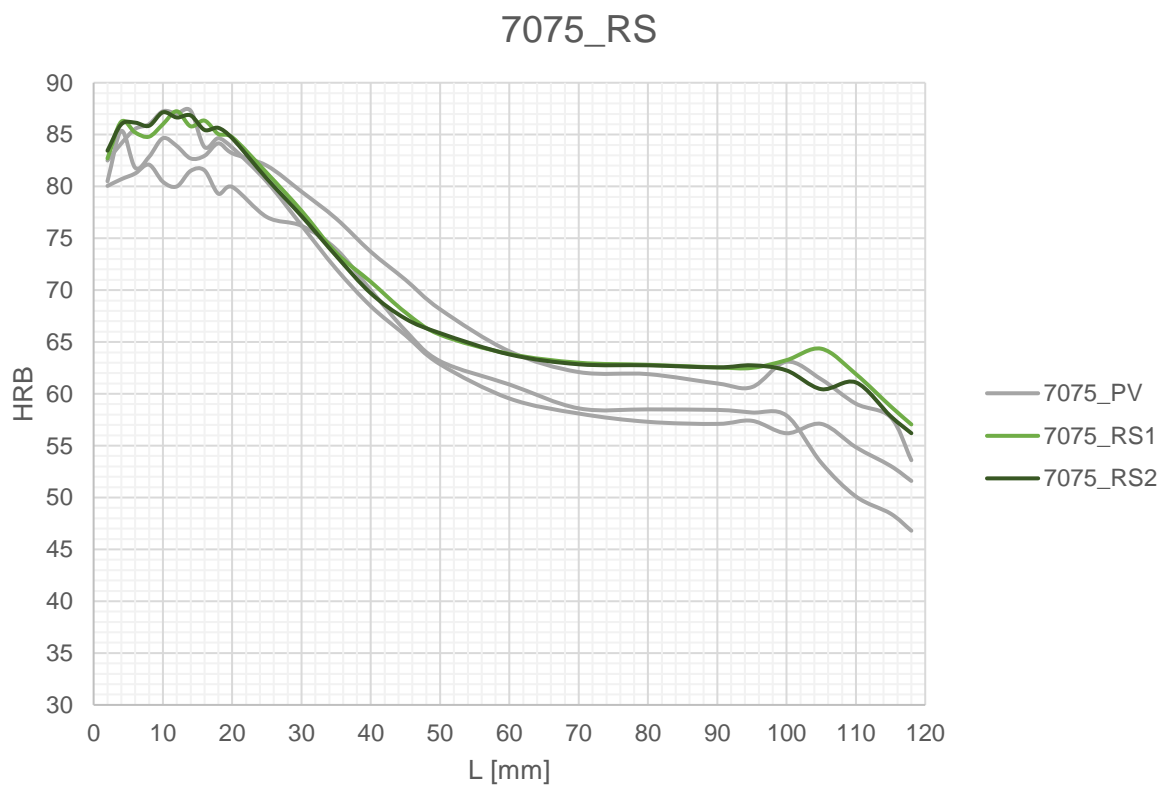
9.4 VÝSLEDKY DRUHÉHO SÚBORU EXPERIMENTOV

9.4.1 KRIVKY PREKALITEĽNOSTI VZORIEK

Druhým experimentom boli určené nasledujúce krivky prekaliteľnosti jednotlivých vzoriek. Meranie tvrdosti vzoriek po vytvrdení, ako aj metodika spracovania meraní je popísané v kapitole 7 Meranie tvrdosti. Vzorky sú označené číselne podľa poradia vyberania vzoriek z pece; skratka *RS* označuje kalenie roztokom soli.



Obr. 27 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 2014; kalenie roztokom soli (RS)



Obr. 28 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 7075; kalenie roztokom soli (RS)

Zistený priebeh tvrdostí je veľmi podobný predošlému experimentu. Z uvedeného grafického znázornenia je zrejmé kolísanie hodnôt tvrdosti, rovnako ako jej pokles na oboch koncoch vzoriek odpovedajúci prvému experimentu.

U zliatiny 2014 sa dosiahlo mierne zvýšenie tvrdosti na celej dĺžke vzorky 2014_RS2 odpovedajúce zvýšenému prekaleniu i zvýšenej maximálnej tvrdosti zatiaľ čo vzorka 2014_RS1 približne odpovedá najvyššej tvrdosti dosiahnutej pri kalení prúdom vody.

Priebeh tvrdosti zliatiny 7075 odpovedá vzorke s najvyššou tvrdosťou pri kalení prúdom vody, s výnimkou oblasti približne 25– 60 *mm*, kedy je tvrdosť dokonca o niečo nižšia.

Z výsledkov druhého súboru experimentov je možné vyvodit' nasledujúce závery:

- Kalením v prostredí s vyššou intenzitou bolo dosiahnuté len minimálne, popr. žiadne zvýšenie prekaliteľnosti. U zliatiny 2014 došlo aj k miernemu zvýšeniu maximálnej tvrdosti.
- U všetkých vzoriek dochádza opätovne k poklesu tvrdosti v tesnej blízkosti kaleného čela.

Krivky prekaliteľnosti zliatin 2014 a 7075 určené v tejto časti sú uvedené v ďalšej časti textu spolu s krivkami určeným nasledujúcim experimentom.

10 TRETÍ SÚBOR EXPERIMENTOV

Cieľom tretieho súboru experimentov je stanovenie kriviek prekaliteľnosti Jominyho skúškou prekaliteľnosti u vybraných zliatin použitím **miernejšieho** kaliaceho prostredia v porovnaní s prostredím použitým v súbore prvom (prúd vody o teplote 22 °C).

10.1 VOĽBA KALIACEHO PROSTREDIA

Nižšia intenzita kalenia sa bežne dosahuje zvýšením teploty kaliacej lázne [1]. Táto varianta sa ukazuje ako značne výhodná pre použitie v tejto práci. Napriek tomu nedošlo k jej realizácii, keďže k zjavnému zníženiu intenzity ochladzovania vody dochádza až pri pomerne vysokých teplotách (70–80 °C) [4]. Táto teplota vysoko prekračuje prevádzkovú teplotu čerpadla použitého v kaliacom zariadení. Zmiernenie rýchlosti ochladzovania vody je ďalej možné pridaním polymérov. Pre použitie bol uvažovaný polyalkylén glykol. Po konzultácii bolo od tejto varianty odstúpené.

Problém bol riešený znížením rýchlosti prúdenia vody, čo predstavuje ďalšiu možnosť zníženia intenzity kalenia. Najväčší efekt je dosiahnutý úplným zrušením cirkulácie, tzn. kalením v stojatej vode. Pre Jominyho skúšku je tento spôsob kalenia možné zahrnúť miernym vnorením čela vzorky do lázne s vodou, bez použitia čerpadla. Neprítomnosť cirkulácie zabezpečí vytvorenie parného vankúša na kalenej ploche a dochádza k podstate pomalšiemu ochladzovaniu.

10.2 VOĽBA ZLIATIN

Na základe výsledkov predošlých experimentov bola pre tretí súbor zvolená zliatina 2014. Tento materiál sa ukázal ako dobre prekaliteľný, existuje teda predpoklad jeho kalenia i v prostredí s nižšou intenzitou, kde je očakávaný pokles prekalenia vzorky. Experiment je doplnený aj o kalenie zliatiny 7075, ktorá síce v predošlých experimentoch preukázala nižšiu prekaliteľnosť v porovnaní so zvyšnými zliatinami. Otázkou však je vplyv ďalšieho zníženia intenzity kalenia na výsledné prekalenie. Zliatina 6082 v tejto časti experimentu zahrnutá nie je. Na realizáciu experimentu boli z každého materiálu použité dve vzorky.

10.3 TEPELNÉ SPRACOVANIE

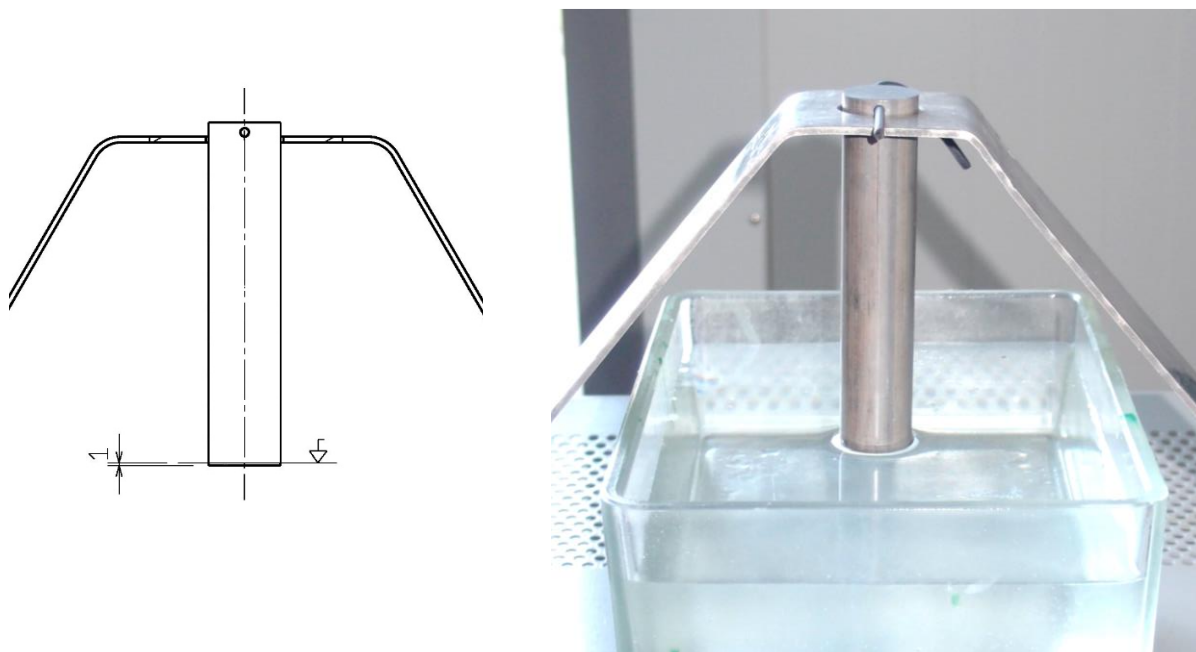
Parametre tepelného spracovania s výnimkou kalenia ostávajú zhodné s použitými v predošlých experimentoch. Vo výsledkoch je teda premietnutá len zmena kaliaceho prostredia. Použité teploty pre rozpúšťací ohrev a starnutie, rovnako výdrže na teplote pre zliatiny 2014 a 7075 sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tab. 8 Zvolené parametre tepelného spracovania, tretí experiment

Zvolené parametre tepelného spracovania		
Zliatina, stav tepelného spracovania		
	2014-T4	7075-T6
Rozpúšťací ohrev	505 °C / 90 min.	470 °C / 90 min.
Kalenie	stojatá voda 22 °C / 10 min.	
Starnutie	izbová teplota / 7 dní	120 °C / 24.30 hod.

10.3.1 KALENIE

Kaliaca lázeň o objeme 3 l bola pripravená do sklenenej nádoby. Vzorka bola do zvislej polohy ustavená použitím pôvodného prípravku kaliaceho zariadenia. Požadovaná hĺbka ponorenia vzorky 1 mm bola docielená miernou korekciou výšky hladiny vody. Mierne ponorenie je nutné k zabezpečeniu kontaktu čela vzorky s kaliacou lážňou počas celej doby kalenia, kedy dochádza k miernemu zmršťovaniu vzorky vplyvom tepelnej rozťažnosti materiálu.



Obr. 29 Kalenie stojatou vodou, vľavo schematicky, vpravo realizácia

Manipulácia so vzorkami bola zhodná s predošlými experimentami. V prvej fáze kalenia dochádzalo k intenzívnej tvorbe pár, sprevádzanej charakteristickým syčaním (Obr. 30 stred). S postupujúcim chladnutím kovu je zreteľná tvorba množstva malých bubliniek (Obr. 30 vpravo), neskôr nastala tvorba väčších bublín, kedy po vytvorení bubliny došlo k jej zreteľnému „vyplaveniu“, čím došlo ku kontaktu lázne so vzorkou ako aj vytvoreniu novej bubliny. Voda v blízkosti kaleného čela dosiahla len mierny nárast teploty, kedy dosahovala hodnoty v rozmedzí 30–35 °C.

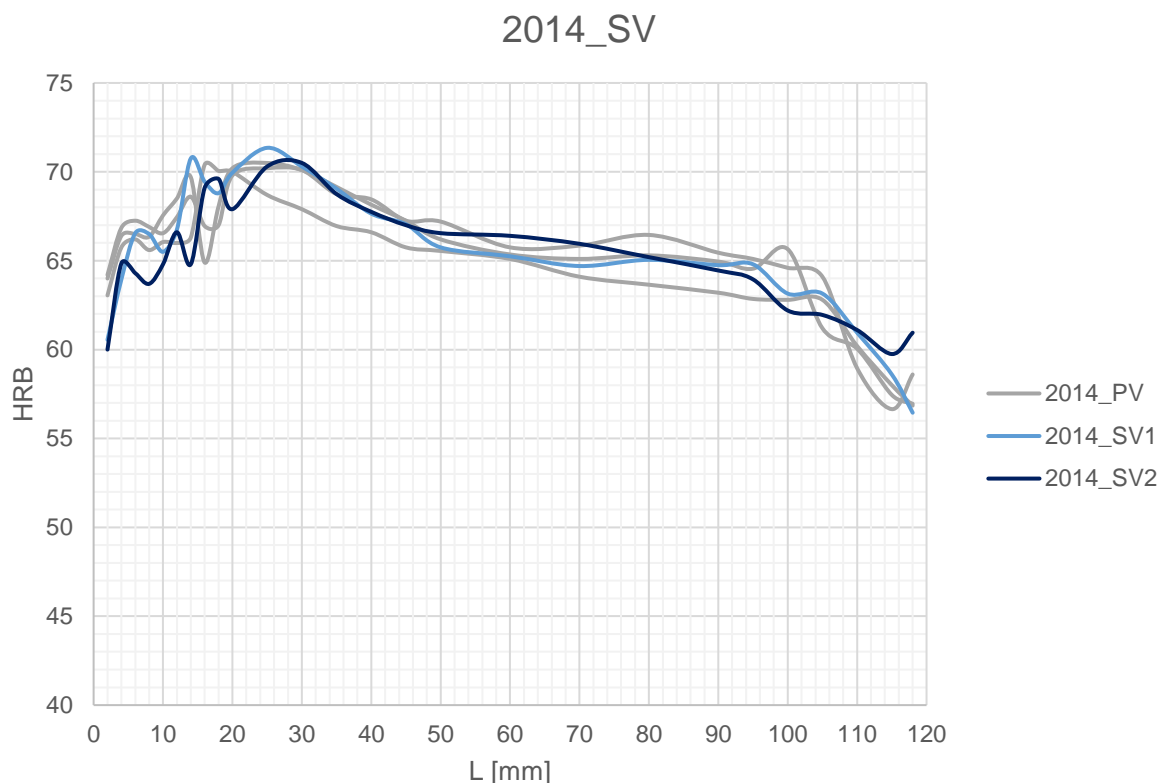


Obr. 30 Vľavo: detail vnorenia vzorky; v strede: prudká tvorba pár v počiatocnej fázy kalenia; vpravo: miernejšia tvorba parných bubliniek

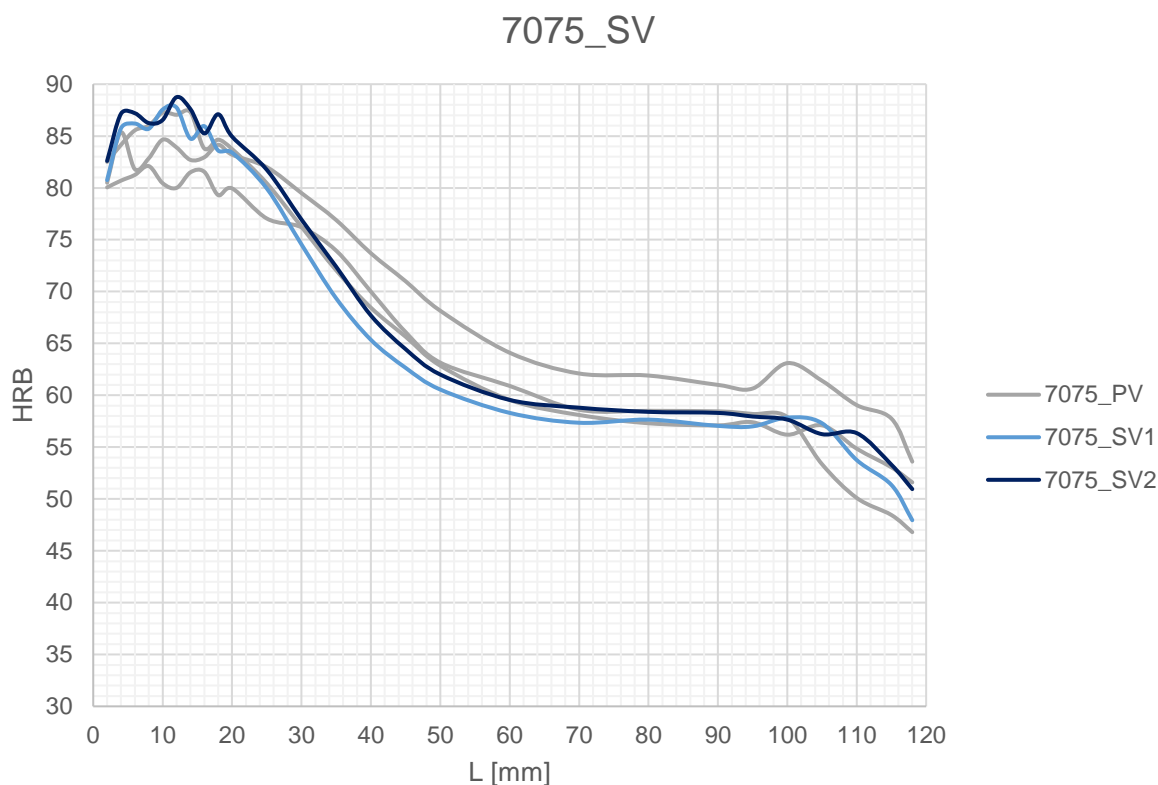
10.4 VÝSLEDKY DRUHÉHO SÚBORU EXPERIMENTOV

10.4.1 KRIVKY PREKALITEĽNOSTI VZORIEK

Tretím experimentom boli určené nasledujúce krivky prekaliteľnosti jednotlivých vzoriek. Meranie tvrdosti vzoriek po vytvrdení, ako aj metodika spracovania meraní je popísané v kapitole 7 Meranie tvrdosti. Vzorky sú označené číselne podľa poradia vyberania vzoriek z pece; skratka SV označuje kalenie stojatou vodou.



Obr. 31 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 2014; kalenie stojatou vodou (SV)



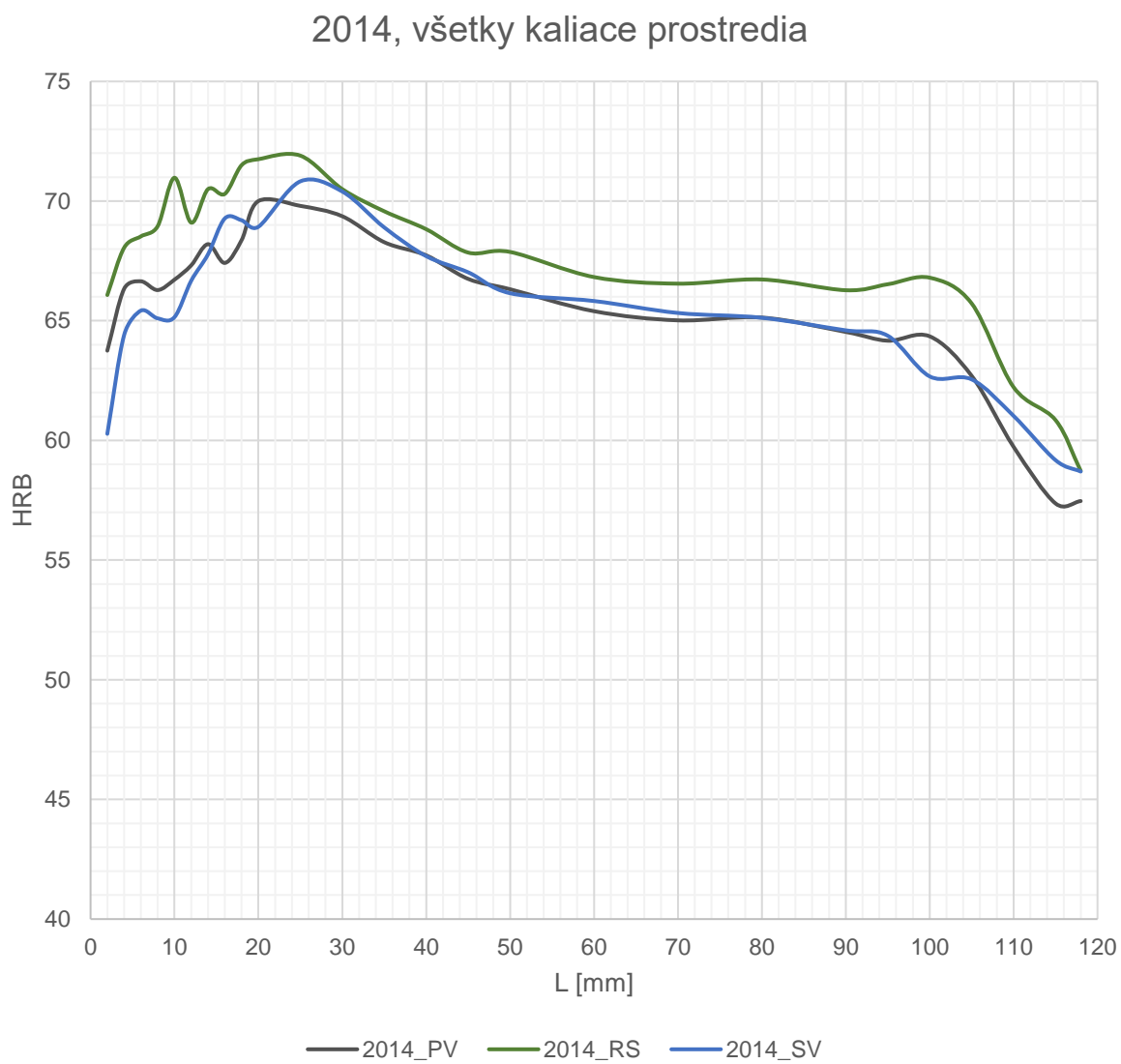
Obr. 32 Krivky prekaliteľnosti vzoriek zliatiny 7075; kalenie stojatou vodou (SV)

Zistený priebeh tvrdostí je veľmi podobný predošlému experimentu. Z uvedeného grafického znázornenia je zrejmé kolísanie hodnôt tvrdosti, rovnako ako jej pokles na oboch koncoch vzoriek odpovedajúci prvému experimentu.

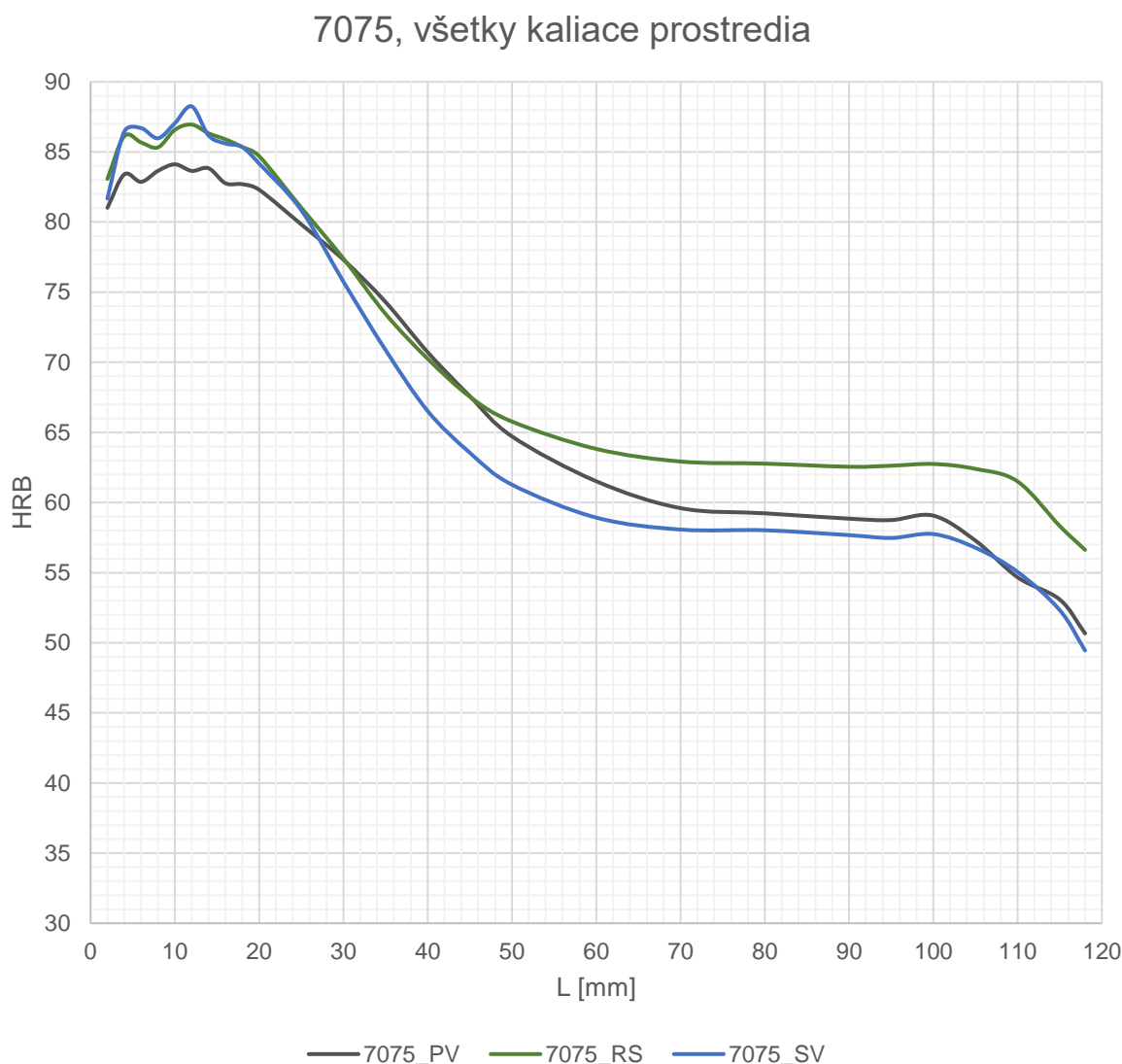
U zliatiny 2014 nie je zreteľná žiadna zmena prekalenia. Zliatina 7075 priebehom tvrdosti takmer odpovedá vzorkám prvého experimentu s nižším prekalením. Zaujímavé je dosiahnutie tvrdostí najviac zakalenej vzorky prvého experimentu v oblasti do 20 mm.

10.4.2 KRIVKY PREKALITEĽNOSTI ZLIATIN

Nasledujúce grafické znázornenia predstavujú krivky prekaliteľnosti zliatiny 2014 a 7075 stanovené pre kalenie prúdom vody, roztokom soli, stojatou vodou.



Obr. 33 Krivky prekaliteľnosti zliatiny 2014; kalenie prúdom vody (PV), roztokom soli (RS), stojatou vodou (SV)



Obr. 34 Krivky prekaliteľnosti zliatiny 7075; kalenie prúdom vody (PV), roztokom soli (RS), stojatou vodou (SV)

U zistených kriviek prekaliteľnosti zliatin 2014 a 7075 je zrejmé že kalením v solnom roztoku je možné dosiahnuť len malého nárastu prekalenia. Použitie stojatej vody sa ukazuje ako nedostatočné z hľadiska zníženia intenzity kalenia. U zliatiny 7075 na počiatočnom úseku bolo dosiahnutých dokonca vyšších hodnôt tvrdosti v porovnaní s kalením prúdom vody, ďalej bol zaznamenaný naopak slabý pokles.

Z výsledkov tretieho súboru experimentov je možné vyvodit' nasledujúce závery:

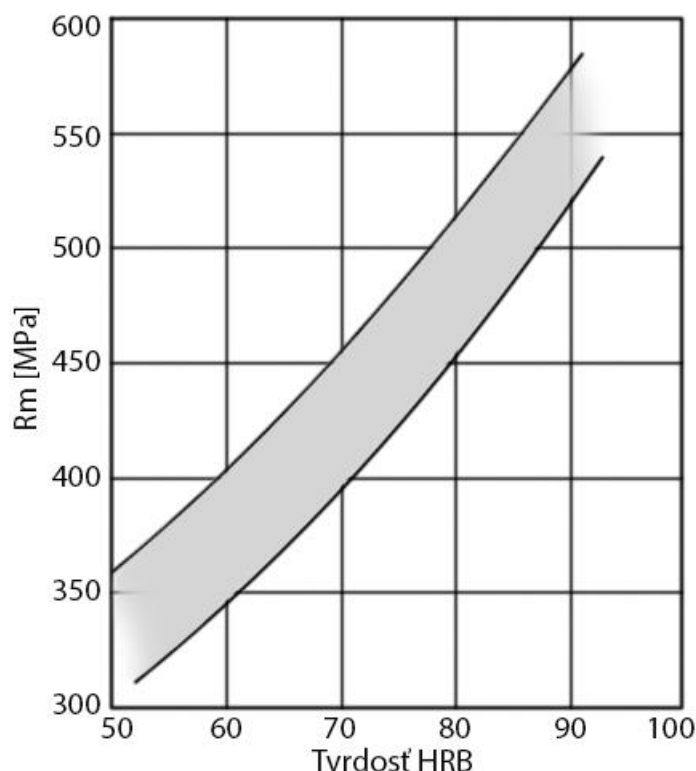
- Kalením v prostredí s nižšou intenzitou nedošlo k predpokladanému poklesu prekalenia zliatin.
- U všetkých vzoriek dochádza opätovne k poklesu tvrdosti v tesnej blízkosti kaleného čela.
- Zmena kaliaceho prostredia sa neukazuje ako významná z hľadiska zmeny dosiahnutej prekaliteľnosti

11 VYTVORENIE DIAGRAMOV EKVIVALENTNÝCH RÝCHLOSTÍ OCHLADZOVANIA

Pokiaľ má byť vo dvoch sledovaných miestach rôznych telies rovnaká tvrdosť, musí byť priebeh ochladzovania oboch miest totožný [5]. Pre hliníkové zliatiny je na základe tohto predpokladu vytvorený návrh diagramov ekvivalentných rýchlostí ochladzovania bežne používaný pri tepelnom spracovaní ocelí. Problém je riešený s použitím zmeraných dáta zliatiny 7075.

11.1 POMOCOU PRIEMERNÝCH RÝCHLOSTÍ OCHLADZOVANIA

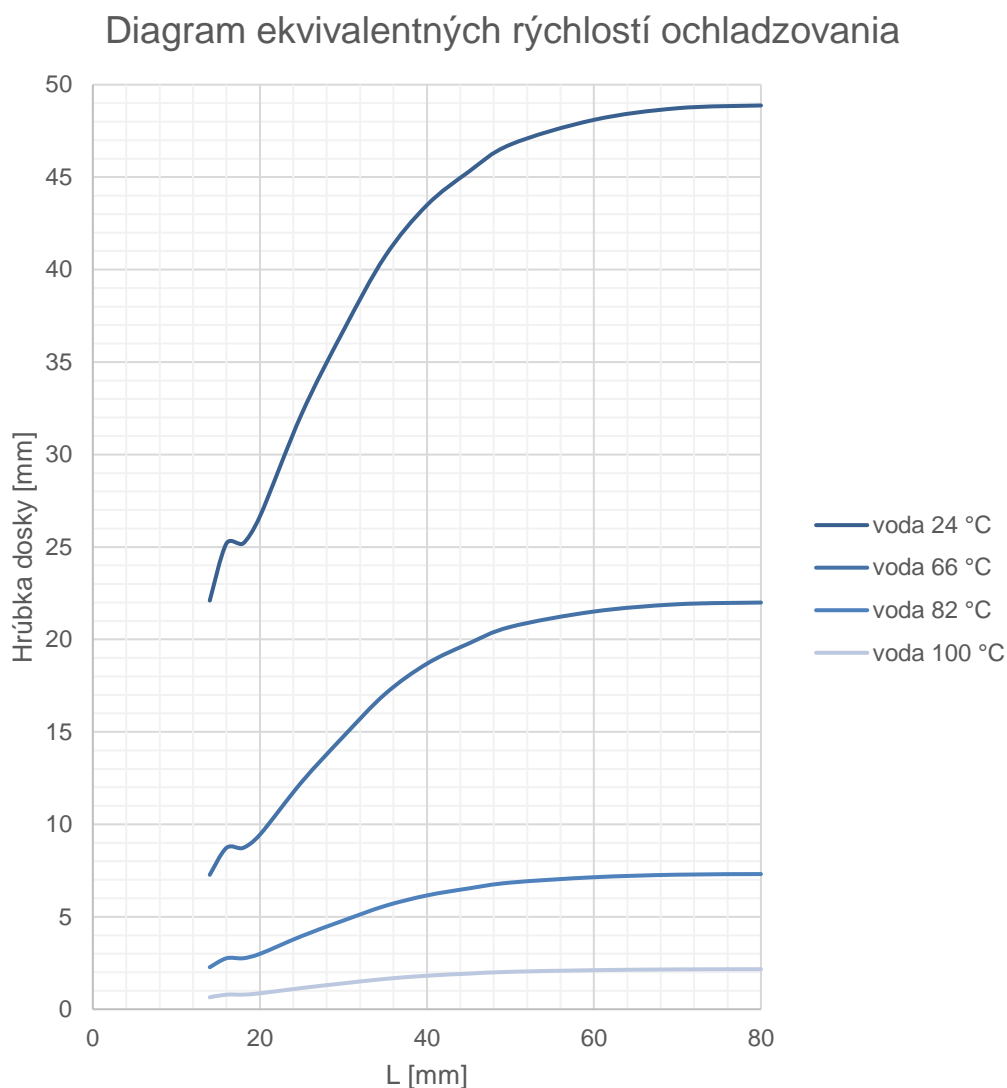
Postup je založený na porovnaní rýchlostí ochladzovania tyčky v jednotlivých bodoch určených Jominyho skúškou prekaliteľnosti a rýchlostí ochladzovania dosiahnutej v jadre kalenej dosky danej hrúbky podľa (Obr. 12). Priebeh rýchlosti ochladzovania Jominyho tyčky je možné určiť z diagramu (Obr. 11) uvedeného v kapitole prekaliteľnosť, kde je pre jednotlivé zliatiny určená závislosť priemernej rýchlosti ochladzovania v_p na dosiahnutej pevnosti. Za týmto účelom je nutné previesť nameranú tvrdosť zliatiny na pevnosť, pomocou nasledujúceho diagramu:



Obr. 35 Závislosť pevnosti na tvrdosti pre hliníkové zliatiny [4]

Problémom však je široké rozmedzie hodnôt pevnosti ktoré je možné danej tvrdosti priradiť. Porovnaním maximálnej tvrdosti zliatiny 7075 zistenej v prvom experimente 84 HRB a typickej pevnosti tejto zliatiny 570 MPa [7] je zrejme že uvedená pevnosť sa nachádza dokonca nad hornou hranicou rozmedzia tohto diagramu. Určenie závislosti tvrdosti a pevnosti je preto riešené pomocou krivky popisujúcej práve hornú

hranicu použitého diagramu, čím je však možný vznik značnej nepresnosti. Po prevedení nameraných hodnôt tvrdosti v jednotlivých miestach Jominyho tyčky na pevnosť a nasledujúcom určení odpovedajúcej priemernej rýchlosti ochladzovania je možné priradiť vzdialenosti L od kaleného čela tyčky hrúbku kalenej dosky s totožnou priemernou rýchlosťou ochladzovania pomocou diagramu (Obr. 12). Diagram definuje rôzne v_p v závislosti na teplote vody kaliacej lázne, resp. kalenia na vzduchu, preto je možné stanoviť odpovedajúce krivky ekvivalentných rýchlostí ochladzovania.



Obr. 36 Vytvorený diagram ekvivalentných rýchlostí ochladzovania pre kalenie dosiek vo vode s rôznou teplotou

Pomocou uvedených kriviek je možné priradiť vzdialenosť na experimentálne kalenej tyčke k hrúbke polotovaru (kaleného vo vybranom prostredí) s tvrdosťou odpovedajúcou danému miestu tyčky. Výhodou diagramu je teda možnosť popísať správanie zliatiny pri kalení v rôznych prostrediach (rozdielna teplota vody, vzduch, atď..) jednoduchým kalením vzorky prúdom studenej vody.

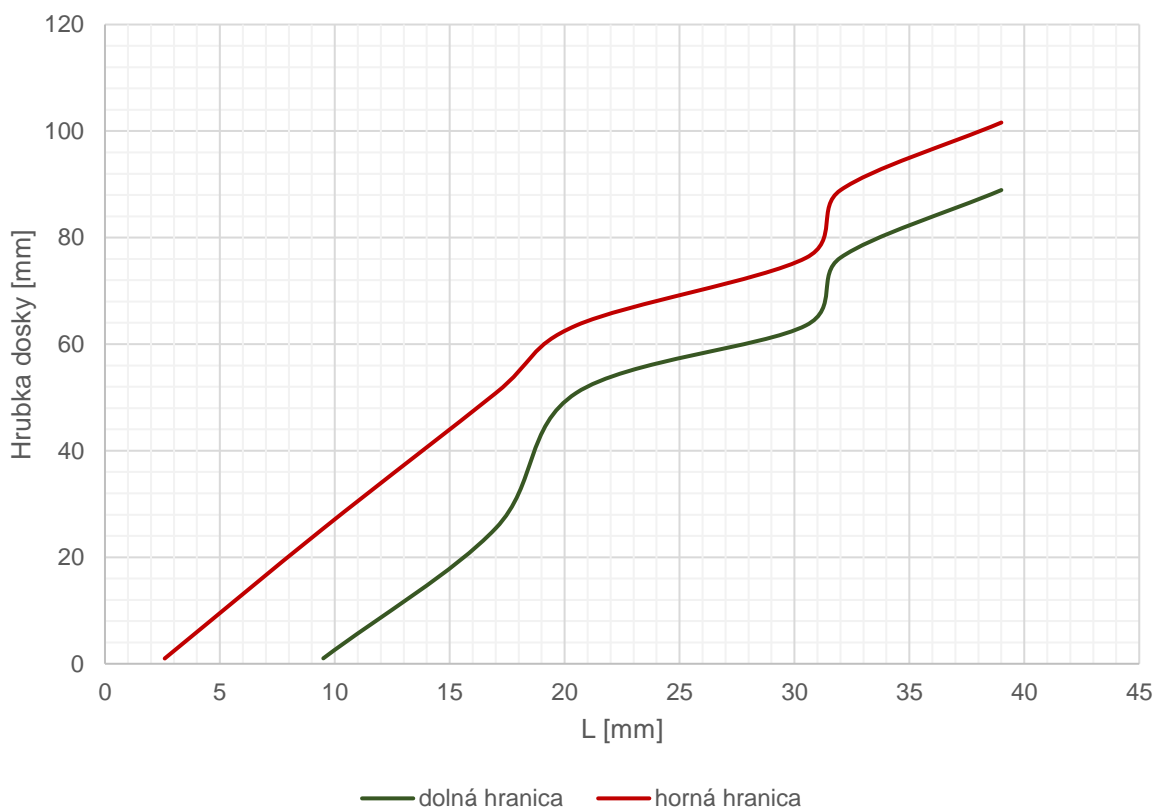
11.2 POMOCOU MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLOTOVAROV

Druhým prístupom riešenia tohto problému môže byť spojenie závislosti hodnôt pevnosti polotovarov rôznej hrúbky uvedených normou s priebehom pevnosti Jominyho tyčky. Pri riešení boli použité minimálne hodnoty pevností definované pre jednotlivé hrúbky doskových polotovarov podľa [7].

Postupovalo sa prevedením nameraných tvrdostí v prvom experimente na pevnosť, rovnakým postupom ako v predošlej časti. Jednotlivým hrúbkam polotovaru bola potom priradená vzdialenosť L na Jominyho tyčke s rovnakou pevnosťou ako je pevnosť polotovaru.

Keďže norma uvádza vždy rozmedzie hrúbok polotovaru a jemu príslušnú pevnosť, boli vytvorené dve závislosti ekvivalentných rýchlostí ochladzovania. Spodná krivka rozmedzia odpovedá minimálnym hodnotám rozmedzí hrúbok, zatiaľ čo horná krivka maximálnym hodnotám. Nedostatkem tohto riešenia je fakt, že nie je známe kaliace prostredie, ktorým boli dosiahnuté pevnosti polotovarov, z ktorých stanovené krivky vychádzajú.

Diagram ekvivalentných rýchlostí ochladzovania



Obr. 37 Vytvorený diagram ekvivalentných rýchlostí ochladzovania pomocou mechanických vlastností polotovarov

Zistené závislosti vychádzajú z údajov pre doskové polotovary. Použitie je možné preto napr. pri určovaní prekalenia dosky ako polotovaru integrálneho panelu.

Z uvedeného postupu riešenia je zrejmé že stanovené krivky sú len orientačné. Jedná sa však o dôkaz toho, že krivky prekaliteľnosti sú výhodné nie len pri porovnávaní prekaliteľností zliatin. Pokiaľ sú krivky spojené so už známymi dátami, je k experimentálne určenému priebehu tvrdosti Jominyho tyčky možné priradiť pravdepodobný priebeh tvrdosti kaleného predmetu.

Presnú väzbu medzi skúškou prekaliteľnosti a reálnym kalením nie sme schopní určiť tak ako u oceli, kde je tento problém riešený na základe štruktúrnych závislostí (podielu martenzitu v štruktúre).

12 DISKUSIA

12.1 EFEKT POKLESU TVRDOSTI BLÍZKO KALENÉHO ČELA

Zaujímavým výsledkom experimentov je jav kedy na čele vzorky po vytvrdení je podstatne nižšia tvrdosť po vytvrdení než vo väčších vzdialenostiach od kaleného čela. Keďže čelo vzorky je v priamom kontakte s kaliacim médiom, je v tomto mieste i predpoklad najvyšších rýchlostí ochladzovania a teda i najvyššej tvrdosti. K tomuto efektu došlo u všetkých zliatin, najvýraznejšie u zliatiny 2014 a 6082.

12.1.1 VYHRIEVANIE ČELA OKOLITÝM MATERIÁLOM

Možné je, že k tomuto efektu dochádza pri ochladzovaní vzorky. Ochladením povrchu vzniká rozdiel teplôt medzi povrchom a materiálom vo väčších vzdialenostiach od čela. Akumulované teplo sa potom dodáva z okolitého zahriateho materiálu, čím dochádza k poklesu rýchlosti ochladzovania na čele a teda aj výslednej tvrdosti po vytvrdení. Rýchlosť ochladzovania v tejto oblasti teda nie je taká vysoká ako by sa čakalo.

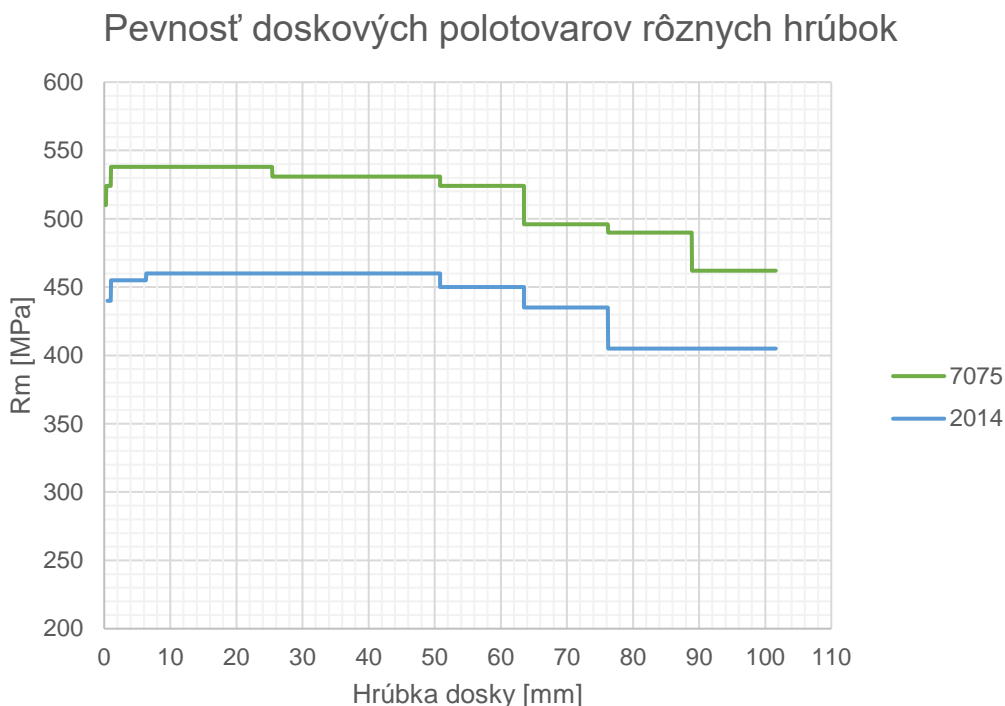
PRERUŠENIE KALENIA

Opätovné vyhrievanie kaleného konca môže byť spôsobené akýmkoľvek prerušením kalenia. Teplo obsiahnuté vo vnútorných častiach materiálu môže byť dostatočné na opätovné vyhrievanie povrchu. Prerušovanie kalenia počas ochladzovania prúdom vody môže byť spôsobené nedostatočným odstraňovaním pár vznikajúcich na kalenom povrchu. Je teda možné že i napriek tomu že sa kalí prúdom vody, dochádza k vzniku parných bublín, ktoré sa odstraňujú, no neustále dochádza k tvorbe nových. Poklesom teploty materiálu tvorba bublín už nie je tak intenzívna a ochladzovanie môže byť intenzívnejšie. Diagram (Obr. 13) na strane 24 vysvetľuje vplyv prerušenia kalenia na priebeh tvrdosti. Vzorka je v tomto prípade ochladzovaná z oboch strán, kedy sa dosahuje vysokej tvrdosti po celej hĺbke materiálu. Prerúšením kalenia jednej strany po 3 sekundách dochádza k výraznému poklesu tvrdosti na tejto strane. Dosiahnutá tvrdosť je dokonca nižšia než u kontrolnej vzorky, ktorá bola ochladzovaná len z jednej strany.

Nedostatočné odstraňovanie pár pri kalení prúdom vody naznačuje i podobnosť zistených kriviek prekaliteľnosti pri kalení prúdom vody a kalení stojatou vodou. Porovnateľný priebeh tvrdosti po dĺžke vzorky je spojený s podobným charakterom ochladzovania oboch prípadov. Keďže počas ochladzovania stojatou vodou celkom určite dochádza k vzniku vrstvy pár a s tým spojeného priebehu ochladzovania, je možné že pri kalení prúdom vody dochádzalo k nedostatočnému odstraňovaniu pár.

12.2 VLASTNOSTI V ZÁVISLOSTI NA HRÚBKKE POLOTOVARU

Priebeh zakalenia tyčiek do istej miery odpovedá pevnostným vlastnostiam polotovarov. Malé hrúbky polotovarov majú často nižšie mechanické vlastnosti ako polotovary väčších hrúbok. U značne hrubých polotovarov potom pevnosť klesá s rastúcou hrúbkou (dané prekaliteľnosťou materiálu).



Obr. 38 Závislosť minimálnej pevnosti doskových polotovarov pre rôzne rozmedzia hrúbok zliatiny 7075 a 2014 podľa [7]

Experimenty ukazujú podobný priebeh tvrdosti, kedy v malých vzdialenostiach od kaleného čela je tvrdosť nižšia než v miestach väčšej vzdialenosti. Preklenutím maximálnych hodnôt tvrdosti nastáva pokles.

Zistené krivky prekaliteľnosti teda môžu odpovedať priebehu kalenia reálnych súčastí. Otázkou však ostáva skutočná príčina poklesu tvrdosti v blízkosti kaleného čela.

12.3 MOŽNOSTI ĎALŠEJ PRÁCE

Vznik uvedeného javu je možné overiť kalením v prostredí, ktoré nespôsobuje vznik pár. Takýmto prostredím je napr. vzduch, alebo olej. Je možné, že v takom prípade by teda nedochádzalo k poklesu tvrdosti na začiatku vzorky. Efekt vzniknutého prerušenia ochladzovania by bolo možné detailnejšie preskúmať experimentom s kontrolovaným prerušením ochladzovania. Rozdielnym charakterom prerušenia by bolo možné dokumentovať potencionálny rozdiel poklesu tvrdosti a teda potvrdiť či je to skutočná príčina problému.

ZÁVER

V diplomovej práci je riešený problém overenia použiteľnosti Jominyho čelnej skúšky prekaliteľnosti pre hliníkové zliatiny. Riešenie prebehlo experimentálne na vybraných konštrukčných zliatinách (2014, 6082, 7075) a s použitím viacerých kaliacich prostredí (prúd vody, roztok soli, stojatá voda). Experimenty boli rozdelené do troch celkov.

V prvom súbore experimentov boli stanovené krivky prekaliteľnosti zliatin použitím prúdu studenej vody ako kaliaceho prostredia v rámci Jominyho skúšky prekaliteľnosti. Stanovením kriviek sa ukázala vhodnosť skúšky pre porovnanie rozdielneho chovania zliatin, odpovedajúcemu kritickým rýchlostiam ochladzovania daných materiálov.

Grafickým porovnaním priebehu zistených tvrdostí bolo možné ukázať ako sa od seba zliatiny líšia z hľadiska maximálnej dosiahnutej tvrdosti a prekaliteľnosti. Zliatiny 2014 a 6082 dosiahli výborného prekalenia takmer v celej dĺžke tyčky, zatiaľ čo zliatina 7075 dosahuje síce vyššie hodnoty zakalenia (tzn. tvrdosti v blízkosti kaleného čela), s rastúcou vzdialenosťou však tvrdosť výrazne klesá. Zistená výborná prekaliteľnosť zliatin 2014 a 6082 dobre odpovedá ich kritickým rýchlostiam ochladzovania, rovnako ako zistená znížená prekaliteľnosť zliatiny 7075.

Druhý súbor experimentov stanovuje krivky prekaliteľnosti zliatin 2014 a 7075 pri použití solného roztoku ako kaliaceho prostredia tzn. prostredia s vyššou intenzitou ochladzovania. Stanovené krivky oboch zliatin pri grafickom porovnaní s krivkami stanovenými v predošlom experimente ukazujú dosiahnutie len minimálneho zvýšenia prekalenia.

V treťom súbore experimentov boli stanovené krivky prekaliteľnosti zliatin 2014 a 7075 pri použití stojatej vody ako kaliaceho prostredia tzn. prostredia s nižšou intenzitou ochladzovania. Zistené krivky oboch zliatin pri grafickom porovnaní s krivkami stanovenými prvým experimentom neukazujú žiadnu významnú zmenu prekalenia, čo neodpovedá predpokladanému poklesu prekalenia zliatin.

Zmena kaliaceho prostredia sa pri vykonaných experimentoch neukázala ako významná, čo však neodpovedá postupom bežne používaným pri kalení v praxi.

Zaujímavým výsledkom experimentov je jav kedy kalené čelo vzorky dosahuje podstatne nižšiu tvrdosť po vytvrdení než materiál vo väčších vzdialenostiach. Možnou príčinou je vyhrievanie čela okolitým materiálom počas kalenia.

Súčasťou práce je vytvorenie diagramov ekvivalentných rýchlostí ochladzovania za pomoci stanovených kriviek prekaliteľnosti. Vytvorené krivky sú orientačné jedná sa však o dôkaz toho že krivky prekaliteľnosti sú výhodné nie len pri porovnávaní prekaliteľností zliatin, ale umožňujú určiť pravdepodobné vlastnosti polotovarov rôznej hrúbky po kalení za rôznych podmienok. Podmienkou je spojenie kriviek s už známymi dátami zliatin.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *SPECIÁLNÍ LETECKÉ TECHNOLOGIE I*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0128-1.
- [2] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ. *Nauka o materiálu I: NAUKA O KOVECH 3. svazek*. Druhé rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1973.
- [3] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
- [4] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, . *ASM handbook: Volume 04 - Heat Treating*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1991. ISBN 978-087-1703-798.
- [5] PÍŠEK, František, Ladislav JENÍČEK a Přemysl RYŠ. *Nauka o materiálu I: NAUKA O KOVECH 4. svazek*. Druhé, rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1975.
- [6] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, . *ASM handbook: Volume 08 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 2000. ISBN 978-087-1703-897.
- [7] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE, . *ASM handbook: Volume 02 - Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. 10th ed. Materials Park, OH: ASM International, 1990. ISBN 978-087-1703-781.
- [8] ČSN EN 2100. *Letectví a kosmonautika. Slitina hliníku AL-P2014A-T4511. Tyče a profily lisované "a" nebo "D" <= 200 mm*. 1995.
- [9] ČSN EN 2636. *Letectví a kosmonautika - Slitina hliníku AL-P6082-T6 -Tyče a profily lisované a nebo D<=200 mm s kontrolou hrubého zrna na obvodu*. 1996.
- [10] ČSN EN 2696. *Letectví a kosmonautika - Slitina hliníku AL-P7075-T6 nebo T62 - Plechy a pásy - 0,4 mm <= a <= 6 mm*. 2005.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

<i>H</i>	[-]	Grossmannov faktor
<i>HRB</i>	[-]	Rockwellova tvrdosť HRB
<i>HRC</i>	[-]	Rockwellova tvrdosť HRC
<i>HRE</i>	[-]	Rockwellova tvrdosť HRE
<i>HV</i>	[-]	Vickersova tvrdosť
<i>L</i>	[mm]	Vzdialenosť od kaleného čela
<i>PV</i>		Prúd vody
<i>R_m</i>	[MPa]	Medza pevnosti
<i>R_{p0,2}</i>	[MPa]	Medza klzu
<i>RS</i>		Roztok soli
<i>SV</i>		Stojatá voda
<i>t</i>	[h]; [min]; [s]	Doba výdrže
<i>v_p</i>	[°C/s]; [°F/s]	Priemerná rýchlosť ochladzovania
<i>v_r</i>	[°C/s]; [°F/s]	Rýchlosť ochladzovania

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 Namerané hodnoty tvrdosti vzoriek

PRÍLOHA 1 NAMERANÉ HODNOTY TVRDOSTI VZORIEK

Tabuľka 1 Hodnoty tvrdosti vzoriek zliatiny 2014 určené ako priemer meraní protifaľých strán

L [mm]	Tvrdosť HRB						
	2014_PV1	2014_PV2	2014_PV3	2014_RS1	2014_RS2	2014_SV1	2014_SV2
2	63,1	64,0	64,2	65,7	66,5	60,6	60,0
4	65,8	66,4	66,9	67,1	69,0	64,0	64,9
6	66,2	66,5	67,3	67,9	69,2	66,6	64,3
8	65,6	66,4	66,9	68,1	69,9	66,5	63,7
10	66,1	67,6	66,6	70,3	71,7	65,5	64,8
12	66,0	68,5	67,5	68,4	69,8	66,8	66,6
14	66,3	69,7	68,6	70,2	70,9	70,8	64,8
16	70,4	64,9	67,0	68,9	71,8	69,5	69,1
18	70,1	68,1	67,0	70,7	72,3	68,8	69,6
20	70,0	70,2	69,8	71,4	72,2	70,0	67,9
25	68,7	70,5	70,2	71,5	72,4	71,4	70,3
30	67,9	70,1	70,1	70,0	71,1	70,3	70,5
35	67,0	69,2	68,8	68,3	70,9	69,1	68,8
40	66,6	68,2	68,5	68,3	69,4	67,7	67,8
45	65,8	67,3	67,3	67,4	68,3	67,1	67,0
50	65,6	66,2	67,2	67,4	68,4	65,8	66,6
60	65,1	65,4	65,8	66,2	67,5	65,3	66,4
70	64,1	65,1	65,9	65,9	67,3	64,7	66,0
80	63,7	65,3	66,5	66,3	67,2	65,1	65,2
90	63,2	65,0	65,5	66,0	66,6	64,8	64,5
95	62,9	64,6	65,1	66,4	66,7	64,8	64,0
100	62,8	65,7	64,6	67,1	66,6	63,2	62,2
105	62,8	61,2	64,1	66,3	65,2	63,2	62,0
110	60,2	60,1	59,0	61,4	63,1	61,0	61,1
115	58,0	57,5	56,7	61,3	60,5	58,6	59,8
118	56,9	57,0	58,6	58,3	59,2	56,5	61,0

Tabuľka 2 Hodnoty tvrdosti vzoriek zliatiny 6082 určené ako priemer meraní protiahlých strán

L [mm]	Tvrdosť HRB		
	6082_PV1	6082_PV2	6082_PV3
2	46,9	53,9	42,8
4	51,8	57,4	56,7
6	53,2	58,4	55,0
8	50,6	57,8	55,6
10	51,5	58,9	56,1
12	51,9	59,4	57,2
14	51,8	62,9	59,1
16	53,9	61,9	60,6
18	53,1	63,2	59,2
20	54,2	63,5	61,3
25	54,2	63,4	60,3
30	53,6	62,3	63,5
35	51,5	61,9	62,0
40	49,9	61,1	61,4
45	48,3	60,5	60,4
50	47,7	59,9	59,9
60	46,1	58,4	59,1
70	45,2	58,2	58,0
80	45,1	56,3	57,8
90	44,6	56,0	58,0
95	44,2	55,8	57,6
100	44,1	55,7	57,4
105	43,4	58,0	57,8
110	40,5	56,9	52,6
115	37,8	50,5	50,2
118	34,4	51,1	46,5

Tabuľka 3 Hodnoty tvrdosti vzoriek zliatiny 7075 určené ako priemer meraní protifaľných strán

L [mm]	Tvrdosť HRB						
	7075_PV1	7075_PV2	7075_PV3	7075_RS1	7075_RS2	7075_SV1	7075_SV2
2	80,1	82,5	80,5	82,7	83,5	80,8	82,6
4	80,7	84,2	85,4	86,3	86,0	85,8	87,2
6	81,3	85,6	81,8	85,2	86,2	86,2	87,2
8	82,1	86,0	82,9	84,8	85,9	85,7	86,3
10	80,5	87,3	84,7	86,0	87,2	87,6	86,6
12	80,0	87,1	83,9	87,3	86,7	87,8	88,8
14	81,5	87,3	82,7	85,8	86,9	84,8	87,6
16	81,6	83,8	83,0	86,4	85,5	86,0	85,3
18	79,3	84,7	84,2	85,1	85,7	83,6	87,1
20	80,0	83,8	83,2	84,8	84,7	83,4	85,0
25	77,1	80,5	82,0	81,3	80,8	80,0	81,8
30	76,2	76,3	79,5	77,7	77,2	74,6	77,0
35	74,0	72,1	76,9	73,6	73,3	69,4	72,4
40	70,0	68,5	73,7	70,8	69,7	65,4	67,7
45	66,1	65,7	71,0	67,9	67,3	62,7	64,5
50	63,2	62,9	68,2	65,7	65,9	60,6	62,0
60	60,9	59,6	64,1	63,9	63,8	58,3	59,6
70	58,6	58,1	62,1	63,0	62,9	57,4	58,8
80	58,5	57,3	61,9	62,8	62,8	57,7	58,4
90	58,5	57,1	61,0	62,6	62,6	57,1	58,3
95	58,2	57,4	60,7	62,5	62,8	57,0	58,0
100	57,9	56,2	63,1	63,3	62,3	57,9	57,7
105	53,4	57,1	61,4	64,4	60,5	57,3	56,3
110	50,1	54,9	59,1	61,9	61,1	53,8	56,4
115	48,5	53,1	57,8	58,8	57,9	51,4	53,3