

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

POPOUŠTĚCÍ KŘEHKOST KONSTRUKČNÍ OCELI 50CrV4
TEMPER BRITTLINESS OF CONSTRUCTION STEEL 50CrV4

AUTOR: Jakub Včelák

STUDIJNÍ PROGRAM: VES

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jana Sobotová, Ph. D

PRAHA 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Včelák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **487188**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Popouštěcí křehkost konstrukční oceli 50CrV4

Název bakalářské práce anglicky:

Temper brittleness of construction steel 50CrV4

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Experimentální část
 - a. Zkouška rázem v ohybu
 - b. Metalografická analýza
 - c. Měření tvrdosti
3. Zpracování výsledků a jejich diskuse
4. Závěry

Seznam doporučené literatury:

- PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. 1999. Brno: CERM, c1999. ISBN 80-720-4130-4.
- ČIZMÁROVÁ, E. a J. SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. Dotisk 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- MACEK, K. a P. ZUNA. Strojírenské materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
- KRAUS, V. Tepelné zpracování a slinování. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013, 270 s. ISBN 978-80-261-0260-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Jana Sobotová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: 8.7.2021

.....
Podpis

Anotace

Bakalářská práce se zabývá studiem výskytu popouštěcí křehkosti u chrom-vanadové oceli k zušlechťování 50CrV4. Ocel byla tepelně zpracovaná: kalení 860 °C/45 minut/olej a popouštění při teplotách 350 až 600 °C/ochlazování ve vodě a na klidném vzduchu. Následně byly provedeny zkoušky rázem v ohybu dle Charpy a tvrdosti dle Rockwella (HRC) a ze získaných hodnot sestaveny popouštěcí křivky, ze kterých byl vyhodnocen výskyt popouštěcí křehkosti. Pro vybrané stavy byla nakonec na příčných řezech provedena metalografická analýza metodou světelné mikroskopie.

Klíčová slova

tepelné zpracování, popouštěcí křehkost, chrom-vanadová ocel 50CrV4, nárazová práce, tvrdost, metalografická analýza

Annotation

The bachelor thesis deals with the study of the occurrence of temper embrittlement in chrome-vanadium steel 50CrV4 for refining. The steel was heat treated: quenching at 860°C/45 minutes/oil and tempering at 350 to 600°C/cooling in water and still air. Subsequently, Charpy bending impact and Rockwell hardness (HRC) tests were performed and tempering curves were constructed from the obtained values to evaluate the occurrence of temper embrittlement. Finally, metallographic analysis by light microscopy was performed on the cross-sections for the selected conditions.

Keywords

heat treatment, tempering brittleness, chrome-vanadium steel 50CrV4, impact energy, hardness, metallographic analysis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Janě Sobotové, Ph. D, vedoucí práce, za její čas, vedení, odborné rady a přívětivý přístup při konzultacích.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Prikner – Tepelné Zpracování Kovů, s.r.o. za provedení tepelného zpracování použitých vzorků a kontrolu vstupního materiálu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Krčilovi za pomoc při provádění měření a vlídný přístup při praktickém vysvětlování obsluhy zařízení.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů	7
Úvod	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Konstrukční oceli	9
1.1.1 Ušlechtilé legované oceli	10
1.2 Systém značení.....	10
1.2.1 Legované oceli s obsahem jednotlivých prvků pod 5%	11
1.3 Zušlechťování	12
1.3.1 Popouštěcí křehkost	13
1.3.2 Legující prvky v ocelích k zušlechťování.....	15
1.4 Ocel 50CrV4	17
2 Experimentální část	20
2.1 Experimentální materiál.....	20
2.1.1 Chemické složení oceli ve výchozím stavu	21
2.1.2 Struktura oceli 50CrV4 ve výchozím stavu	21
2.2 Použité experimentální metody.....	22
2.2.1 Zkouška rázem v ohybu.....	22
2.2.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella-stupnice C (HRC)	23
2.2.3 Metalografická analýza	24
3 Výsledky a jejich diskuze	25
4 Závěry	31
Použitá literatura	32
Seznam obrázků	34
Seznam tabulek.....	35

Seznam použitých zkratek a symbolů

Pojem	Značka	Jednotka
mez pevnosti	R_m	MPa
mez kluzu	R_e	MPa
tažnost	A	%
nárazová práce	KV	J
zbytkový austenit	A_z	%
vysokoteplotní popouštěcí křehkost	VTPK	-
nízkoteplotní popouštěcí křehkost	NTPK	-
eutektoidní teplota v diagramu Fe-Fe ₃ C	A_{c1}	°C
tvrdost dle Rockwella	HRC	-
kontrakce	Z	%
fosfor	P	-
síra	S	-
arsen	As	-
antimon	Sb	-
cín	Sn	-
uhlík	C	-
křemík	Si	-
mangan	Mn	-
chrom	Cr	-
nikl	Ni	-
dusík	N	-
smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	MPa

Úvod

Konstrukční oceli patří k nejpoužívanější skupině materiálů. Existuje jich široký sortiment, od nelegovaných po vysokolegované, od ocelí obvyklých jakostí po ušlechtilé [1]. Použití ocelí závisí na jejich mechanických a technologických vlastnostech-na různé druhy aplikací jsou kladeny odlišné požadavky na vlastnosti, či jejich kombinaci.

V dnešní době dochází k nárůstu požadavků na tyto vlastnosti. Jednou z možností zlepšení mechanických vlastností je tepelné zpracování, kdy dochází ke změně struktury materiálu doprovázené modifikací vlastností.

Tato bakalářská práce se zabývá chrom-vanadovou nízkolegovanou ušlechtilou ocelí 50CrV4 používanou k zušlechťování, která je dle dostupné literatury [2] náchylná k popouštěcí křehkosti. Hlavním použitím této oceli jsou aplikace, kdy je požadována vysoká pevnost i houževnatost jako jsou velké pružiny u traktorů a lokomotiv [2].

Popouštěcí křehkost je jev, kdy při určité teplotě popouštění dojde k nežádoucímu snížení houževnatosti materiálu a zvýšení jeho tvrdosti [1]. V důsledku toho je z pohledu kalírny nutné znát vhodné parametry tepelného zpracování.

Obvykle [3] se popouštěcí křehkost diagnostikuje na popouštěcích křivkách materiálu, kde se projevuje lokálním poklesem nárazové práce a růstem tvrdosti.

Cílem této bakalářské práce je vypracovat popouštěcí křivky pro ocel 50CrV4, kalenou z teploty 860 °C do oleje a následně popouštěnou při teplotách 350-600 °C a ochlazovanou ve dvou prostředích, na klidném vzduchu a ve vodě. Na základě popouštěcích křivek je pak vyhodnocen výskyt popouštěcí křehkosti.

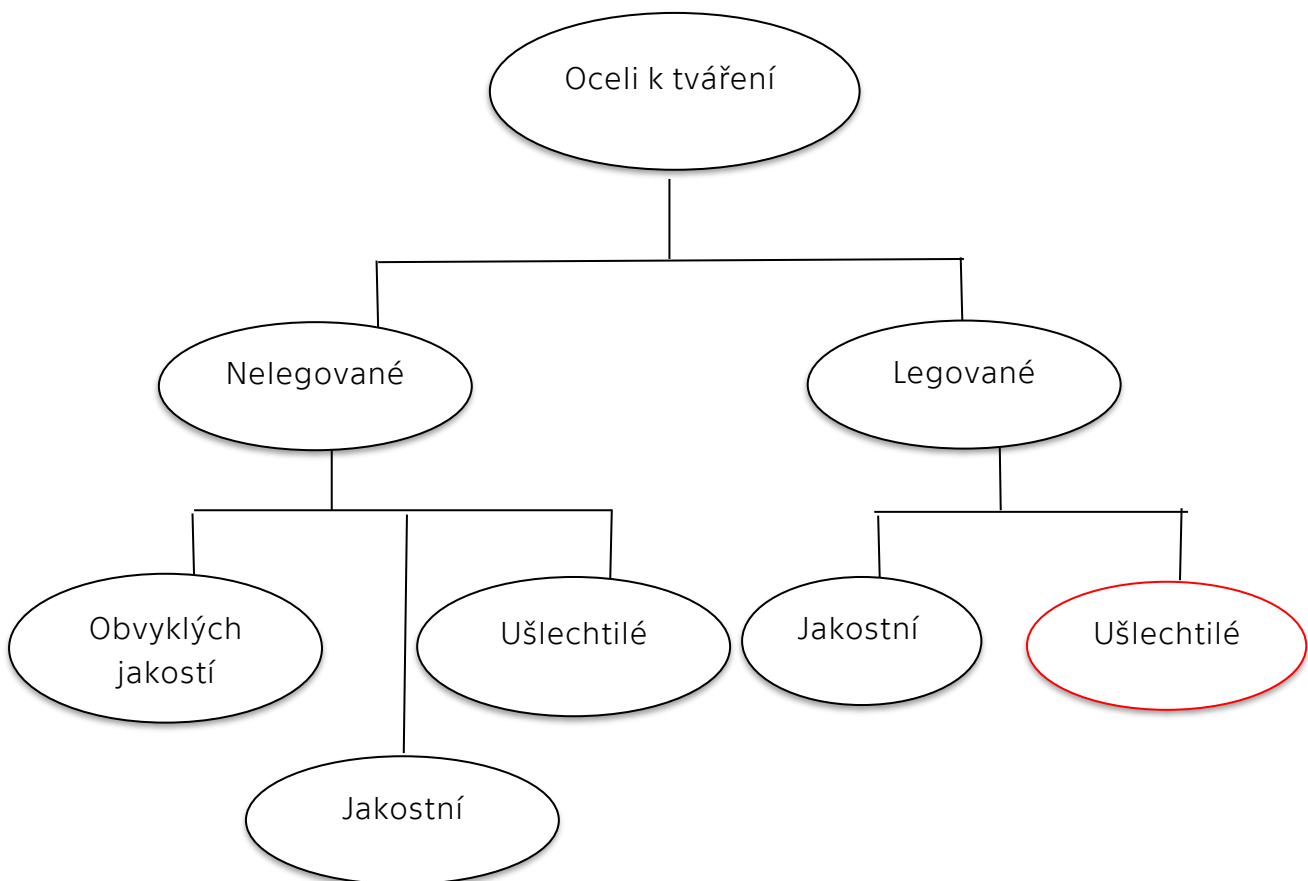
1 Teoretická část

1.1 Konstrukční oceli

Dostupná literatura uvádí ocel jako slitinu železa, uhlíku a dalších doprovodných prvků s hraničním obsahem uhlíku 2 procenta [1].

V dnešní době mají oceli obrovskou škálu uplatnění, proto je nutné je nějakým způsobem rozdělit. Dělení lze provést podle různých kritérií. Základním způsobem je to na oceli konstrukční a oceli nástrojové. Konstrukční oceli lze z hlediska technologie zpracování rozdělit na oceli ke tváření a oceli na odlitky [4].

Předložená práce se bude věnovat ocelím ke tváření, proto je dále uvedeno jejich dělení podle ČSN EN 10020 (Obrázek 1).



Obrázek 1 Schéma rozdělení konstrukčních ocelí dle ČSN EN 10020

V Obrázku 1 jsou vyznačeny ušlechtilé legované oceli, protože jedna z nich je předmětem této práce.

1.1.1 Ušlechtilé legované oceli

Za legované oceli se považují ty, která mají obsah jednoho či více doprovodných prvků větší nebo roven meznímu obsahu legujících prvků uvedených v Tabulce 1 [1].

Tabulka 1 Mezní obsah legujících prvků [1]

Název prvku	Max. množství [%]	Název prvku	Max. množství [%]
B	0,008	Si	0,5
Al	0,1	Te	0,1
Bi	0,1	Ti	0,05
Co	0,1	V	0,1
Cr	0,3	Mn	1,65
Cu	0,4	Mo	0,08
Ni	0,3	Nb	0,06
Pb	0,4	W	0,1
Se	0,1	Lantanoidy*	0,05
Zr	0,05	Ostatní**	0,05

*posuzuje se jednotlivě

** vyjma C, N, S, P

Ušlechtilé oceli jsou oceli s rozličnými, striktně určenými vlastnostmi, které jsou dané nejvyššími požadavky na přesnost chemického složení, dodržování speciálních výrobních postupů a následného zkoušení [1].

1.2 Systém značení

U ocelí je dále nutné pro jednoznačnost určení zvolit systém označování. Jeden takový specifikuje v současné době platná norma ČSN EN 10027-1, která uvádí systém zkráceného označování, v rámci něho se používají dva typy značek – dle použití, mechanických a fyzikálních vlastností, nebo podle jejich chemického složení [1].

Tato práce bude dále používat systém značení podle chemického složení, a to konkrétně u legovaných ocelí s obsahem jednotlivých prvků pod 5 %. Systém tvorby jejich označení je obsahem následující kapitoly.

1.2.1 Legované oceli s obsahem jednotlivých prvků pod 5%

Značení tvoří několik skupin znaků podle následujícího schématu:

1. Skupina nnn
2. Skupina a
3. Skupina n-n

První skupina uvádí střední hodnotu obsahu uhlíku z uvedeného rozsahu vynásobenou stem. V případě 2 materiálů se stejným středním obsahem uhlíku je pro jednoznačnost možné číslo o jednu zvětšit [4].

Druhá skupina udává chemické značky legujících prvků obsažených v oceli sestupně řazené podle jejich obsahu. V případě dvou stejných obsahů jsou řazeny podle abecedy [5].

Písmena n-n udávají střední hodnotu procentuálního obsahu doprovodných prvků vynásobenou charakteristickým koeficientem daného prvku. Jsou oddělena pomlčkou a zaokrouhlují se na nejbližší vyšší hodnotu [1] [5]. Koeficienty jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2 charakteristické koeficienty jednotlivých prvků [1]

Prvek	Koeficient
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Legované ušlechtilé oceli se obecně dále dají dělit podle způsobu jejich tepelného zpracování na oceli k zušlechťování, cementaci a k nitridaci.

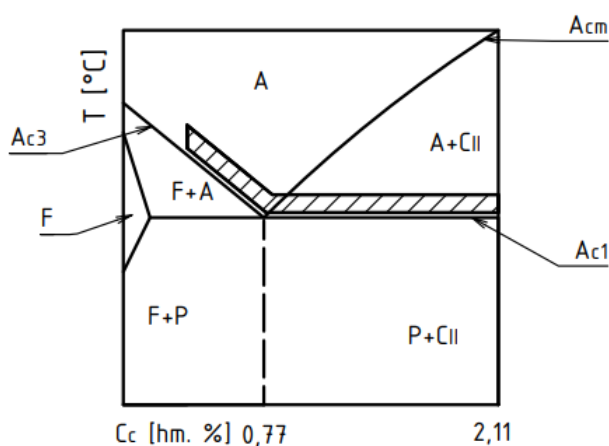
Tato práce se bude dále zabývat oceli k zušlechťování.

1.3 Zušlechťování

Patří mezi kombinované postupy tepelného zpracování. Skládá se z kalení a vysokoteplotního popouštění (popouštění nad 400°C). [6]

První fází je kalení, kdy dochází k ohřevu na kalící teplotu s následným ochlazováním nadkritickou rychlostí. Ochlazování je možné provést různými druhy kalících médií. Nejběžnější kalící média používaná u legovaných ocelí jsou minerální oleje. Jejich hlavní výhodou je vznik menšího vnitřního prnutí ve srovnání s kalením do vody [1].

Kalící teplota závisí na složení zpracovávaného materiálu. Oceli k zušlechťování jsou obvykle podeutektoidní [1], teplota kalení tedy bude 30–50°C nad A_{c3} , jak je patrné na Obrázku 2.



Obrázek 2 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe₃C

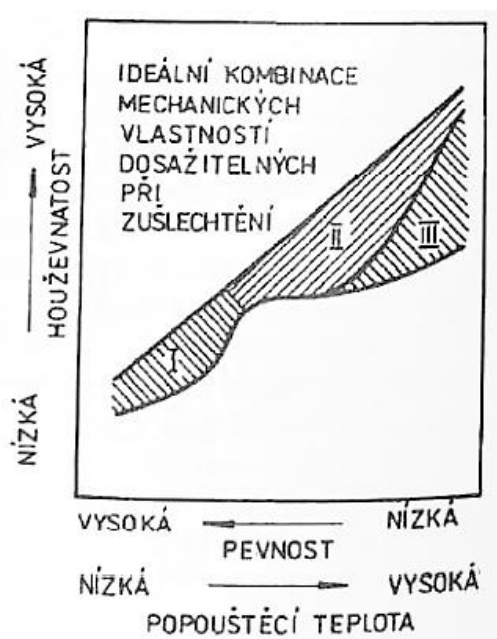
Po kalení následuje vysokoteplotní popouštění, po kterém je ve struktuře jemná sorbitická struktura, ta zaručuje výhodný poměr pevnostních a plastických vlastností [6].

V důsledku popouštění u některých ocelí dochází k popouštěcí křehkosti.

1.3.1 Popouštěcí křehkost

Popouštěcí křehkost je nežádoucí jev, při kterém při určitých teplotách dochází ke snížení vrubové nebo lomové houževnatosti a ke zvýšení náchylnosti ke koroznímu praskání a vodíkovému křehnutí [1] [7].

Náchylnost ocelí k popouštěcí křehkosti je různá, závisí na jejich chemickém složení a na parametrech popouštění. Je známo, že ji ovlivňují především povrchově aktivní prvky, jako je P, S, As, Sb, Sn [1].

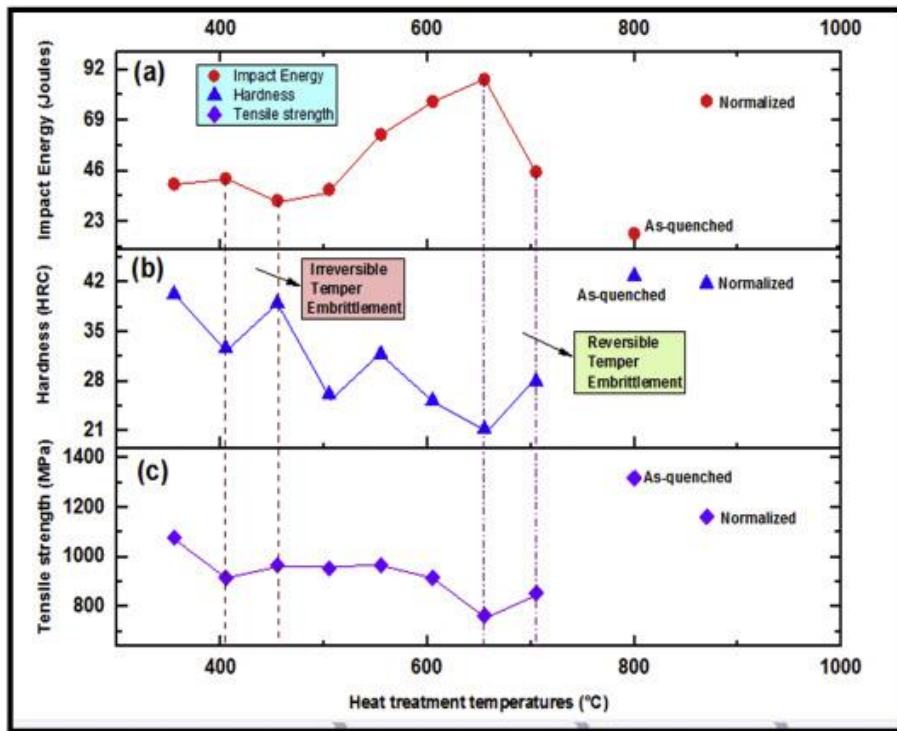


Obrázek 3 Teplotní oblasti výskytu popouštěcí křehkosti [1]

Jak je patrné z Obrázku 3 existují tři typy popouštěcích křehkostí. Prvním typem (označeným I) je nízkoteplotní křehkost (NTPK), která se vyvíjí izotermicky při teplotách 350-450°C. Druhým typem je izotermická vysokoteplotní popouštěcí křehkost (VTPK) ozn. II, při které dochází k nejvyššímu poklesu houževnatosti. Posledním typem je anizotermická VTPK, která vzniká z důvodu pomalého ochlazování z popouštěcí teploty, ozn. III [1].

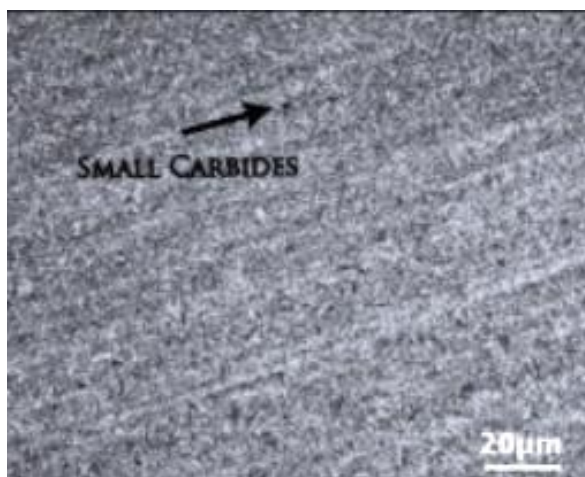
Příčinou popouštěcích křehkostí je segregace povrchově aktivních prvků a karbidů podél původních austenitických zrn podporovaných některými legujícími prvky. Výsledkem je vznik štěpného (křehkého) lomu viditelného na zkušebních vzorcích po zkoušce rázem v ohybu. Dostupná literatura uvádí NTPK jako neodstranitelnou. Naproti tomu jsou obě formy VTPK udávány jako odstranitelné. VTPK lze odstranit novým kalením a následným rychlejším ochlazením po popouštění [1] [7].

Ačkoliv jsou obecné principy popouštěcí křehkosti dobře popsány, stále se odborníci věnují studiu této problematiky. Uvedená skutečnost je dána kromě jiného neustále lepší kvalitou konstrukčních ocelí a také novými možnostmi v oblasti technologie tepelného zpracování. Například autoři [3] při zkoumání popouštěcí křehkosti oceli AISI 4340 (C 0,45 %, Si 0,26 %, Mn 0,37 %, Ni 4,11 %, Cr 1,31 %, N 0,037 %, P 0,012 %, S 0,007 %) zjistili výskyt neodstranitelné popouštěcí křehkosti při popouštěcí teplotě 450°C a odstranitelné při 700°C, jak je patrné nárůstu pevnosti a tvrdosti a poklesu nárazové práce na obrázku 4. Zkoumané vzorky byly nejprve normalizačně žíhány při teplotě 870°C a zchlazeny na vzduchu. Poté byly kaleny z teploty 800°C do oleje pokojové teploty [3].



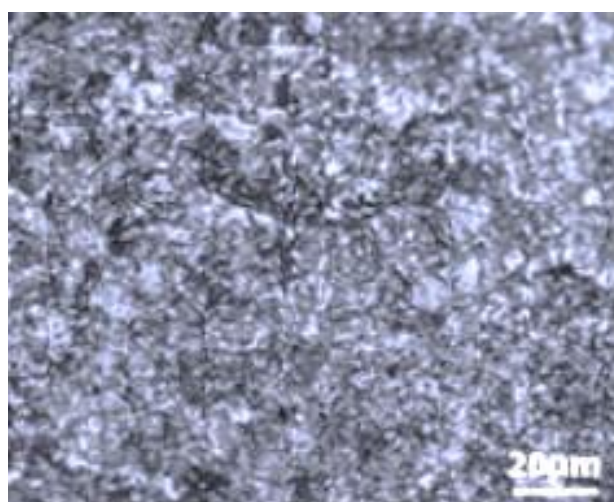
Obrázek 4 Vliv popouštěcí teploty na mechanické vlastnosti oceli AISI 4340 [3]

Autoři [3] konstatují, že při popouštěcí teplotě 450°C dochází ke vzniku nekoherentních karbidů na hranicích martenzitických zrn, jak je patrné na Obrázku 5. Tyto karbidy způsobují snížení nárazové práce, protože oslabují hranice zrn, uvedená popouštěcí křehkost byla označena jako nevratná [3].



Obrázek 5 Struktura oceli AISI 4340 po popouštění při teplotě 450°C [3]

Popouštěcí křehkost vznikající při popouštěcí teplotě 700°C je způsobena segregací doprovodných prvků na hranicích zrn, jak je patrné na Obrázku 6 [3], tato skutečnost je v souladu s prostudovanou literaturou [1] [7].



Obrázek 6 Struktura oceli AISI 4340 po popouštění při teplotě 700°C [3]

Jak již bylo uvedeno, tuto popouštěcí křehkost autoři označují za odstranitelnou.

1.3.2 Legující prvky v ocelích k zušlechťování

Ušlechtilé legované oceli určené k zušlechťování jsou obecně legovány následujícími prvky: Cr, Mo, V, Ni, Mn, Si případně jejich kombinacemi. [7] Většina z nich má příznivý vliv na mechanické vlastnosti.

Dále je uveden vliv jednotlivých prvků, a to i ve vazbě na popouštěcí křehkost.

- **Chrom**

Zvyšuje pevnost a tvrdost. Také zvyšuje prokalitelnost za předpokladu rozpuštění karbidů při austenitizaci. Nerozpuštěné karbidy prokalitelnost naopak snižují. Zvyšuje teplotu A_{c1} (viz obrázek 2). Při vysokoteplotním popouštění je nutné zajistit rychlejší ochlazování, nejlépe ve vodě. Snižuje se tak riziko VTPK [8].

- **Molybden**

Zvyšuje pevnost, tvrdost a prokalitelnost. Je karbidotvorný. Zvyšuje odolnost proti korozi v agresivních prostředích. V případě popouštěcí křehkosti zabraňuje segregaci karbidů a povrchově aktivních prvků na hranicích zrn. Doporučený obsah je 0,2-0,3 % [1] [8].

- **Vanad**

Je silně karbidotvorný. V nízkých koncentracích tvoří jemnozrnné karbidy a tím podporuje vznik jemnozrnné struktury. Zvyšuje prokalitelnost. Jeho vliv na mechanické vlastnosti je ovlivňován kalící teplotou-vlivem vyšší teploty dochází k rozpuštění karbidů vanadu a po zakalení ke zlepšení mechanických vlastností. Při nižší kalící teplotě se karbidy nerozpustí a mechanické vlastnosti naopak zhoršuje. Zabraňuje vodíkové korozi. Nemá vliv na vznik popouštěcí korozi [8].

- **Nikl**

Je austenitotvorný, výrazně zvyšuje houževnatost, zvyšuje pevnost, a to více než Cr, zvyšuje prokalitelnost, avšak méně než Cr či Mn. Má nepříznivý vliv na popouštěcí křehkost, podporuje segregaci povrchově aktivních prvků [1] [8].

- **Mangan**

Zvyšuje pevnost a tvrdost, ale snižuje tažnost, zvyšuje prokalitelnost. Je austenitotvorný, proto zvyšuje množství zbytkového austenitu po kalení. Rovněž zvyšuje náchylnost materiálu vůči vysokoteplotní popouštěcí křehkosti, je náchylný k odměšování [8].

- **Křemík**

Zvyšuje teplotu rozpadu zbytkového austenitu (A_z). Zvyšuje prokalitelnost, ale méně než Cr nebo Mn. Má negativní vliv na vysokoteplotní popouštěcí křehkost, a proto je nutné popouštět nad teplotou, při které dochází k popouštěcí křehkosti a rychle materiál ochladit [8].

Předložená práce je věnována studiu popouštěcí křehkosti oceli 50CrV4.

1.4 Ocel 50CrV4

Jedná se o chrom-vanadovou ušlechtilou legovanou ocel k zušlechťování s obsahem legujících prvků do 5 %.

V Tabulce 3 jsou uvedené různé ekvivalenty oceli 50CrV4. Uvedené značení je dle nejčastěji používaných norem a 2 vybraných výrobců.

Tabulka 3 Ekvivalenty materiálu 50CrV4

	Norma				Výrobce		Zdroj [9]
	EN	W.Nr	AISI	ČSN	Poldi	Boehler	
Označení	50CrV4	1.59	6150	15260	CV4	F550	

V Tabulce 4 je uvedeno rozmezí chemického složení, které udávají různí výrobci tohoto materiálu na svých stránkách v porovnání se složením uvedeným v dostupné literatuře.

Tabulka 4 Chemické složení oceli 50CrV4

Materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	V [%]	zdroj
F550	0,51	*	1	1,1	0,1	[10]
50CrV4	0,47-0,55	*	0,7-1,1	0,9-1,2	*	[11]
1.8159	0,51	*	*	1,1	0,2	[12]
15260	0,47-0,55	0,17-0,4	0,7-1	0,9-1,2	0,1-0,2	[2]

*výrobce obsah neuvádí

Z tabulky je možné konstatovat, že udávané množství uhlíku se nepatrně liší v závislosti na použitém zdroji. Zatímco některé zdroje uvádí střední procentuální zastoupení, jiné uvádí rozsah.

Konečné vlastnosti uvedeného materiálu jsou získány až tepelným zpracováním, proto je vhodné uvést doporučené kombinace parametrů kalení a popouštění, jak uvádí dostupná literatura a výrobce (viz Tabulka 5).

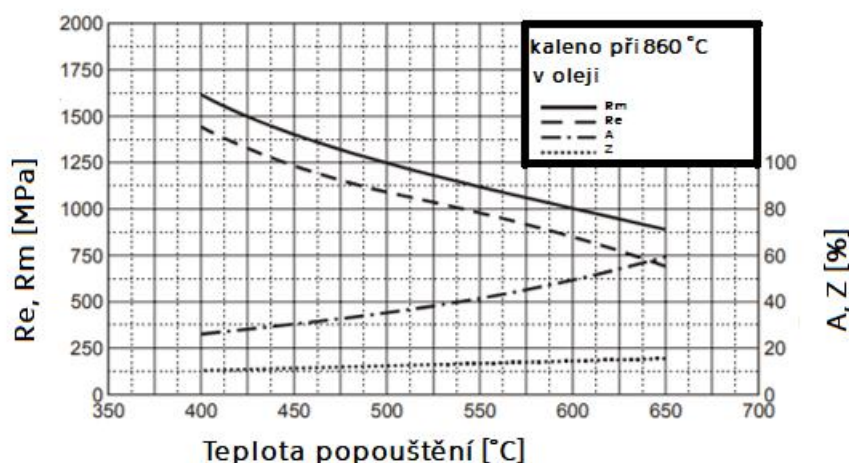
Tabulka 5 Doporučené tepelné zpracování oceli 50CrV4

Kalící teplota [°C]	Chladící médium	Popouštěcí teplota [°C]	Chladící médium	Zdroj
830-850 840-870	voda olej	530-670	voda	[2]
830-860	olej	400-600	vzduch	[13]

Jak již bylo zmíněno výše, vlastnosti materiálu závisí na tepelném zpracování, v případě zušlechťování zvláště na parametrech popouštění, a to nejen na teplotě, ale i na chladícím médiu.

Z tabulky 5 vyplývá, že je možné kombinovat různá chladící média a teploty. V případě kalení je možné použít chladící médium s nižší rychlostí ochlazování v kombinaci s vyšší kalící teplotou, nebo s vyšší rychlostí ochlazování a s nižší kalící teplotou. Po popouštění je možné ochlazování ve vodě nebo na vzduchu. V případě ochlazování na vzduchu se může jednat o pomalé ochlazování, kdy by mohlo u tohoto materiálu docházet k VTPK [2].

Na obrázku 7 jsou zobrazeny závislosti mechanických vlastností na teplotě popouštění oceli 50CrV4.



Obrázek 7 Popouštěcí diagram oceli 50CrV4 po kalení z teploty 860°C do oleje z [12] přeloženo pro potřeby BP

Ačkoliv literatura [2] uvádí, že se u oceli 50CrV4 může vyskytovat popouštěcí křehkost, na obrázku není patrná. Výrobce [12] udává tento diagram pouze jako orientační a bez bližší specifikace chladícího média při popouštění, které by mohlo ovlivnit výsledné vlastnosti.

V tabulce 6 jsou uvedené tvrdosti dosažené při různých popouštěcích teplotách. Tyto hodnoty jsou však měřeny ve velkých teplotních rozmezích a nelze z nich vyčíst eventuální výskyt popouštěcí křehkosti.

Tabulka 6 Závislost popouštěcí teploty na tvrdost oceli 50CrV4 [13]

Popouštěcí teplota [°C]	400	500	600	700
HRC	49	46	40	36

Z dosažitelných vlastností vyplývá použití oceli 50CrV4.

Dostupná literatura [2] uvádí jako hlavní použití na součásti motorových vozidel namáhané nárazy, vyžadující vysokou pevnost a náchylné k opotřebení. Příkladem takového použití jsou klikové hřídele, vřetena, ozubená kola a čerpadla. Další aplikací jsou pružiny velkého průřezu využívané např. u traktorů a lokomotiv.

2 Experimentální část

V experimentální části byla jako materiál použita ocel 50 CrV4 (kapitola 1.4). Z tohoto materiálu byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu s tvarem vrubu V v počtu 60 kusů (dle ČSN EN ISO 148-1).

U všech vzorků byly identické podmínky kalení: 860 °C/45 minut, ochlazení v oleji. Následně byly popouštěny. Podmínky popouštění a značení vzorků jsou uvedeny v Tabulce 7. Ochlazovací médium bylo zvoleno v souladu s Tabulkou 5 s tím, aby bylo možno porovnat vliv rychlosti ochlazování po popouštění

Tabulka 7 Podmínky popouštění a značení vzorků u oceli 50CrV4

Popouštění	Ochlazování	Značení vzorků	Počet
350 °C/2 h	klidný vzduch	350 A	5
400 °C/2 h		400 A	5
450 °C/2 h		450 A	5
500 °C/2 h		500 A	5
550 °C/2 h		550 A	5
600 °C/2 h		600 A	5
350 °C/2 h	voda	350 W	5
400 °C/2 h		400 W	5
450 °C/2 h		450 W	5
500 °C/2 h		500 W	5
550 °C/2 h		550 W	5
600 °C/2 h		600 W	5

Pro hodnocení popouštěcí křehkosti byla použita zkouška rázem v ohybu, měření tvrdosti a metalografická analýzy. Použité metody jsou popsány dále.

2.1 Experimentální materiál

Kontrolu výchozího stavu materiálu provedla firma Prikner – tepelné zpracování kovů, s.r.o. a je uvedeno dále.

2.1.1 Chemické složení oceli ve výchozím stavu

V Tabulce 8 je porovnání zjištěného a v literatuře uváděného chemického složení oceli ve výchozím stavu.

Tabulka 8 Porovnání zjištěného chemické složení oceli 50 CrV4 ve výchozím stavu a udávaného v [2]

Materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	V [%]	P [%]	S [%]	zdroj
15260	0,47-0,55	0,17-0,4	0,7-1	0,9-1,2	0,1-0,2	*	*	[2]
50CrV4	0,46	0,33	0,7	0,9	0,1	0,017	0,011	**

* zdroj obsah neuvádí

** Prikner – tepelné zpracování kovů, s.r.o.

Jak je patrné z Tabulky 8, oproti složení, jak jej uvádí [2], je zde nepatrně nižší obsah uhlíku. Lze předpokládat, že tento rozdíl je způsobený tolerančním polem přístroje, obsah ostatních prvků je v uvedených mezích.

2.1.2 Struktura oceli 50CrV4 ve výchozím stavu

Na Obrázku 8 jsou pro porovnání struktury oceli 50 CrV4 v příčném a podélném směru, použité zvětšení je 500x.



příčný směr



podélný směr

Obrázek 8 Porovnání struktury oceli 50CrV4 ve výchozím stavu

Podle očekávání je struktura oceli v obou případech tvořena feritem a lamelárním perlitem, který je místy částečně sferoidizovaný.

Jak je z obrázků patrné, struktury nevykazují anizotropii, a proto nebylo nutné přidávat do obrázků měřítko.

2.2 Použité experimentální metody

2.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Pro měření nárazové práce (KV) byla použita zkouška rázem v ohybu. Jedná se o dynamickou destruktivní zkoušku, která je založena na přeražení zkušebního tělesa s předem připraveným vrubem [6][14] tvaru V (Obrázek 9), jak již bylo uvedeno. Zkouška byla prováděna na stroji walter+bai PH-300-S (na Obrázku 10) při pokojové teplotě.



Obrázek 9 Zkušební vzorek s vybroušeným vrubem tvaru V



Obrázek 10 Stroj walter+bai PH-300-S

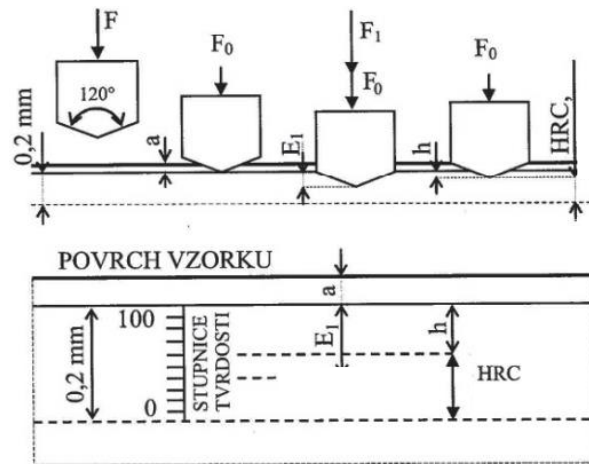
Pro každou teplotu popouštění a ochlazovací médium bylo přeraženo 5 vzorků a ze stroje odečtena nárazová práce.

Z takto získaných hodnot byla určena průměrná hodnota a vypočtena směrodatná odchylka.

2.2.2 Zkouška tvrdosti dle Rockwella-stupnice C (HRC)

Pro měření tvrdosti byla použita zkouška dle Rockwella. Zkouška je založená na vtlačování diamantového kuželu do povrchu vzorku [6]

Byla zvolena stupnice C, pro kterou odpovídá zkušební zatížení $F_0=98,1$ N a přídatné zatížení $F_1=1471,5$ N. Schéma měření je znázorněno na Obrázku 11.



Obrázek 11 Schéma zkoušky tvrdosti dle Rockwella [6]

Zkouška byla provedena na stroji Emcotest M4C 075 G3 (viz Obrázek 12).



Obrázek 12 Zkušební stroj Emcotest M4C 075 G3

U každého ze vzorků po zkoušce rázem v ohybu byly změřeny 3 hodnoty tvrdosti. Následně byly výsledky pro vzorky popouštěné při stejné teplotě zprůměrovány a vypočtena směrodatná odchylka.

Nakonec byly získané hodnoty nárazové práce a tvrdosti použity k sestavení popouštěcí křivky a k vyhodnocení výskytu popouštěcí křehkosti.

2.2.3 Metalografická analýza

Metalografická analýza je prováděna na metalografickém výbrusu, který musí být nejdříve zhotoven, viz dále.

Nejprve je třeba zvolit místo a velikost odebíraného vzorku. Ten se připravuje tak, aby nedošlo ke změně struktury způsobené ohřevem materiálu nebo plastickou deformací. Po vyhotovení vzorku je nutné provést jeho označení, aby později nedošlo k záměně [14].

Další fází je preparace, kdy z důvodů lepší manipulace se vzorky, často malých rozměrů, zafixují. Poté následuje broušení pomocí brusných papírů různé zrnitosti, a to od nejhrubších po nejjemnější. Při každé výměně brusného papíru je nutné vzorek opláchnout vodou. Výsledkem je vznik rovnoměrné drsnosti povrchu. Poslední fází je leštění, kdy nedochází k odběru materiálu, ale pouze ke srovnání reliéfu vzorku. Další úpravou je leptání, které se provádí v případě kontroly struktury [14].

Tímto procesem je získán metalografický vzorek, u kterého je možné provádět kontrolu, případně hodnocení struktury pomocí mikroskopu. [14]

Pro potřeby předložené práce byl použit světelný mikroskop Zeiss Neophot 32 (viz Obrázek 13).



Obrázek 13 Světelný mikroskop Zeiss Neophot 32

Struktura ve vybraných stavech byla hodnocena na příčném řezu vzorků po zkoušce rázem v ohybu. Lomové plochy byly uchovány pro další případnou fraktografickou analýzu. Tato analýza však nemohla být vzhledem k možnostem k přístupu do laboratoří v době pandemie provedena.

3 Výsledky a jejich diskuze

V tabulce 9 jsou uvedeny naměřené hodnoty nárazové práce a tvrdosti pro sledované stavy.

Tabulka 9 Nárazové práce a tvrdosti oceli 50CrV4, kalení 860 °C/45 minut/olej a odlišné rychlosti ochlazování po pouštění

Značení vzorků	Ochlazování	KV [J]	HRC [-]
350 A	Klidný vzduch (červeně)	19±1,6	49,2±1,0
400 A		28±0,9	47,5±0,8
450 A		36±2,0	44,2±0,8
500 A		39±1,1	41,1±1,1
550 A		42±1,8	38,3±0,9
600 A		56±3,5	35,2±0,9
350 W	Voda (modře)	17±2,3	50,2±0,6
400 W		29±5,4	46,7±1,1
450 W		31±0,9	44,5±1,1
500 W		34±1,7	40,7±0,9
550 W		39±1,4	38,2±0,8
600 W		54±2,4	36,1±1,0

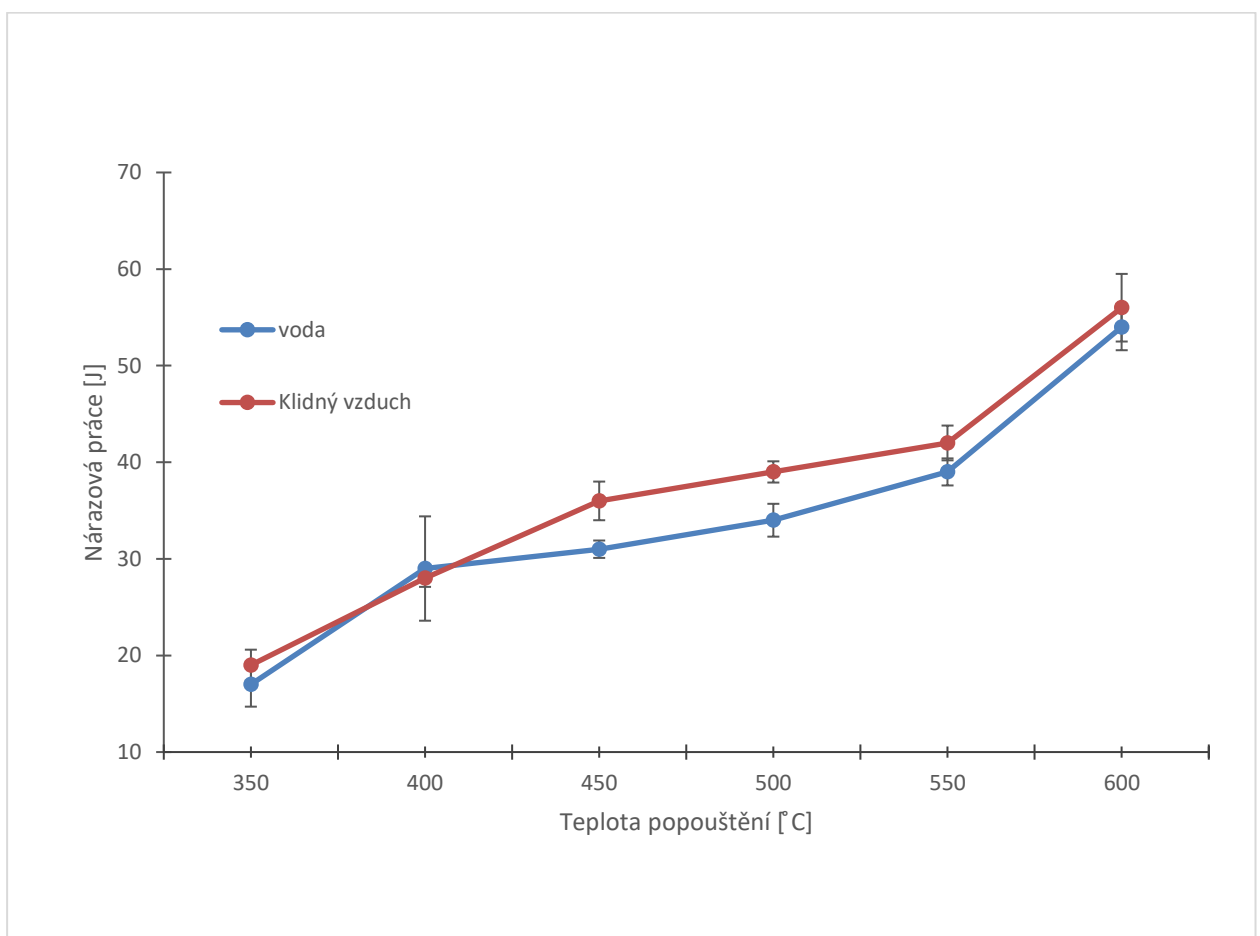
Na Obrázku 14 je znázorněna závislost nárazové práce na teplotě popouštění oceli 50CrV4 po popouštění ve vodě a na klidném vzduchu.

Pro oba způsoby ochlazování lze konstatovat, že dle očekávání mají závislosti nárazové práce na popouštěcí teplotě vzestupný průběh. Mezi teplotami 350 a 400 °C jsou křivky totožné. Mezi teplotami 450 a 550 °C se jejich průběh mírně liší, hodnoty pro klidný vzduch jsou přibližně o 5 J vyšší, než pro ochlazování ve vodě. Mezi teplotami 550 a 600 °C jsou křivky v rámci směrodatných odchylek téměř shodné, je patrný výraznější nárůst nárazové práce, než v oblasti 400 a 550 °C.

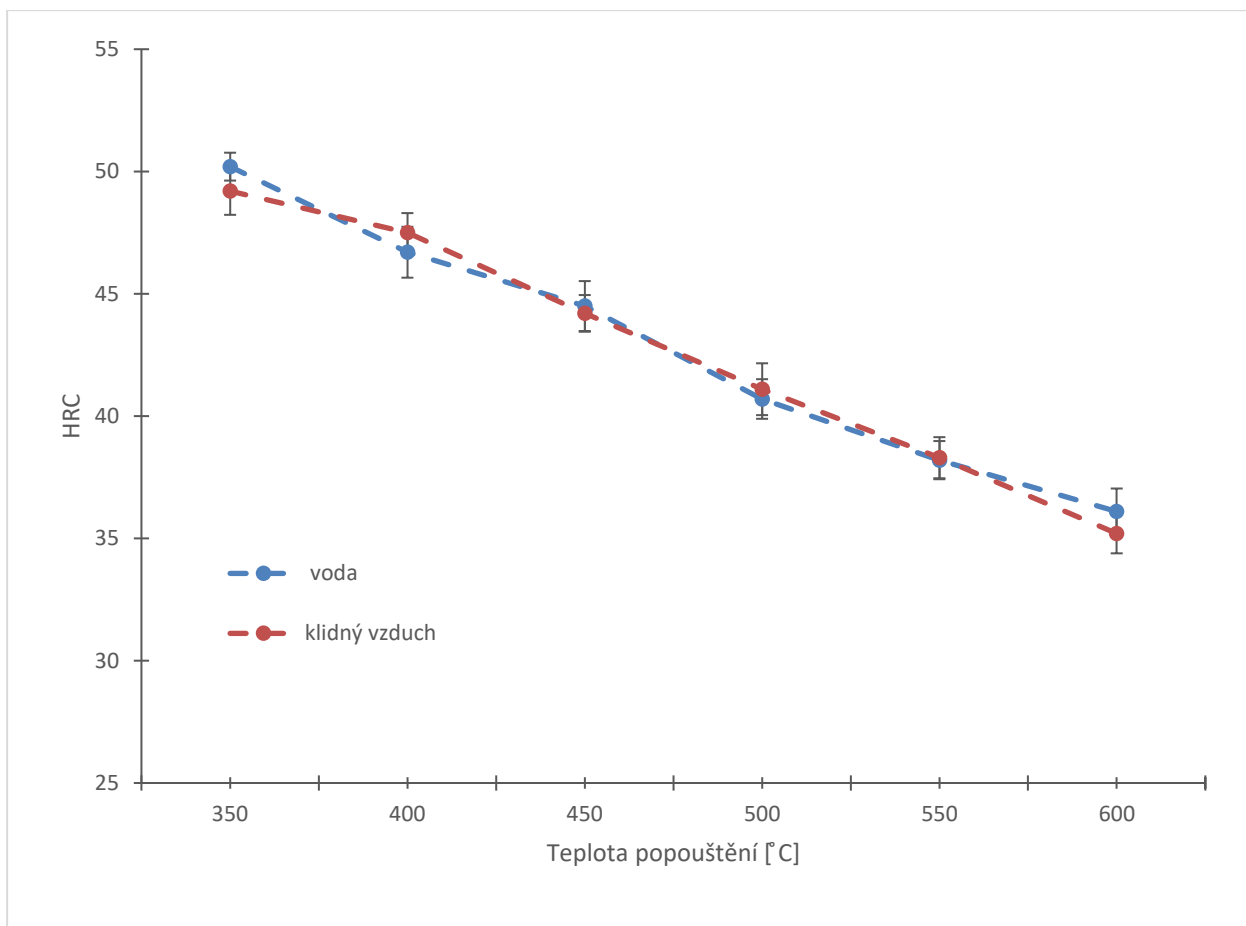
Směrodatné odchylky nárazové práce jsou poměrně malé. Vyjimku tvoří ochlazování ve vodě z teploty 400 °C (29±5,4). Tuto hodnotu by bylo vhodné zkontrolovat na větším počtu vzorků a případně doplnit podrobnější fraktografickou a metalografickou analýzou vzorků, které se od průměru výrazně liší. Nicméně tyto práce jsou již nad rámec předložené bakalářské práce.

Ověření důvodu této vysoké směrodatné odchylky by nemělo mít vliv na výsledek této práce, protože se vyskytuje u ochlazování rychlého, tedy vodou. V takovém případě by z hlediska teorie k popouštěcí křehkosti nemělo docházet.

Nicméně, z Obrázku 14 je patrné, že rychlost ochlazování z popouštěcí teploty nemá po kalení za použitých podmínek zásadní vliv na popouštěcí křivky oceli 50CrV4. Dále v rozsahu sledovaných popouštěcích teplot nebyl na těchto popouštěcích křivkách zjištěn lokální pokles nárazové práce, který by mohl být spojován s výskytem popouštěcí křehkosti.



Obrázek 14 Vliv rychlosti ochlazování z popouštěcí teploty na závislost nárazové práce na popouštěcí teplotě pro ocel 50CrV4 (kalení 860°C/45 minut/olej)



Obrázek 15 Vliv rychlosti ochlazování z popouštěcí teploty na závislost tvrdosti podle Rockwella (HRC) na popouštěcí teplotě pro ocel 50CrV4 (kalení 860 °C/45 minut/olej)

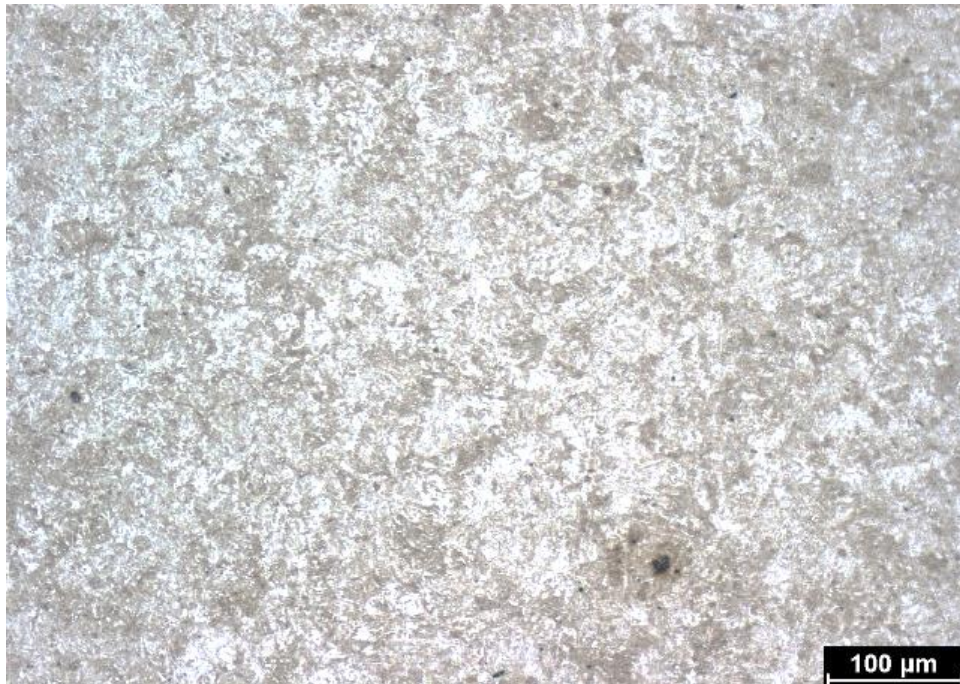
Na Obrázku 15 je znázorněná závislost tvrdosti podle Rockwella (HRC) na teplotě popouštění oceli 50CrV4 po popouštění ve vodě a na klidném vzduchu.

Popouštěcí křivky z hodnot tvrdosti pro ochlazování na klidném vzduchu a ve vodě mají dle očekávání a v souladu s křivkami na Obrázku 14 klesající průběh. Zjištěné závislosti si v rámci směrodatných odchylek odpovídají.

Stejně jako v případě popouštěcích křivek z hodnot nárazové práce, ani v tomto případě nebyl zaznamenán výrazný nárůst tvrdosti, který by mohl být spojován s výskytem popouštěcí křehkosti.

Z popouštěcích křivek lze konstatovat, že u oceli 50CrV4 kalené a popouštěné při podmínkách popsaných výše, nedochází k výskytu popouštěcí křehkosti.

Zjištěné popouštěcí křivky byly doplněny pro vybrané stavy (400 a 550 °C/obě ochlazovací média) metalografickou analýzou. Tyto stavy byly vybrány, protože v nich dochází ke změně průběhu popouštěcích křivek.



a) ochlazování z popouštěcí teploty na klidném vzduchu



b) ochlazování z popouštěcí teploty ve vodě

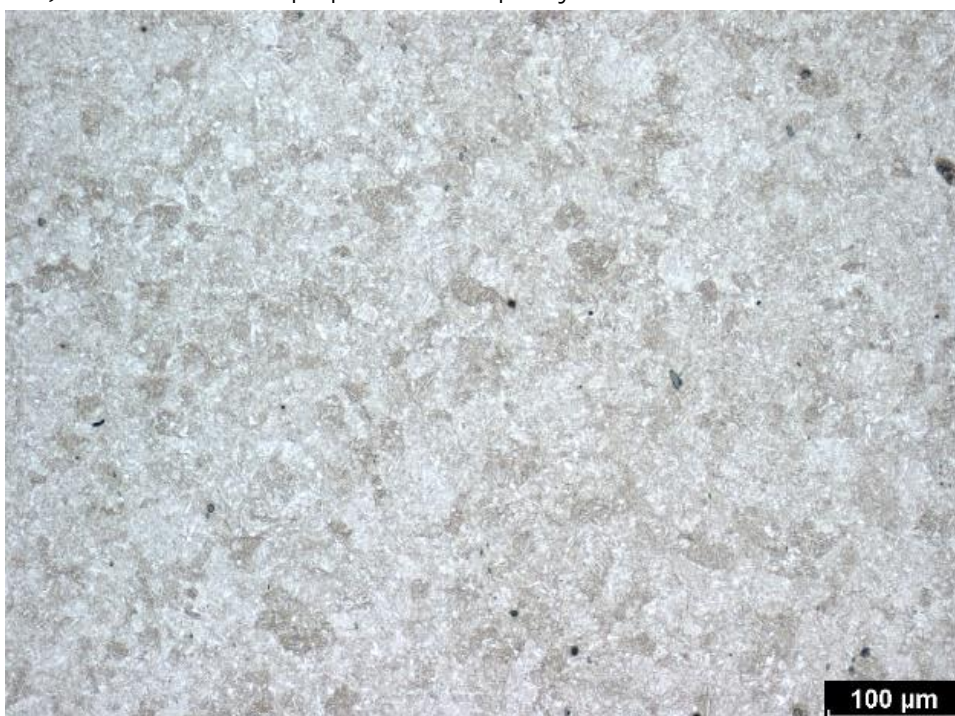
Obrázek 16 Porovnání struktur oceli 50CrV4 kalené 860 °C/45 minut/olej a popouštěné při teplotě 400 °C v různých zvětšeních

Na Obrázku 16 jsou pro porovnání struktury oceli 50CrV4 popouštěné při 400 °C a ochlazované na klidném vzduchu a ve vodě.

Ze snímku je patrné, že struktura je dle očekávání [6] sorbitická a její charakter se neliší v závislosti na rychlosti ochlazování z popouštěcí teploty. Přítomen bude také malý podíl zbytkového austenitu, ten však není světlenou mikroskopií detekovatelný [14].



a) ochlazování z popouštěcí teploty na klidném vzduchu



b) ochlazování z popouštěcí teploty ve vodě

c)

Obrázek 17 Porovnání struktur oceli 50CrV4 kalené 860 °C/45 minut/olej a popouštěné při teplotě 550 °C v různých zvětšeních

Na Obrázku 17 jsou pro porovnání struktury oceli 50CrV4 popouštěné při 550 °C a ochlazované na klidném vzduchu a ve vodě.

Struktura v obou případech svým charakterem odpovídá strukturám na Obrázku 16. Nicméně, při vzájemném porovnání se struktura po vyšší teplotě popouštění zdá mírně hrubší, což je v souladu s nižší tvrdostí (viz Obrázek 15)

Obecně lze konstatovat, že metalografická analýza vybraných stavů je v dobrém souladu s výsledky zkoušky rázem v ohybu a měření tvrdosti.

Ačkoliv odborná literatura [2] uvádí, že u sledované oceli 50CrV4 může docházet k výskytu popouštěcí křehkosti, v rámci předložené bakalářské práce nebyla při použitých režimech tepelného zpracování prokázána.

4 Závěry

Bylo provedeno studium popouštěcí křehkosti u konstrukční chrom-vanadové oceli 50CrV4 kalené při teplotě 860 °C do oleje a následně popouštěné při teplotách 350-600 °C a ochlazované na klidném vzduchu a ve vodě. Z výsledků je možno komentovat, že:

1. Chemické složení oceli odpovídá hodnotám udávaným v literatuře, struktura oceli 50CrV4 ve výchozím stavu je tvořena feritem a lamelárním perlitem.
2. Hodnoty nárazových prací pro obě ochlazovací média mají s rostoucí teplotou vzestupný průběh, nebyla zjištěna lokální minima, která by nasvědčovala výskytu popouštěcí křehkosti.
3. Hodnoty tvrdostí pro obě ochlazovací média měly s rostoucí teplotou popouštění sestupný průběh.
4. Výsledná struktura vzorků popouštěných při teplotách 400 a 550 °C a ochlazovaných na klidném vzduchu a ve vodě je sorbitická, přičemž při vyšší teplotě popouštění má mírně hrubší charakter.
5. V rozsahu sledovaných popouštěcích teplot nebyl zjištěn výskyt popouštěcí křehkosti.
6. Cíle bakalářské práce byly splněny.

Použitá literatura

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II* Brno: CERM, 1999 ISBN80-720-4130-4.
- [2] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [3] SAMI UDDIN, Muhammad, Hira YOUNUS, Zubia ANWER, Jinglong LI, Sumair Uddin SIDDIQUI a Mohammad Nouman SIDDIQUI. Mechanical & microstructural evaluation of reversible and irreversible embrittlement in ultra-high strength steel. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. 2020, 3(3), 250-257 [cit. 2020-11-21]. ISSN 25888404. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijlmm.2020.02.003
- [4] SROVNÁNÍ VYBRANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU A KONSTRUKČNÍCH OCELÍ. Brno, 2009. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. FRANTIŠEK VLAŠIC.
- [5] *Rozbor a komparace číselného značení ocelí dle ČSN, EN a ISO*. České Budějovice, 2013. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [6] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Elena ČIŽMÁROVÁ a Jakub HORNÍK. *Nauka o materiálu I. a II. cvičení*. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-05550-02.
- [7] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [8] Vliv legovacích prvků na vlastnosti ocelí. *Svanda.webz.cz* [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [9] Převodní tabulky ocelí. *Tumlikovo* [online]. 2010 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/prevodni-tabulky-oceli/#more-2938>
- [10] F550. *BÖHLER* [online]. BÖHLER, 2020 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://www.boehlerstahl.ch/de/products/f550/>
- [11] DIN-50CrV4. *Jfs-steel.com* [online]. Taichung City: Ju Feng Special Steel Co., 2020 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://www.jfs-steel.com/cs/steelDetail/DIN-50CrV4/DIN-50CrV4.html>
- [12] Materiálový list Doerrenberg 1.8159. *Doerrenberg Special Steel* [online]. Doerrenberg [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: http://www.doerrenberg.com.sg/fileadmin/template/doerrenberg/stahl/DatenblaetterEng/1.8159_en.pdf

[13] 50CrV4 Pružinová ocel. *Venturasteels* [online]. 2016 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://venturasteels.com/50crv4-spring-steel/>

[14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Schéma rozdělení konstrukčních ocelí dle ČSN EN 10020... 9	9
Obrázek 2 Pásmo kalících teplot v diagramu Fe-Fe ₃ C 12	12
Obrázek 3 Teplotní oblasti výskytu popouštěcí křehkosti [1]..... 13	13
Obrázek 4 Vliv popouštěcí teploty na mechanické vlastnosti oceli AISI 4340 [3]..... 14	14
Obrázek 5 Struktura oceli AISI 4340 po popouštění při teplotě 450°C [3]..... 15	15
Obrázek 6 Struktura oceli AISI 4340 po popouštění při teplotě 700°C [3]..... 15	15
Obrázek 7 Popouštěcí diagram oceli 50CrV4 po kalení z teploty 860°C do oleje z [12] přeloženo pro potřeby BP..... 18	18
Obrázek 8 Porovnání struktury oceli 50CrV4 ve výchozím stavu 21	21
Obrázek 9 Zkušební vzorek s vybroušeným vrubem tvaru V 22	22
Obrázek 10 Stroj walter+bai PH-300-S..... 22	22
Obrázek 11 Schéma zkoušky tvrdosti dle Rockwella [5] 23	23
Obrázek 12 Zkušební stroj Emcotest M4C 075 G3..... 23	23
Obrázek 13 Světelný mikroskop Zeiss Neophot 32..... 24	24
Obrázek 14 Vliv rychlosti ochlazování z popouštěcí teploty na závislost nárazové práce na popouštěcí teplotě pro ocel 50CrV4 (kalení 860°C/45 minut/olej) 26	26
Obrázek 15 Vliv rychlosti ochlazování z popouštěcí teploty na závislost tvrdosti podle Rockwella (HRC) na popouštěcí teplotě pro ocel 50CrV4 (kalení 860°C/45 minut/olej) 27	27
Obrázek 16 Porovnání struktur oceli 50CrV4 kalené 860°C/45 minut/olej a popouštěné při teplotě 400 °C v různých zvětšeních 28	28
Obrázek 17 Porovnání struktur oceli 50CrV4 kalené 860°C/45 minut/olej a popouštěné při teplotě 550 °C v různých zvětšeních ... 29	29

Seznam tabulek

Tabulka 1 Mezní obsah legujících prvků [1].....	10
Tabulka 2 charakteristické koeficienty jednotlivých prvků [1]	11
Tabulka 3 Ekvivalenty materiálu 50CrV4.....	17
Tabulka 4 Chemické složení oceli 50CrV4.....	17
Tabulka 5 Doporučené tepelné zpracování oceli 50CrV4	17
Tabulka 6 Závislost popouštěcí teploty na tvrdost oceli 50CrV4 [13].	18
Tabulka 7 Podmínky popouštění a značení vzorků u oceli 50CrV4	20
Tabulka 8 Porovnání zjištěného chemické složení oceli 50 CrV4 ve výchozím stavu a udávaného v [2]	21
Tabulka 9 Nárazové práce a tvrdosti oceli 50CrV4, kalení 860°C/45 minut/olej a odlišné rychlosti ochlazování po pouštění.....	25