

Analýza struktury a mechanických vlastností slévárenské oceli G22NiMoCr5-6

Tomáš Kment¹, Jana Sobotová²

^{1,2} ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Tato práce je věnována problematice slévárenské oceli G22NiMoCr5-6 s dobrou svařitelností se zaměřením na výrobu metodou vytavitelného modelu používanou ve firmě Kdynium a.s., kde autor práce působil v rámci praxe metalurga v technologickém oddělení. Je provedena analýza struktury a mechanických vlastností G22NiMoCr5-6 v závislosti na parametrech tepelného zpracování. Byla použita metalografická analýza pomocí světelného mikroskopu, měření tvrdosti, zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu v rozsahu -40 °C až 100 °C. V první části vzorky byly kaleny z teploty 950 °C a dále popuštěny variantně při teplotách 560 °C, 580 °C a 610 °C. V druhé části práce je provedena analýza normalizovaného stavu a dále analýza vzorků normalizačně žháných při teplotě 940 °C a zušlechťených za stejných podmínek jako v první části experimentu.

Klíčová slova: vysokopevnostní ocel na odlitky; mechanické vlastnosti; tepelné zpracování; struktura

1. Úvod

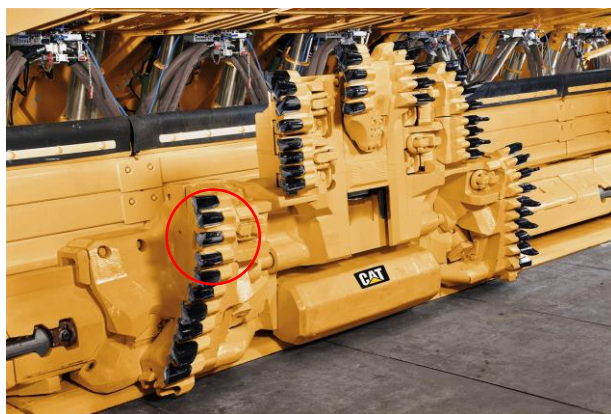
Vzhledem k rostoucím požadavkům zákazníků na celkovou kvalitu, aplikovatelnost výrobků, ekonomičnost apod. dochází k vývoji nových perspektivních materiálů. Aby v současném průmyslu dokázaly slévárny obstát proti konkurenci ostatních technologií, musí být vybaveny dokonalou znalostí odlévaných materiálů a díky tomu deklarovat zákazníkům požadovanou kvalitu.

Metoda vytavitelného modelu patří k jedné z nejpřesnějších metod slévárenského průmyslu. [1] Metodě vytavitelného modelu se věnuje i firma Kdynium a.s. se sídlem v Plzeňském kraji. Tato práce vznikla na základě požadavku zmíněné firmy, jejímž záměrem je rozšíření svého materiálového portfolia o ocel G22NiMoCr5-6. Vzhledem k náročnosti aplikací této oceli, vyžadují zákazníci průkaznost mechanických vlastností a struktury. Cílem práce je kompletně popsat tento druh materiálu, a to i s vlivem parametrů tepelného zpracování dle požadavků firmy Kdynium a.s.

Autor práce zároveň absolvoval praxi na pozici metalurga, kde se podílel na různých projektech firmy a současně mohl celý výrobní proces zmíněné oceli nejen sledovat, ale také se na něm osobně podílet.

2. Ocel G22NiMoCr5-6

Materiál G22NiMoCr5-6 je vysokopevnostní, podeutektoidní ocel, která je vhodná pro slévárenskou výrobu, ale také pro aplikace vyžadující dobrou svařitelnost materiálu po zhotovení výrobku. [2] Její nejčastější aplikace jsou vysoce namáhané součásti převodových systémů, součástí těžebních strojů apod., které vyžadují houževnatost i za nízkých teplot. Na Obrázku 1 [3] lze vidět těžební stroj, kde zvláště díly jsou vyráběny ze zmíněného materiálu. Detail jednoho z dílů vyrobený firmou Kdynium a.s. je pak na Obrázku 2.



Obrázek 1: Těžební stroj s aplikací oceli G22NiMoCr5-6 [3]



Obrázek 2: Díl vyrobený metodou vytavitelného modelu z oceli G22NiMoCr5-6 (vyznačen na Obrázku 1)

Aktuálně není materiál v ČR příliš dobře zmapován a jeho výroba je směřována spíše do zahraničí. Specifikace materiálu G22NiMoCr5-6 lze nalézt v německé normě SEW 520. Tato norma uvádí chemické složení, minimální hodnoty mechanických vlastností, doporučení

* Kontakt na autora: Tomas.Kment@fs.cvut.cz

v oblasti tepelného zpracování a svařování apod. Tyto specifikace jsou uvedeny dále.

2.1 Specifikace dle SEW 520

• Chemické složení

Chemické složení specifikované normou SEW 520 je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení G22NiMoCr5-6 dle SEW 520 [2]

| Prvek | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo |
|-------|--------------|------------|------------|--------------|--------------|----------|------------|------------|
| [%] | 0,18 0,24 | max 0,6 | 0,8 1,2 | max 0,015 | max 0,005 | 0,5 1 | 0,8 1,3 | 0,5 0,7 |

• Tepelné zpracování

Doporučení v oblasti tepelného zpracování uvedené v normě SEW 520 je uvedeno v Tabulce 2.

Tabulka 2: Tepelné zpracování G22NiMoCr5-6 dle SEW 520 [2]

| | Typ | Teplota austenitizace [°C] | Kalící prostředí | Teplota popouštění [°C] |
|--------------|-----|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| G22NiMoCr5-6 | I | 900-980 | Není předepsáno („kapalina“) | 560-610 |
| | II | | | 550-600 |

*Normalizace je pouze doporučena pro mohutné odlitky, ale podmínky nejsou specifikovány.

• Mechanické vlastnosti

Minimální mechanické vlastnosti specifikované normou SEW 520 jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti G22NiMoCr5-6 dle SEW 520 [2]

| | Typ | R _{p0,2} [MPa] | R _m [MPa] | A [%] | KV (20 °C) [J] | KV _{s=27} J=(T _i) [°C] |
|--------------|-----|-------------------------|----------------------|-------|----------------|---|
| G22NiMoCr5-6 | I | min. 825 | 930- 1080 | 10 | min. 50 | -50 |
| | II | min. 950 | 1050- 1200 | 10 | min. 40 | -30 |

3. Experimentální část

Experimentální část byla rozdělena do dvou částí, kde pro obě tyto části byly vyrobeny vzorky metodou vytavitelného modelu ve firmě Kdynium a.s. a následně tepelně zpracovány ve firmě CzechMetal (Olomouc). Vzorky byly odlity na otevřené elektrické indukční peci s neutrální vyzdívkou, doplňkovou technologií argonováním (eliminace vměstků ve výsledném materiálu) z velmi čisté počáteční vsázky finské firmy Outo Kumpu a s použitím dostupných legur. Výsledné chemické složení první a druhé tavby je uvedeno v Tabulce 4 a 5.

Tabulka 4: Chemické složení oceli G22NiMoCr5-6 - 1. tavba

| C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,24 | 0,48 | 0,94 | 0,013 | 0,005 |
| Cr [%] | Ni [%] | Mo [%] | Al [%] | Nb [%] |
| 1,01 | 1,23 | 0,52 | 0,017 | 0,02 |

Tabulka 5: Chemické složení oceli G22NiMoCr5-6 - 2. tavba

| C [%] | Si [%] | Mn [%] | P [%] | S [%] |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,21 | 0,4 | 0,95 | 0,013 | 0,006 |
| Cr [%] | Ni [%] | Mo [%] | Al [%] | Nb [%] |
| 0,96 | 1,13 | 0,55 | 0,09 | 0,02 |

V obou případech (1. i 2. tavby) bylo dodrženo chemické složení dle normy SEW 520 (Tabulka 1).

Jak již bylo zmíněno, experimentální část byla rozdělena na dvě části. První část je věnována vzorkům, které byly po odlití tepelně zpracovány zušlechtním. Druhá část je věnována vzorkům, které byly po odlití normalizačně žihány a následně zušlechtěny stejným způsobem, jako vzorky pro první část experimentu. Každá část experimentu byla rozdělena do 3 skupin vzorků podle teploty popouštění. Parametry tepelného zpracování jsou shrnuty v Tabulce 6.

Tabulka 6: Zvolené tepelné zpracování oceli G22NiMoCr5-6 pro jednotlivé části experimentu

| | Normalizace | Kalící teplota | Teploty popouštění | Chladící médium |
|--------|--------------|----------------|--------------------|-----------------|
| 1.část | Ne | 950 °C | 560 °C | Olej |
| | | | 580 °C | |
| 2.část | Ano (940 °C) | | 610 °C | |

Vzorky byly vyrobeny pro obě části k provedení tahové zkoušky, zkoušky rázem v ohybu, zkoušky tvrdosti a metalografické analýzy. Pro každou skupinu tepelného zpracování bylo vyrobeno 10 ks vzorků pro zkoušku tahem, 15 ks vzorků pro zkoušku rázem v ohybu a 10 ks vzorků pro měření tvrdosti (Obrázek 3). Metalografická analýza byla provedena na zkušebních tělesech pro zkoušku rázem v ohybu v příčném řezu.



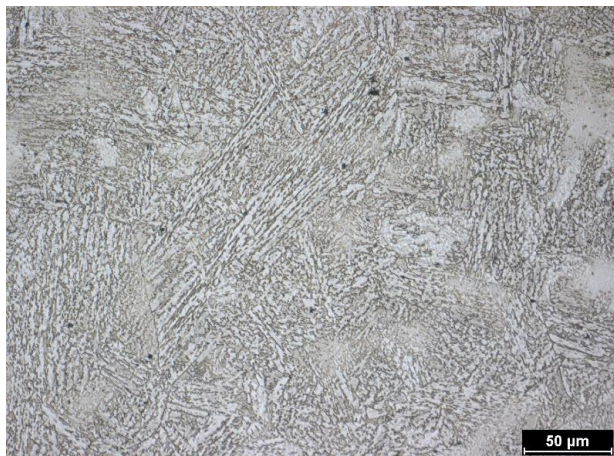
Obrázek 3: Vzorky pro mechanické zkoušky a metalografickou analýzu G22NiMoCr5-6

4. Výsledky a jejich diskuze

4.1. Analýza oceli G22NiMoCr5-6 po zušlechťení

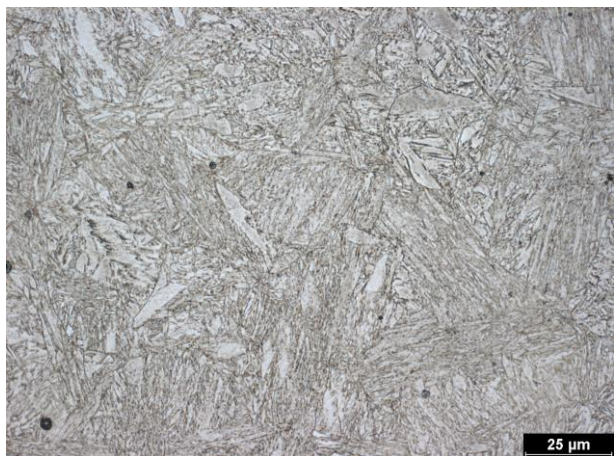
4.1.1 Metalografie

Výchozí stav materiálu G22NiMoCr5-6 pro první část experimentu je uveden na Obrázku 4.



Obrázek 4: Výchozí stav materiálu G22NiMoCr5-6 v litém stavu, leptáno (Nital) – 1.část

Struktura je tvořena hrubšími jehlicemi acikulárního feritu (proeutektoidní fáze), která vzniká mezi feritem a bainitem. Přítomnost této fáze lze vysvětlit rychlejším chladnutím malého vzorku po odlití.



Obrázek 5: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950 °C, popuštěno 580 °C, leptáno (Nital)

Struktura vzorků kalených z teploty 950 °C a popuštěných při teplotách 580 a 610 °C je na Obrázcích 5 a 6. Metalografická analýza vzorků s teplotou popuštění 560 °C nebyla provedena s ohledem na výsledek mechanických zkoušek (bude komentováno dále). Struktura je v obou případech tvořena sorbitem a dolním bainitem, lze očekávat malý podíl zbytkového austenitu, který však nelze světelnou mikroskopií patřičně identifikovat. V souladu s výchozí strukturou je i struktura po zušlechťování poměrně hrubá. Z porovnání Obrázku 5 a 6 je patrné, že popouštění při vyšší teplotě dle očekávání způsobilo větší rozpad martenzitu.



Obrázek 6: Struktura G22NiMoCr5-6, kaleno 950 °C, popuštěno 610 °C, leptáno (Nital)

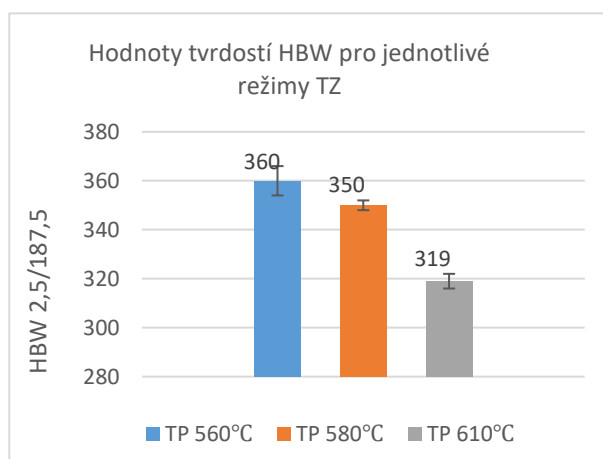
4.1.2. Zkouška tvrdosti

Pro zjištění tvrdosti materiálu G22NiMoCr5-6 byly použity dvě zkušební metody – dle Brinella a dle Rockwella stupnice C. Na každém vzorku bylo vždy provedeno 5 měření. Z těchto měření byla stanovena průměrná hodnota včetně směrodatné odchylky. Obecně německá norma SEW 520 hodnoty tvrdosti neuvádí, proto tyto hodnoty lze brát jako její doplnění.

Tvrdost výchozí stavu je 287 ± 5 HBW 2,5/187,5. Výsledky pro různé parametry tepelného zpracování jsou uvedeny v Tabulce 7 a graficky na Obrázku 7.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty tvrdostí G22NiMoCr5-6 – část 1

| TP | HBW 2,5/187,5 | HRC |
|--------|---------------|----------------|
| 560 °C | 360 ± 6 | $39 \pm 0,5$ |
| 580 °C | 350 ± 2 | $37,5 \pm 0,5$ |
| 610 °C | 319 ± 3 | $33,5 \pm 0,5$ |



Obrázek 7: Tvrdost G22NiMoCr5-6, kaleno z 950 °C a variantně popuštěno

Dle očekávání zvyšující se teplota popouštění (dále jen TP) způsobila u materiálu G22NiMoCr5-6 pokles tvrdosti. Obecně lze konstatovat, že směrodatné odchylky odpovídají přesností použitých metod měření. Je pa-

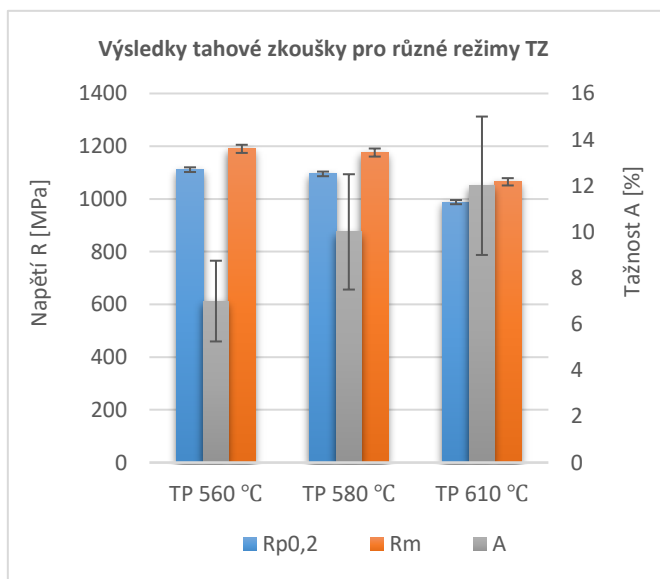
trné, že změna teploty popouštění z 560 °C na 580 °C způsobila minimální pokles tvrdosti. Naopak změna TP z 580 °C na 610 °C způsobila značně větší pokles tvrdosti.

4.1.3. Zkouška tahem

Byla provedena zkouška tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška byla provedena v laboratořích UMI ČVUT Fakulty strojní na Karlově náměstí v Praze pomocí univerzálního trhačícího stroje INSTRON 5582. Kompletní výsledky pro vzorky kalené z teploty 950 °C a popouštěné v rozmezí 560-610 °C jsou uvedeny v Tabulce 8 a graficky na Obrázku 8.

Tabulka 8: Výsledky ze zkoušky tahem – část 1

| | TP 560 °C | TP 580 °C | TP 610 °C |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| $R_{p0,2}$ [MPa] | 1111 ± 5 | 1095 ± 13 | 988 ± 5 |
| R_m [MPa] | 1190 ± 16 | 1176 ± 21 | 1065 ± 8 |
| A [%] | 7 ± 2 | 10 ± 2,5 | 12 ± 3 |



Obrázek 8: Graficky znázorněné výsledky zkoušky tahem – část 1

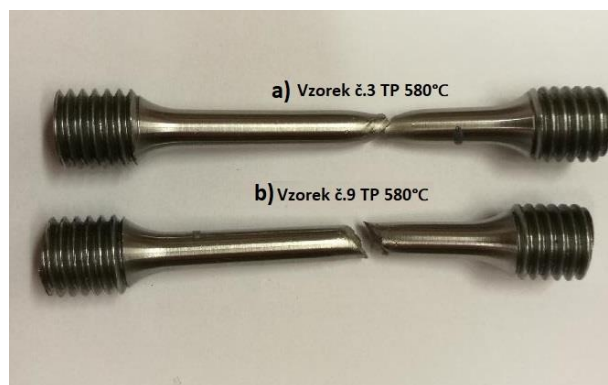
Vzhledem k dosaženým pevnostem jsou veškeré výsledky dále porovnávány s hodnotami pro typ II uvedeným v normě SEW 520 (Tabulka 3).

Při všech způsobech zušlechťení vzorků (bez normalizace) byly zjištěny vyšší meze kluzu, než je minimální hodnota udávaná v normě SEW 520 a meze pevnosti v rozmezí touto normou udávaném. Obecně lze tedy říci, že vzorky pevnostně vyhovely. Hodnoty tažnosti se oproti normě mírně liší. Pro teplotu popouštění 560 °C byla zjištěna nižší tažnost, pro teplotu popouštění 580 °C byla tažnost limitní a pro teplotu popouštění 610 °C byla tažnost vyhovující.

V souladu s měřením tvrdosti, pevnost oceli G22NiMoCr5-6 s rostoucí teplotou popouštění klesá. Zároveň ve shodě s výsledky měření tvrdosti je změna pevnostních charakteristik se změnou teploty popouštění

z 560 °C na 580 °C minimální. Zvýšení teploty popouštění na 610 °C se na pevnostních charakteristikách naopak projevuje výrazněji. Při nárůstu TP z 580 °C na 610 °C dochází k poklesu výsledné tvrdosti o 4 HRC a tomu odpovídá pokles pevnosti přibližně o 110 MPa. Pevnostně vzorky vykazovaly stabilní chování, čemuž odpovídá i směrodatná odchylka naměřených pevností.

Z hlediska tažnosti vzorky vykazovaly značný rozptyl hodnot, kterému odpovídají i směrodatné odchylky uvedené v Tabulce 8. Zároveň v souvislosti s většími hodnotami směrodatných odchylek tažností je třeba dodat, že vzorky prokazovaly během zatěžování různorodé lomové chování. Obrázek 9 dokumentuje, že vzorky po identickém tepelném zpracování vykazovaly odlišný charakter lomové plochy. Zatímco vzorek a) vykazuje tvorbu „krčku“ charakteristický pro tvárné porušení, lomová plocha vzorku b) svědčí o křehkolomovém chování.



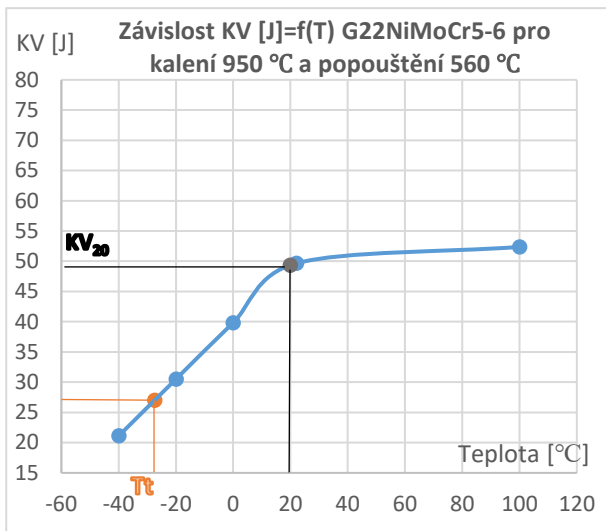
Obrázek 9: Porovnání vzhledu vzorků oceli po zkoušce tahem (oba vzorky po TP 580 °C) a) lom s tvorbou krčku b) lom bez tvorby krčku

Z rozdílného lomového chování a směrodatných odchylek tažností lze usuzovat, že neprovedená normalizace je možnou příčinou tohoto chování, kde nehomogenita materiálu způsobuje nestabilní chování všech vzorků.

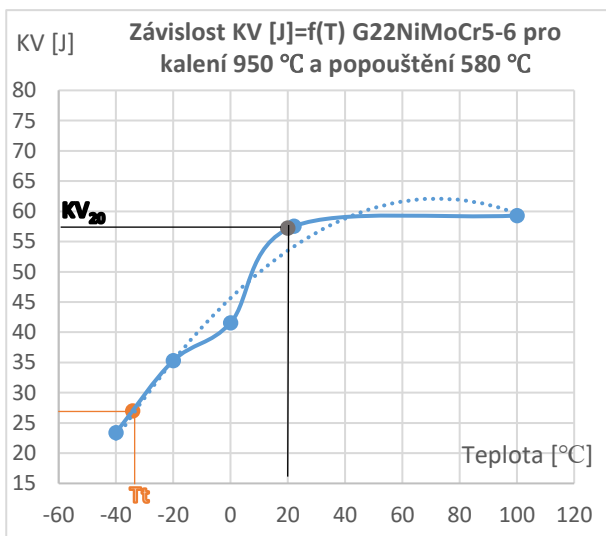
4.1.4. Zkouška rázem v ohybu

V experimentu byla použita zkouška rázem v ohybu dle Charpy (ČSN ISO 148). Byly použity vzorky s „V2“ vrubem. Zkouška byla provedena pro teploty -40 °C, -20 °C, 0 °C, 100 °C a pokojové teplotě (22,1 °C). Experiment byl proveden na zařízení PH 300/450-Charpy (300 J) v laboratořích UMI Fakulty strojní, ČVUT v Praze.

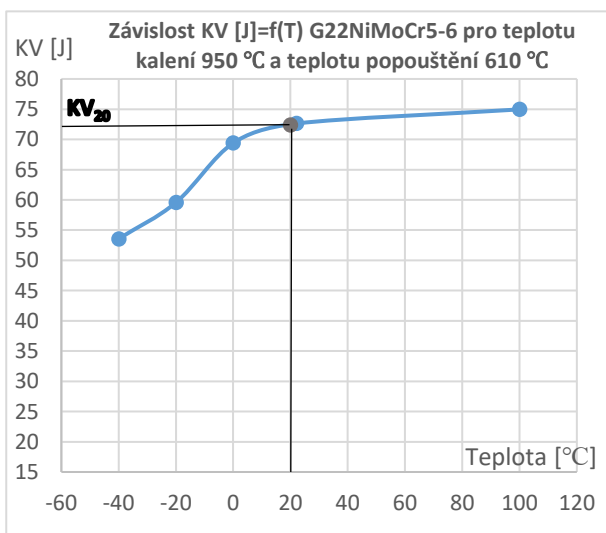
Norma SEW 520 pro tento materiál vyhodnocuje křehkolomové chování dvěma způsoby, jako nárazovou práci při 20 °C (KV_{20}) nebo teplotu při které byla dosažena nárazová práce $KV=27$ J (označení Tt). Výsledky hodnocení odolnosti proti křehkému porušení dle uvedených metodik jsou přehledně uvedeny v Tabulce 9 a dále jsou jednotlivé charakteristiky barevně označeny na Obrázcích 10-12.



Obrázek 10: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5 -6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 560 °C



Obrázek 11: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5 -6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 580 °C



Obrázek 12: KV [J]=f(T) G22NiMoCr5 -6 pro teplotu kalení 950 °C a teplotu popouštění 610 °C

Tabulka 9: Výsledky zkoušky rázem v ohybu dle Charpy –část 1

| Teplota pouštění | Teplota zkoušky [°C] | -40 | -20 | 0 | 22,1 | 100 |
|------------------|----------------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
| 560 °C | ØKV [J] | 21,1 ± 3 | 30,5 ± 6 | 39,8 ± 4 | 49,7 ± 7 | 52,4 ± 4 |
| 580 °C | | 23,4 ± 4 | 35,3 ± 7 | 41,6 ± 4 | 57,5 ± 9 | 59,3 ± 5 |
| 610 °C | | 53,5 ± 12 | 59,6 ± 1 | 69,4 ± 10 | 72,6 ± 4 | 75 ± 4 |

Z Obrázku 10 je patrné, že hodnoty nárazové práce v oblasti pod pokojovou teplotou klesají prakticky lineárně. Pokles teploty o 20 °C v této oblasti odpovídá zhruba poklesu nárazové práce o 10 J. Zároveň ve shodě s výsledky tažnosti lze říci, že materiál po tomto tepelném zpracování nevykazuje nejnižší nárazovou práci. Z porovnání dosažených výsledků s hodnotami uvedených v normě SEW 520 je možno říci, že zjištěná nárazová práce při 20 °C, je o 9,3 J vyšší než minimální předepsaná. Nárazové práce 27 J bylo dosaženo při teplotě o 2,6 °C vyšší, než udává norma.

Ze závislosti na Obrázku 11 je patrné, že propojením hodnot vyhlazenými spojnicemi pomocí softwaru Microsoft Excel nebyl dosažen předpokládaný průběh závislosti, a to zejména v oblasti -20 °C až 20 °C. Nicméně ani proložení polynomem 3. stupně (čárkovaně) nevedlo k uspokojivému výsledku. Z tohoto důvodu by bylo vhodné ověřit hodnotu nárazové práce pro teplotu zkoušky 0 °C. Lze předpokládat, že při této teplotě by hodnota nárazové práce mohla být vyšší. Hodnota nárazové práce KV₂₀ dosáhla vyšší hodnoty, než je specifikovaná v normě SEW 520 zhruba o 17 J. Nárazové práce 27 J bylo dosaženo při teplotě o 4 °C nižší, než udává norma [2].

Průběh závislosti na Obrázku 12 odpovídá výsledkům zkoušky tahem i měření tvrdosti. Hodnoty nárazové práce jsou výrazně vyšší než po popouštění při 560 °C a 580 °C. Nárazové práce 27 J v rozsahu použitých teplot zkoušky rázem v ohybu nebylo vůbec dosaženo, ačkoliv pevnost odpovídá dolní hranici hodnot uvedených v normě SEW 520. Kompletní vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu je zobrazeno v Tabulce 10.

Tabulka 10: Vyhodnocení odolnosti proti křehkému porušení

| Hodnocení odolnosti proti křehkému porušení G22NiMoCr5-6 | TP [°C] | KV (20°C) [J] | Tt [°C] |
|--|---------|---------------|---------|
| | 560 | 49,3 | -27,4 |
| | 580 | 57,2 | -34,2 |
| | 610 | 72,4 | - |

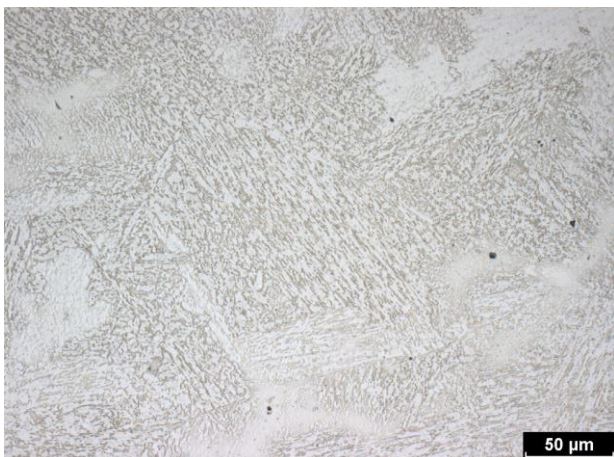
Jak již bylo uvedeno, dle očekávání s narůstající TP (560 °C až 610 °C) po kalení z teploty 950 °C dochází u oceli G22NiMoCr5-6 odlité metodou vytavitelného modelu k výraznému nárůstu houževnatosti. Z průběhu měření a vyhodnocení směrodatných odchylek (Tabulka 9) je evidentní, že některé vzorky se projevily nestejnorodě. Důvod naznačily již předchozí mechanické

zkoušky. Nehomogenita materiálu s nezařazením normalizačního žíhání před zušlechťováním je pravděpodobnou příčinou vyšší odchylek u nárazové práce.

4.2. Analýza oceli G22NiMoCr5-6 po normalizaci a zušlechťení

4.2.1. Metalografie

Jak již bylo zmíněno, druhá část experimentu je věnována vzorkům se zařazením normalizačního žíhání před samotné zušlechťení. Před vlastním tepelným zpracováním byla provedena analýza litého stavu materiálu (Obrázek 13). Struktura odpovídá výchozí struktuře (Obrázek 4) v první části experimentu, je tvořena hrubšími jehlicemi acikulárního feritu. Na metalografickém snímku lze také pozorovat malé póry, které běžně vznikají při výrobě odlitků. Dále byla provedena analýza struktury po normalizačním žíhání pro různé teploty (dle normy SEW 520), které jsou předepsány v rozmezí 900 °C až 980 °C. Rozmezí bylo pokryto volbou tří zkušebních teplot 900, 940 a 980 °C. Analýza byla provedena za účelem zvolení vhodné normalizace pro další zpracování zkušebních vzorků a doplněna o měření tvrdosti (Tabulka 11). Struktury po normalizaci jsou na Obrázku 14-16.

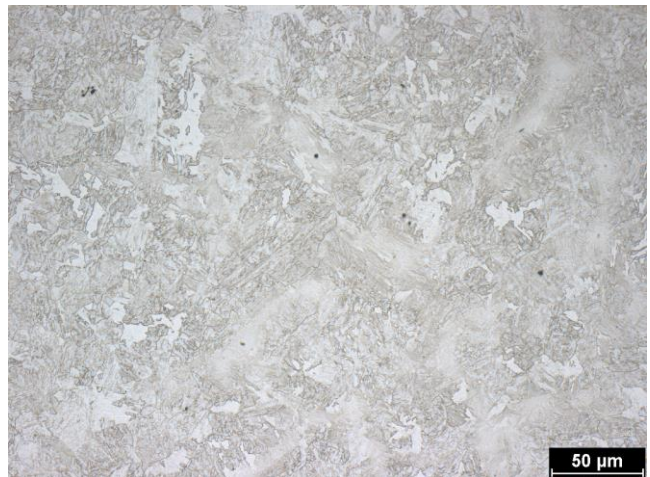


Obrázek 13: Výchozí stav materiálu G22NiMoCr5-6 v litém stavu, leptáno (Nital) – 2.část

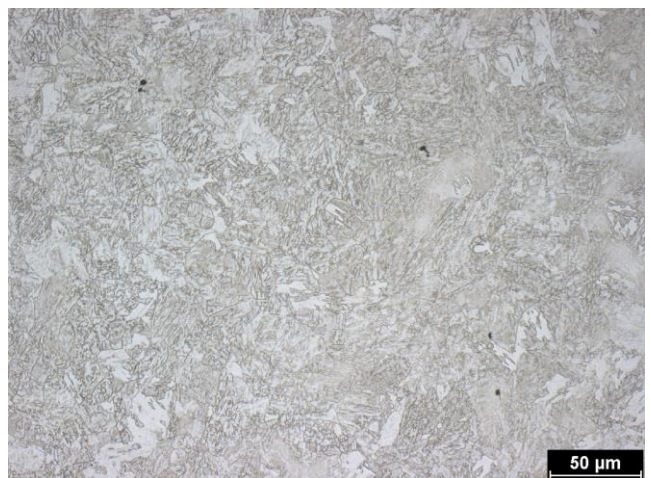
Tabulka 11: Naměřené hodnoty tvrdosti pro litý a normalizačně žíhaný stav G22NiMoCr5-6

| Stav | Litý | Normalizace 900 °C | Normalizace 940 °C | Normalizace 980 °C |
|---------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| HBW 2,5/187,5 | 270 ± 7 | 286 ± 5 | 283 ± 1 | 275 ± 3 |
| HRC | 27,5 ± 1 | 30,5 ± 1 | 28,5 ± 1 | 28 ± 0,5 |

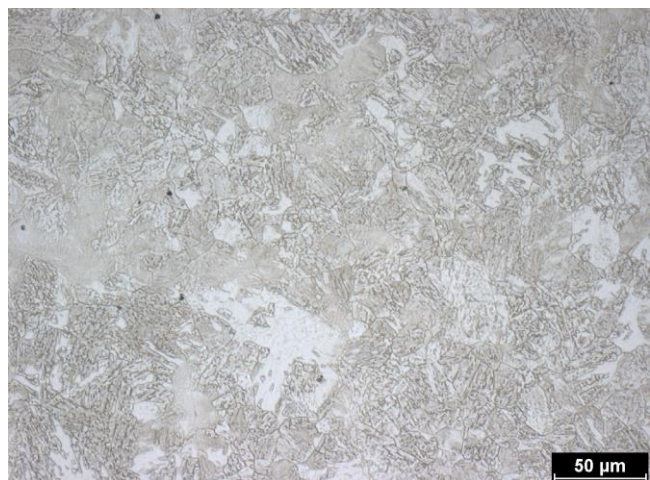
V porovnání s tvrdostí litého stavu v první části experimentu je hodnota nižší o 17 HBW 2,5/187,5.



Obrázek 14: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno, teplota austenitizace 900 °C, leptáno (Nital)



Obrázek 15: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno, teplota austenitizace 940 °C, leptáno (Nital)

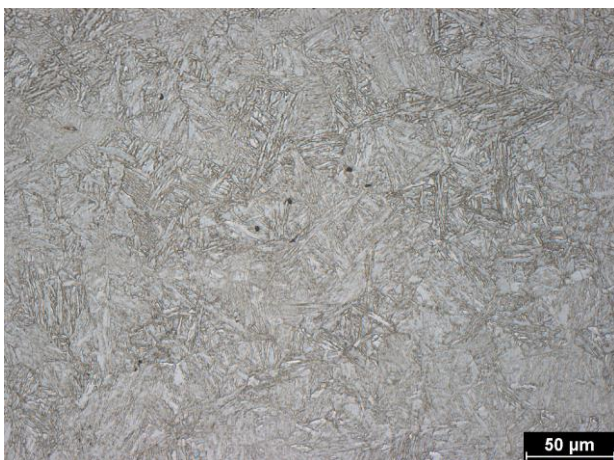


Obrázek 16: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno, teplota austenitizace 980 °C, leptáno (Nital)

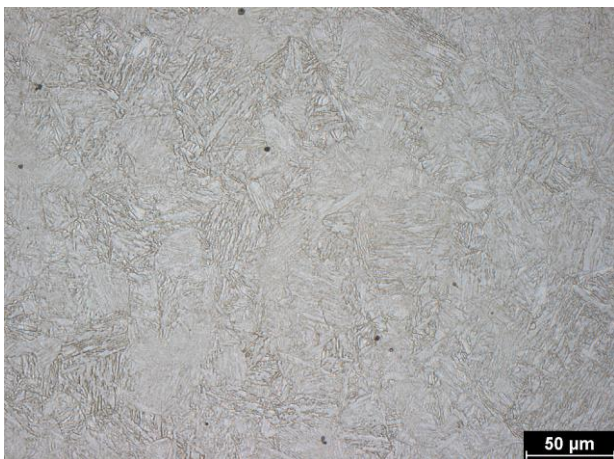
Ve všech případech provedené normalizace je struktura tvořena směsí acikulárního feritu, feritu a perlitu. Pro lepší analýzu fázového složení by bylo vhodné použití elektronovou mikroskopií. Autor si je vědom částečně nedoleptaných míst zapříčenených jeho nedostatečnou zkušeností

s přípravou vzorků. Tvrdost s rostoucí teplotou normalizačního žihání dle očekávání klesá, v souladu s tím lze očekávat hrubší strukturu. Tato skutečnost by měla být potvrzena v další práci, kdy bude lépe zvládnuta metodika leptání vzorků.

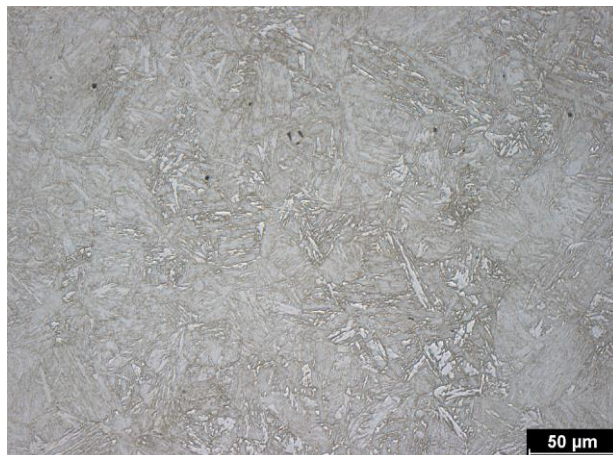
Po zhodnocení tvrdostí a struktury byla zvolena jako nejvhodnější normalizace při teplotě normalizačního žihání 940 °C, která na metalografii prokázala největší homogenitu jemnozrnné struktury. Následující vzorky pro mechanické zkoušky byly normalizačně žihány při 940 °C, kaleny z teploty 950 °C a následně variabilně popuštěny jako v případě první části experimentu. Metalografické snímky těchto stavů jsou na Obrázku 17 až 19.



Obrázek 17: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žiháno při teplotě 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při teplotě 560 °C, leptáno (Nital)



Obrázek 18: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žiháno při teplotě 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při teplotě 580 °C, leptáno (Nital)



Obrázek 19: Struktura G22NiMoCr5-6, normalizačně žiháno při teplotě 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při teplotě 610 °C, leptáno (Nital)

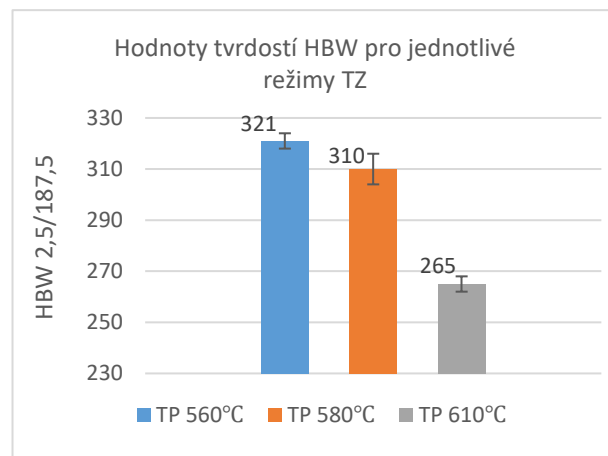
Z Obrázků 17-19 je patrné, že struktura je tvořena směsí sorbitu, bainitu a lze očekávat určitý podíl zbytkového austenitu. Zastoupení jednotlivých fází by bylo možné určit např. elektronovou mikroskopií. S rostoucí teplotou popuštění dochází k většímu rozpadu martenzitu. Z porovnání Obrázků 5 a 18 i 6 a 19 je možno konstatovat, že v souladu s teoretickými předpoklady jsou struktury, pokud u nich bylo použito normalizace před zušlechtním, jemnější. Pro potvrzení této skutečnosti byla stanovena velikost zrna porovnávaných struktur, a to průřezkovou metodou [4]. Z těchto měření vyplývá, že průměrná velikost zrna u vzorků s aplikací normalizačního žihání před vlastním zušlechtním je v průměru o 36 % nižší než u struktur bez aplikace normalizačního žihání. Metalografickou analýzu s TP 560 °C z Obrázku 17 nelze porovnat, protože nebyla v první části vyhodnocována.

4.2.2. Měření tvrdosti

Metodika měření tvrdosti z první části experimentu byla zachována (kapitola 4.1.2.). Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 12 a graficky znázorněny na Obrázku 20.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty tvrdostí G22NiMoCr5-6 – část 2

| TP | HBW 2,5/187,5 | HRC |
|--------|---------------|------------|
| 560 °C | 321 ± 3 | 32,5 ± 0,5 |
| 580 °C | 310 ± 6 | 31 ± 1 |
| 610 °C | 265 ± 3 | 24,5 ± 0,5 |



Obrázek 20: Tvrdost G22NiMoCr5-6, normalizačně žiháno 940 °C, kaleno z 950 °C a variantně popuštěno

Z průběhu naměřených hodnot je evidentní, že ve shodě s první částí experimentu (kapitola 4.1.2.) dochází u materiálu G22NiMoCr5-6 s rostoucí teplotou popouštění k poklesu tvrdosti. Tak jako u vzorků bez normalizačního žíhání dochází k nejvýraznějšímu poklesu tvrdosti při změně TP 580 °C na 610 °C. Z porovnání Tabulky 7 a 12 vyplývá, že aplikace normalizačního žíhání před samotným zušlechtním obecně způsobuje u materiálu G22NiMoCr5-6 pokles tvrdosti o minimálně 40 HBW 2,5/187,5. Tato skutečnost však neodpovídá teoretickým předpokladům a bude třeba ji v dalších experimentech ověřit.

4.2.3 Zkouška tahem

Metodika provedené zkoušky tahem byla zachována z první části experimentu pro vzorky bez normalizačního žíhání (kapitola 4.1.3. – Zkouška tahem).

Výsledky druhé části experimentu včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v Tabulce 13 a graficky na Obrázku 21.

Tabulka 13: Výsledky ze zkoušky tahem – část 2

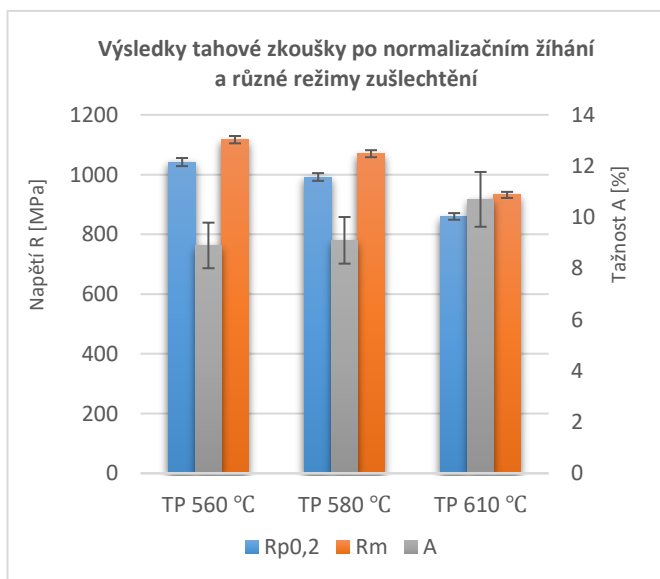
| | TP 560 °C | TP 580 °C | TP 610 °C |
|------------------|-----------|-----------|------------|
| $R_{p0,2}$ [MPa] | 1042 ± 18 | 992 ± 12 | 860 ± 5 |
| R_m [MPa] | 1117 ± 13 | 1070 ± 12 | 932 ± 8 |
| A [%] | 8,8 ± 0,9 | 9 ± 0,8 | 10,7 ± 1,3 |

experimentu lépe odpovídají typu materiálu I (Tabulka 3) budou s těmito hodnotami dále porovnávány.

Z hodnot uvedených v Tabulce 13 lze říci, že u všech tří způsobů tepelného zpracování bylo dosaženo minimální požadované hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a také bylo dodrženo rozmezí pro hodnotu meze pevnosti R_m uvedené normou SEW 520 (viz. Tabulka 3). Ve shodě s měřením tvrdosti pevnost materiálu s rostoucí teplotou popouštění klesá. Při nejvyšší teplotě popouštění dosahuje mez pevnosti dolní hranice stanovené normou. V oblasti tažnosti vyhověly normou předepsané hodnotě pouze vzorky s TP 610 °C. Ostatní vzorky s nižší TP hodnotou tažnosti nevyhověly.



Obrázek 22: Houževnaté porušení všech vzorků pro zkoušku tahem s použitím normalizačního žíhání a TP 560 °C



Obrázek 21: Graficky znázorněné výsledky zkoušky tahem – část 2

Ačkoliv je struktura po normalizaci a zušlechtnění jemnější než v případě pouze zušlechtněné struktury, pevnostní charakteristiky jsou mírně nižší. Tažnost vzorků druhé experimentální části se pro všechny TP blíží předepsané hodnotě normou SEW 520 (viz. Tabulka 3). V každém případě u hodnot tažnosti došlo po použití normalizace k výraznému poklesu směrodatné odchylky. Této skutečnosti odpovídá i podobný vzhled porušení zkušebních tyčí při zkoušce tahem (Obrázek 22). Výsledky pro druhou část

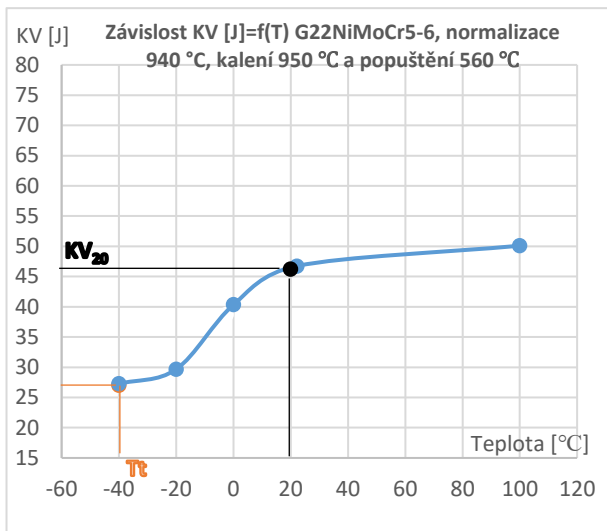
Na základě naměřených hodnot se autor domnívá, že rozdělení materiálu ve zmíněné normě (typ I a II) je uvedeno z důvodu možnosti aplikace normalizačního žíhání a materiálové charakteristiky lze tepelným zpracováním cílit na typ I nebo II. Úvaha bude dále komentována společně s výsledky zkoušky rázem v ohybu, protože zde norma také uvádí rozdílné charakteristiky. Úplným závěrem vyhodnocen. Je třeba konstatovat, že uvedeným tepelným zpracováním (Tabulka 6 – 2.část) bylo kompletně dosaženo požadovaných mechanických vlastností normou SEW 520 pouze u vzorků s TP 610 °C.

4.2.4. Zkouška rázem v ohybu

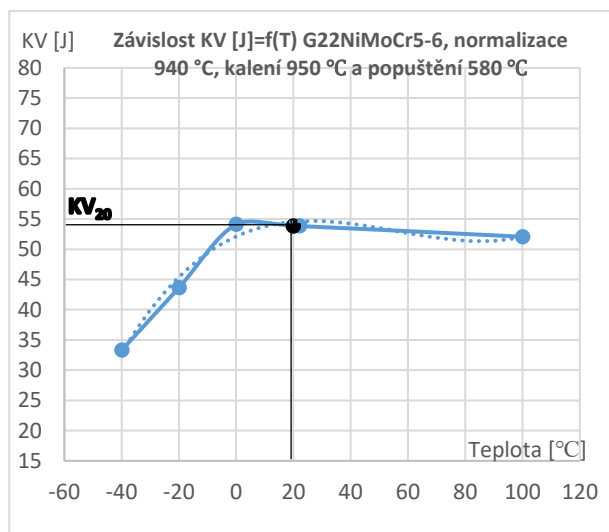
Metodika zkoušky rázem v ohybu byla zachována z první části experimentu (vzorky bez normalizačního žíhání - kapitola 4.1.4. – Zkouška rázem v ohybu). Výsledky získané z druhé části experimentu jsou uvedeny v Tabulce 14 a graficky na Obrázcích 23 – 25.

Tabulka 14: Výsledky zkoušky rázem v ohybu dle Charpy – část 2

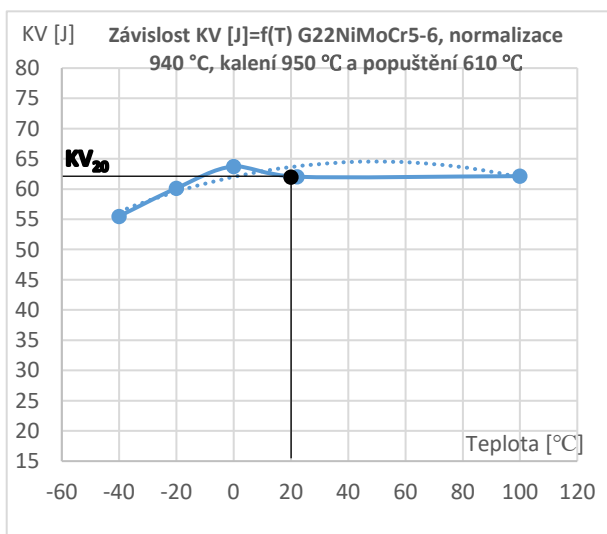
| Teplota pouštění | Teplota zkoušky [°C] | -40 | -20 | 0 | 22,1 | 100 |
|------------------|----------------------|------------|------------|----------|------------|------------|
| 560 °C | ØKV [J] | 27,3 ± 2,5 | 29,7 ± 2 | 40,3 ± 2 | 46,7 ± 2 | 50,1 ± 2,5 |
| | | 33,3 ± 2,5 | 43,6 ± 2 | 54 ± 0,1 | 53,8 ± 2,5 | 52 ± 1,5 |
| 55,5 ± 2 | | 60,1 ± 1,5 | 63,8 ± 2,5 | 62 ± 0,5 | 62,1 ± 0,5 | |



Obrázek 23: Závislost KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno při 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při 560 °C



Obrázek 24: Závislost KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno při 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při 580 °C



Obrázek 25: Závislost KV [J]=f(T) G22NiMoCr5-6, normalizačně žíháno při 940 °C, kaleno z teploty 950 °C a popuštěno při 610 °C

Z Obrázku 23 je patrné, že vzorky normalizačně žíhané a zušlechtněné s TP 560 °C se při pokojové a vyšších teplotách chovají houževnatě, kde do hodnoty 20 °C dochází zejména k mírnému lineárnímu poklesu nárazové práce (pokles teploty o 40 °C odpovídá 4 J). Při nižších teplotách dochází k rychlejšímu poklesu nárazové práce, který je nejvýraznější v rozmezí teplot 20 °C a -20 °C. Změna této teploty o 40 °C odpovídá poklesu nárazové práce zhruba o 15 J. V porovnání se vzorky z první části experimentu (Tabulka 9) byla naměřena průměrná nárazová práce nepatrně vyšší.

Ze závislosti na Obrázku 24 lze říci, že nárazová práce při teplotách vyšších než 0 °C je téměř konstantní. K poklesu dochází až v záporných teplotách, kde změna teploty o 20 °C odpovídá zhruba 10 J. V porovnání se vzorky z první části experimentu (Tabulka 9) byly v záporných teplotách naměřeny hodnoty zhruba o 10 J vyšší, kdežto v kladných teplotách zhruba o 5 J nižší. Celkové grafické vyhodnocení na Obrázku 24 bylo pro lepší znázornění proloženo polynomem třetího stupně (tečkovaně), který lépe kopíruje předpokládaný tvar přechodové křivky.

Normalizačně žíhané vzorky, zušlechtněné s TP 610 °C se dle očekávání projevovaly nejhouževnatěji. Závislost na Obrázku 25 ukazuje, že pro kladné teploty je průběh nárazové práce téměř konstantní. K mírnému poklesu dochází až v záporných teplotách. Zároveň je třeba podotknout, že rozdíl nárazové práce mezi maximální a minimální zkušební teplotou (140 °C) je 7 J. Z tohoto faktu lze usuzovat, že se materiál při tomto tepelném zpracování chová v rozmezí teplot -40 °C a 100 °C houževnatě. Grafická závislost na Obrázku 25 byla opětovně proložena polynomem za účelem lepší aproximace.

Komplexní zhodnocení zkoušky rázem v ohybu je přehledně uvedeno v Tabulce 15. Z důvodů uvedených v kapitole 4.2.3 budou dále hodnoty z Tabulky 14 porovnávány s typem materiálu II (viz. Tabulka 3).

Tabulka 15: Vyhodnocení odolnosti proti křehkému porušení – část 2

| Hodnocení odolnosti proti křehkému porušení | TP [°C] | KV (20°C) [J] | Tt ₁ [°C] |
|---|---------|---------------|----------------------|
| | 560 | 46,2 | -40 |
| | 580 | 53,8 | - |
| | 610 | 62 | - |

Dle očekávání odolnost proti křehkému porušení s rostoucí TP u normalizačně žíhaného a zušlechtněného materiálu G22NiMoCr5-6 roste. U vzorků s TP 560 °C lze říci, že hodnoty nevyhovují minimálním požadavkům normy SEW 520 (materiál typ II) jak v parametru přechodové teploty T_t, tak i v hodnotě nárazové práce pro 20 °C. Vzorky s TP 580 °C a 610 °C lze z hlediska KV (20 °C) považovat za vyhovující. Z hlediska přechodové teploty T_t lze s jistotou předpokládat, že vzorky s TP 610 °C by vyhověly i v tomto parametru, kde norma SEW 520 požaduje hodnotu T_t = -50 °C. U vzorků s TP 580 °C (i 610 °C) nebyla nárazová práce 27 J vůbec naměřena.

Obecně z porovnání naměřených hodnot první a druhé části experimentu (Tabulka 9 a 14) a v souladu s hodnotami tažnosti lze říct, že vlivem zařazení normalizačního žíhání dochází ke značnému sjednocení hodnot nárazové práce, což dokazuje pokles směrodatných odchylek. Například pro zušlechtnuté vzorky s TP 610 °C činila směrodatná odchylka zhruba 22,5 % naměřené hodnoty (pro teplotu zkoušky -40 °C). V případě zařazení normalizačního žíhání před zušlechtnutím tvoří odchylka zhruba 3,5 % naměřené hodnoty. Dále z porovnání první a druhé části experimentu (Tabulka 10 a 15) je možné říct, že vzorky s použitím normalizačního žíhání vykazují značně lepší odolnost proti křehkému porušení, a to zejména v oblasti přechodových teplot. V souladu s metalografickou analýzou u vzorků s normalizačním žíháním je struktura více homogenní a jemnozrnější, což má za následek i pokles směrodatných odchylek ve výsledcích tažnosti a nárazové práce (vzorky se chovají stejnorodě). Výsledky budou kompletně komentovány společně s ostatními výsledky experimentální části v následující kapitole.

4.3. Zhodnocení výsledků

Souhrn výsledků ze všech částí experimentu je přehledně uveden v Tabulce 16. Společně porovnané hodnoty jsou barevně odděleny (oranžová, šedá).

Tabulka 16: Souhrn výsledků experimentální části věnované analýze materiálu G22NiMoCr5-6

| | Typ | Tvrdość HBW 2,5/187,5 | Rp0,2 [MPa] | Rm [MPa] | A [%] | KV20 [J] | Tt [°C] |
|--|-----------------|-----------------------------|----------------|---------------|------------------|-------------|---------|
| Norma SEW 520 | Typ I | - | min. 825 | 930- 1080 | 10 | min. 50 | -50 |
| | Typ II | - | min. 950 | 1050- 1200 | 10 | min. 40 | -30 |
| Kalení (950 °C) + Popo- uštění | TP 560 °C | 360 ± 6 | 1111 ± 5 | 1190 ± 16 | 7 ± 2 | 49,3 | -27,4 |
| | TP 580 °C | 350 ± 2 | 1095 ± 13 | 1176 ± 21 | 10 ± 2,5 | 57,2 | -34,2 |
| | TP 610 °C | 319 ± 3 | 988 ± 5 | 1065 ± 8 | 12 ± 3 | 72,4 | <-40 °C |
| Norma- lizační žíhání (940 °C) + Kalení (950 °C) + Popo- uštění | TP 560 °C | 321 ± 3 | 1042 ± 18 | 1117 ± 13 | 8,8 ± 0,9 | 46,2 | -40 °C |
| | TP 580 °C | 310 ± 6 | 992 ± 12 | 1070 ± 12 | 9 ± 0,8 | 53,8 | <-40 °C |
| | TP 610 °C | 265 ± 3 | 860 ± 5 | 932 ± 8 | 10,7 ± 1,3 | 62 | <-40 °C |

Z Tabulky 16 je patrné, že tvrdost materiálu G22NiMoCr5-6 může být v závislosti na způsobu tepelného zpracování volena v rozmezí 265 až 360 HBW 2,5/187,5. Při zařazení normalizačního žíhání dochází u sledovaného materiálu k poklesu tvrdosti vůči pouze zušlechtnutému, a to alespoň o 40 HBW 2,5/187,5. Tvrdost není německou normou SEW 520 definována, proto nelze tuto hodnotu oficiálně porovnat.

Hlavním výsledkem zkoušky tahem je, že vzhledem normě SEW 520 pevnostně vyhověly všechny vzorky.

Z pohledu tažnosti se vzorky bez normalizačního žíhání chovaly nesouhlasně, což se také projevilo na vyšších hodnotách směrodatných odchylek. U vzorků s normalizačním žíháním došlo ke sjednocení hodnot a směrodatné odchylky výrazně klesají. Závěrem tahové zkoušky lze tedy říct, že nezávisle na způsobu tepelného zpracování s použitím TP 560 °C nelze zajistit požadovanou tažnost materiálu G22NiMoCr5-6. Pro ostatní TP tuto hodnotu zaručit lze, ovšem je třeba zvážit aplikaci normalizačního žíhání před vlastní zušlechtnutím zejména v závislosti na aplikačních požadavcích.

Provedení zkoušky rázem v ohybu potvrdilo, že při zařazení normalizačního žíhání do procesu tepelného zpracování materiálu G22NiMoCr5-6 dochází k výraznému růstu odolnosti proti křehkému porušení, a to i v záporných teplotách. Měření prokázalo, že použitím TP 560 °C po zušlechtnutí (případně normalizaci) nelze dosáhnout požadovaných parametrů. Ostatní vzorky (s TP 580 a 610 °C) nezávisle na způsobu tepelného zpracování vyhověly požadovaným hodnotám normy SEW 520, ačkoliv nebyla nárazová práce 27 J vůbec naměřena. V další práci by bylo vhodné ověřit hodnotu nárazové práce při -50 °C pro vzorky normalizované a zušlechtnuté s TP 580 °C.

Z výsledků experimentální části (Tabulka 16) lze usuzovat, že rozdělení materiálu G22NiMoCr5-6 v normě SEW 520 na typ I a II je cíleno podle varianty tepelného zpracování s použitím normalizačního žíhání (typ I) a varianty bez něj (typ II). Dále je možné se domnívat, že např. jiná volba kalící teploty by mohla případně variabilitu dosažitelných vlastností ještě rozšířit.

5. Závěr

Byla provedena analýza a hodnocení struktury, mechanických vlastností oceli na odlitky G22NiMoCr5-6 v závislosti na parametrech zušlechťování a vlivu normalizačního žíhání zařazeného před zušlechťování s tím, že tento způsob TZ není v dostupné normě exaktně specifikován. Z provedené analýzy lze konstatovat, že:

- 1) Metalografická analýza prokázala, že ocel G22NiMoCr5-6 je po odlití metodou vytavitelného modelu tvořena hrubšími jehlicemi acikulárního feritu.

Po normalizačním žíhání tvořena jehlicemi acikulárního feritu, feritu a perlitu. Normalizační žíhání dle očekávání způsobuje zjemnění původního austenitického zrna i následně zušlechtěné struktury (zhruba o 36 %).

Struktura po zušlechtění v obou případech je tvořena směsí sorbitu, bainitu a určitým podílem zbytkového austenitu, který nelze světelnou mikroskopií identifikovat.

- 2) Byly zjištěny dosud nepublikované hodnoty tvrdosti v závislosti na parametrech tepelného zpracování.
- 3) Tvrdosti po zařazení normalizačního žíhání před zušlechtění jsou proti teoretickým předpokladům nižší než ve stavu pouze zušlechtěném. Tuto skutečnost by bylo třeba ověřit u vzorků stejné tavby a v rámci jednoho tepelného zpracování.
- 4) Po všech použitých režimech tepelného zpracování byly splněny pevnostní charakteristiky předepsané normou SEW 520.
- 5) Normalizační žíhání před zušlechtěním jednoznačně snižuje směrodatnou odchylku u hodnot tažností a nárazové práce.
- 6) Lze předpokládat, že rozdělení sledovaného materiálu dle normy na Typ I a II souvisí se zařazením normalizačního žíhání do tepelného zpracování.
- 7) Typ I je případem pouze zušlechtěného materiálu. Typ II je materiálem se zařazením normalizačního žíhání do cyklu tepelného zpracování.
- 8) V případě použití teploty popouštění 560 °C pro typ I a II nebyly splněny předepsané hodnoty tažností a odolnosti proti křehkému porušení ze zkoušky rázem v ohybu.
- 9) V další práci by bylo vhodné doplnit zkoušku rázem v ohybu při teplotách nižších než -40 °C
- 10) Cíle práce byly splněny.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce docentce Janě Sobotové za rady, cenné zkušenosti a zejména čas, který mi byla ochotna věnovat. Dále bych rád poděkoval firmě Kdynium a.s. za financování výroby vzorků. Firmě CzechMetal Olomouc (speciálně Ing. Martinu Kuříkovi) děkuji za provedení tepelného zpracování a Ústavu materiálového inženýrství FS ČVUT za poskytnutí laboratoří (speciálně Ing. Janu Krčilovi za jeho praktické rady). V neposlední řadě děkuji své rodině za veškerou podporu nejen během psaní této práce, ale v celém studiu.

Seznam symbolů

| | |
|------------|---|
| KV_{20} | hodnota nárazové práce pro 20 °C [J] |
| R_m | mez pevnosti [MPa] |
| $R_{p0,2}$ | smluvní mez kluzu [MPa] |
| T_T | přechodová teplota pro $KV = 27$ J [°C] |
| °C | stupeň celsia |
| ČR | Česká republika |
| ČSN | česká státní norma |
| ČVUT | České vysoké učení technické |
| A | tažnost [%] |
| Al | hliník |
| C | uhlík |
| Cr | chrom |
| Cu | měď |
| EN | evropská norma |
| HBW | tvrdost dle Brinella [N/mm ²] |
| HRC | tvrdost dle Rockwella stupnice C [N/mm ²] |
| ISO | mezinárodní organizace pro normalizaci |
| J | joule [N.m] |
| KV | nárazová práce [J] |
| MPa | megapascal [N/mm ²] |
| Mn | mangan |
| Mo | molybden |
| Nb | niob |
| Ni | nikl |
| P | fosfor |
| S | síra |
| SEW | označení německé normy |
| Si | křemík |
| TP | teplota popouštění [°C] |
| TZ | tepelné zpracování [°C] |
| V_2 | označení vrubu na zkušební tělese (2 mm) |
| a. s. | akciová společnost |

Literatura

- [1] HERMAN, Aleš. Lítí na vytavitelný model. In: *Fs.cvut.cz*. b.r., s. 1-30. Dostupné také z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
- [2] *SEW 520*. Hochfester Stahlguss mit guter Schweisseignung. Dusseldorf: Verlag Stahleisen, 1996.
- [3] UNDERGROUND PRODUCTION – Wilhelm Löbbecke and Konrad Grebe. In: *International Mining Technology Hall*

of Fame [online]. Lower Kings Road, Berkhamsted, Hertfordshire HP4 2AF, England, UK: International Mining Technology Hall of Fame, 2013 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.im-halloffame.com/underground-production-wilhelm-lobbe-and-konrad-grebe/>

- [4] SOBOTOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.