

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**

**Studium faktorů ovlivňujících odolnost proti opotřebení  
kovových materiálů**

**KATEDRA MATERIÁLU A STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

Doktorská disertační práce

**Ing. Jiří Cieslar**

2016

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Milana Brožka, CSc. a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tiskárenská a elektronická verze práce se doslovně shodují.

Ing. Jiří Cieslar

Podpis

Datum

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za odborné vedení a cenné rady v průběhu zpracování této práce. Také bych rád poděkoval celému kolektivu z Katedry materiálu a strojírenské technologie v rámci doktorského studia za profesionální přístup a cenné rady.

Na tomto místě bych rád také poděkoval všem, kteří mně v této práci podpořili a inspirovali. Jmenovitě mým lektorům P. Mařánkovi, Ing. M. Škeříkovi, Ph.D., Ing. V. Jandurovi, Ph.D., Ing. Z. Zavadilovi (ATG) za velice inspirativní konzultace v oblasti materiálového inženýrství; dále celému kolektivu FS ČVUT v Praze především doc. L. Kolaříkovi, Ph.D. a Ing. B. Bednářovi, CSc., za cenné připomínky a pomoc z oblasti výroby speciálních litin; J. Skývovi (ČKD) za cenné konzultace z oblasti výroby litin a přípravy cenové nabídky; Ing. A. Mlíchovi, Ph.D. (Strojon), za zpracování svařovacích postupů a technologický dozor během svařování; Ing. J. Vyskočilovi (HVL Plasma) za poskytnutí technického vybavení z oblasti mikroskopického zkoumání materiálů; Ing. M. Štefloví (AERO Vodochody AEROPSACE) za odborné poznatky z oblasti zkoušení jednotlivých NDT metod; Z. Hospodkovi (Latecore Czech Republic) za poskytnutí a zpracování vzorků pro experimentální zkoušení; doc. Ing. R. Chotěborskému, Ph.D. (ČZU) za konzultace a pomoc z oblasti metalografie a statistické analýzi dat, pomoc při získání nových zkušebních vzorků a cenné připomínky k práci; M. Rinágelovi (ŠZP Lány) za poskytnutí technického vybavení pro provozní zkoušky, Ing. V. Bízkovi, CSc. za konzultace při hodnocení snímků z elektronového mikroskopu, Ing. K. Kreislové, Ph.D. za konzultace z oblasti metalografie (SVÚOM).

Na tomto místě bych také rád poděkoval celé mé rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

## Abstrakt

Disertační práce se zabývá vhodným chemickým složením slitin železa se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení. Za účelem experimentálních ověření byly vyrobeny unikátní sady slitin s přesně odstupňovaným chemickým složením. V laboratorních podmínkách bylo následně studováno jejich chování v definovaném abrazivním prostředí. Odolnost proti opotřebení byla zjišťována na přístroji s pevně vázanými částicemi. Získané výsledky byly vždy doplněny o závěry vyplývající ze zkoumání struktury materiálu. Získané výsledky byly srovnány s výsledky, kterých dosáhly komerčně dostupné návarové materiály, určené pro použití v abrazivním prostředí. Tyto materiály byly podrobeny shodným laboratorním zkouškám a dále byly jejich vlastnosti určovány v provozních podmínkách.

Z práce vyplývají nové poznatky o vztahu tvrdosti a struktury materiálu ve vztahu k jeho odolnosti proti opotřebení. Výsledky také vypovídají o míře, do jaké hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřebení stanovené v laboratorních podmínkách odpovídají hodnotám stanovených v provozu, opět s přihlédnutím k tvrdosti a struktuře daného materiálu.

V závěru práce jsou získané poznatky aplikovány na konkrétní aplikaci – životnost plužních ostří. Na základě poznatků je argumentován vhodný přístup k renovaci ostří a dále je navržen nový materiál, který bez zvýšených nároků na finance výrazně prodlouží životnost ostří v provozních podmínkách.

**Klíčová slova:** Odolnost proti abrazivnímu opotřebení, tvrdost, chemické složení, slitina, návarový materiál.

# Abstract

This thesis investigates the suitable chemical composition of a iron alloy with improved wear resistance. A unique set of alloys with a specifically designated chemical composition was manufactured for experiments. Their properties in defined abrasive conditions was studied in laboratory conditions. Wear resistance was determined on an experimental bench with bound particles. Material properties description was always complemented with information gained during material metallographic structure investigations. All the results were compared with results achieved for commercially available weld deposition materials (specifically designated for abrasion conditions). These (weld deposition) materials were subjected to an identical set of laboratory experiments and additionally to a set of experiments under in-service conditions.

This thesis offers new knowledge about the relationship between material hardness, material structure and wear resistance. The outlined results also give evidence about the correlation between results gained under laboratory conditions and those gained under in-service conditions (in relation to material structure and hardness).

At the end of the thesis the knowledge gained from these experiments is applied to a specific application – the service life extension of plough blade segments. On this basis a new material is designed which will extend service life without additional demands on the costs, and the approach to the renovation of worn plough blade segments is justified.

**Key words:** Wear resistance, hardness, chemical composition, iron alloy, hard facing.

# Obsah

<b>Prohlášení</b>	<b>i</b>
<b>Poděkování</b>	<b>ii</b>
<b>Abstrakt</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Obsah</b>	<b>v</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>xi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xv</b>
<b>Seznam značek</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Přehled o současném stavu problematiky</b>	<b>2</b>
2.1 Tření	3
2.2 Opotřebení	3
2.3 Druhy opotřebení kovových materiálů	4
2.3.1 Abrazivní opotřebení	5
2.3.2 Adhezivní opotřebení	7
2.3.3 Erozivní opotřebení	9
2.3.4 Kavitační opotřebení	9
2.3.5 Vibrační opotřebení	10
2.3.6 Únavové opotřebení	11
2.3.7 Kombinace opotřebení	12
2.4 Vlastnosti technických materiálů a jejich rozdělení	12
2.4.1 Mechanické vlastnosti kovových materiálů	13
2.5 Rozdělení kovových technických materiálů	14
2.5.1 Litina	15

2.5.2	Vlastnosti jednotlivých mikrostrukturu materiálu .....	16
2.5.3	Vliv chemického složení na výsledné vlastnosti ocelí.....	18
2.5.4	Vliv jednotlivých chemických prvků.....	19
2.6	Vytváření povrchových vrstev se zvýšenou odolností proti opotřebení.....	22
2.6.1	Navařování.....	22
2.6.2	Způsoby navařování.....	23
2.6.3	Návarové materiály .....	23
2.7	Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení kovových materiálů .....	24
2.7.1	Způsoby určování faktorů majících vliv na abrazivní opotřebení.....	25
2.8	Vlivy na proces a na velikost abrazivního opotřebení.....	26
2.8.1	Vliv druhu materiálu .....	26
2.8.2	Vliv zatížení vzorku.....	26
2.8.3	Vliv kluzné rychlosti pohybu.....	28
2.8.4	Vliv velikosti abrazivních částic .....	29
2.8.5	Vliv tvrdosti abraziva a opotřebovávaného materiálu .....	30
2.9	Metodika hodnocení vlastností a míry poškození opotřebovaného povrchu .....	33
2.9.1	Diagnostika poškozeného povrchu se zaměřením na abrazivní opotřebení.....	33
<b>3</b>	<b>Cíle disertační práce .....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Materiál a metody .....</b>	<b>36</b>
4.1	Litín se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení .....	36
4.2	Návarové materiály .....	37
4.3	Materiály ostří a dlát orebních těles .....	38
4.4	Referenční materiál .....	39
4.5	Příprava vzorků litin pro laboratorní zkoušky.....	39
4.5.1	Příprava vzorků návarových materiálů pro laboratorní zkoušky ..	40

4.5.2	Příprava návarů pro měření v provozních podmínkách .....	42
4.5.3	Příprava ostatních vzorků .....	45
4.6	Metody měření.....	45
4.6.1	Určení dosaženého chemického složení .....	45
4.6.2	Určení mikrostruktury vzorků.....	45
4.6.3	Určení hustoty zkušebních vzorků.....	46
4.6.4	Hodnocení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení .....	46
4.6.5	Stanovení tvrdosti dle Vickerse .....	48
4.6.6	Posouzení homogenity materiálu (radiografická metoda) .....	48
4.6.7	Kontrola kvality návarů (kontrola povrchových vad).....	48
4.6.8	Měření rozložení teplotního pole .....	49
4.6.9	Hodnocení topografie opotřebovaného povrchu.....	49
4.6.10	Provozní zkoušky .....	50
<b>5</b>	<b>Výsledky měření.....</b>	<b>51</b>
5.1	Kontrola vzorků před vlastním experimentem .....	51
5.1.1	Kontrola vzorků litin.....	51
5.1.2	Kontrola homogenity návarů určených pro laboratorní zkoušky..	52
5.1.3	Kontrola homogenity návarů určených pro provozní zkoušky .....	52
5.2	Experimentální měření vzorků litin – určení hustoty, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení.....	53
5.2.1	Sada A (uhlík C) – naměřené hodnoty.....	54
5.2.2	Sada B (křemík Si) – naměřené hodnoty .....	59
5.2.3	Sada C (nikl Ni) – naměřené hodnoty.....	61
5.2.4	Sada D (měď Cu) – naměřené hodnoty .....	65
5.2.5	Sada E (mangan Mn) – naměřené hodnoty.....	67
5.2.6	Sada F (chrom Cr) – naměřené hodnoty .....	69
5.2.7	Rozložení teplotního pole .....	71



5.2.8	Metalografie, mikrotvrdost a topografie opotřebovaného povrchu .....	73
5.3	Odolnost proti abrazivnímu opotřebování a tvrdost návarových materiálů .....	78
5.4	Provozní měření.....	79
5.5	Ekonomické hodnocení dosažených výsledků .....	80
5.5.1	Ekonomické aspekty renovace navařováním.....	80
5.5.2	Ekonomické aspekty renovace výměnou.....	83
5.6	Dílní závěry experimentů .....	84
5.6.1	Vliv chemického složení na tvrdost materiálu.....	84
5.6.2	Vliv chemického složení na odolnost proti opotřebování.....	86
5.6.3	Význam rozložení teplot .....	88
5.6.4	Výsledky získané při zkoumání chování návarových materiálů v laboratorních podmínkách .....	91
5.6.5	Výsledky získaných při zkoumání chování návarových materiálů v provozních podmínkách.....	95
<b>6</b>	<b>DISKUSE.....</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>Závěr a doporučení pro další rozvoj v oboru.....</b>	<b>105</b>
7.1	Přínosy disertační práce pro další rozvoj v oboru .....	108
<b>8</b>	<b>Literatura .....</b>	<b>110</b>
<b>Příloha A: Sady litin a jejich chemické složení.....</b>		<b>121</b>
	Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku [1] .....	121
	Zkušební sada B – vzorky litin se změnou obsahu křemíku .....	121
	Zkušební sada C – vzorky litin se změnou obsahu niklu .....	121
	Zkušební sada D – vzorky litin se změnou obsahu mědi .....	122
	Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu.....	122
	Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu [2].....	122

<b>Příloha B: Popis návarových materiálů ESAB .....</b>	<b>123</b>
<b>Příloha C: Popis návarových materiálů WELCO .....</b>	<b>125</b>
<b>Příloha D: Popis materiálů ostří a dlát ořebních těles .....</b>	<b>128</b>
<b>Příloha E: Návarové materiály a jejich struktura .....</b>	<b>129</b>
<b>Příloha F: Provozní zkoušky – naměřené hodnoty .....</b>	<b>131</b>
<b>Příloha G: Výsledky experimentálních měření vzorků litin .....</b>	<b>133</b>
G.1 Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku .....	133
G.2 Zkušební sada B – vzorky se změnou obsahu křemíku .....	133
G.3 Zkušební sada C – vzorky se změnou obsahu niklu .....	134
G.4 Zkušební sada D – vzorky se změnou obsahu mědi .....	134
G.5 Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu .....	135
G.6 Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu .....	135
<b>Příloha H: Sady litin a jejich struktura .....</b>	<b>136</b>
H.1 Popis určených struktur vzorků litiny .....	136
Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku .....	136
Zkušební sada B – vzorky litin se změnou obsahu křemíku .....	136
8.1.1 Zkušební sada C – vzorky litin se změnou obsahu niklu .....	136
8.1.2 Zkušební sada D – vzorky litin se změnou obsahu mědi .....	137
8.1.3 Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu .....	137
8.1.4 Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu .....	137
H.2 Zobrazení mikrostruktury jednotlivých vzorků .....	138
<b>Příloha I: Návary ostří – grafické zpracování naměřených hodnot ..</b>	<b>144</b>
<b>Příloha J: Návary dlát – grafické zpracování naměřených hodnot ....</b>	<b>145</b>
<b>Příloha K: Fotodokumentace provozních zkoušek .....</b>	<b>146</b>
<b>Příloha L: Příklad schváleného postupu svařování (WPS) .....</b>	<b>149</b>
<b>Příloha M: Popis a charakteristika půdních podmínek     provozních zkoušek [117] .....</b>	<b>150</b>
<b>Příloha N: Statistické zpracování naměřených hodnot .....</b>	<b>152</b>

N.1	Matematické vzorce použité pro zpracování naměřených hodnot [116] .....	152
-----	---	-----

<b>Příloha O:</b>	<b>Cenová nabídka na dodávku odlitků ostří ze slitiny 5A.....</b>	<b>154</b>
-------------------	---	------------

## Seznam obrázků

- Obrázek 2.1: Zjednodušené schéma abrazivního opotřebení vlivem zatížení na abrazivní zrno.
- Obrázek 2.2: Schéma abrazivního opotřebení [46].
- Obrázek 2.3: Příklady abrazivního opotřebení [41].
- Obrázek 2.4: Erozivní opotřebení plochy slitiny hliníku [52].
- Obrázek 2.5: Kavitační opotřebení povrchu odstředivého oběžného kola tlakového čerpadla [52].
- Obrázek 2.6: Opotřebení povrchu po vibrační zkoušce [52].
- Obrázek 2.7: Únavové opotřebení kuželíkového ložiska [52].
- Obrázek 2.8: Graf závislosti vlivu zatížení na abrazivním opotřebení [85].
- Obrázek 2.9: Graf závislosti vlivu zkušebního zatížení na hmotnostním oteru při různé velikosti abrazivní částice pro materiál Cu [101].
- Obrázek 2.10: Graf závislosti vlivu kluzné rychlosti na objemovém oteru pro hliník, mosaz a ARMCO [102].
- Obrázek 2.11: Graf závislosti vlivu velikosti abraziva na objemový oter [96].
- Obrázek 2.12: Graf závislosti vlivu tvrdosti abraziva  $H_a$  a tvrdosti opotřebovaného materiálu  $H_m$  v závislosti na objemovém oteru a poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení  $\psi_a$  [86].
- Obrázek 2.13: Graf závislosti objemového oteru povrchové vrstvy na mikrotvrdosti oceli a litin [110].
- Obrázek 4.14: Předlitý vzorek, proces soustružení a obrobený vzorek.
- Obrázek 4.15: Výřez dvou tělísek z bloku (vlevo), a následné určení homogenity sady tělísek s pomocí RTG (vpravo).
- Obrázek 4.16: Pluh Lemken vari diamant 160.
- Obrázek 4.17: Zobrazující umístění návarů na dlátě a ostří
- Obrázek 4.18: Schéma přístroje s vázanými abrazivními částicemi s rotačním pohybem [14, 15].
- Obrázek 5.19: Příklad vad indikovaných radiografickou zkouškou.
- Obrázek 5.20: Oblast o velikosti cca. 75 x 18 mm zobrazující výrazné trhliny
- Obrázek 5.21: Fotografie návarů dlát při kontrole na přítomnost trhlín.

- Obrázek 5.22: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství uhlíku v litině.
- Obrázek 5.23: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost vypočtené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a naměřené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$
- Obrázek 5.24: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a střední velikosti částic na hmotnost % C.
- Obrázek 5.25: Graf zobrazující vzorky sady B – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství křemíku v litině.
- Obrázek 5.26: Graf zobrazující vzorky sady C – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství niklu v litině.
- Obrázek 5.27: Graf zobrazující vzorky sady D – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství mědi v litině.
- Obrázek 5.28: Graf zobrazující vzorky sady E – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství manganu v litině.
- Obrázek 5.29: Graf zobrazující vzorky sady F – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství chromu v litině.
- Obrázek 5.30: Rozložení teplotního pole u vzorku 5A na brusném plátně P120. Linie vyznačuje oblast měření rozložení teplot na brusném plátně.
- Obrázek 5.31: Vzorek 3A - Posouzení struktury a tvrdosti.
- Obrázek 5.32: Vzorek 3A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.
- Obrázek 5.33: Vzorek 4A - Posouzení struktury a tvrdosti.
- Obrázek 5.34: Vzorek 4A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.
- Obrázek 5.35: Vzorek 5A - Posouzení struktury a tvrdosti.
- Obrázek 5.36: Vzorek 5A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.
- Obrázek 5.37: Graf zobrazující porovnání dosažených tvrdostí v rámci jednotlivých sad vzorků.

- Obrázek 5.38: Graf zobrazující porovnání dosažených průměrných hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  v rámci jednotlivých sad vzorků.
- Obrázek 5.39: Graf zobrazující závislost průměrné teploty povrchu zkušební vzorku na jeho průměrné odolnosti proti opotřebení.
- Obrázek 5.40: Graf zobrazující dosažené hodnoty tvrdosti a průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jednotlivých materiálů.
- Obrázek 5.41: Graf zobrazující porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jednotlivých materiálů.
- Obrázek 5.42: Porovnání mikrostruktury slitin WELCOLLOY 1745 S (vlevo) a slitiny 5A (vpravo).
- Obrázek 5.43: Graf zobrazující porovnání dosažených hodnot odolnosti na pozadí struktury zkoušených materiálů.
- Obrázek 5.44: Graf zobrazující příklady porovnání hmotnostních úbytků segmentů s návarem a bez náváru.
- Obrázek 5.45: Příklady vykreslení trendu v hmotnostních úbytcích.
- Obrázek 5.46: Graf průměrných úbytků materiálu na ploše 1ha a příslušný faktor ochrany – příklady.
- Obrázek 5.47: Graf zobrazující porovnání poměrných odolností proti opotřebení stanovených v laboratorních a provozních podmínkách.
- Obrázek 5.48: Opotřebované ostří (po šesti dnech orby) přiložená na nové ostří.
- Obrázek D.1: Dláto – Podeutektoidní ocel, struktura odpovídá popuštěnému mantenzitu, se zbytkovým austenitem; (100x zvětšeno; leptáno – Nital (4 %)).
- Obrázek D.2: Ostří – Podeutektoidní ocel, struktura odpovídá popuštěnému mantenzitu, se zbytkovým austenitem; (100x zvětšeno; leptáno – Nital 4 %).
- Obrázek G.1: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátka.
- Obrázek G.2: Graf zobrazující vzorky sady B – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátka.
- Obrázek G.3: Graf zobrazující vzorky sady C – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátka.

- Obrázek G.4: Graf zobrazující vzorky sady D – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.
- Obrázek G.5: Graf zobrazující vzorky sady E – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.
- Obrázek G.6: Graf zobrazující vzorky sady F – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.
- Obrázek H.1: Vzorky sady A - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek H.2: Vzorky sady B - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek H.3: Vzorky sady C - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek H.4: Vzorky sady D - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek H.5: Vzorky sady E - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek H.6: Vzorky sady F - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.
- Obrázek I.1: Graf zobrazující návary ostří – grafické zpracování naměřených hodnot.
- Obrázek J.1: Graf zobrazující návary dlát – grafické zpracování naměřených hodnot.
- Obrázek K.1: Osazení novým dlátem a ostřím bez návarů.
- Obrázek K.2: Osazení novým dlátem a ostřím s návary.
- Obrázek K.3: Oblast provozních zkoušek (před započítáním zkoušek).
- Obrázek K.4: Průběh provozních zkoušek.
- Obrázek K.5: Hloubka orby.
- Obrázek K.6: Průběžná kontrola opotřebení ploch opatřených návary.
- Obrázek M.1: Zrnitostní čáry vzorků půdy v dané oblasti.

## Seznam tabulek

- Tabulka 2.1: Rozdělení vlastností technických materiálů dle [58, 64].
- Tabulka 2.2: Orientační hodnoty tvrdostí struktur [105]
- Tabulka 2.3: Parametry ovlivňující abrazivní opotřebení dle [20].
- Tabulka 2.4: Vztah kluzné rychlosti a abrazivního opotřebení dle Chruščova a Babičeva [85].
- Tabulka 4.5: Průměrné chemické složení vzorků v sadě.
- Tabulka 4.6: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [2, 33].
- Tabulka 4.7: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [34, 35, 36, 37].
- Tabulka 4.8: Skutečné chemické složení základního materiálu ostří a dlát.
- Tabulka 4.9: Popis skutečného chemického složení referenčního vzorku.
- Tabulka 4.10: Přehled použitých navařovacích proudů.
- Tabulka 4.11: Přehled měření provedených na jednotlivých vzorcích.
- Tabulka 5.12: Vzorky sady A – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení [1].
- Tabulka 5.13: Vzorky sady B – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 5.14: Vzorky sady C – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 5.15: Vzorky sady D – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 5.16: Vzorky sady E – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 5.17: Vzorky sady F – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení [2].
- Tabulka 5.18: Maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebení.
- Tabulka 5.19: Tvrdost HV 30 a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 5.20: Náklady na přídatný materiál.
- Tabulka 5.21: Vzorky vykazující nejvyšší tvrdost.
- Tabulka 5.22: Vzorky vykazující nejnižší tvrdost.
- Tabulka 5.23: Vzorky vykazující nejvyšší odolnost.
- Tabulka 5.24: Maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebení.
- Tabulka 5.25: Doporučené chemické složení slitiny železa.
- Tabulka 5.26: Porovnání skutečného chemického složení slitiny WELCOLLOY 1745 S a slitiny 5A.
- Tabulka 5.27: Tvrdost HV 30 a odolnost proti opotřebení.
- Tabulka 7.28: Doporučené chemické složení slitiny železa.
- Tabulka A.1: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady A.
- Tabulka A.2: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady B.



Tabulka A.3:	Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady C.
Tabulka A.4:	Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady D.
Tabulka A.5:	Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady E.
Tabulka A.6:	Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady F.
Tabulka B.1:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [2].
Tabulka B.2:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [33].
Tabulka B.3:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [34].
Tabulka B.4:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [35].
Tabulka B.5:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [36].
Tabulka B.6:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [37].
Tabulka D.1:	Skutečné chemické složení základního materiálu dláta.
Tabulka D.2:	Skutečné chemické složení základního materiálu ostří.
Tabulka E.1:	Provozní zkoušky materiálu ostří – naměřené hodnoty.
Tabulka F.1:	Provozní zkoušky materiálu dlát – naměřené hodnoty.
Tabulka B.3:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [34].
Tabulka B.4:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [35].
Tabulka B.5:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [36].
Tabulka B.6:	Směrné chemické složení deklarované výrobcem [37].
Tabulka D.1:	Skutečné chemické složení základního materiálu dláta.
Tabulka D.2:	Skutečné chemické složení základního materiálu ostří.
Tabulka N.1:	Přehled použití statistických nástrojů.

## Seznam značek

$b$	=	koeficient materiálu [-];
$C_e$	=	uhlíkový ekvivalent [%];
$F$	=	síla působící na vzorek nebo zkušební síla [N];
$F_n$	=	normálová síla [N];
$F_t$	=	třecí síla [N];
$\gamma$	=	tvrdost materiálu [-];
$H$	=	tvrdost vzorku [-];
$H_a$	=	tvrdost abraziva [-];
$H_m$	=	tvrdost opotřebovávaného materiálu [-];
$HV$	=	tvrdost dle Vickerse [-];
$k$	=	koeficient [-];
$k_{abr}$	=	koeficient tření pro abrazivní opotřebení [-];
$L$	=	dráha vzorku [m];
$n$	=	počet měřených hodnot;
$N$	=	celkové náklady [Kč];
$N_e$	=	náklady na energie [Kč];
$N_n$	=	náklady na přídatný materiál [Kč];
$N_p$	=	náklady na práci [Kč];
$t$	=	tloušťka svařovaného plechu [mm];
$u_i$	=	velikosti úhlopříček vtisku [mm];
$W_{hPZ}$	=	průměrný hmotnostní úbytek zkušební tělesa [g];
$W_{hZ}$	=	průměrný hmotnostní úbytek zkoušených těles [g];
$W_o$	=	objemový otěr [mm <sup>3</sup> ];
$x_i$	=	výsledné naměřené hodnoty;
$\bar{X}$	=	aritmetický průměr souboru hodnot;
$X_{max}$	=	maximální hodnota kvantitativního znaku;
$X_{min}$	=	minimální hodnota kvantitativního znaku;
$\varepsilon$	=	poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení získaná poměrem úbytku vzorku etalonu z cín-olověné slitiny [-];
$\mu$	=	koeficient tření pro adhezivní opotřebení [-];
$\psi_{abr}$	=	poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení [-];
$\sigma$	=	směrodatná odchylka;
$f_d$	=	faktor ochrany [-];
$R^2$	=	index determinace [-];

- $F$  =  $F$ -test pro testování rozdílu dvou rozptylů [-];  
 $P$  = pravděpodobnost [-];  
 $T$  = Teplota vzorku [°C];

# 1 Úvod

Současná technická zařízení jsou charakteristická velmi rychlým vývojem a rozvojem. To se týká prakticky všech technických odvětví. Původně mechanická zařízení byla upravována tak, aby poskytovala na jedné straně větší výkon, a na straně druhé vyžadovaly menší ekonomické výdaje. Tím jsou myšleny nejen výrobní, ale také provozní náklady. Téměř vždy se jedná o určitý kompromis mezi cenou, výkonem a celkovou životností zařízení.

Tato práce se zabývá abrazivním opotřebením zemědělských součástí zařízení a jejich funkčních částí. Zemědělské pluhy obecně nejsou řazeny mezi ty strojní celky, kterým je věnována zvýšená pozornost (tak jako například automobilům nebo letadlům). Na druhé straně je zemědělství odvětví, které se denně potýká s ekonomickou stránkou – snaha snížit náklady je vynucované tlakem na snížení cen zemědělské produkce.

Ostří a dláta orebních těles jsou při práci vystaveny vysoce abrazivním podmínkám a vyžadují velmi časté výměny, popřípadě renovace. Při tom oba případy vyžadují odstávku stroje, náklady vynaložené na údržbu. Současný stav techniky sice popisuje perspektivní metody renovací, ale ucelená studie, která by se zabývala touto problematikou komplexně v návaznosti současný stav techniky (po roce 2013) i v souvislosti s finanční stránkou a vlivem na životnost, v posledních letech chybí.

Disertační práce se zabývá možnostmi renovace ostří a dlát orebních těles. Klade si za cíl definovat vhodný kovový materiál, který by měl potenciál zvýšení životnosti nejvíce exponovaných komponentů zejména s ohledem ostří radlic.

Zároveň má ambici prozkoumat možnosti renovace těchto dílů a určit, který z možných způsobů bude z pohledu ekonomiky a životnosti nejlepší.

## 2 Přehled o současném stavu problematiky

Disertační práce se věnuje problematice opotřebení kovových materiálů. Technická praxe rozlišuje různé druhy opotřebení, které se vzájemně liší především mechanismem vzniku, který k samotnému opotřebení vede. Nezbytným předpokladem pro správný výběr či návrh materiálu vhodného pro danou aplikaci je třeba dobře porozumět procesu, který k opotřebení vede. Proto se teoretická část práce částečně zabývá definicemi druhů opotřebení a jejich popisem.

Tato práce je věnována kovovým materiálům, zejména pak litinám, které mají díky své poměrně snadné a dobře technologicky podchycené výrobě velký potenciál co se týká zlepšování jejich výsledné odolnosti proti opotřebení. Zlepšení mechanických vlastností v této oblasti lze dosáhnout v první řadě úpravami chemického složení litiny, ale také dalšími technologickými postupy jako například tepelným zpracováním. Při tom nemusí jít o technologický krok zařazený přímo za účelem úpravy mechanických vlastností, může se jednat i o vedlejší efekt technologické operace spjaté s aplikací daného materiálu – například pokud má být vrstva materiálu aplikována navařením. Proto se teoretická část disertační práce zabývá také touto oblastí.

Mechanické vlastnosti materiálu navrženého tak, aby vykazoval co možná nejvyšší odolnost proti mechanickému opotřebování, je třeba také určit. V oblasti bylo vypracováno několik alternativních způsobů, které jsou pro každou dílčí aplikaci více či méně vhodné. Správná volba experimentu ovlivňuje věrohodnost dosažených výsledků. Proto část práce uvádí přehled těchto postupů.

Ze syntézy výše uvedených poznatků pak vyplynou jednoznačně definované cíle práce, na které naváže praktická část, věnovaná samotnému experimentálnímu měření a analýze výsledků.

V následujících kapitolách disertační práce jsou popsány jednotlivé druhy opotřebení, které se nejvíce vyskytují v technické praxi.

## 2.1 Tření

Tření je odpor pohybu jednoho tělesa po povrchu druhého tělesa. Význam slova tření je odvozen od latinského slovesa „fricare“ – majícího význam slova třít, dřít, drhnout, ale také například vyleštit [41, 45].

Objekty vystavené tření mohou být pevné, ale i plynné nebo kapalně (tekuté tření). Tření může nastat na dvou i více površích, které pohlcují energii v rámci jedné sestavy (vnitřní tření).

Reálné dopady tření (kterým bude věnována další textová část) při tom nemusejí být jen negativní, jak se obecně předpokládá. Jeden z bezesporu nejvýznamnějších vynálezů, který stál na počátku civilizace – rozdělování ohně tzv. vrtáním (s použitím dřevěného kolíku) je založen na skutečnosti, že tření vyvolává nárůst teploty [43].

Pochopení skutečnosti, že valivý odpor je mnohonásobně menší oproti smykovému vedl k umožnění rozvoje nových způsobů přepravy (např. dopravu těžkých břemen na valivých kolečkách a nikoliv tah po smykové podložce) a ve svém důsledku vyústil ve vynález kola [42, 43, 45].

Existují taktéž případy opotřebení povrchu moderních strojů, které mohou být velmi přínosné, např. během jejich záběhu, kdy probíhá vyhlazení povrchu pomocí dotyku vzájemně se pohybujících součástí. Na těchto površích dochází k opotřebení stykových ploch a k plastické deformaci, které vedou ke zlepšení pracovních činností přístrojů. Toto tzv. zaběhnutí strojů vede taktéž ke snížení koncentrace napětí a ke zlepšení vlastností mazání vlivem vytvoření větší pracovní mezery mezi rotujícími součástmi, které následně mohou být důsledněji mazány.

V současnosti je ale tření spojováno spíše s negativními dopady. Předpokládá se, že tření může vést k opotřebení.

## 2.2 Opotřebení

Opotřebení lze definovat jako trvalou nežádoucí změnu povrchu tělesa nebo rozměrů součásti, která je zapříčiněná pohybem funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a média. Na opotřebovaném povrchu je viditelné odstraňování vrchních částí materiálu nebo jeho následné přemísťování. Poškození povrchu je vyvolané pomocí mechanických účinků, které je velmi často doprovázeno i jinými účinky,

např. tepelnými, chemickými [16, 46, 47]. V případě kovových materiálů může být materiál z povrchu odstraněn obecně třemi způsoby:

- odtavením;
- chemickým rozpuštěním;
- fyzikálním oddělením.

Fyzikální a chemické procesy mohou působit samostatně nebo společně např. v rámci opotřebení v agresivním prostředí. Pokud je uvažováno fyzikální oddělení materiálu, pak v procesu mohou hrát významnou roli také další vlivy – účinek napětí, nebo cyklické namáhání.

Rozdělení opotřebení a jejich přesného definování je podobné jako při definování tření, kdy jejich rozdělení je možné pomocí jejich druhů pohybů:

- statické;
- dynamické;
- rázové [20, 48, 49].

Náklady na eliminaci opotřebení jsou vysoké. Byly odhadnuty v rozmezí od 1 do 4 % hrubého národního průmyslového produktu (v závislosti na rozvinutosti průmyslových odvětví v daném státě). Vliv opotřebení je zvláště patrný v oblastech zemědělství, hornictví, při zpracování minerálů a zemních prací – tedy v odvětvích, kde se manipuluje s minerálními látkami jako je kámen, prašné prostředí a jiné. Příkladem jsou pluh, drtiče kamene, šnekové dopravníky pro přepravu šterků a jiné [12, 46, 50, 51, 52].

### **2.3 Druhy opotřebení kovových materiálů**

Druhy opotřebení lze v souladu s normou ČSN 01 5050 [53] rozdělit na:

- abrazivní;
- adhezivní;
- erozivní;
- kavitační;
- vibrační;
- únavové;
- jiné.

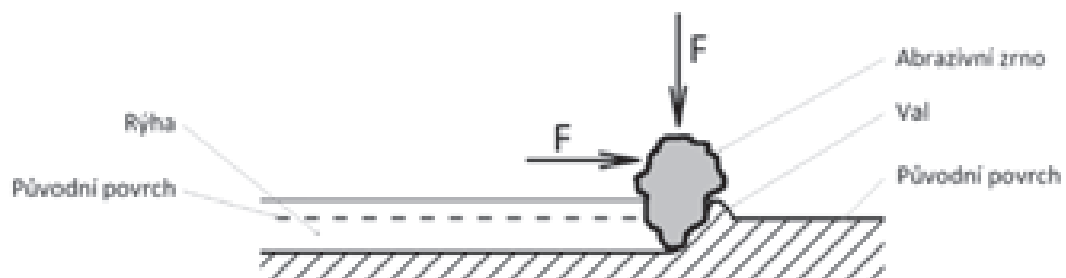
### 2.3.1 Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení je definováno jako oddělování nebo přemísťování částic materiálu rýhováním nebo řezáním tvrdými částicemi média. Mnozí autoři uvádějí, že až 50 % opotřebení je způsobeno právě abrazivním opotřebením [20, 54].

Jsou-li v kontaktu dva povrchy, k opotřebení dochází na obou součástech, ale s různou intenzitou. Pozornost se obvykle soustředí na opotřebení povrchu součástí, které mají největší potenciál pro ekonomickou ztrátu, na druhý povrch se obvykle zřetel nebere. Příkladem může být individuální chůze po schodech budovy, kdy se posuzuje opotřebení podrážek obuvi, zatímco opotřebení povrchu podlahy se nezmiňuje [52].

Výše popsany stav, kdy k abrazivnímu opotřebení dochází při styku dvou těles, je znám jako dvoutělesové opotřebení. Mimo něj je literaturou popisováno také třítělesové opotřebení – tedy stav, kdy se mezi dvě tělesa, která jsou vůči sobě ve vzájemném pohybu, dostává třetí – například ve formě volných částic. Dvoutělesové opotřebení je charakteristické větším hmotnostním úbytkem oproti třítělesovému opotřebení. V experimentální části práce bude věnován prostor právě dvoutělesovému opotřebení [20].

Abrazivní mechanismy jsou často využívány ve strojírenství k úpravě povrchů nebo k samotnému oddělování částic. Jako příklad lze jmenovat dokončovací operace leštění, kdy je daný povrch leštěn pomocí hadrového kotouče, na který je přiváděna pasta s brusným práškem určité zrnitosti. Na obr. 2.1 je zobrazeno zjednodušené schéma abrazivního opotřebení. Účinku ostrohranných částic se taktéž využívá k úpravě povrchu například k tryskání povrchu součástí. Abrazivních účinků taktéž využívá rozvíjející se metoda řezání vodním paprskem, kde vodní paprsek pod vysokým tlakem obsahuje abrazivní částice, které přispívají k dělicímu účinku.



Obrázek 2.1: Zjednodušené schéma abrazivního opotřebení vlivem zatížení na abrazivní zrnko [42].



V rámci abrazivního opotřebení je dále velmi často rozlišováno mezi:

- abrazivním opotřebením za působení nízkých napětí;
- abrazivním opotřebením za působení vysokých napětí (tzv. vydírání) [42].

Za působení nízkých napětí nedochází k velkému úběru materiálu a opotřebovaný povrch je po krátké době skoro nedotčen, například při broušení dřeva jemným brusným plátnem. Při působení vysokého napětí se tvrdé částice podílí na procesu opotřebení nebo jsou rozdrčeny a rozmělněny do formy prášku a následně působí na obou povřších. Vydírání se nejčastěji vyskytuje u součástí, které pracují s tvrdými materiály za působení vysokých napětí a rychlostí.

### **Mechanismy úběru materiálu při abrazivním opotřebením**

Úběr materiálu z povrchové vrstvy je při abrazivním opotřebením realizován několika mechanismy. Mezi základní druhy abrazivního opotřebení patří [46, 52]:

- mikrořezání;
- mikrorýhování;
- mikroúnava;
- mikroporušení.

**Mikrořezání** vede přímo k oddělováním materiálu z povrchu. V tomto případě jsou tvořeny třísky bez tvorby postranních valů v materiálu a dochází k odběru celého objemu.

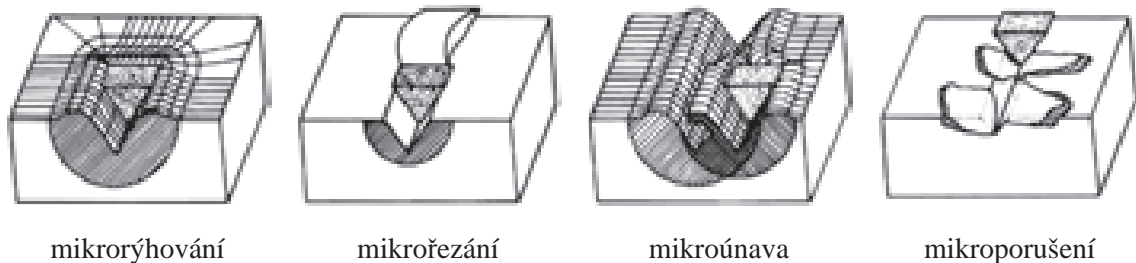
**Mikrorýhování**, které je doprovázeno plastickou deformací ve spojení s rýhováním. Před abrazivní částicí se na povrchu vytváří val, který je vytlačován na okraj materiálu. U tohoto opotřebení se u materiálu nevytváří částice otěru.

**Mikroúnava** je úzce spjata s mikrorýhováním, kdy po vytvoření rýhy nová abrazivní částice působí v blízkosti původní rýhy a způsobuje novou deformaci v již deformované oblasti. Tento jev má za následek vytvoření nového valu, který se plasticky deformuje až do vyčerpání zásoby plasticity. Posléze dojde k oddělení třísky z povrchu opotřebovaného materiálu.

**Mikroporušení** je obvykle spjata s křehkými materiály. Mikroporušení vede k oddělování částic ze základního materiálu pomocí křehkého porušení. Za určitých podmínek ale může tento stav nastat i u houževnatých materiálů. Na povrchu základního materiálu vzniká napětí, které je způsobeno vlivem průchodu abrazivní

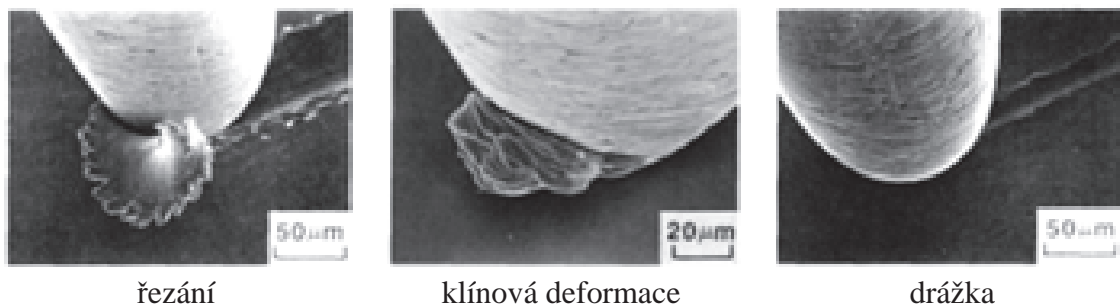
částice. Porušení materiálu je velmi úzce spojeno s rychlostí šíření trhliny v základním materiálu. Po uzavření celého objemu částice následně dojde k jejímu oddělení z povrchu součásti [46, 52].

Všechny čtyři zmiňované případy schematicky ilustruje obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma abrazivního opotřebení [46].

Reálné případy abrazivního opotřebení povrchu různých materiálů jsou zdokumentována na obrázku 2.3 (vynesené měřítko slouží k určení velikosti třísky).



Obrázek 2.3: Příklady abrazivního opotřebení [41].

To, který ze jmenovaných mechanismů poškození povrchu bude hrát dominantní roli, závisí především na druhu materiálu opotřebované součásti, druhu a velikosti nástroje (abrazivní částice), teplotě, relativní rychlosti a dalších parametrech. Vzhledem ke komplexnosti celého procesu, ale nelze nikdy s jistotou říci, jaký mechanismus stál za poškozením povrchu.

### 2.3.2 Adhezivní opotřebení

Pro adhezivní opotřebení je charakteristické oddělování částice základního materiálu z jeho povrchu a následně jeho přemístování [52]. Adhezivní opotřebení může vznikat na všech strojních zařízeních. Je velmi často důsledkem smýkání dvou tuhých těles, která jsou zároveň k sobě přitlačována normálovou silou.

Povrchy strojních součástí nikdy nejsou dokonale rovné a hladké. Technologické operace určují konečnou topografii povrchu součásti. Vlivem normálové

přítlačné síly dochází k vzájemnému styku povrchů (mnohdy plošnému, až celoplošnému styku). Na stykových plochách vznikají elastické a po překročení meze kluzu daného materiálu i plastické deformace. Za těchto podmínek mohou vznikat mikrospoje. Mikrospoj je definovaný jako malý svarový spoj na povrchu základního materiálu. Pokud dochází k vzájemnému pokluzu součástí, jsou mikrospoje mechanicky porušovány a v důsledku toho dochází k vytrhávání částic materiálu z povrchu [52].

Tyto částice pak vnikají mezi funkční povrchy součástí a dostávají se do role abraziva. Proto lze tvrdit, že adhezivní opotřebení je velmi často spojeno s jiným druhem opotřebení – abrazivním [46, 47, 52], které celý proces opotřebení akceleruje.

Jako každé opotřebení, tak i adhezivní opotřebení má různé intenzity poškození součásti, od mírného až po vážné, které může skončit až havárií dané součásti – při intenzivním opotřebení může dojít až k zadření součástí. Hlavní faktory, které mají vliv na míru adhezivního opotřebení, jsou [46, 47]:

- rychlost relativního pohybu a velikost zatížení;
- poloměr zakřivení povrchových mikronerovností a hloubka vnikání částice;
- schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje;
- stav povrchu (drsnot).

Jak již bylo řečeno, na adhezivní opotřebení má největší vliv koeficient tření pro adhezivní opotřebení. Velikost třecí síly je přímo úměrná normálové síle a platí rovnice (2.1) [42].

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.1)$$

Míru adhezivního opotřebení lze velmi snadno snížit přidáním definovaného druhu a množství maziva mezi funkční povrchy.

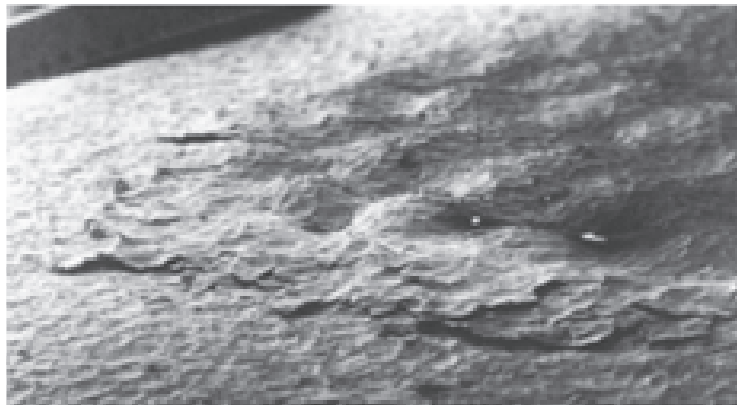
Součásti, které na povrchu mají oxidační vrstvu, jsou lépe chráněné proti adhezivnímu opotřebení. Tato vrstva se u materiálů podle různého chemického složení více či méně obnovuje. U méně intenzivního opotřebení se tato vrstva stačí obnovovat a chrání celý povrch součásti. U součástí, které jsou vystaveny intenzivnímu adhezivnímu opotřebení vlivem velkých napětí nebo rychlostí, se oxidační vrstva už nestačí vytvářet v dostatečné tloušťce a tím dochází k intenzivnějšímu poškození [47].

### 2.3.3 Erozivní opotřebení

Tento druh opotřebení vzniká na součástech, které pracují s různými druhy medií. Charakteristickým znakem erozivního opotřebení je oddělování materiálu účinkem [47]:

- částic neseným proudem kapaliny;
- proudem kapaliny, par nebo plynů.

Mechanismus erozivního opotřebení je podobný mechanismu abrazivního opotřebení. Při tomto opotřebení je hlavním znakem nerovnoměrné opotřebení povrchu, na kterém je pouhým okem pozorovatelné zvrásnění a prohloubeniny povrchu. Turbulentní proudění kapalin je z hlediska opotřebení povrchu nebezpečnější než laminární proudění. Z tohoto pohledu jsou nejvíce exponované úseky, kde se mění směr proudění. Opotřebené součásti jsou velmi často vyřazeny z provozu z důvodu značného zeslabení určité oblasti na součásti, když ostatní plochy jsou bez poškození. Toto opotřebení je velmi snadno rozpoznatelné od opotřebení abrazivního a adhezivního [46, 47, 55]. Pro ilustraci lze uvést zobrazení erozivního opotřebení plochy slitiny hliníku na obrázku 2.4. Dílčí poškození bylo způsobeno ocelovými broky ( $\varnothing 0,7$  mm), které dopadaly na povrch pod úhlem  $60^\circ$  [42, 52].



Obrázek 2.4: Erozivní opotřebení plochy slitiny hliníku [52].

### 2.3.4 Kavitační opotřebení

Toto opotřebení je charakteristické oddělováním částic, poškozováním povrchu součásti vlivem vzniku (a zániku) kavitačních dutin v kapalině.

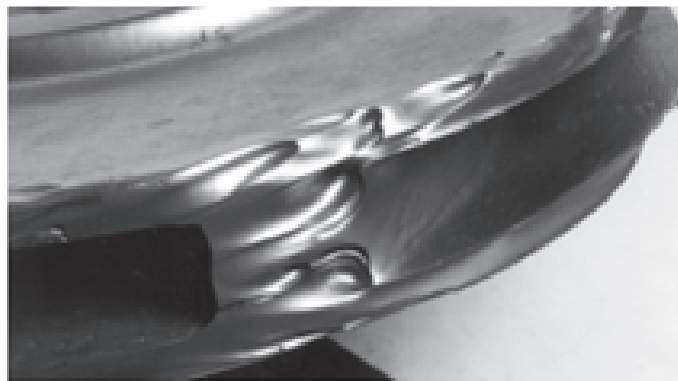
Kavitační dutina může v kapalině vzniknout za předpokladu, že v daném místě je tlak a teplota kapaliny právě taková, že kapalina může přejít do plynného stavu.

Vznik dutiny vyplněné nasycenými parami je proto vázán na specifická místa v hydraulickém systému, kde požadované podmínky mohou nastat (např. vlivem snížené rychlosti proudění) [45, 55].

Vlivem proudění v systému se dutina v proudu kapaliny postupně dostane do místa, kde již nepanují podmínky nezbytné pro její existenci. Dutina zaniká implozí, která je následována hydraulickým rázem. Protože ke vzniku a zániku kavitačních dutin dochází cyklicky a vždy na přibližně stejném místě, jsou okolní díly hydraulického systému vystavovány cyklickým rázům. Proces vzniku a zániku dutin probíhá v rozmezí  $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  s [42].

Poškození povrchu se mohou účastnit i jiné faktory, zejména chemického a elektrochemického rázu.

Nejčastější kavitační opotřebení můžeme vidět například u oběhových kol vodovodních čerpadel, redukčních ventilů, hydraulických systémů. Kavitační opotřebení povrchu odstředivého oběžného kola tlakového čerpadla je zobrazeno na obrázku 2.5. V prvotním stupni opotřebení nedochází k oddělování částic, ale pouze k „zmatování“ povrchu (drsňý, matný povrch součásti je typickým znakem kavitačního opotřebení). Ve druhém stádiu dochází k porušení vrstvy materiálu, vytrhávání částic z povrchu a ke vzniku povrchových trhlin [42, 55].



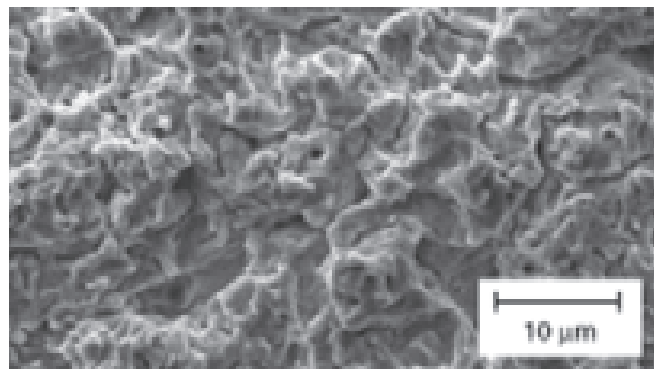
Obrázek 2.5: Kavitační opotřebení povrchu odstředivého oběžného kola tlakového čerpadla [52].

### 2.3.5 Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic ze základního materiálu vzájemným pohybem funkčních povrchů za působení kmitavého tangenciálního posunu za působení normálových sil. Za normálních podmínek běžné vibrační opotřebení vzniká již od amplitudy 0,1 až 100  $\mu\text{m}$ . Za těchto podmínek může docházet v místě styku k vytlačování maziva a přispět tak k agresivnějšímu opotřebení.

V některých případech je poměrně složité jednoznačně určit příčinu a místo vzniku vibrací. Při zběžném pozorování může být toto opotřebení zaměněno s kavitačním nebo korozním opotřebením, po podrobnější analýze je ale jednoznačně rozeznatelné. Opotřebované částice materiálů se mnohdy zachytávají v místě relativního pohybu, a tím přispívají následně k intenzivnějšímu abrazivnímu opotřebením. U ocelí, litin a jiných materiálů jsou mnohdy produkty vibračního opotřebením oxidy z místa tření. V praxi je toto opotřebení často spjato s komplexními celky, jejichž vyvážení je složité. Nedostatečně vyvážené díly se za provozu stávají generátory vibrací. Jedná se o rotační stroje, povrchy valivých ložisek, klikové hřídele, valivé čepy. Zdrojem ale mohou být i nepohyblivá uložení – vlivem nedostatečné tuhosti soustavy [42, 46, 52, 55].

Součásti po intenzivním vibračním opotřebením, které obsahují volné částice opotřebovaného materiálu, mnohdy není možné samovolně rozebrat. Takto opotřebované díly jsou velmi často poškozené do takové míry, že už je nemožné jejich následné použití. V místech pohybu se narušují povrchové vrstvy, jak u měkkých materiálů, tak i u tvrdých, kde vznikají iniciovaná místa s možností vzniku únavových lomů a následně možností havárie součásti. Z obrázku 2.6 je patrná možná míra poškození povrchu po vibrační zkoušce [52].



Obrázek 2.6: Opotřebením povrchu po vibrační zkoušce [52].

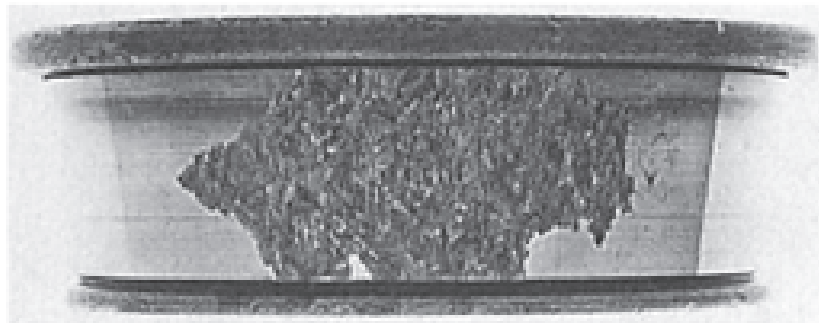
### 2.3.6 Únavové opotřebením

Únavové opotřebením vzniká na površích stykových ploch součásti, které jsou vystaveny silovému a cyklickému namáhání nebo při styku dvou těles. Napětí pod mezí kluzu je charakteristické pro vysoko-cyklovou únavu a naopak napětí nad mezí kluzu je charakteristické pro nízko-cyklovou únavu [52].

Lokální tlaky vznikají nejčastěji na povrchu dvou zakřivených styčných ploch, typickým opotřebením na součástech jsou boky u železničních dvojkolí, pístů

spalovačích motorů a plochy u valivých ložisek a jiné. Je-li povrchová vrstva vystavena vysokému smykovému tření, může docházet u plastických a u křehkých materiálů k oddělování částic vlivem křehkého lomu. Únavové porušení může zasáhnout celý povrch součásti nebo jen lokální místo. Únavové opotřebení nejčastěji není příčinou odstavení stroje, zatímco únavový lom vede k porušení stroje nebo k havárii celé soustavy.

Pro ilustraci lze uvést viditelné únavové opotřebení části plochy kuželíkového ložiska, které je zobrazeno na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Únavové opotřebení kuželíkového ložiska[52].

Vlivem cyklického namáhání vzniklo únavové opotřebení. Tak jako i v jiných případech – neodhalením rozvíjejícího se únavového opotřebení v časném stádiu by i zde vedlo k fatálnímu selhání celé strojní sestavy [42, 46, 52, 55, 56].

### **2.3.7 Kombinace opotřebení**

Lze konstatovat, že strojní součást není nikdy vystavena pouze jednomu druhu opotřebení – vždy se jedná o kombinaci více druhů opotřebení. Otázkou je, do jaké míry je některý z mechanismů dominantní. V praxi se velmi často lze setkat s tím, že určitý druh opotřebení může vyvolat následně jiný druh opotřebení. Vlivem adhezivního opotřebení, které působilo na strojní součást vlivem tvorby třísek, se následně tvoří abrazivní složka opotřebení a podobně [42].

## **2.4 Vlastnosti technických materiálů a jejich rozdělení**

Technický materiál je pro danou aplikaci volen na základě svých vlastností. Posuzované vlastnosti literatura obecně dělí následovně [58, 70]. Mezi hlavní vlastnosti, které ovlivňují chování materiálů lze vyjmenovat fyzikální, mechanické, technologické,

chemické vlastnosti. V tabulce 2.1 je uvedeno rozdělení vlastností technických materiálů, které nejvíce ovlivňují opotřebení kovových materiálů.

Tabulka 2.1: Rozdělení vlastností technických materiálů [58, 64].

Fyzikální vlastnosti	- hustota, teplota tání, délková a objemová roztažnost, tepelná vodivost;
Mechanické vlastnosti	- pevnost, tvrdost, pružnost, tažnost, houževnatost.
Technologické vlastnosti	- tvažitelnost, svažitelnost, obrobitelnost, slévatelnost;
Chemické vlastnosti	- korozivzdornost, žáruvzdornost, žárupevnost.

Některé vlastnosti mají protichůdný charakter (například tvrdost a tvárnost). Proto je zjevné že technický materiál může nabízet vysoké užité hodnoty pouze u některých vybraných vlastností, zatímco ostatní budou mít hodnoty nižší.

Z hlediska odolnosti proti opotřebení mají podstatný význam u jednofázových slitin zejména pevnost a tvrdost materiálu. Obecně lze říci, že mechanické vlastnosti jsou s odolností proti opotřebení spjaty více než například fyzikální.

#### 2.4.1 Mechanické vlastnosti kovových materiálů

Mechanické vlastnosti materiálu jak jsou definovány např. v [73] nebo [74]. Z definic lze odvodit například, že tvrdé materiály mají malou tvárnost nebo že houževnaté materiály mají vyšší pevnost.

Na základě porovnání výše uvedených definic s popisem jednotlivých druhů opotřebení kovových materiálů lze odvodit, že od materiálu s vysokou odolností proti opotřebení se obecně očekává vysoká pevnost, tvrdost a houževnatost. Tvárné a pružné materiály z tohoto pohledu nejsou natolik perspektivní [75].

Na druhé straně je ale třeba přihlédnout i k dalším (například konstrukčním) nárokům. Jednotlivé strojní díly nejsou vystavovány opotřebení samoučelně – ve strojní sestavě mají určitou úlohu – obvykle přenášejí sílu z jednoho elementu na jiný. Pokud by byla součást navrhována tak, aby co nejlépe vyhovovala přenosu síly, pak může vysoká tvrdost představovat riziko (s ohledem na porušení křehkým lomem) zatímco určitá míra pružnosti může toto riziko eliminovat.



Při volbě materiálu je také třeba uvažovat technologické nároky – součást musí být možné vyrobit s pomocí dostupné technologie a za přijatelných nákladů. Z tohoto pohledu může být požadována také určitá míra tvárnosti [75, 76].

Výše uvedené je důvodem, proč je správná volba materiálu nezbytnou, nikoliv však postačující, podmínkou pro výrobu součástí s požadovanými vlastnostmi. Další podmínkou je její zpracování. Někdy ale ani toto nemusí být dostatečné a je třeba navrhnout vhodnou kombinaci více materiálů v rámci jedné strojní součásti.

## 2.5 Rozdělení kovových technických materiálů

Současná strojírenská praxe využívá při výrobě a opravách poměrně širokou škálu kovových i nekovových materiálů. Volba vhodného materiálu závisí na tom, do jaké míry vlastnosti materiálu odpovídají konstrukčním a provozním požadavkům. V poslední době lze sledovat, jak se nekovové materiály (zejména kompozity) začínají uplatňovat tam, kde bylo jejich použití dříve nemyslitelné, přesto však převážnou většinu technických materiálů tvoří materiály kovové [4], [5]. Těm je také věnována tato práce. Popis vlastností a výroby technických kovových materiálů je v dostupné literatuře popsán více než detailně - například [59]. Proto dále nebude zmiňován.

Kovové materiály lze třídit z několika hledisek. Prvním kritériem může být chemická čistota. Z tohoto pohledu lze rozlišovat [59, 62]:

- čisté kovy;
- slitiny.

Čisté kovy jsou složeny z jediného chemického prvku. Díky tomu mohou nabídnout vynikající hodnotu některé z vlastností (zlato – vodivost, wolfram – teplota tání). Na druhé straně velmi vysoké hodnoty v jedné oblasti mohou znamenat velmi nízké hodnoty v oblasti jiné. Proto jsou čisté kovy voleny pouze tam, kde je daná vlastnost jediným dominantním kritériem [59].

Pokud je navrhována strojní součást, lze očekávat, že kritéria pro volbu materiálu budou poněkud širší. Například od ozubeného kola se očekává nejen zvýšená otěruvzdornost povrchu, ale také jistá pevnost a houževnatost. Z hlediska otěruvzdornosti by se mohla zdát volba velmi tvrdého materiálu jako správná, ale z hlediska houževnatosti tomu tak být nemusí. Proto přicházejí na řadu slitiny, které

mohou vykazovat vysoké hodnoty u širší skupiny technických vlastností. Slitina je směs dvou nebo více materiálů, z nichž alespoň jeden je kov.

Jiným kritériem může být obsah některého z chemických prvků. Z tohoto pohledu je běžné členění na [60]:

- železné kovy a jejich slitiny;
- neželezné kovy a jejich slitiny.

Neželezné kovy a slitiny mohou být zajímavé z hlediska některých vlastností (například hustota a k ní vztážená hmotnost). Význam této skupiny ale dokresluje fakt, že v technické praxi tvoří cca. 5 % produkce, zatímco zbylých 95 % tvoří železo a jeho slitiny [71].

### 2.5.1 Litina

Jako **litina** je označována slitina železa uhlíku (a případně dalších prvků), která obsahuje více než 2,11 % uhlíku [70]. Litina se vyznačuje vysokou pevností v tlaku, vysokou odolností vůči zvýšené teplotě, ale také nízkou mírou pružnosti u šedé litiny s lupínkovým grafitem. Pevnost litiny je výrazně ovlivněna formou, v jaké je v litině vyloučen uhlík [64, 70]. Literatura v tomto směru poměrně výstižně rozděluje grafitické litiny na [141, 142, 143, 144]:

- Litina s lupínkovým grafitem LLG;
- Litina s kuličkovým grafitem LKG;
- Litina s červíčkovitým grafitem LČG;
- Temperovaná litina.

Forma, v jaké je uhlík vyloučen, závisí na chemickém složení litiny (na množství některých dalších prvků ve slitině), ale také na jejím tepelném zpracování. Obecně lze tvrdit, že litina představuje materiál, který na jedné straně může nabídnout velký potenciál, co se vybraných mechanických vlastností týká a na straně druhé ji lze poměrně snadno vyrobit a zpracovávat za ekonomicky příznivých podmínek. Proto lze tvrdit, že je v některých případech jako technický materiál neprávem opomíjena.

## 2.5.2 Vlastnosti jednotlivých mikrostrukturu materiálu

Mechanické vlastnosti kovových materiálů a odolnost proti opotřebení závisí ve velké míře na mikrostruktuře a na velikosti zrna ve struktuře. Velikost zrna je ve struktuře materiálu určena především během tuhnutí (například po odlití) [105].

Struktura kovových materiálů může být ovlivněna chemickým složením, tepelným zpracováním a stavu krystalizačních zárodků. Struktura kovového materiálu může být jednosložková nebo se může skládat z více složek. Popis nejčastěji vyskytujících se metalografických struktur a jejich mechanických vlastností:

### Perlitická struktura

Je měkká, tvárná, odolává mechanickým rázům a vzniku trhlin ale má malou odolnost proti opotřebení. Je tvořena feritem a perlitickým cementitem, který mu dodává větší pevnost a tvrdost, než jakou má samotný ferit.

Ve srovnání s feritem má perlit vyšší pevnost a tvrdost, horší plastické vlastnosti, horší obrobiteľnosť, vyšší odolnost proti opotřebení. Přítomnost perlitu v litinách ovlivňuje pevnost a tvrdost a dosahuje až tvrdosti HB = 290. Vlastnosti perlitu významně závisí na "hustotě perlitu" dané jeho dispersitou. Dispersita je určena vzdáleností dvou sousedních lamel feritu. Čím hustější je perlit, tím nižší jsou mechanické vlastnosti zejména tvrdost a pevnost [105].

### Feritická struktura

Má nižší pevnost a tvrdost oproti perlitické struktuře, je tvárná, odolává vzniku trhlin, ale má špatnou odolnost proti opotřebení. Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu. Pomalé ochlazování podporuje vznik feritu. Ferit vykazuje následující mechanické vlastnosti – měkký, tvárný, s relativně nízkou pevností, dobře obrobiteľný, v litinách je nositelem houževnatosti. Na vlastnosti feritu mají značný vliv legující a doprovodné prvky. Všechny přísady zvyšují tvrdost a pevnost feritu a mají také vliv na jeho houževnatost. Poměrně významné je snížení houževnatosti feritu s rostoucím obsahem křemíku. Významnými feritotvornými prvky jsou také Cr, Si, W, Mo, V, Al a Ti [105].

### **Feriticko-perlitická struktura**

Má nízkou pevnost i tvrdost, její mechanické vlastnosti jsou dány kombinací struktury perlitické a feritické. Z obou zmiňovaných si tato struktura přebírá dostačenou tvrdost při zachování tvárnosti. Výsledné vlastnosti jsou dány především procentuálním zastoupením jedné nebo druhé struktury. Pokud bude struktura obsahovat větší procento feritické struktury tak pevnost a tvrdost budou nižší, ale bude dosahovat lepších výsledků z oblasti tvárnosti. Vyšší procentuálním zastoupením perlitické struktury bude znamenat, že pevnost a tvrdost bude vyšší, ale naopak tvárnost bude omezena.

### **Martenzitická struktura**

Je velice tvrdá, vyznačuje se vysokou křehkostí, špatnou odolností proti vzniku trhlin ale dobrou odolností proti opotřebením. Vzniká bezdifuzním rozpadem austenitu při kalení nelegovaných nebo legovaných litin, v legovaných litinách někdy přímo v litém stavu. Martenzit je velmi tvrdý – dosahuje tvrdosti až nad 1 100 HV, je také vysoce křehký. Vznik martenzitické struktury podporují prvky C, Ni, Cr.

### **Austenitická struktura**

V litinách se nachází ve formě zbytkového austenitu Austenitická struktura velice tvrdá, vyznačují se zvýšenou houževnatostí i při nízkých teplotách, dobrou odolností proti vzniku trhlin a vysokou odolností proti opotřebením. Austenit je měkký, výborně tvárný, odolný proti korozi a proti působení vysokých teplot a vyznačuje se paramagnetickými vlastnostmi. Austenitické litiny se používají pro výrobu žáruvzdorných a korozivzdorných odlitků. Mezi nejdůležitější austenitotvorné prvky lze zařadit Ni, Mn, Co, C a N [52, 105].

### **Bainitická struktura**

Vzniká jako lící struktura především u legovaných litin s obsahem molybdenem a niklu. U nelegovaných litin podporuje vznik bainitické struktury tepelné zpracování. Litiny s bainitickou strukturou mají při dobrých plastických vlastnostech vysokou pevnost a tvrdost. [52, 105].

## Vliv karbidů

Karbidy jsou tvrdé fáze, proto silně modifikují mechanické vlastnosti ocelí. Zvyšují pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení, ale také pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot (tzv. žárupevnost). Prvky, které v ocelích tvoří karbidy, se nazývají karbidotvorné. Patří mezi ně zejména Cr, Mn, V, Mo, W a Ti. Orientační hodnoty tvrdosti HV litin uvádí tabulka 2.2.

Tabulka 2.2: Orientační hodnoty tvrdostí struktur [105].

Struktura	Tvrdost
Feritická	130 - 160 HV
Ferito-perlitická	140 - 220 HV
Perlitická	170 - 275 HV
Austenitická	120 - 190 HV
Bainitická	240 - 440 HV
Martenzitická	320 - 580 HV
Martenziticko-karbidická	560 - 720 HV

Hlavní faktory, které ovlivňují konečnou strukturu litin, jsou chemické složení matrice a podmínky ochlazování. Legující prvky se rozpouští v různém poměru mezi karbidy a austenitem. Otěruvzdorné litiny mají často vysoce stabilní austenit v perlitické a bainitické oblasti pomocí transformace nalegováním austenitu C, Cr, Ni, Mo. V litém stavu v matrici chromových litin je značný podíl austenitu. Jeho stabilita při izotermickém rozpadu závisí na jeho chemickém složení a teplotě austenitizace.

### 2.5.3 Vliv chemického složení na výsledné vlastnosti ocelí

Změna chemického složení oceli vede ke změně výsledných, zejména mechanických, vlastností slitiny. Volba vhodného chemického složení obecně záleží na zamýšlené aplikaci. Přesto je ale možné tvrdit, že v případě některých prvků převažují negativní efekty, zatímco jiné prvky jsou prospěšné. Literatura uvádí [59], [70], například že:

Mezi škodlivé lze řadit: síra, fosfor, kyslík, dusík, vodík, cín, olovo, arsen, atd.

Mezi prospěšné prvky: křemík, chrom, nikl, vanad, mangan, wolfram, niob, atd.

Pochopení vlivu daného prvku na jednotlivé vlastnosti materiálu je z hlediska volby materiálu zásadní. Literatura v tomto směru poskytuje více než podrobné údaje [59], [67] nebo [75].

#### 2.5.4 Vliv jednotlivých chemických prvků

##### Uhlík (C)

- z hlediska vlivu na vlastnosti ocelí má největší význam, s rostoucím množstvím uhlíku roste pevnost a tvrdost materiálu, ale klesá jeho houževnatost a plasticita;
- pod 0,2 % C lze oceli poměrně dobře svařovat bez přehřevů, nad 0,6 % C poměrně dobře kalitelná, ale špatně svařitelná);
- vyšší obsah uhlíku zlepšuje kalitelnost materiálu;
- uhlík podporuje grafitizaci litiny;
- vyšší obsah uhlíku v litině snižuje míru smršťování při tuhnutí [59, 70].

Uhlík spolu s křemíkem mají největší vliv na vlastnosti litin a strukturu. S vyšším obsahem uhlíku, který je vyloučen ve formě grafitu se snižuje smrštění během tuhnutí. Při vyšším obsahu uhlíku dochází ke zhrubnutí grafitu a to má následně za vliv nižší mechanické vlastnosti.

##### Křemík (Si)

- zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost proti korozi;
- funguje jako dezoxidační činidlo;
- snižuje tvařitelnost;
- může podporovat vznik jemnozrnné struktury. Ve spojení s dalšími prvky (Fe, Al, atd.) je obvyklým očkovačem přidávaným do litiny za účelem ovlivnění množství, tvaru a velikosti zrn grafitu) [75, 76].

Křemík je po uhlíku dalším z nejvýznamnějších prvků v litinách. Během tuhnutí má křemík za následek podporování grafitizace a během transformace austenitu podporuje vznik feritické fáze. Pokud litiny obsahují malé procento křemíku tak mají vliv k tvorbě zákalky [52, 105].

## **Mangan (Mn)**

- zvyšuje pevnost a tvrdost při zachování dostatečné míry tažnosti;
- obecně se považuje za prospěšný díky vysoké afinitě ke kyslíku a síře [59, 70].

Mangan jako jeden z mála prvků má při tuhnutí litiny pouze malý vliv na grafitizaci. Při obsahu manganu nad 0,5 % působí antigrafitisačně. Při obsahu manganu přibližně nad 1,1 % často podporuje vznik přechlazeného grafitu. Pokud je litina pomalu ochlazována pomalu může mangan vytvářet karbidy. Při pomalém ochlazování může mangan v tlustých stěnách odlitku tvořit karbidy. Mangan ve struktuře litin stabilizuje perlit, napomáhá zjemňování perlitu. Hlavními výhodami je, že zvyšuje pevnost litiny, tvrdost a odolnost proti opotřebení [105].

## **Měď (Cu)**

- pokud je množství mědi udržováno pod specifickým limitem, může přítomnost mědi v oceli zvyšovat pevnost a odolnost proti korozi, nebo například podporovat kalitelnost;
- v případě, že je daný obsah tohoto prvku překročen, měď podporuje rozvoj trhlin v materiálu;
- podporuje grafitizaci litiny [58, 59].

Měď mírně podporuje grafitizaci litin. Měď v rozmezí od 0,5-1,5 % se používá pro stabilizaci perlitu ve tvárných litinách, zlepšení mechanických vlastností a tvrdosti litiny. U litin se často s výhodou kombinuje s chromem, obvykle v poměru Cu/Cr = 4:1, kdy je možné pomocí toho poměru dosáhnout perlitické struktury s jemným grafitem a velmi vysokými mechanickými vlastnostmi. Za účelem legování je vždy nutno použít pouze velmi čistou měď bez příměsí jiných prvků [105].

## **Chrom (Cr)**

- zvyšuje pevnost a otěruvzdornost materiálu;
- zlepšuje vlastnosti materiálu za tepla, (pevnost), ale přispívá také k prokalitelnosti materiálu;
- při zvýšeném obsahu (nad 12 %) zvyšuje odolnost proti korozi;

- v kombinaci s dalšími prvky je obvyklým legujícím prvkem korozivzdorných ocelí;
- v litině působí jako anti grafitizační činitel [59, 70, 76].

Chrom je silně karbidotvorný prvek. Podporuje metastabilní tuhnutí slitiny. Zdrojem chromu bývají vsázkové suroviny - surové železo, ale zejména ocelový nebo litinový šrot. Chrom působí ke zjemnění grafitu, často však může způsobovat vznik mezidendritického grafitu. Zvyšuje tvrdost a pevnost litiny. Pokud ve struktuře nachází volné karbidy, významně se podílí na zhoršení obrobitelnost. Pro zvýšení mechanických vlastností se leguje se chromem v množství do 0.5 %. Negativní sklon ke vzniku karbidů se kompenzuje přidáním mědi. Ve feritických litinách má být obsah co nejnižší < 0,045 % [20, 105].

### **Nikl (Ni)**

- zlepšuje vrubovou houževnatost (při nízkých a snížených teplotách);
- zvyšuje mez kluzu;
- podporuje jemnozrnnou strukturu materiálu.
- v kombinaci s chromem je obvyklou přísadou korozivzdorných ocelí, kde podporuje austenitizaci, houževnatost a plasticitu;
- podporuje grafitizaci litiny [73, 74].

Nikl má podobné účinky jako měď. Stabilizuje perlit, působí mírně grafitizačně, zvyšuje mechanické vlastnosti při nízkých teplotách. Za těmito účely se přidává do obsahu až 4 %. Při obsahu niklu nad 17 % (za přítomnosti spolu s Cu již od 13 %) stabilizuje austenit ve struktuře [20, 105].

Odborná literatura v některých případech popisuje i vliv dalších prvků [62, 64]. Takto široká škála ale daleko přesahuje rozsah této práce. V další (experimentální) části práce budou uvažovány právě výše uváděné prvky (C, Si, Mn, Cr, Ni, Cu).



## 2.6 Vytváření povrchových vrstev se zvýšenou odolností proti opotřebení

Jak již bylo zmíněno, na strojní součást mohou být kladeny protichůdné nároky. Zatímco od většiny součástí může být očekáváno, že bude houževnatá, od určitých (definovaných) funkčních ploch se může očekávat, že budou naopak tvrdé a schopné odolávat opotřebení. V takovém případě je na konstruktérovi a technologovi, aby zvážili, zda navrhovat součást z materiálu, který obstojí v obou případech – což může vést ke kompromisnímu řešení, nebo zda zvolit takový postup, který umožní na součásti z houževnatého materiálu vytvořit vrstvu s jinými vlastnostmi. Takového stavu lze docílit několika způsoby [69, 77]:

- tepelným zpracováním;
- chemicko-tepelné zpracováním;
- tepelně-mechanickým zpracováním;
- navařováním.

Z hlediska této práce je významné navařování. Proto se zde sluší uvést alespoň jeho stručný popis. Ostatní technologie jsou dobře popsány literaturou [59, 60, 70, 71, 73] a proto není třeba je dále zmiňovat.

### 2.6.1 Navařování

Navařování je proces, při kterém dochází k depozici nové kovové vrstvy (návaru) na původní kovový materiál (základní materiál). K tomu je obvykle používáno obvyklé svařovací zařízení.

Návary jsou aplikovány jak v průběhu výroby na nové díly jako prevence, například zvyšování chemické odolnosti procesních částí v chemickém průmyslu tzv. claddingem, tak v rámci renovace strojních součástí, které byly poškozeny (například opotřebením). Pokud je navíc nový návarový materiál vhodně zvolen, může mít takto renovovaná povrchová vrstva vyšší odolnost proti opotřebení, než tomu bylo u původního povrchu.

Nová návarová vrstva je se základním materiálem spojena tavným spojem. Tedy stejně, jako dva základní materiály, které jsou spojeny svarem. Tento druh spojování může být doprovázen některými negativními vlivy (deformace, vnitřní pnutí, nežádoucí změny v tepelně ovlivněné oblasti, nebo například vznik trhlin). Tyto vlivy je

třeba pokud možno co nejvíce potlačit (například zmenšením tepelně ovlivněné oblasti pod návarem). Proto je třeba věnovat pozornost způsobům navařování.

### **2.6.2 Způsoby navařování**

Literatura uvádí různé způsoby navařování [81]. Z hlediska této práce je uvažováno pouze navařování elektrickým obloukem, které může být prováděno odtavující se elektrodou, nebo netavící se elektrodou. V obou případech se může jednat o ruční proces, tak o proces s různou mírou automatizace (i vysoce automatizovaný).

### **2.6.3 Návarové materiály**

Přídavný materiál může být ve formě [79]:

- drátu;
- obalované elektrody;
- tyčinky;
- plněné elektrody (trubičkového drátu);
- pásy atd.

Na trhu je k dispozici celá škála komerčně dostupných materiálů s různými vlastnostmi, například ESAB [29], WELCO [34], CASTOLIN a atd. Při jejich volbě by mělo být přihlíženo nejen k požadovanému chemickému složení a očekávaným mechanickým vlastnostem, zohledněny by měly být také další obecné zásady.

### **Vliv teploty tavení**

Teplota tavení návarového materiálu by měla být obdobná nebo menší než teplota tavení základního materiálu. Příliš velké rozdíly v teplotě tavení ale také nejsou vhodné (například navařování metalizací hliníkové vrstvy na ocel).

### **Vliv hmotnosti (specifické hustoty)**

Při navařování je třeba počítat s tím, že pokud má jeden materiál výrazně nižší specifickou hustotu, může docházet k jeho „vyplavování“ do druhé taveniny.

## **Vliv chemického složení základního materiálu**

Při procesu navařování je třeba zohlednit, do jaké míry je materiál dobře svařitelný (vliv chemického složení, uhlíkový ekvivalent). Některé materiály například litiny, vyžadují zvláštní přístup např. předehřev a závěrečné pomalé ochlazování. Vlastní technologie navařování je odbornou literaturou dobře popsána [46] nebo [80].

## **2.7 Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení kovových materiálů**

Každý druh opotřebení je ovlivňován sérií specifických okolností. Výskyt těchto okolností, jakož i jejich vzájemná kombinace a intenzita, jsou podmínkou pro rozvoj opotřebení a definují jeho rychlost [47, 52, 54]. Pokud by se podařilo tyto faktory nebo případně jejich specifické kombinace jednoznačně identifikovat, pak by prostřednictvím jejich potlačení bylo možné redukovat vliv opotřebení. Jako příklad lze jmenovat vliv teploty. Její snížení může mít za následek zmírnění účinků poškození povrchu [83].

Mnozí autoři [82, 84, 85, 86, 88, 91], kteří se zabývali studiem parametrů ovlivňující abrazivní opotřebení, jmenovali následující základní faktory, na kterých opotřebení závisí:

- zatížení vzorku;
- délka třecí dráhy;
- tvrdosti abraziva na opotřebování materiálu;
- velikosti abrazivního zrna;
- relativní třecí rychlost materiálu a abraziva;
- vliv povrchové tvrdosti materiálů vůči velikosti opotřebení;
- vliv vlhkosti materiálu a abraziva.

Nejčastější parametry, které se podílí na ovlivnění abrazivního opotřebení, jsou shrnuty v tab. 2.3.

Tabulka 2.3: Parametry ovlivňující abrazivní opotřebení [20].

Opotřebovaná součást	- povrchová vrstva, tvrdosti v jádře materiálu, tvrdost definované struktury materiálu, mikrostruktura (tvar, velikost zrna, orientace a velikost fází), atd.
Abrazivo	- tvrdost, geometrie částice (velikost, orientace, tvar), rozdělení částice (hustota, výška, vzdálenost mezi částicemi), atd.
Parametry dotyku	- relativní rychlost, zatížení, velikost dotykové plochy, teplota, prostředí, atd.
Výsledné parametry	- koeficient opotřebení, poměrný otěr, koeficient tření, topologie povrchu, koeficient oddělování, atd.

### 2.7.1 Způsoby určování faktorů majících vliv na abrazivní opotřebení.

Zjištění základních parametrů abrazivního opotřebení může být provedeno v laboratorních podmínkách (na laboratorních přístrojích) nebo v provozních podmínkách (na provozních zařízeních). Obvyklé je nejprve přistoupit k laboratornímu měření, které pomůže definovat jednotlivé faktory za předem definovaných počátečních podmínek. Tyto parametry jsou následně určovány při provozních zkouškách.

Z laboratorních podmínek byla odvozena zjednodušená rovnice (2.2) pro výpočet úbytku materiálu  $W_o$  při abrazivním opotřebení [12, 97].

$$W_o = k_{abr} \cdot \frac{F \cdot L}{\pi \cdot H} \quad (2.2)$$

Z rovnice (2.2) vyplývá, že objemový otěr materiálu je přímo úměrný přítláčné síle a dráze pohybu vzorku, ale nepřímo úměrný tvrdosti materiálu. Rabinowitz a et al. [45, 46] se řadu let zabývali abrazivním opotřebem. Ověřili výsledky mnohých autorů a dospěli k názoru, že  $k_{abr}$  se pohybuje v rozmezích  $2 \times 10^{-1}$  až  $2 \times 10^{-2}$  dle vlivu abrazivních částic.

Chruščov odvodili rov. (2.3) poměrné odolnosti materiálu (čistého kovu) proti abrazivnímu opotřebení v následujícím tvaru [86]:

$$\varepsilon = b \cdot h [-] \quad (2.3)$$

## **2.8 Vlivy na proces a na velikost abrazivního opotřebení**

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé vlivy, které se podílí na proces abrazivního opotřebení.

### **2.8.1 Vliv druhu materiálu**

Vliv chemického složení materiálu (vliv druhu materiálu) na odolnost proti opotřebení je odvozen od vlivu chemického složení a mechanické vlastnosti materiálu. Proto lze volbou vhodného materiálu vliv abrazivního opotřebení snížit. Výběr ale může být velmi složitý proces plný kompromisů a ke správnému výběru je zapotřebí znát i vliv dalších parametrů. Například vliv velikosti zatížení nebo druhu pracovního prostředí.

V praxi prvotní výběr materiálů provádějí konstruktéři, kteří v některých případech opomenou okolní podmínky uvažovat nebo jednoduše nemají k dispozici dostatek podkladů a informací nezbytných pro správné rozhodnutí [12, 42, 46, 52]. V takových případech je často výběr proveden pouze na základě požadovaného chemického složení a mechanických vlastností, jak je uvádí literatura – bez ohledu na vliv pracovního prostředí.

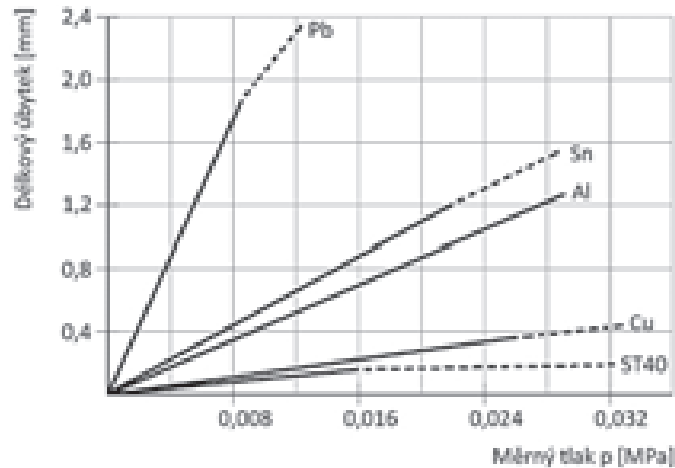
Není ale výjimkou, že rozhodující faktor pro výběr vhodného materiálu na danou součást je požadovaná životnost dílu v kombinaci s jeho cenou. Dnešní doba klade důraz na snižování nákladů na výrobu daných zařízení. Pro součásti, které budou vystaveny dlouhodobému opotřebení, je vhodné volit kvalitnější druhy materiálu. Součásti, které nebudou používány tak často nebo lze tolerovat jejich krátkou životnost, mohou být vyrobeny z méně kvalitního materiálu.

### **2.8.2 Vliv zatížení vzorku**

Mnozí autoři [20, 98, 99, 100], kteří se po desítky let zabývali a stále zabývají abrazivním opotřebením, dospěli k názoru, že velikost opotřebení mnohých materiálů je přímo úměrná použitému zatížení. V průběhu let byla zkoušena celá řada materiálů a některé materiály vykazovaly určitý odklon lineárního modelu [85, 90].

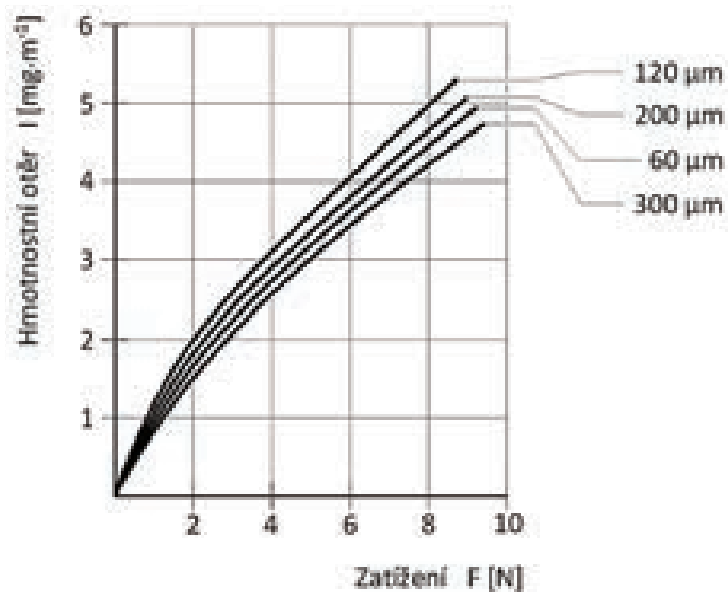
Příkladem jsou výsledky experimentálních měření zachycené na obrázku 2.8, kterou provedli Chruščov a Babičev [85], kteří volili z pěti materiálů – olova, cínu, hliníku, mědi a zkušební etalonu z oceli 12040 (ST40). Všechny zkoušené vzorky byly upraveny na průměr 2 mm a bylo použito zkušební zatížení od 0,03 až 0,034 N,

toto zatížení odpovídá měrnému tlaku 9,551 až 10,824 kPa. Dále bylo použito brusné plátno o zrnitosti 170  $\mu\text{m}$ . Jak je zřejmé z následujícího, u všech vzorků existuje lineární závislost až do horní části, ve které se zřejmě vyskytla změna charakteru procesu opotřebení daného zkoušeného vzorku – pravděpodobně docházelo k vylamování materiálu.



Obrázek 2.8: Graf závislosti vlivu zatížení na abrazivním opotřebení [85].

Autoři Larsen a Badse [101] provedli rozsáhlé zkoušky, ve kterých se zabývali vlivem velikosti abrazivního zrna a velikostí zkoušeného vzorku na způsob opotřebení. Graf na obrázku 2.9 znázorňuje závislost zkušebního zatížení na hmotnostním úběru vzorku pro různé velikosti abrazivních částic. Zkušební vzorky byly vyrobeny z mědi a vykazovaly tvrdost 110 HV 30.



Obrázek 2.9: Graf závislosti vlivu zkušebního zatížení na hmotnostním oteru při různé velikosti abrazivní částice pro materiál Cu [101].

### 2.8.3 Vliv kluzné rychlosti pohybu

Vliv kluzné rychlosti na proces abrazivního opotřebení není snadné předvídat. Kluzná rychlost se může projevovat odlišně v závislosti na okolních podmínkách – například může záviset na vlhkosti prostředí nebo média přítomného během procesu opotřebení (jak je obvyklé u provozních zkoušek). Právě z těchto důvodů se popisu vlivu kluzné rychlosti mnozí autoři vyhýbají. Určité poznatky ale přesto k dispozici jsou. Bylo vyzkoušeno, že např. vysoká obvodová rychlost vede k velkému zvýšení teploty povrchu součásti a následným snížením mechanických vlastností materiálu, což následně vede ke zvýšení opotřebení [12, 20, 46].

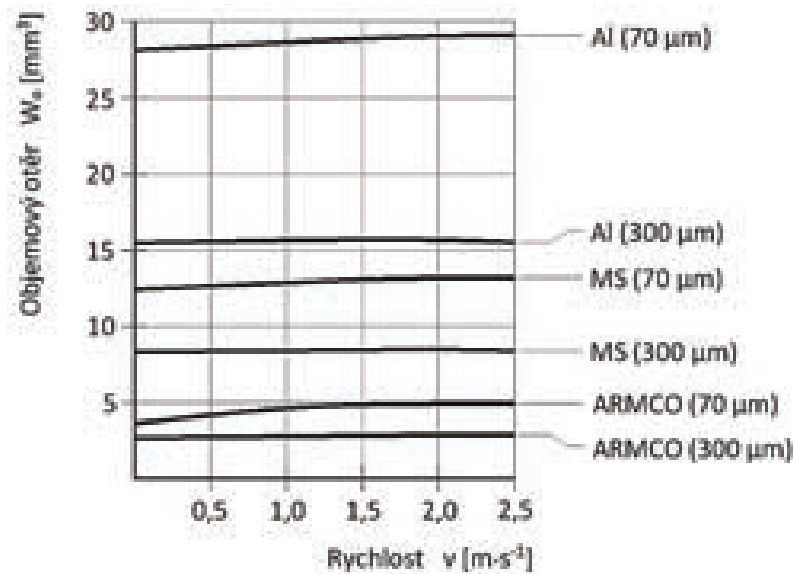
Chruščov a Babičev [85] prováděly experimentální měření vlivu kluzné rychlosti na proces abrazivního opotřebení na brusném přístroji s označením „Ch-B“. Dospěli k názoru, že opotřebení zkušební vzorku mírně roste až do hodnoty  $2 \text{ ms}^{-1}$ . Vztah kluzné rychlosti a abrazivního opotřebení pro ocel C40 a C45, která byla tepelně zpracována, jsou zobrazeny v tabulce 2.4. Jejich experimenty byly provedeny na přístroji, který pracuje na principu pohybu zkušební vzorku po otáčejícím se kotouči s brusným plátnem. Dalšími zkouškami byly experimenty na žíhaných uhlíkových ocelích, kdy byly naměřeny výsledky, které ukazují, že abrazivní opotřebení vzroste o 13 %. Druhá série vzorků byla vyrobena z oceli se středním obsahem uhlíku, která posléze byla tepelně zpracována, kde abrazivní otěr vzrostl jen o 6,5 %. Podobné výsledky ve svých pracích taktéž publikovali Nathan a Jones [86], kteří využívali přístroj s nekonečným pásem, který byl pokryt vrstvou abrazivních částic a umožňoval přesněji určit kluznou rychlost částic vzhledem ke vzorku.

Tabulka 2.4: Vztah kluzné rychlosti a abrazivního opotřebení dle Chruščova a Babičeva [85].

Materiál	Materiál dle ČSN 41 2040	Tvrдость [HV]	Kluzná rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]		
			0,0233 – 0,172	0,093 – 0,685	0,376 – 2,73
Ocel 40 žíháno	12 040	178	93,5 %	100 %	106,5 %
Ocel 45 tepelně zpracováno	12 040	645	96,7 %	100 %	103,3 %

Podrobnější experimenty na vzorcích z hliníku, mosazi a Armco železa pro dvě různé velikosti abrazivního zrna  $70 \mu\text{m}$  a  $300 \mu\text{m}$  ukázaly, že objemový otěr při abrazivním otěru menšími částicemi stoupá s rychlostí od 4 do 20 % [102]. Naměřené

výsledky experimentálního měření závislosti vlivu kluzné rychlosti na objemovém otěru uvádí graf na obr. 2.10. Zkoumán byl taktéž objemový otěr za použití větších částic, rapidní nárůst ale nebyl zaznamenán.



Obrázek 2.10: Graf závislosti vlivu kluzné rychlosti na objemovém otěru pro hliník, mosaz a ARMCO [102].

Elen a Li [97] zkoumali abrazivní opotřebení za použití přístroje s pryžovým kotoučem. Jejich výsledky ukázaly, že u hliníku a mědi se otěr materiálu v rozsahu rychlostí 1 až 5  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  nezmění. Tyto výsledky byly následně ověřeny na vzorcích z kalené ledeburitické oceli za stejných rychlostí, zde byl však zaznamenán výrazný pokles objemového otěru. Tento poznatek následně autoři vysvětlili tím, že se může projevit vliv tření mezi stykovými plochami mezi vzorkem a pryžovým kotoučem. Tím může dojít ke zvýšení teploty, která následně vede ke změně mechanických vlastností povrchové vrstvy pryžového kotouče, a tím i ke změně mechanických a fyzikálních podmínek. Vlivem zvýšené teploty pryžového kotouče dojde k ohřátí zkoušených materiálů, to může mít za následek změnu tvrdosti vzorků.

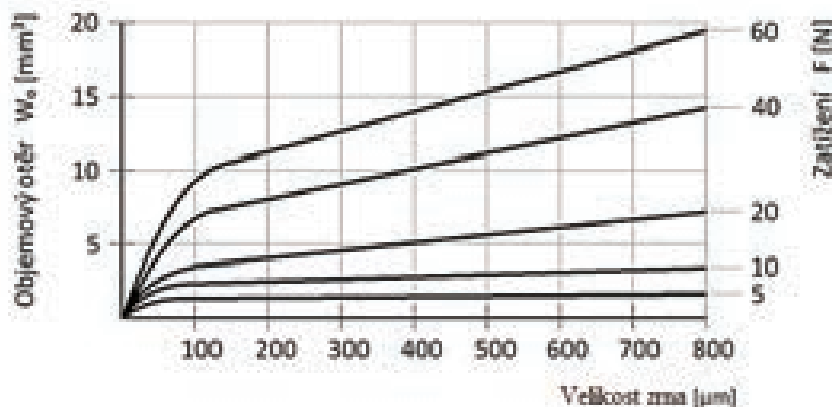
#### 2.8.4 Vliv velikosti abrazivních částic

Experimentální měření mnohých autorů ukázala [15, 87, 96, 101, 106, 107], že existuje závislost mezi velikostí abrazivní částice a mírou abrazivního opotřebení. Opotřebení roste s velikostí abrazivní částice. Toto tvrzení platí do doby, než nastane dosažení kritické velikosti částice, kdy se opotřebení začne pomalu snižovat. Kritická velikost abrazivní částice je závislá především na druhu abrazivní částice, dále na použitém zatížení, na mechanických vlastnostech zkoušeného materiálu a taktéž na



velikosti opotřebované plochy a tvrdosti částice [104]. V závislosti na výše jmenovaných parametrech se kritická velikost pohybuje v intervalu od 9 do 60  $\mu\text{m}$ . Je ale třeba dodat, že vliv má i druh použitého přístroje a kluzná rychlost.

Autoři Dobrovolskij a Košelenko [104] došli k závěru, že velikost abrazivního opotřebení roste až do velikosti částic 900  $\mu\text{m}$  a další zvětšování částic už nemá vliv na velikost opotřebení. Graf na obrázku 2.11 uvádí vliv velikosti zrna na objemový ořer.



Obrázek 2.11: Graf závislosti vlivu velikosti abraziva na objemový ořer [96].

Podrobnější výsledky byly publikovány také autory [15, 87, 96, 101, 108], kteří dospěli k názoru, že opotřebení povrchu materiálu je rozděleno do tří stádií podle rychlosti opotřebení. V prvním stádiu dochází k nízkému opotřebení při mírném zvětšování částic. Ve druhém stádiu dochází k výraznému zvýšení opotřebení a třetí stádium opotřebení už není závislé na velikosti částic a jeho míra roste velmi pomalu.

Podle Garbara [108, 109] u slitin hliníku typu AISI 1020, AISI 1040, AISI 1080 dochází v prvním stadiu opotřebení k povrchovému zpevnění materiálu. Toto tvrzení podložili tvrzením týkající se plastické deformace, kdy změna povrchové vrstvy pomocí relaxace je rychlejší než plastická deformace. Povrchová vrstva změněná relaxací je pevnější a odolnější vůči abrazivnímu opotřebení. Ve druhém stadiu, kdy dochází k výraznému vzrůstu opotřebení od relativně nízké až po vysokou rychlost, odolnost materiálu klesá. Tento jev je dán fragmentací povrchové vrstvy, kdy se její velikost zvětšuje. Povrchová vrstva je tím méně odolná vůči opotřebení.

### 2.8.5 Vliv tvrdosti abraziva a opotřebovávaného materiálu

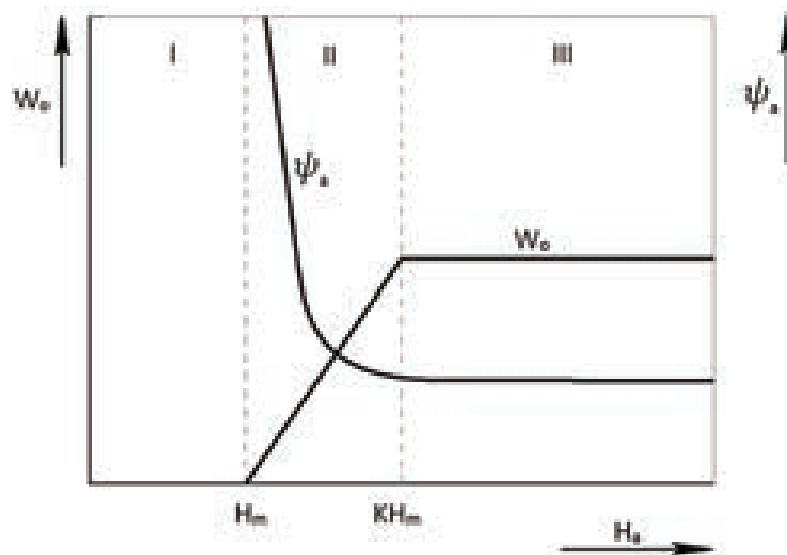
Experimenty ukazují, že opotřebení materiálu je úměrné přítláční síle a délce, během které dochází k opotřebení a nepřímo úměrné tvrdosti materiálu, na něž působí opotřebení. Je také známo, že když je tvrdost opotřebovávaného materiálu  $H_m$  značně

menší, než tvrdost abraziva  $H_a$ , odolnost opotřebovávaného kovového materiálu pak značně klesá.

V případě, že tvrdost použitého kovového materiálu roste, jeho odolnost vůči abrazivnímu opotřebení taktéž roste a dosahuje svého maxima v bodě, kdy platí rovnice (2.4) [20, 86].

$$H_m = \frac{H_a}{k} \quad (2.4)$$

Chruščov [86] při svých experimentech došel k závěru, že koeficient  $k$ , který je vyjádřen jako poměr tvrdosti abraziva ku objemovému otěru se pohybuje v rozmezí 1,3 až 1,7. Vliv objemového otěru  $W_o$ , tvrdosti abraziva  $H_a$  a použitého materiálu  $H_m$  na výsledném poměrném opotřebení kovového zkoušeného materiálu je znázorněno následujícím grafem na obrázku 2.12.

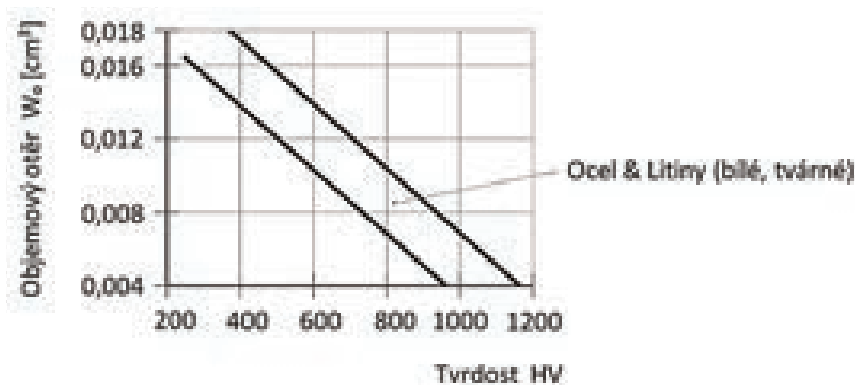


Obrázek 2.12: Graf závislosti objemového otěru a poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení  $\psi_a$  na vlivu tvrdosti abraziva  $H_a$  a tvrdosti opotřebovaného materiálu  $H_m$  v závislosti na [86].

V technické praxi se na opotřebení strojních zařízení podílí nejčastěji minerální látky (jako např.  $\text{SiO}_2$ ). Mnohé svojí tvrdostí překračují tvrdost některých v praxi používaných kovových materiálů (například uhlíkových ocelí). Pouze některé nástrojové oceli, speciální litiny se zvýšenou odolností vůči opotřebení nebo tvrdonávary, které obsahují karbidy, mají výslednou tvrdost srovnatelnou nebo vyšší.

Chruščov [85] došel k názoru, že při opotřebení materiálu dochází k plastickým změnám v materiálu, které se následně podílí na zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy materiálu vzorku.

Ke zvýšení tvrdosti materiálu dochází na hraně před oddělováním třísky a tento materiál je odebrán ve formě třísky, proto zpevnění povrchové vrstvy nemá zásadní vliv na zvýšení odolnosti vůči abrazivnímu opotřebení. Zpevnění povrchové vrstvy kovového materiálu, na které působí opotřebení, je způsobeno vlivem plastické deformace. Pouze na povrchu směrem k jádru tvrdost značně klesá. Plastické zpevnění povrchových vrstev je přímo úměrné hloubce působení abrazivních částic. Boyes [110] zjistil, že mezi objemovým otěrem a tvrdostí materiálu existuje závislost. Podrobnějších výsledků dosáhl při studiu korelace mikrotvrdosti opotřebovaného povrchu s objemovým úbytkem u ocelí a litin, který uvádí graf na obrázku 2.13, kde je zobrazena oblast, ve které se tyto dva materiály pohybují.



Obrázek 2.13: Graf závislosti objemového otěru povrchové vrstvy na mikrotvrdosti oceli a litin [110].

Richardson [89, 90, 92] ve svých experimentech ověřil teoretický předpoklad, že při abrazivním opotřebení na brusném plátně dochází k nižšímu zpevnění povrchových vrstev materiálu, než při použití vhodné metody úpravy povrchu otryskáním. Při experimentálním měření Richardson ověřil [89, 90], že při působení měkkých částic na daný povrch, může vznikat abrazivní opotřebení za předpokladu, že abrazivní částice má vhodný tvar řezné části. Při vhodném ostrohranném tvaru částice může docházet až k intenzivnímu opotřebení součástí. Závislost objemového otěru je pro kovové a nekovové materiály rozdílná. Poměrný objemový otěr nekovových materiálů, které mají nižší tvrdost, pouze mírně roste oproti kovovým materiálům. Odlišné mechanismy otěru jsou pravděpodobně dány různorodostí meziatomových vazeb, které působí v krystalové mřížce.

## **2.9 Metodika hodnocení vlastností a míry poškození opotřebovaného povrchu**

Z vlastností opotřebované povrchové vrstvy lze odvodit množství informací o materiálu i o provozních podmínkách, v jakých byl nasazen. Mikrostrukturní analýzy spolu s měřením tvrdosti a chemického složení pak tyto informace mohou doplnit a tím přispět k lepšímu zmapování celého problému. Struktura i složení poškozené povrchové vrstvy jsou často velmi odlišné od struktury a složení původního materiálu. Proto je vhodné tyto dva stavy vzájemně porovnat.

### **2.9.1 Diagnostika poškozeného povrchu se zaměřením na abrazivní opotřebení**

Při diagnostikování poškozeného povrchu je třeba zaměřit pozornost na rozpoznání přítomnosti těch faktorů, které jsou spjaty s rozvojem opotřebení. Dále je třeba stanovit, k jakému typu poškození na daném povrchu došlo. Každý typ poškození se na povrchu projevuje specifickým způsobem. Rozpoznání této signatury pak vede ke stanovení způsobu opotřebení a tím napoví, které faktory mohly vést k jeho rozvoji. Taková znalost může v důsledku napomoci dané faktory potlačit a tím omezit budoucí případy opotřebení. [20, 128] Obecně lze rozlišit následující stavy:

- nadměrný úbytek (ztráta) materiálu vede až k opotřebování celého celku součásti (např. zuby bagru, opotřebování podrážek bot) a tím ke ztrátě integrity;
- ztráta materiálu vede ke zhoršení funkce (např. opotřebení řezné hrany vrtáku, nadměrné opotřebení kluzné plochy ložiska);
- opotřebované (uvolněné) částice materiálu zhorší funkci tím, že způsobí abrazivní opotřebení součástí, které následně kontaminují konečné výrobky, (jako např. stroje pro leštění optických čoček) [46, 63, 69].

V průběhu procesu abrazivního opotřebení dochází k místnímu porušení opotřebovaného materiálu a k vytváření rýh, které je velmi často doprovázeno místním ohřevem materiálu i tělesa. Studium topografie poškozeného materiálu (například s pomocí elektronového mikroskopu), napoví, jaký mechanismus úběru materiálu při zatížení součásti převládal.

Povrchová vrstva je intenzivně zahřívána vlivem tepla vyvíjeného v důsledku tření při abrazivním oddělování materiálu [26]. Největší podíl množství tepla přechází při broušení do zkoušeného vzorku, nejmenší podíl tepla se mění ve vyzařování do

okolního prostředí a odvodem třísek. Vyšší teploty (např. při obrábění materiálů nástroji z rychlořezných ocelí, kdy se pohybují pod 600 °C) mohou způsobit změnu mechanických vlastností zkoušeného materiálu, což může vést až k jeho znehodnocení [6, 26].

Teplotu povrchu při opotřebení ovlivňuje relativní rychlost nástroje. Příkladem je vliv obvodové rychlosti broušícího kotouče, jejíž změna se projevuje změnou teploty povrchové vrstvy (toto je patrné například při broušení tvrdších materiálů). Čím je vyšší obvodová rychlost a posuv otáčení, tím je i vyšší teplota působící v povrchové vrstvě vzorku [26]. Z toho důvodu je soubor dat vhodné doplnit o záznam provozních podmínek.

### 3 Cíle disertační práce

Hlavní cíl disertační práce:

**Studium faktorů ovlivňujících abrazivní opotřebení kovových materiálů.**

Dosažení tohoto cíle bylo realizováno skrze následující kroky a dílčí cíle:

Příprava experimentální části:

**Příprava vzorků litin se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení.**

Na základě teoretických znalostí je možné odhadnout, které chemické prvky podpoří vznik mikrostruktury s vyšší odolností proti abrazivnímu opotřebení. Experimentální měření bylo navrženo s ohledem na tyto chemické prvky C, Si, Ni, Cu, Mn a Cr. Cílem bylo připravit vzorky grafitických litin se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení a ty následně podrobit laboratorním zkouškám.

Dílčí cíl 1:

**Laboratorní zkoušky kovových materiálů různého chemického složení, podrobených abrazivnímu opotřebení.**

- stanovení vlivu mikrostruktury materiálu na jeho odolnost proti abrazivnímu opotřebení;
- stanovení vlivu velikosti abrazivní částice na změnu velikosti abrazivního opotřebení;
- stanovení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení, tvrdosti, hustoty a návarů pomocí laboratorních zkoušek.

Dílčí cíl 2:

**Experimentální zkoušky pluzních ostří a různých druhů návarů.**

- stanovení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vybraných návarových materiálů, materiálů dlát a ostří orebních soustav v provozních podmínkách;
- porovnání vlastností chování návarových materiálů v laboratorních podmínkách vůči provozním podmínkám.

Na základě výše uvedených zkoušek byly formulovány závěry definující možné praktické využití výsledků provedených laboratorních zkoušek a přínos nových poznatků.

## 4 Materiál a metody

V rámci této disertační práce byly zkoumány vzorky litin s jedinečným chemickým složením. Vlastnosti těchto litin byly porovnávány s vlastnostmi komerčně dostupných návarových materiálů. A dále s vlastnostmi ocelí, ze kterých jsou vyrobeny ostří a dláta orebních těles. Z důvodu porovnání byl posuzován také referenční vzorek uhlíkové oceli.

### 4.1 Litin se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení

Příprava a výroba litin se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení probíhalo na pracovišti Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze. V rámci spolupráce s Ing. Bohumírem Bednářem, CSc. (Ústav strojírenské technologie FS ČVUT v Praze), byly tyto vzorky získány a použity ke studiu vlivu chemického složení na změnu abrazivního opotřebení. Za tímto účelem (pro laboratorní experimenty) bylo na Katedře materiálu a strojírenské technologie na Technické fakultě ČZU ze získaného materiálu vybráno a vyrobeno šest sad vzorků litin s různým chemickým složením. V jednotlivých souborech se vždy měnila jedna významná složka chemického složení, přičemž množství ostatních prvků bylo konstantní (v rámci výrobních tolerancí). Celkem bylo připraveno 108 vzorků, ze kterých byla následně vyrobena jednotlivá zkušební tělesa.

Prvním z cílů laboratorních měření bylo zmapování vlivu chemického složení na mikrostrukturu a vlastnosti litin z hlediska odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. A to s ohledem na definování rozsahu vhodného chemického složení materiálu, které vede k dosažení mikrostruktury s vysokou odolností proti opotřebení.

Průměrné chemické složení připravených vzorků v jednotlivých sadách uvádí tabulka 4.5:

Tabulka 4.5: Průměrné chemické složení vzorků v sadě.

Označení sady	Průměrné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Ni	Cu	Mn	Cr	P	Mo	Fe
A	<b>1,75-3,95</b>	1,59	3,74	0,13	0,72	2,21	0,01	0,01	88,75
B	3,7	<b>0,79-2,16</b>	3,76	0,14	0,5	2,19	0,01	0,01	88,29
C	3,45	0,71	<b>0,14-4,81</b>	0,13	0,56	2,48	0,01	0,02	90,1
D	3,44	0,99	0,11	<b>0,11-4,74</b>	0,65	2,36	0,01	0,01	90,00
E	3,44	1,8	3,73	0,13	<b>0,13-2,01</b>	2,31	0,01	0,01	87,8
F	3,78	1,72	2,12	0,14	0,52	<b>0,72-4,50</b>	0,01	0,01	89,33

Detailní popis chemického složení jednotlivých vzorků litin a jejich struktury uvádí příloha A.

Popisované litiny byly navrženy pro aplikace v podmínkách abrazivního opotřebení s důrazem na potenciální oblast jejich aplikace ve výrobě i při renovaci nástrojů zpracovávajících zemědělskou půdu. Způsobu přípravy jednotlivých vzorků je věnována následující podkapitola.

Jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách, výše uváděné litiny jsou zamýšleny pro použití při výrobě a renovaci abrazí namáhaných dílů zemědělských strojů (jako jsou například plužní ostří). V praxi se lze setkat se dvěma způsoby renovace opotřebovaných dílů:

- s výměnou celého segmentu za nový (zde by se tedy jednalo o výrobu);
- s renovací opotřebovaného segmentu vhodným návarem.

Z oblasti konstrukce a navrhování lze vyslovit tvrzení, že pokud lze využít standardizované a komerčně dostupné produkty, mají přednost před výrobou dražších dílů „na zakázku“. Z toho důvodu byly vybrané slitiny porovnávány na jedné straně s komerčně dostupnými návarovými materiály a na straně druhé s materiály, ze kterých jsou dláta a ostří průmyslově vyráběny.

## 4.2 Návarové materiály

Z hlediska zadání se jako vhodné materiály zdají být přídavné materiály určené přímo pro renovace dílů poškozených opotřebováním. Produkty společností ESAB a WELCO jsou v této oblasti považovány za nejkvalitnější. Proto byly obě společnosti osloveny, s žádostí, zda by pro účely plánovaných experimentů nedoporučili vzorky návarových materiálů.



V obou případech společnosti vyhověly, jejich technologové po prostudování zadání laboratorních a provozních zkoušek navrhli ty návarové materiály, o kterých se domnívali, že jsou pro danou aplikaci nejvhodnější. Vždy se jednalo o návarové materiály se zvýšeným obsahem uhlíku, chromu a manganu.

Společnost ESAB doporučila následující materiály, které uvádí tabulka 4.6. Detailní popis materiálů a jejich vlastností je uveden v příloze B:

Tabulka 4.6: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [2, 33].

Zkušební vzorek	Chemické složení [hmotn. %]										
	C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
ESAB OK 84.52	0,25	0,5	0,5	0,03	-	13,0	-	-	-	-	-
ESAB OK 74.78	0,06	0,4	1,5	-	-	0,1	-	0,1	-	-	-

Společnost WELCO doporučila následující materiály, které uvádí tabulka 4.7. Detailní popis materiálů vlastností je uvedeno v příloze C.

Tabulka 4.7: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [34, 35, 36, 37].

Zkušební vzorek	Chemické složení [hmotn. %]										
	C	Si	Mn	P	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
WELCO 1702 S	0,75	0,15	11,7	0,02	-	0,75	0,35	3,1	-	-	-
WELCOLLOY 1745 S	5,5	-	1,5	-	-	40,0	-	-	-	-	-
WELCOLLOY 1750 S	0,4	0,8	14,5	-	-	15,0	-	-	1,0	-	-
WELCO 1701 S	4,3	-	1,3	-	-	38,0	0,8	-	-	1,3	-

### 4.3 Materiály ostří a dlát orebních těles

Chemické složení originálních materiálů ostří a dlát uvádí tabulka 4.8.

Tabulka 4.8: Skutečné chemické složení základního materiálu ostří a dlát.

Složení	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Dláto	0,32	0,21	1,13	0,05	0,02	0,36	0,53	0,05	0,30	0,02	0,01	96,96
Ostří	0,25	0,27	1,32	0,07	0,02	0,31	0,36	0,06	0,13	0,01	0,01	97,19

Detailní popis obou základních materiálů je uveden v příloze D.

## 4.4 Referenční materiál

Jako referenční vzorek (etalon) byla použita ocel S235JR s chemickým složením jak jej uvádí tabulka 4.9.

Tabulka 4.9: Popis skutečného chemického složení referenčního vzorku.

Referenční materiál	Chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
S235JR	0,08	0,18	0,54	0,02	0,03	0,07	0,14	0,13	98,81

Referenční vzorek byl používán při stanovení hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení ostatních materiálů (na základě této hodnoty bylo možné jednotlivé materiály porovnávat).

## 4.5 Příprava vzorků litin pro laboratorní zkoušky

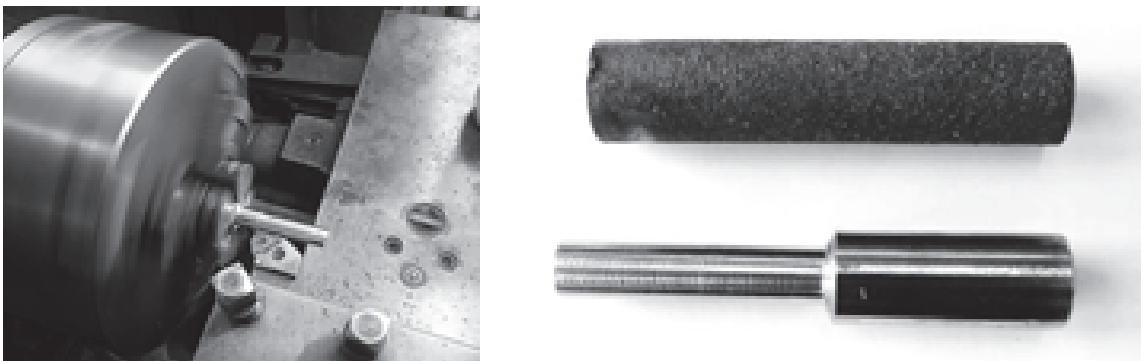
Celá příprava a výroba sad vzorků litin časově i finančně náročným procesem. Materiály byly připraveny z primárních surovin podle předem určeného hmotnostního podílu jednotlivých složek. Materiály byly poté naváženy do požadované hmotnostní koncentrace a navážky byly posléze roztaveny. Po důkladném roztavení celého objemu taveniny a dokonalém promísení všech složek byly gravitačně odlity zkušební tyče do pískových forem. Příprava a výroba směsi a odlévání probíhalo ve spolupráci na pracovišti Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze.

Zkušební tělesa byla odlita na průměr 20 mm. Následně byla kontrolována vnitřní homogenita odlitků radiografickou metodou. Vyhovující tělíska byla dále mechanicky opracována tak, aby svými rozměry odpovídala požadavkům příslušných norem. Během opracování bylo pozorováno, že litiny dosahují vysoké tvrdosti a křehkosti. Proto bylo nutné zakoupit nové sady obráběcích přípravků. Obrábění legovaných bílých litin s martenzitickou nebo austenitickou maticí je velmi obtížné. Pro soustružení byly zvoleny řezné vyměnitelné destičky od firmy Pramet s firemním označením CCMT 120412E – FM z řezného materiálu T8330, které nejlépe vyhovovaly z celé nabízené škály.

Kvůli vlastnostem materiálů byly zvoleny následující technologické parametry soustružení: řezná rychlost  $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , posuv  $0,1 \text{ mm}\cdot\text{ot}^{-1}$ , hloubka 0,1 mm, podélný posuv byl ponechán ruční, tímto způsobem bylo možné nejlépe reagovat na změny

podmínek během obrábění. O tvrdosti materiálu svědčí i fakt, že bylo nutné volit úběr třísky vždy po 0,1 mm, větší úběr nebyl možný z důvodu přehřívání jednotlivých vzorků. Soustružení probíhalo až doby, kdy průměr vzorku byl  $\varnothing$  10,5 mm a délky 50 mm. Soustružení bylo prováděno na univerzální soustruhu ZMM typ C 11 /1000.

Kvůli vysoké technické náročnosti byly obrobena vždy pouze tři vzorky daného chemického složení (celkem tedy 99 kusů vzorků). Obrobené vzorky byly následně broušeny. Byl zvolen úběr 0,005 mm až do dosažení požadovaného průměru  $\varnothing$  10 mm (a požadované jakosti) v celé délce vzorku. Praktická příprava zkušebních vzorků probíhala na Katedře materiálu a strojírenské technologie na Technické fakultě ČZU. Přípravu vzorků ilustruje obrázek 4.14.



Obrázek 4.14: Předlitý vzorek, proces soustružení a obrobený vzorek.

#### 4.5.1 Příprava vzorků návarových materiálů pro laboratorní zkoušky

Navařování materiálů bylo provedeno ve spolupráci se společností ATG s.r.o., která poskytla technické zázemí a vybavení nezbytné pro aplikaci návarů. Pro výrobu zkušebních vzorků byly jako podkladový materiál použity pásy z oceli s označením S235JR tloušťky 20 mm. Příprava spočívala v nařezání pásů na pásové pile na vhodně odpovídající podložky na rozměry 80 x 80 x 20 mm.

K aplikaci návarových materiálů byla použita metoda tavného svařování ruční obalenou elektrodou a svařovací agregát CEA TOP 250 AC/DC TIG. Vzhledem k vysokým obsahům legujících prvků, které vedou k vysoké tvrdosti návarů, bylo možné očekávat vznik velkého množství defektů návarů, které by ve svém důsledku mohly vést ke znehodnocení vlastností návaru.

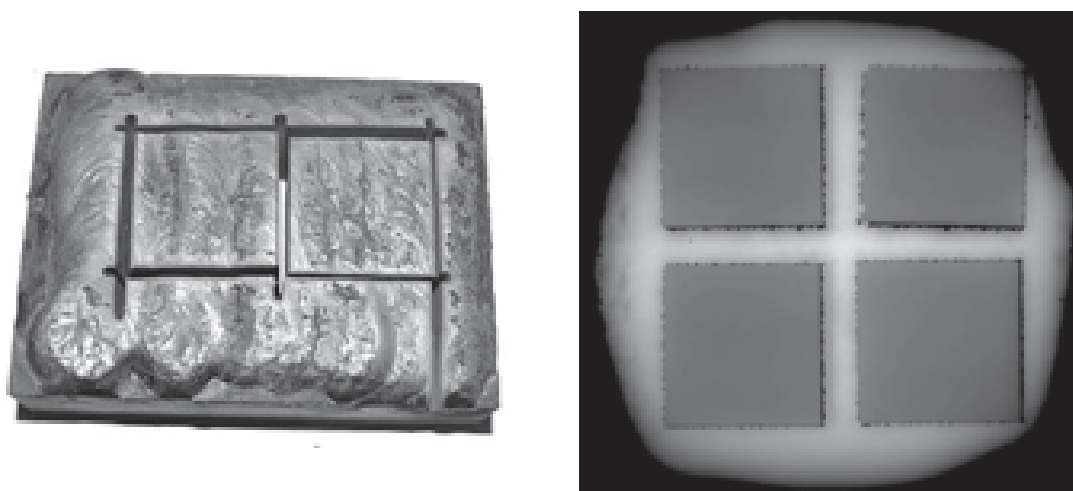
Pro zajištění co nejkvalitnějšího výsledku byly na základě technologických podmínek stanovených výrobcem připraveny pro navařování svařovací postupy WPS (Written Procedure Specification). Ty byly před použitím posouzeny a schváleny třetí stranou (Ing. A. Mlích, Ph.D., EWF, ze společnosti STROJON, spol. s.r.o.). Příklad

schváleného postupu WPS je uveden v příloze L. Vlastní návar byl dle doporučení výrobce navařen ve třech vrstvách (ve třetí návarové vrstvě bylo určeno, že se skutečné chemické složení blíží cca. 99,8 % směrným hodnotám). Před nanesením každé další vrstvy byl povrch předešlé pečlivě očištěn. U všech typů elektrod se svařovalo bez rozkvyvu svarového kovu. Svařovací proudy použité pro jednotlivé elektrody uvádí tabulka 4.10.

Tabulka 4.10: Přehled použitých navařovacích proudů.

Typ elektrody	Použitý navařovací proud [A]	Typ elektrody	Použitý navařovací proud [A]
ESAB OK 84.52	170 A	WELCO 1702 S	210 A
ESAB 74.78	160 A	WELCOLLOY 1745	150 A
WELCO 1701 S	140 A	WELCOLLOY 1750	215 A

Mechanické zpracování zkušebních těles bylo provedeno na Katedře materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty ČZU. Destičky byly nejprve děleny na rozměr 25 x 25 x 25 mm pomocí vodního paprsku s abrazivem. Místa výřezů byla volena tak, aby vzorky obsahovaly co možná nejméně trhlin. Všechna tělíška byla následně kontrolována na homogenitu radiografickou metodou. Příklad výřezů podrobených kontrole uvádí obrázek 4.15 [44].



Obrázek 4.15: Výřez dvou tělísek z bloku (vlevo), a následné určení homogenity sady tělísek s pomocí RTG (vpravo).

Takto nařezané polotovary byly dále upravovány pro mechanické zkoušky – soustruženy na rozměr  $\varnothing$  10,5 a délku 25 mm. Finálním krokem přípravy

vzorků bylo opět broušení na rozměr  $\varnothing$  10,0 a délku 25 mm. Postup mechanického zpracování i použité přístrojové vybavení se shoduje s tím, které bylo zvoleno pro přípravu vzorků litin.

#### 4.5.2 Příprava návarů pro měření v provozních podmínkách

Provozní měření bylo provedeno na šestiradičném dvouramenném otočném pluhu Lemken Vari Diamant 160, viz obrázek 4.16.



Obrázek 4.16: Pluh Lemken vari diamant 160.

Ostří a dláta těles na pravé straně pluhu byla opatřena návarý. Každé těleso bylo navařeno jiným návarovým materiálem. Popis návarových materiálů uvádí přílohy B a C, jejich mikrostruktury pak příloha E.

Levá strana pluhu byla celá osazena novými ostřími a dláty, které sloužily pro následné porovnání naměřených údajů. Jejich chemické složení a popis mikrostruktury uvádí příloha D.

#### Umístění návarů

Při navařování bylo rozhodnuto (v rozporu s běžnou praxí) vytvořit plochu návaru na spodní straně ostří. Toto rozhodnutí bylo odůvodněno následovně:

- a) Náklady na palivo spotřebované při obdělávání půdy hrají významnou roli v ekonomice podniků. Jakákoliv odchylka od optimální geometrie osazení radlic ostřími a dláty by se projevila ve zvýšeném odporu pluhu a tím i na nákladech na palivo. Z toho důvodu je geometrie při každém novém osazování kontrolována laserovým měřicím zařízením. Vrstva návaru na čele ostří (na horní straně) by představovala nerovnost, která by se v geometrii nepochybně projevila a v důsledku tak mohla nepříznivě ovlivnit spotřebu paliva.
- b) Pokud by byl návar umístěn na horní stranu, kterou obtéká odcházející zemina, představoval by možnost vrubu. Zemina by pak za tímto vrubem měnila směr obtékání a tím by docházelo za návarem k lokálnímu výraznému opotřebení základního materiálu. Návar bude tedy po určitý čas materiál chránit, pak ale vlivem ztenčení základního materiálu dojde k jeho celkovému odlomení (na takové chování poukazuje ve svých publikacích zaměřených na dané téma také J. Suchánek [20]).

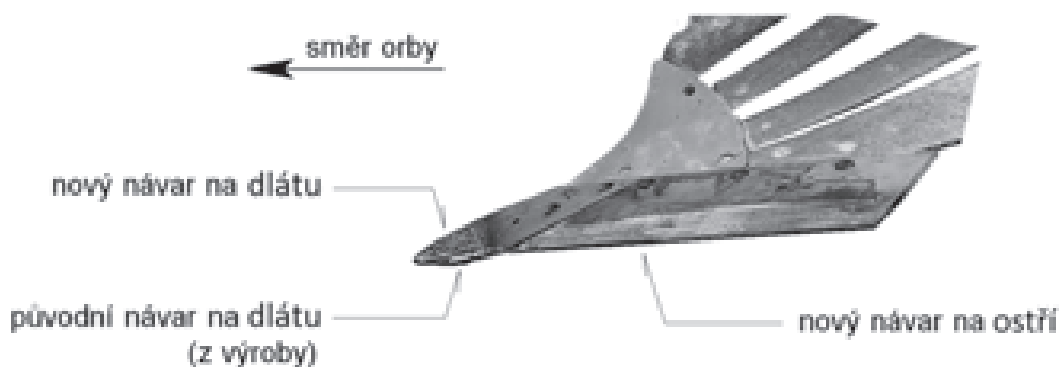
Pokud je návar umístěn na horní straně, je opotřebováván plošně svrchu. Při jeho umístění na spodní straně segmentu je opotřebováván spíše z boku (v reakci na sílu působící ve směru orby). Přitom nejrychleji dochází k opotřebovávání relativně měkkého materiálu nad návarem, a prvních návarových vrstev, kde došlo k promísení návarového a základního materiálu. Tím se vytváří ostrá hrana (tvořená poslední návarovou vrstvou), která podporuje řezání zeminy.<sup>1</sup>

Správnost volby pozice pro umístění návaru je potvrzena také skutečností, že dláta jsou již ve výrobě opatřena návary na spodní straně (nikoliv na horní).<sup>2</sup> Návar na dlátu pokrýval celou špičku. Návar na ostří zasahoval do hloubky 50 mm. Umístění návarů ilustruje obrázek 4.17.

---

<sup>1</sup> Tvrzení je podloženo praktickými zkušenostmi a bylo potvrzeno v rámci konzultací technologem zemědělského podniku Cochlar. Společnost působí v okrese Frýdek-Místek, a mimo jiné se specializuje na renovace strojů navařováním. Společnost v dnešní době obhospodařuje 150 ha vlastní orné půdy a zhruba dvojnásobné množství plochy svých smluvních partnerů.

<sup>2</sup> Z toho důvodu byl dodatečný návar na dlát umístěn shora.



Obrázek 4.17: Zobrazující umístění návarů na dlátě a ostří.

### Technologický postup navařování

Navařování probíhalo ve spolupráci s firmou ATG s.r.o., která za tímto účelem poskytla nezbytné technické zázemí. Pro navařování byla použita metoda svařování ruční obalenou elektrodou. S ohledem na prokázaný sklon k praskání u některých návarových materiálů byl postup navařování konzultován se specialistou v oboru svařování, který nejprve schválil vhodné technologické postupy.

Po konzultaci s výrobcí návarových materiálů nebyl použit před navařováním předehřev u dlát ani u ostří, a to u žádného z uvedených materiálů. V souladu s připravenými technologickými postupy byly vytvořeny návary ve třech vrstvách. Aplikace návarů na nová ostří a dláta byla provedena chronologicky v následujících krocích:

- očištění materiálu od barvy a nečistot;
- vytvoření návarových vrstev, vždy byla vytvořena jedna řada housenky;
- důkladné očištění návaru od vzniklé strusky pomocí drátěného kartáče;
- vytvoření další návarové housenky;
- dokončení návarových vrstev až do třívrstvé vrstvy;
- přirozené pomalé ochlazování pomocí tepelných dek.

Jednotlivé směry housenek ve vrstvách návarů se křížily pod úhly 45° až 60°, z důvodu vytvoření lepšího promíšení nového návaru s původním. Po vytvoření každé vrstvy byly návary zabaleny do speciální (ochlazovací) deky, kterou je možné docílit řízené pomalé ochlazování návarů. Takto řízeným procesem bylo možné dosáhnout požadovaných mechanických vlastností.

### 4.5.3 Příprava ostatních vzorků

Vzorky z referenčního materiálu (S235JR) a z materiálu dlát a ostří byly připraveny shodným způsobem jako vzorky litin.

## 4.6 Metody měření

Přehled zkoušek, kterým byly podrobeny připravené vzorky, uvádí tabulka 4.11.

Tabulka 4.11: Přehled měření provedených na jednotlivých vzorcích.

	Hustota vzorku	Chemické složení	Mikrostrura	Tvrdost dle Vickerse	Odolnost proti opotřebení (laboratorní zkoušky)	Provozní zkoušky	RTG kontrola homogenity	MT kontrola povrchových vad	Rozložení teplotního pole
Litiny	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓
Návary (lab. zkoušky)		✓	✓	✓	✓		✓		
Návary (provozní zkoušky)		✓	✓	✓		✓	✓	✓	
Dláta a ostří		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Referenční materiál	✓	✓	✓	✓	✓				

### 4.6.1 Určení dosaženého chemického složení

V rámci přípravy vlastního laboratorního měření bylo u všech vzorků určeno jejich chemického složení. Měření bylo prováděno ve spolupráci se Škodou Plzeň s.r.o. na jiskrovém optickém emisním spektrometru Bruker s označením Q4 TASMAN. Následně byly výsledky ověřeny ještě na přístroji OXFORD INSTRUMENT s označením x-Met5000 využívající rentgeno-fluorescenční spektrometrii disperzních analyzátorů.

### 4.6.2 Určení mikrostruktury vzorků

Určení mikrostruktury vzorků bylo provedeno na všech měřených vzorcích. Měření probíhalo na Katedře materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty



ČZU ve spolupráci s doc. Ing. Chotěborským, Ph.D. Byl použit mikroskop Zeiss Jenavert s označením PA HD s optickým snímačem ARTCAM 300Mi.

Hodnocení procentuálního obsahu složek materiálu bylo prováděno s pomocí programu QuickPHOTO Industrial 2.3, ve spolupráci se společností GE Aviation Czech, s.r.o.

#### 4.6.3 Určení hustoty zkušebních vzorků

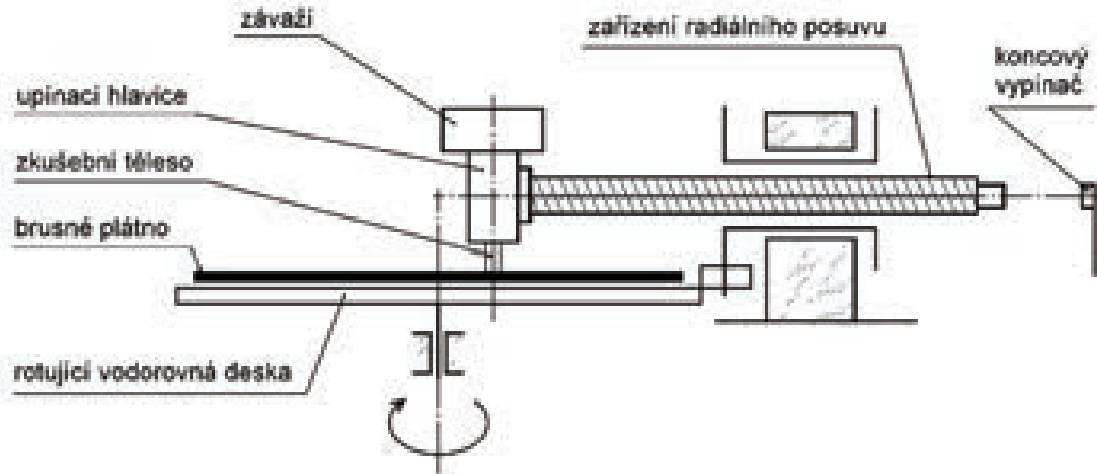
Měření hustoty látek bylo provedeno pomocí hydrostatické metody. Tato metoda je vhodná pro vzorky nepravidelného tvaru, u kterých hustotu nelze zjistit pomocí výpočtu. Hustota zkušebních vzorků byla stanovena pro všechny druhy materiálů posuzovaných v rámci této disertační práce. Měření probíhalo na Katedře materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty ČZU s pomocí digitálních vah Kern s označením ABS 120-4N přesnost měření 0,01 mg. Hustota materiálů byla vždy měřena třikrát pro každý zkušební vzorek. Připravené a odmaštěné zkušební vzorky byly nejprve zváženy (hmotnost  $v_z$  [g]). Dále byla změřena hmotnost kádinky ( $m_k$  [g]), která byla po okraj naplněna demineralizovanou vodou. Následně byl zkušební vzorek uvázan na tenkou nit a upevněn do kleští stojanu. Takto připravený vzorek byl vložen do kádinky tak, aby byl umístěn ve středu kádinky a nedotýkal se žádné její stěny ani dna. Případné vzduchové bublinky na povrchu ponořeného zkušebního tělesa byly odstraněny pomocí drátku. Následně byla změřena hodnota hmotnosti kádinky se zavěšeným vzorkem ( $v_z + m_k$  [g]). Na závěr byla změřena teplota demineralizované vody a na jejím základě byla odečtena tabelovaná hodnota hustoty (typicky  $\rho_k = 995,847 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Hustota vzorku byla vypočítána dle rovnice (4.5).

$$\rho = \frac{v_z}{(v_z + m_k) - m_k} \times \rho_k \quad (4.5)$$

#### 4.6.4 Hodnocení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení

Odolnost materiálu proti abrazivnímu opotřebení byla stanovena pro všechny druhy materiálů měřené v rámci této práce. Experimentální hodnocení bylo provedeno na přístroji s vázanými abrazivními částicemi s rotačním pohybem [111], který byl vyroben na Katedře materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty ČZU (vlastní konstrukce), dle požadavků [11]. V rámci zkoušky byla realizována tzv. dvoutělesová abraze [9, 10], kde abrazivní částice pevně vázané na brusném plátně

vníkaly do zkoušeného tělesa a postupně ho opotřebovávaly. Schéma přístroje s vázanými abrazivními částicemi s rotačním pohybem je zobrazeno na obrázku 4.18. Zkušební tělesa byla na plátno přitlačována tlakem 0,32 MPa. Vzorek byl v průběhu zkoušky posouván od kraje ke středu brusného plátna.



Obrázek 4.18: Schéma přístroje s vázanými abrazivními částicemi s rotačním pohybem [14, 15].

Zkušební podmínky vycházely z normy ČSN 01 5084 (Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně) [11]. Tento experiment navazoval na předešlé publikované práce a výsledky [14, 15, 16, 17]. Při zkouškách byla kromě brusného plátna s předepsanou zrnitostí P120 (střední velikost částic 115,5  $\mu\text{m}$ ) použita ještě plátna se zrnitostí P240 (střední velikost částic 44,5  $\mu\text{m}$ ) a P60 (střední velikost částic 275  $\mu\text{m}$ ) [12, 13].<sup>3</sup>

Opotřebení vzorků bylo hodnoceno na základě hmotnostního úbytku vzorku. Prvním krokem bylo před vážení vzorků na digitálních vahách Kern s označením ABS 120-4N přesnost měření 0,01 mg, a to z důvodu určení rozsahu hmotnosti, toto měření bylo důležitým krokem z důvodu nepoškození analytických vah. Druhým krokem bylo měření na analytických vahách MERA-WAG s označením WA35 přesnost měření 0,001 mg v souladu s normou ČSN 01 5084. Každé měření bylo prováděno vždy na novém brusném plátně.

3 Použitá brusná plátna byla pokryta abrazivními částicemi z Korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je devátý nejtvrdší prvek na Mohsově stupnici tvrdosti. Tabelaovaná hodnota tvrdosti se uvádí 2000 až 2500 HV [19].

Pro vzájemné porovnání abrazivního opotřebení různých druhů litin byly stanoveny poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení  $\psi_{abr}$  dle rovnice (4.6) [11]:

$$\psi_{abr} = \frac{W_{hPZ}}{W_{hZ}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

#### 4.6.5 Stanovení tvrdosti dle Vickerse

Měření tvrdosti byly podrobeny všechny materiály použité v experimentální části této práce. Tvrdost dle Vickerse byla hodnocena v souladu s normou ČSN EN 6507 (Zkoušky tvrdosti podle Vickerse) [18]. Na připravených zkušebních vzorcích bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse HV30 na tvrdoměru Heckert Germany s označením HPO 250. Pravidelný čtyřboký jehlan byl vtlačován do zkoušeného materiálu pod zkušebním zatížením 294 N. Z naměřených hodnot byla následně dle rovnice (4.7) vypočítána výsledná hodnota tvrdosti.

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{u_1 \cdot u_2} \quad (4.7)$$

#### 4.6.6 Posouzení homogenity materiálu (radiografická metoda)

Tento postup byl využit v rámci přípravy vzorků litin a návarových materiálů pro laboratorní zkoušky. Všechny připravené vzorky byly nejprve převáženy. Ty vzorky, u kterých hmotnost vybočovala z předpokládaných mezí, byly následně podrobeny rentgenové zkoušce za účelem zjištění vnitřních nehomogenit. Zkoušky probíhaly ve spolupráci se společností ATG s.r.o. na RTG přístroji Andrex CMA 357. Metodický postup byl v souladu s normou EN ISO 5579 [3].

Kontrola radiografickou metodou byla provedena také na polotovarech určených pro výrobu vzorků pro laboratorní zkoušky, kde bylo cílem zjistit přítomnost trhlin, které by mohly mít negativní vliv na průběh zkoušek. Následkem nezjištění trhlin před laboratorními zkouškami by mohlo dojít k odlomení vzorků a tím k přerušení měření nebo zničení laboratorního zařízení.

#### 4.6.7 Kontrola kvality návarů (kontrola povrchových vad)

Kontrola povrchových vad byla provedena také na návarech určených pro provozní zkoušky. Po vychladnutí návarů na okolní teplotu byl povrch kontrolován na přítomnost trhlin pomocí magnetické metody práškové. Metodika kontroly byla

v souladu s normou EN ISO 9934-1 [38]. Potřebné laboratorní vybavení poskytla společnost ATG s.r.o.

#### **4.6.8 Měření rozložení teplotního pole**

Měření probíhalo současně s měřením hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na vzorcích litin. Měření bylo provedeno bezkontaktně s pomocí termokamery Fluke Ti20 (kterou zapůjčila společnost ATG s.r.o.).

Měření teplotního pole bylo provedeno vždy na základě pěti snímků pořízených za identických podmínek pro každý vzorek na každém druhu brusného plátna. V rámci experimentu byly sledovány hodnoty povrchových teplot jak u brusného plátna, tak na samotném vzorku [26]. Teploty naměřené na daném vzorku byly porovnány s teplotami zjištěnými u oceli S235JR (etalon).

Analýza získaných dat byla hodnocena v grafickém rozhraní programu InsideIR v souladu s platnými normami a instrukcemi výrobce kamery. Z metodického hlediska je třeba zmínit, že zajištění co možná nejpřesnější naměřené hodnoty povrchové teploty je nezbytné uvažovat správnou hodnotu emisivity povrchu  $\varepsilon$  [21]. V tomto případě bylo ale měření zaměřeno na kvalitativní aspekt stanovit, zda je povrch teplejší nebo chladnější, případně kolikrát je teplejší / chladnější. Zmiňovaná emisivita hraje významnou roli v případě kvantitativních měření, v případě kvalitativních měření lze dle platných zásad akceptovat přibližnou hodnotu emisivity. V daném případě byla použita hodnota  $\varepsilon = 0,95$ , dle doporučení výrobce z manuálu pro dané zkoušené materiály, což odpovídá doporučením pro daný typ materiálu a drsnost povrchu dle [144].

#### **4.6.9 Hodnocení topografie opotřebovaného povrchu**

U vybraných materiálů byla posuzována také topografie opotřebovaného povrchu. Snímky na elektronovém mikroskopu byly pořízeny ve spolupráci se společností HVM Plasma spol. s.r.o. na přístroji FE-SEM SU5000.

#### 4.6.10 Provozní zkoušky

Návarové materiály byly podrobeny provozním zkouškám. Měření bylo prováděno ve spolupráci se společností ŠZP Lány, spol. s.r.o., která poskytla veškeré nezbytné technické vybavení. Společnost v době provádění experimentu hospodařila na cca. 3000 ha zemědělských pozemků ve Středočeském kraji. Ve společnosti je zavedenou praxí měnit opotřebované segmenty radlic za nové díly (renovace se neprovádí).

Orba probíhala na celkové ploše 52 ha v rámci šesti dnů po úsecích 0 – 11 – 25 – 31 – 39 – 46 – 52 ha. Na začátku každého z úseků bylo každé dláto i ostří očištěny a zváženy. Stejně tak proběhlo vážení po dokončení posledního úseku. Hmotnostních úbytky byly měřeny pomocí digitálních vah s označením CITIZEN CG 6102. Provozní měření bylo provedeno na šestiradličném dvouramenném otočném pluhu Lemken Vari Diamant 160. Hmotnostní úbytky byly přepočítány na jednotlivé plužní ostří a dláto, tedy na 1/12 z celkových 52 ha.

Během provozních zkoušek byly také odebrány čtyři vzorky půdy (rovnoměrně v průběhu celého experimentu), ze kterých byla následně v laboratoři environmentální geochemie na ČZU vyhodnocena zrnitost půdy. Hodnoty naměřené v průběhu provozních zkoušek uvádí příloha M. Pro ilustraci je uvedena také grafická příloha K, ve které jsou ilustrativní fotografie z provozních zkoušek.

## 5 Výsledky měření

Před provedením hlavních experimentů byly vzorky vždy kontrolovány s cílem vyloučit z experimentu defektní kusy, které by díky výskytu nehomogenit zkreslily soubor naměřených hodnot.

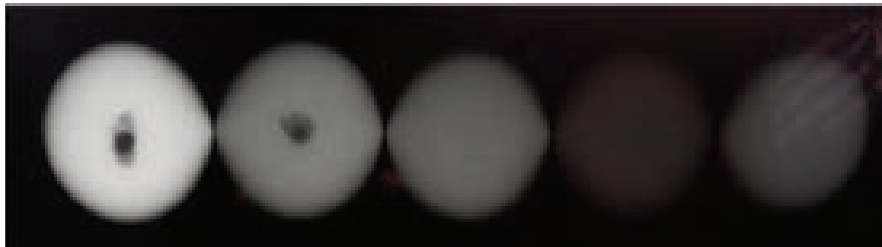
### 5.1 Kontrola vzorků před vlastním experimentem

Následující podkapitoly popisují použité nedestruktivní kontroly, které byly použity před provedenými experimenty. Kontrola homogenity vzorků litin a návarů byla provedena pomocí radiografické zkoušky. Kontrola homogenity návarů určených pro provozní zkoušky byla provedena pomocí fluorescenční magnetické práškové metody.

#### 5.1.1 Kontrola vzorků litin

U vzorků litin s označením 6A, 1D, 1F byla prokázána velká vnitřní nečelistvost, která již během výroby zkušebních vzorků zapříčinila nesoudržnost materiálu. Vzorky se během obrábění rozpadaly. Z tohoto důvodu nebyly uvedené vzorky začleněny do experimentálního měření.

Na povrchu ostatních vzorků sice žádné vady vidět nebyly, ale v případě, že by v průběhu abrazivního opotřebení byly odkryty některé skryté – vnitřní vady (například osová staženina) hrozilo by reálné riziko ovlivnění výsledků měření. Proto byly ostatní vzorky zkontrolovány na vnitřní homogenitu. Obrázek 5.19 ilustruje vzhled nečelistvostí zjištěných při kontrole homogenity. Zkouška sice u některých vzorků odhalila přítomnost vnitřních nehomogenit, zároveň se ale podařilo stanovit přibližně jejich polohu a tím prokázat, že přítomné vady nebudou interferovat s oblastí měření a byly tedy použity k měření [93].

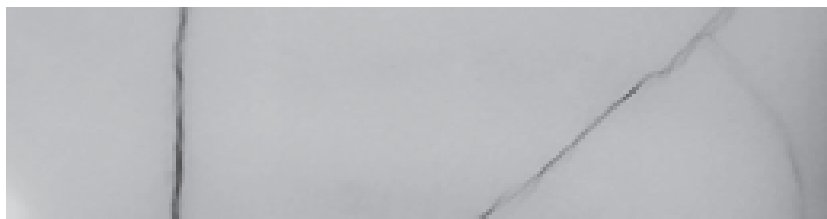


Obrázek 5.19: Příklad vad indikovaných radiografickou zkouškou.

### 5.1.2 Kontrola homogenity návarů určených pro laboratorní zkoušky

U většiny návarů určených pro zkoušení v laboratorních podmínkách byla zjištěna přítomnost trhlin. K jejich vzniku byly náchylné zejména návarové materiály s vyšším obsahem chromu. Trhliny sice tvořily poměrně řídkou síť, nicméně byly relativně velké. Na obr. 5.20 je zobrazena oblast radiografického snímku těchto trhlin.

Výskyt trhlin a zejména možnost jejich eliminace byla konzultována s dodavatelem elektrod, ti se shodně vyjádřili v tom smyslu, že při současném stavu technologie je tento jev nedílnou součástí výrobku, a který nejde eliminovat ani ovlivnit jeho polohu (nepomáhá ani volba svařovacích parametrů ani důsledné předehřevy).

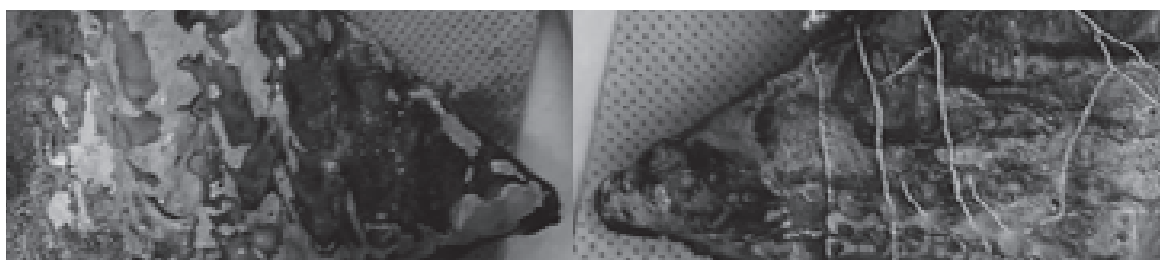


Obrázek 5.20: Oblast o velikosti cca. 75 x 18 mm zobrazující výrazné trhliny.

Tento stav byl tedy zohledněn a vzorky byly odebírány z míst bez trhlin a následně kontrolovány znovu pomocí radiografické metody.

### 5.1.3 Kontrola homogenity návarů určených pro provozní zkoušky

Na základě zkušeností s přípravou návarů pro laboratorní zkoušky byly i návary určené pro provozní zkoušky kontrolovány na přítomnost povrchových trhlin. Homogenita návarových materiálů byla ověřena pomocí fluorescenční magnetické práškové metody.



Nový návar

Originální návar od výrobce

Obrázek 5.21: Fotografie návarů dlát při kontrole na přítomnost trhlin.

Kontrola prokázala, že díky dobře zvoleným technologickým parametrům a pečlivému dodržení svařovacího postupu je na nových návarech minimum povrchových trhlin. Výsledky kontroly ilustruje obrázek 5.21. Naproti tomu původní

návar zhotovený výrobcem na základním materiálu dláta vykazoval množství velkých povrchových trhlin v rozmezí šířky od 0,3 – 1,1 mm. Trhlin jsou způsobeny povrchovým pnutím návarové vrstvy. Přítomnost trhlin v návaru toto pnutí sníží pod kritickou mez, což vede k zastavení šíření trhlin do základního materiálu. Výrobce toto komentoval argumentem, že trhliny budou „zaplněny“ zeminou a díky tomu nemají na opotřebení dláta zásadní vliv.<sup>4</sup> Takto připravená dláta a ostří byla osazena na orební tělesa. Následovalo seřízení geometrie za pomoci speciálního laserového měřicího systému, díky kterému lze dosáhnout přesného nastavení.

## **5.2 Experimentální měření vzorků litin – určení hustoty, tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení**

Tento ucelený blok měření byl věnován zjištění vlivu chemického složení litin na jejich odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Pro každý vzorek byly určeny hodnoty hustoty, tvrdosti a poměrné odolnosti proti opotřebení.

Poměrná odolnost proti opotřebení byla stanovována vždy pro tři různé zrnitosti abrazivních částic. Souhrn naměřených výsledků z této části experimentů uvádí tabulky 5.12 až 5.17 (jednotlivé tabulky popisují vždy samostatnou sadu vzorků). Hodnoty poměrných odolností pro danou střední velikost částic jsou vyneseny v grafech, které uvádí příloha G (grafy v příloze popisují dílčí odolnosti v závislosti na střední velikosti abrazivních částic).

Pro doplnění (a usnadnění interpretace výsledků) byly do všech tabulek doplněny pro každý materiál také průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení. Ty byly spolu s tvrdostmi vyneseny vždy v následujícím grafu. Obrázky 5.22 až 5.29 znázorňují vliv změny koncentrace daného prvku na tyto dvě veličiny. Funkční rovnice a hodnoty spolehlivosti  $R^2$  k testovaným sadám vzorků jsou znázorněny v následujících podkapitolách pro jednotlivé sady vzorků. Funkční rovnice byly sestaveny v programu STATISTIKA pro zkušební sady A, B, C a F.

---

<sup>4</sup> Zde se však jedná o nepodloženou spekulaci výrobce.



### 5.2.1 Sada A (uhlík C) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.12: Vzorky sady A – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení [1].

Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic	Střední velikost částic	Střední velikost částic	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
			44,5 $\mu$ m (P240)	115,5 $\mu$ m (P120)	275 $\mu$ m (P60)	
1A	667 ± 26	7324 ± 36	2,52 ± 0,021	2,42 ± 0,050	2,27 ± 0,041	2,40
2A	<b>753 ± 40</b>	7615 ± 17	3,16 ± 0,013	2,76 ± 0,035	2,79 ± 0,087	2,90
3A	631 ± 23	7663 ± 36	2,99 ± 0,030	2,83 ± 0,076	2,85 ± 0,061	2,89
4A	553 ± 31	7717 ± 33	3,26 ± 0,045	<b>3,20 ± 0,018</b>	2,83 ± 0,023	3,05
5A	372 ± 20	7872 ± 20	<b>3,38 ± 0,016</b>	3,17 ± 0,019	<b>3,07 ± 0,026</b>	3,21
S235JR	161 ± 25	7857 ± 13	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabulka 5.12 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady A. Z naměřených údajů vyplývá, že s klesajícím obsahem uhlíku se zvyšuje hustota. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušební vzorku 5A a to  $7872 \pm 20 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Závislost % C na změnu hustoty v sadě vzorků A popisu následující funkční rovnice s označením 5.8:

Funkční rovnice 5.8 náležící k tab. 5.12.

$$\rho = 8210,74 - (202,17) \cdot \% C \quad (5.8)$$

$$R^2 = 0,85$$

$$F = 72,3$$

$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením uhlíku naměřená tvrdost roste. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 2A a to  $753 \pm 40 \text{ HV}$ . Nejnižší naměřenou hodnotu ze souboru zkušebních vzorků vykazoval vzorek s označením 5A a to  $372 \pm 20 \text{ HV}$ . Pro porovnání experimentálních hodnot byl použit etalon s označením S235JR, který dosahoval hodnot  $161 \pm 25 \text{ HV}$ .

Závislost % C na změnu tvrdosti v sadě vzorků A popisu následující funkční rovnice s označením 5.9:

Funkční rovnice 5.9 náležící ke grafu na obrázku 5.22.

$$HV = 208,14 + (136,67) \cdot \% C \quad (5.9)$$

$$R^2 = 0,75$$

$$F = 23,5$$

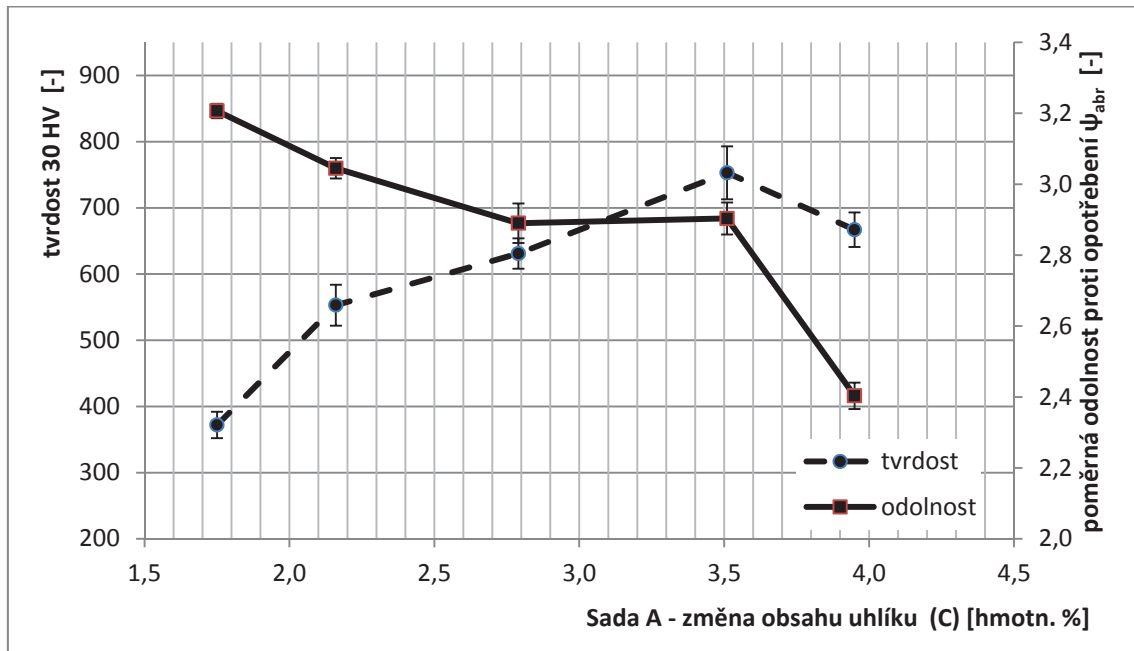
$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Naměřené hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ukazují, že opotřebení je závislé na struktuře materiálu a velikosti abrazivních částic. Metalografická struktura všech zkoušených materiálů je popsána a vyobrazena v příloze H. Nejnižší poměrná odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušebním vzorku s označením 1A na všech zkušebních plátnech z celého souboru měřených zkušebních vzorků ze sady A. Z výsledků zjištěných u všech vzorků je patrný klesající trend poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nárůst hmotnostního úbytku se zvyšující se velikostí abrazivních částic. Výsledky pro jednotlivé velikosti částic se značně liší. Zkušební vzorek s označením 5A vykazuje pro brusné plátno s označením P240 (střední velikost částic 44,5  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $3,38 \pm 0,016$  a na brusné plátno s označením P60 (střední velikost částic 275  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $3,07 \pm 0,026$ . Na grafu obr. 5.22 je zobrazena závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  a tvrdosti 30 HV na množství uhlíku v litině. Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná poměrná odolnost proti opotřebení klesá se zvyšujícím se obsahem uhlíku. Naopak tvrdost se zvyšuje se vzrůstajícím obsahem uhlíku.

Z výsledků je také patrné, že nejméně odolným materiálem byla ocel s označením S235JR (etalon), která vykazovala cca. třetinovou poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$ , tj. cca trojnásobný hmotnostní úbytek než vzorek s označením 5A.



Obrázek 5.22: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství uhlíku v litině.

Graf na obrázku s označením 5.22 zobrazuje vzorky sady A, v grafu je zobrazena závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství uhlíku v litině. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace.

Závislost % C na změnu poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v sadě vzorků A popisu následující funkční rovnice s označením 5.10:

Funkční rovnice 5.10 náležící ke grafu na obrázku 5.22..

$$\psi_{abr} = 3,7636 - (0,3049) \cdot \% C \quad (5.10)$$

$$R^2 = 0,64$$

$$F = 23,5$$

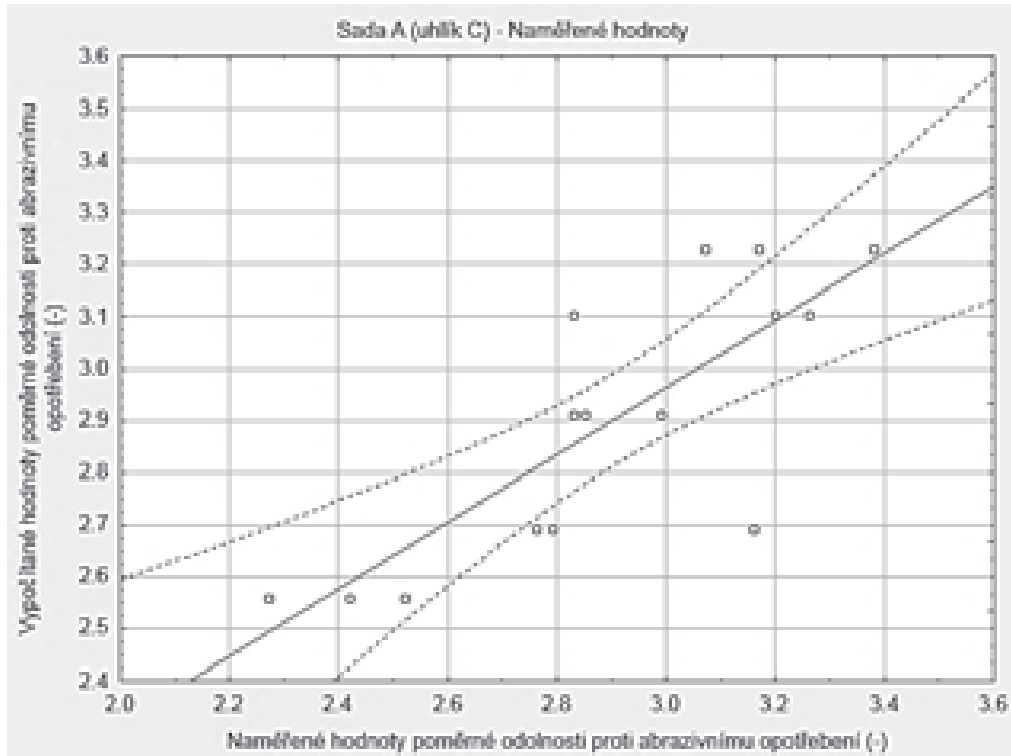
$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Z funkční rovnice je patrné, že výsledek použité rovnice určuje vysokou sílu testu. Pravděpodobnost spolehlivosti je vyšší než 99,9 % a na základě toho, lze tvrdit, že naměřený soubor hodnot vykazuje silnou sílu statistického testu.

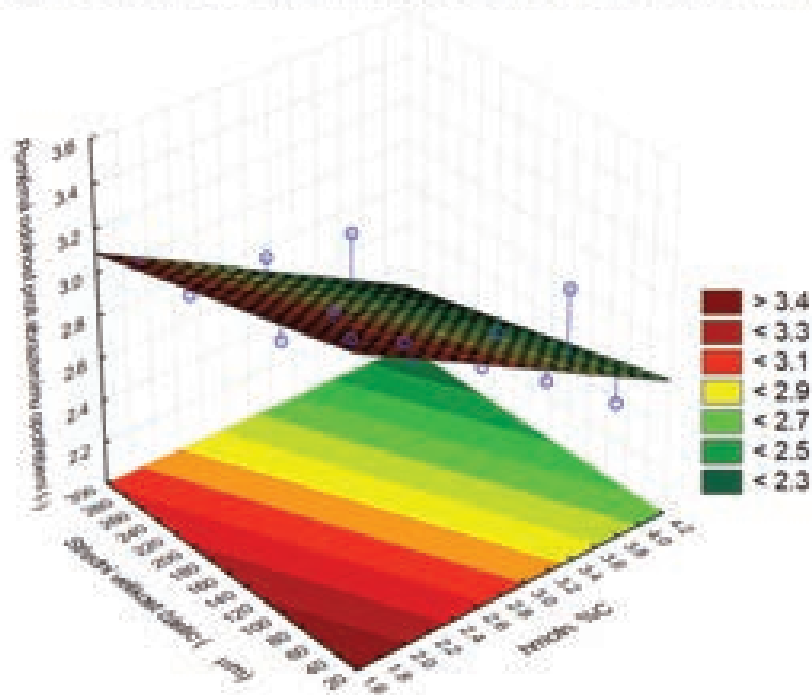
Graf na obrázku s označením 5.23 zobrazuje vzorky sady A – závislost vypočtené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a naměřené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$ , které byly určeny za pomoci statistického programu STATISTICA.



Obrázek 5.23: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost vypočtené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a naměřené hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$

Graf na obrázku s označením 5.23 zobrazuje vzorky sady A, v grafu je zobrazen konfidenční interval vypočítaných hodnot, který vyznačuje interval spolehlivosti, ve kterém s 95 % pravděpodobností leží skutečná naměřená hodnota veličiny odhadované na základě studia vzorku.

Závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a střední velikosti částic na hmotn. % C



Obrázek 5.24: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a střední velikosti částic na hmotn. % C.

Funkční rovnice 5.11 náležící ke grafu na obrázku 5.24.

$$Y = 3,93 - (0,0012) \cdot dz - 0,305 \cdot \% C \quad (5.11)$$

$$R^2 = 0,74$$

$$F = 21,79$$

$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Z funkční rovnice je patrné, že výsledek použité rovnice určuje vysokou sílu testu. Pravděpodobnost spolehlivosti je vyšší než 99,9 %.

## 5.2.2 Sada B (křemík Si) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.13: Vzorok sady B – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřevení.

Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřevení $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic 44,5 $\mu\text{m}$ (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu\text{m}$ (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu\text{m}$ (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
1B	577 ± 35	7355 ± 36	2,61 ± 0,011	2,71 ± 0,035	2,78 ± 0,045	2,70
2B	<b>915 ± 38</b>	7574 ± 20	2,76 ± 0,064	2,70 ± 0,009	2,67 ± 0,050	2,78
3B	802 ± 43	7650 ± 38	2,74 ± 0,021	2,79 ± 0,056	2,88 ± 0,021	2,80
4B	824 ± 21	7668 ± 19	2,89 ± 0,035	2,80 ± 0,021	2,77 ± 0,078	2,82
5B	745 ± 27	7674 ± 32	2,88 ± 0,077	<b>2,91 ± 0,023</b>	<b>2,92 ± 0,072</b>	2,90
6B	739 ± 21	7672 ± 26	<b>2,98 ± 0,079</b>	2,90 ± 0,021	2,84 ± 0,010	2,90
S235JR	161 ± 25	7866 ± 15	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabulka 5.13 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady B. Z naměřených údajů vyplývá, že se snižujícím se obsahem křemíku se hustota stále zvyšuje. Stejně tak tomu je i u sad vzorků s označením A a F. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušebního vzorku 5B a to  $7674 \pm 32 \text{ kg.m}^{-3}$ , nejnižší u vzorku 1B a to  $7355 \pm 36 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Závislost % Si na změnu hustoty v sadě vzorků B popisu následující funkční rovnice s označením 5.12:

Funkční rovnice 5.12 náležící k tab. 5.13.

$$\rho = 7898,71 - (215,99) \cdot \% \text{ Si} \quad (5.12)$$

$$R^2 = 0,77$$

$$F = 53,4$$

$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením křemíku naměřená tvrdost roste až do koncentrace 1,72 % a následně prudce klesá z důvodu vzniku většího procentuálního množství karbidického eutektika. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 2B a to  $915 \pm 38 \text{ HV}$ . Nejnižší naměřenou hodnotu ze souboru zkušebních vzorků vykazoval vzorek s označením 1B a to  $577 \pm 35 \text{ HV}$  (ten obsahoval nejvyšší procento křemíku ze

souboru vzorků s označením B). Pro porovnání experimentálních hodnot v souboru sady byl opět použit etalon s označením S235JR, který dosahoval hodnot  $161 \pm 25$  HV.

Závislost % Si na změnu tvrdosti v sadě vzorků B popisu následující funkční rovnice s označením 5.13:

Funkční rovnice 5.13 náležící ke grafu na obrázku 5.25.

$$HV = 849,77 - (59,62) \cdot \% Si \quad (5.13)$$

$$R^2 = 0,072$$

$$F = 1,24$$

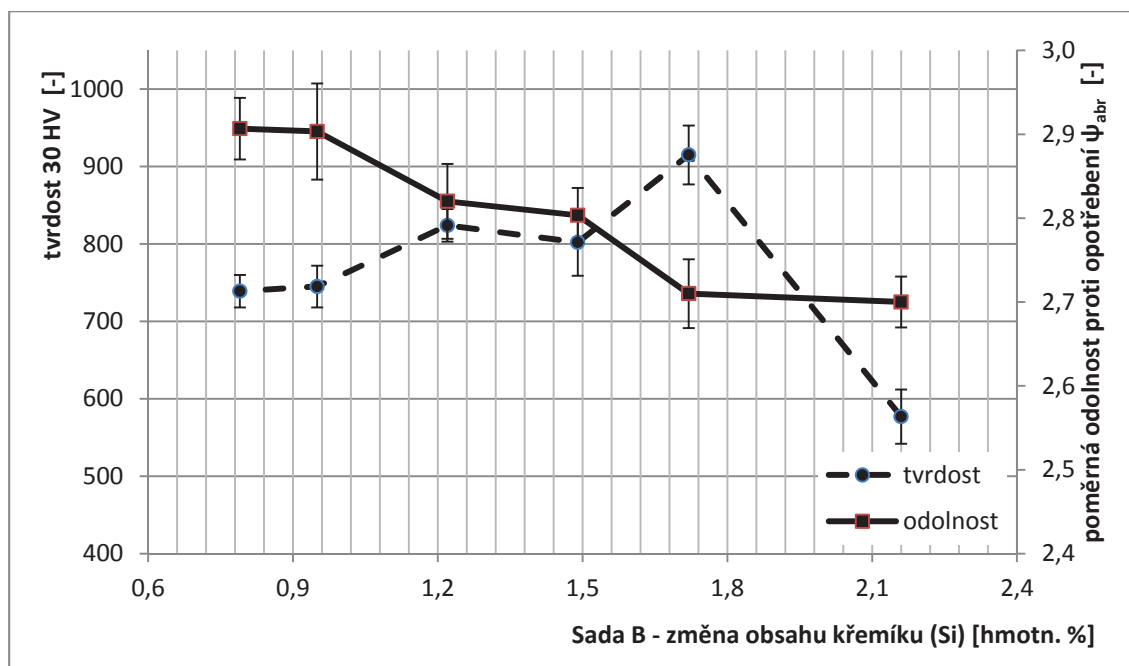
$$P < 0,28$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F < F_{krit.} \Rightarrow$  nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší.

Tabulka 5.13 zobrazuje také výsledky zkoušek odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Ty ve spojení s informací o metalografické struktuře (viz příloha H) opět poukazují na fakt, že naměřené údaje jsou závislé na struktuře materiálu. Z výsledků zjištěných vzorků s označením 2B, 4B a 6B je patrný snižující se trend poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. zvyšující se hmotnostní úbytek se vzrůstající střední velikostí abrazivních částic. Výsledky pro jednotlivé velikosti částic se příliš nemění v porovnání s ostatními sadami zkušebních vzorků popisovaných v této práci. Zvyšující se poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení ve vzrůstající střední velikostí částic vykazují zkušební vzorek s označením 1B, 3B a 5B na všech zkušebních plátnech.

Zkušební vzorek s označením 6B vykazuje pro brusné plátno s označením P240 ( $44,5 \mu\text{m}$ ) nejvyšší poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,98 \pm 0,079$  z celého souboru vzorků. Zkušební vzorek s označením 5B vykazuje pro brusné plátno s označením P120 ( $115,5 \mu\text{m}$ ) nejvyšší poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,91 \pm 0,023$  a na brusném plátně s označením P60 ( $275 \mu\text{m}$ ) opět nejvyšší poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,92 \pm 0,072$  ze souboru zkušebních vzorků s označením B. Nejnižší poměrná odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušebním vzorku s označením 1B pro zkušební plátno s označením P240 ( $44,5 \mu\text{m}$ ) z celého souboru měřených zkušebních vzorků ze sady s označením B. Graf na obrázku 5.25 zobrazuje závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  a tvrdosti 30 HV na množství křemíku v litině.



Obrázek 5.25: Graf zobrazující vzorky sady B – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství křemíku v litině.

Z naměřených výsledků z grafu na obrázku 5.25 je zřejmé, že poměrné odolnosti proti opotřebení a tvrdosti spolu souvisí, je patrné, že zvyšujícím se obsahem křemíku hodnoty průměrné poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  klesají a naopak hodnoty tvrdosti vzrůstají až do koncentrace 1,72 % Si. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace.

Závislost % Si na změnu poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v sadě vzorků B popisu následující funkční rovnice s označením 5.14:

Funkční rovnice 5.14 náležící ke grafu na obrázku 5.25.

$$\psi_{abr} = 3,04 - (0,1693) \cdot \% Si \quad (5.14)$$

$$R^2 = 0,66$$

$$F = 31,3$$

$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.



### 5.2.3 Sada C (nikl Ni) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.14: Vzorok sady C – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení.

Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic 44,5 $\mu$ m (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu$ m (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu$ m (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
1C	602 ± 25	7478 ± 63	2,44 ± 0,053	2,54 ± 0,011	2,33 ± 0,078	2,49
2C	643 ± 37	7585 ± 26	2,43 ± 0,021	2,45 ± 0,032	2,33 ± 0,041	2,40
3C	719 ± 20	7599 ± 53	2,75 ± 0,098	2,61 ± 0,0830	2,77 ± 0,069	2,71
4C	723 ± 39	7608 ± 31	<b>2,91 ± 0,021</b>	<b>2,87 ± 0,012</b>	<b>3,09 ± 0,032</b>	2,95
5C	<b>765 ± 31</b>	7630 ± 38	2,83 ± 0,056	2,86 ± 0,024	2,72 ± 0,054	2,80
6C	591 ± 28	7646 ± 41	2,76 ± 0,032	2,80 ± 0,075	2,61 ± 0,018	2,72
S235JR	161 ± 25	7857 ± 13	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabulka 5.14 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady C. Z naměřených údajů zobrazené vyplývá, že s vzrůstajícím se obsahem niklu se hustota zvyšuje (stejně jako u sad vzorků A, B a F). Toto tvrzení bylo dokázáno pomocí funkční rovnice 5.15. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušební vzorku 5C a to  $7646 \pm 41 \text{ kg.m}^{-3}$ , nejnižší u vzorku 1C a to  $7478 \pm 63 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Závislost % Ni na změnu hustoty v sadě vzorků C popisu následující funkční rovnice s označením 5.15:

Funkční rovnice 5.15 náležící k tab. 5.14.

$$\rho = 7514,15 - (30,24) \cdot \% Ni \quad (5.15)$$

$$R^2 = 0,79$$

$$F = 61,9$$

$$P < 0,001$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit.} \Rightarrow$  zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením niklu naměřená tvrdost roste až do koncentrace 3,92 % a následně prudce klesá z důvodu vzniku většího procentuálního zastoupení austenitu ve struktuře materiálu a velmi malého množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 5C a to  $765 \pm 31 \text{ HV}$ .

Nejnižší naměřenou hodnotu ze souboru zkušebních vzorků vykazoval vzorek s označením 6C a to  $591 \pm 28$  HV, který obsahuje nejvyšší procento niklu ze souboru vzorků s označením C. Pro porovnání experimentálních hodnot v souboru byl opět použit etalon s označením S235JR, který dosahoval hodnot  $161 \pm 25$  HV.

Závislost % Ni na změnu tvrdosti v sadě vzorků C popisu následující funkční rovnice s označením 5.16:

Funkční rovnice 5.16 náležící ke grafu na obrázku 5.26.

$$HV = 647,11 + (10,58) \cdot \% Ni \quad (5.16)$$

$$R^2 = 0,067$$

$$F = 1,15$$

$$P < 0,29$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

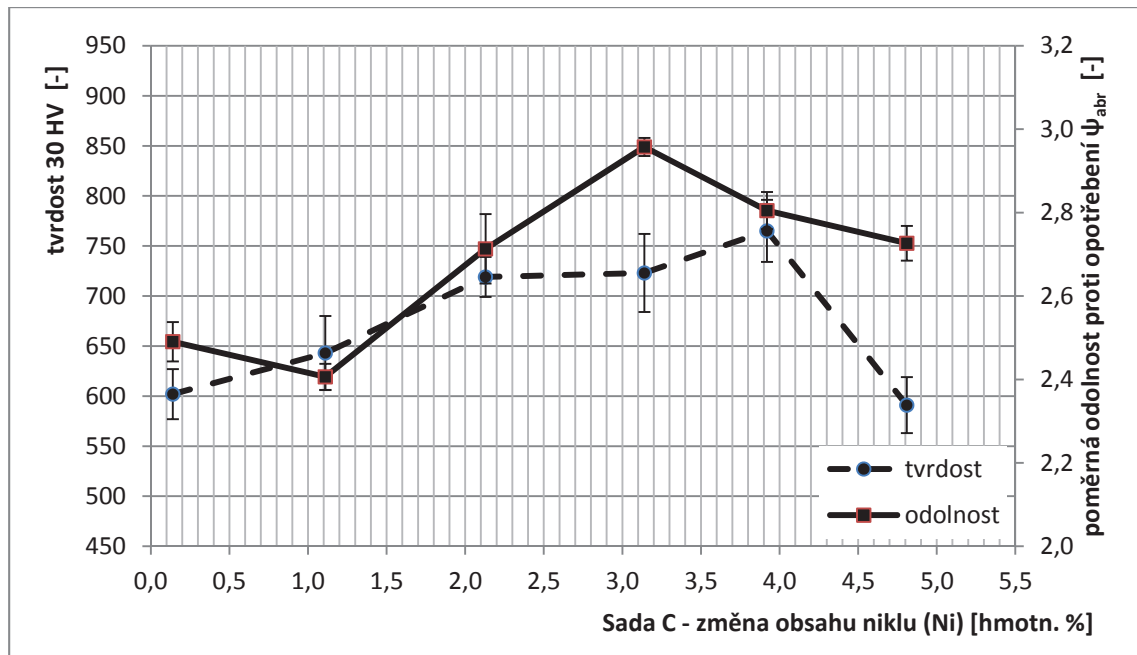
Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F < F_{krit.} \Rightarrow$  nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší.

Z konfrontace výsledků zkoušek odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jsou (viz tab. 5.14) a metalografických struktur (viz příloha H) je opět patrný fakt, že naměřené údaje se strukturou materiálu souvisí. Z výsledků zjištěných u všech vzorků není jasný konkrétní trend poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. změna hmotnostního úbytku. Rozdíly vykazují vzorky s označením 4C na brusném plátně s označením P60 a vzorek s označením 3C opět na brusném plátně P60, u kterých se se poměrná odolnost proti abrazivním zvětšuje se střední velikostí částic. U ostatních zkušebních vzorků se nejprve k poklesu poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. zvýšení hmotnostního úbytku.

Zkušební vzorek s označením 4C vykazuje pro brusné plátno s označením P240 ( $44,5 \mu\text{m}$ ) nejvyšší poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,91 \pm 0,021$ , na brusném plátně s označením P120 ( $11,5 \mu\text{m}$ ) vykazuje  $\psi_{abr.}$   $2,87 \pm 0,012$  a na P60 ( $275 \mu\text{m}$ ) vykazuje  $\psi_{abr.}$   $3,09 \pm 0,032$ . Zkušební vzorek s označením 4C vykazuje na všech zkušebních plátnech nejvyšší poměrnou odolnost z celého souboru sady vzorků s označením C.

Nejnižší poměrná odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušebním vzorku s označením 1C pro zkušební plátno s označením P60 (střední velikost částic  $275 \mu\text{m}$ ) z celého souboru měřených zkušebních vzorků ze sady s označením C. Na grafu obr. 5.26 je zobrazena závislost

průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství hmotnostního procenta niklu.



Obrázek 5.26: Graf zobrazující vzorky sady C – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství niklu v litině.

Z grafu s označením 5.26, je patrné, že zvyšujícím se obsahem niklu hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  ze začátku klesá, tato změna je daná mikrostrukturou daného vzorku. Následně dochází ke zvýšení a to až do koncentrace 3,14 % Ni a následně dochází opět k prudkému poklesu hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$ . Hodnoty tvrdosti vzrůstají až do koncentrace 3,92 % Ni a následně dochází k prudkému poklesu tvrdosti. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace.

Závislost % Ni na změnu poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v sadě vzorků C popisu následující funkční rovnice s označením 5.17:

Funkční rovnice 5.17 náležící ke grafu na obrázku 5.26.

$$\psi_{abr} = 2,44 + (0,091) \cdot \% Ni \quad (5.17)$$

$$R^2 = 0,48$$

$$F = 14,9$$

$$P < 0,002$$

$$F_{krit.} = 5,98$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit}$ . => zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

#### 5.2.4 Sada D (měď Cu) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.15: Vzorok sady D – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřeбенí.

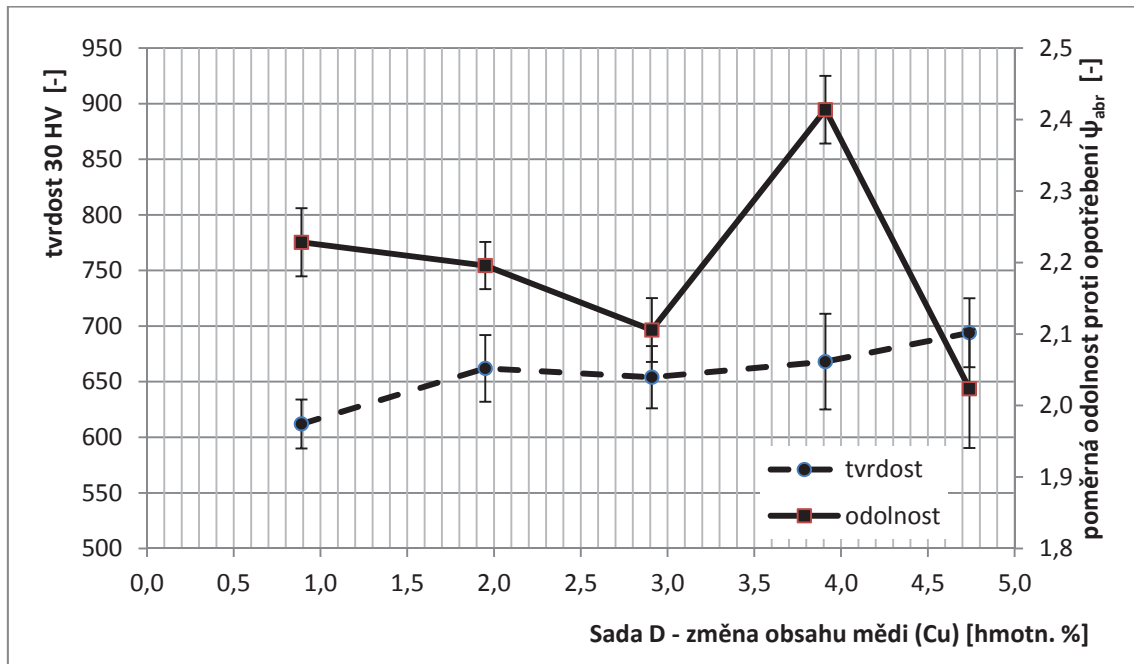
Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřeбенí $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic 44,5 $\mu$ m (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu$ m (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu$ m (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
2D	612 $\pm$ 22	7610 $\pm$ 35	2,33 $\pm$ 0,026	2,12 $\pm$ 0,042	1,97 $\pm$ 0,075	2,23
3D	662 $\pm$ 30	7639 $\pm$ 43	<b>2,43 <math>\pm</math> 0,016</b>	2,15 $\pm$ 0,021	2,01 $\pm$ 0,062	2,19
4D	654 $\pm$ 28	7654 $\pm$ 21	2,22 $\pm$ 0,011	1,98 $\pm$ 0,097	2,12 $\pm$ 0,026	2,11
5D	668 $\pm$ 43	7569 $\pm$ 29	2,42 $\pm$ 0,056	<b>2,42 <math>\pm</math> 0,062</b>	<b>2,41 <math>\pm</math> 0,024</b>	2,41
6D	<b>694 <math>\pm</math> 31</b>	7656 $\pm$ 20	2,20 $\pm$ 0,098	1,92 $\pm$ 0,11	1,94 $\pm$ 0,041	2,02
S235JR	161 $\pm$ 25	7857 $\pm$ 13	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabulka 5.15 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady D. Z naměřených údajů vyplývá, že se vzrůstajícím obsahem mědi se hustota zvyšuje. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušebního vzorku 5D a to  $7872 \pm 20 \text{ kg.m}^{-3}$ . Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením mědi naměřená tvrdost roste. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 6D a to  $694 \pm 31 \text{ HV}$ . Nejnižší naměřenou hodnotu ze souboru zkušebních vzorků vykazoval vzorek s označením 1D a to  $612 \pm 22 \text{ HV}$ . Pro porovnání experimentálních hodnot byl použit etalon s označením S235JR, který dosahoval hodnot  $161 \pm 25 \text{ HV}$ .

Naměřené hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřeбенí ukazují, že abrazivní opotřeбенí je závislé na struktuře materiálu a velikosti abrazivních částic. Metalografická struktura všech zkoušených materiálů je zobrazena v příloze H. Nejnižší poměrná odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušebním vzorku s označením 6D na všech zkušebních plátnech z celého souboru měřených zkušebních vzorků ze sady D. Z výsledků zjištěných u všech vzorků je patrný klesající trend poměrné odolnosti proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$ . tj. nárůst hmotnostního úbytku se zvyšující se velikostí abrazivních částic. U zkušební vzorek s označením 5D a koncentrace 3,91 % Cu došlo ke zvýšení poměrné odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$ , ale

následně se zvyšující se koncentrací Cu došlo opět ke snížení poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$ .

Zkušební vzorek s označením 5D vykazuje pro brusné plátno s označením P120 (115,5  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr}$   $2,42 \pm 0,062$  a na brusné plátno s označením P60 (275  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr}$   $2,41 \pm 0,024$ . Na grafu 5.27 je zobrazena závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství mědi v litině. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace.



Obrázek 5.27: Graf zobrazující vzorky sady D – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství mědi v litině.

Z naměřených výsledků vyplývá, že průměr poměrné odolnosti proti opotřebení klesá se zvyšujícím se obsahem mědi, ale naopak tvrdost se zvyšuje se vzrůstajícím procentem mědi ve struktuře materiálu. U průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení došlo ke zvýšení v koncentraci 3,91 % Cu, toto zvýšení měl za následek zkušební vzorek s označením 5D, který ovlivnil celkový průměr. U zkušebního vzorku s označením 5D došlo k ovlivnění měření z důvodu nalezení materiálu malého množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů ve struktuře materiálu viz příloha H. Vlivem karbidických útvarů, které mají vysokou tvrdost, došlo ke zvýšení poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení.

### 5.2.5 Sada E (mangan Mn) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.16: Vzorčky sady E – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřeбенí.

Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřeбенí $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic 44,5 $\mu\text{m}$ (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu\text{m}$ (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu\text{m}$ (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
1E	589 ± 20	7425 ± 46	2,31 ± 0,015	2,50 ± 0,062	2,37 ± 0,10	2,41
2E	794 ± 25	7574 ± 35	2,45 ± 0,019	2,55 ± 0,028	2,37 ± 0,072	2,46
3E	<b>826 ± 42</b>	7644 ± 53	2,59 ± 0,024	2,65 ± 0,079	2,67 ± 0,051	2,64
4E	811 ± 36	7647 ± 35	2,46 ± 0,11	2,68 ± 0,023	2,56 ± 0,098	2,57
5E	750 ± 36	7687 ± 51	<b>2,78 ± 0,021</b>	<b>2,85 ± 0,016</b>	<b>2,83 ± 0,032</b>	2,82
6E	679 ± 21	7677 ± 31	2,67 ± 0,023	2,55 ± 0,092	2,43 ± 0,052	2,54
S235JR	161 ± 25	7857 ± 13	1,00	1,00	1,00	1,00

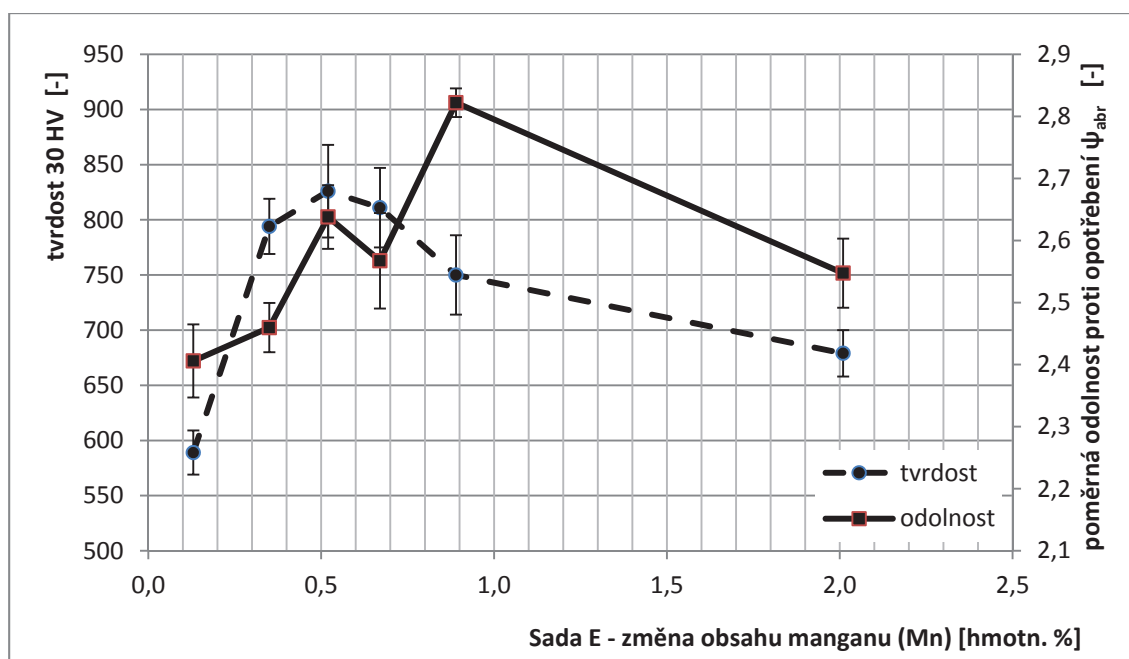
Tabulka 5.16 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady D. Z naměřených údajů vyplývá, že se vzrůstajícím obsahem manganu se hustota zvyšuje. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušební vzorku 5E a to  $7687 \pm 51 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením manganu naměřená tvrdost roste. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 3E a to  $826 \pm 42 \text{ HV}$ . Naměřené hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřeбенí ukazují, že abrazivní opotřeбенí je závislé na struktuře materiálu a velikosti abrazivních částic. Metalografická struktura všech zkoušených materiálů je popsána a zobrazena v příloze H. Nejnižší poměrná odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušebním vzorku s označením 1E na všech zkušebních plátnech z celého souboru měřených zkušebních vzorků ze sady E. Z výsledků zjištěných u všech vzorků je patrný vzrůstající trend poměrné odolnosti proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$ . tj. snížení hmotnostního úbytku do střední velikosti částic 115,5  $\mu\text{m}$ . Následně z výsledků zjištěných u všech vzorků je patrný klesající trend poměrné odolnosti proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$ . tj. zvýšení hmotnostního úbytku až do střední velikosti částic 275,5  $\mu\text{m}$ .

Zkušební vzorek s označením 5E vykazuje pro brusné plátno s označením P240 (44,5  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$   $2,78 \pm 0,021$ , na P120 (115,5  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$   $2,85 \pm 0,016$  a na brusné plátno s označením P60 (275  $\mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřeбенí  $\psi_{abr}$   $2,83 \pm 0,032$ .

Z naměřených výsledků tedy vyplývá, že zkušební vzorek 5E dosahoval nejvyšších hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení na všech zkušebních plátcích.

Grafu obrázku 5.28 zobrazuje závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství mědi v litině. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace. Z naměřených výsledků vyplývá, že poměrné odolnosti proti opotřebení roste se zvyšujícím se obsahem manganu až do koncentrace 0,89 % Mn a následně dochází k poklesu.



Obrázek 5.28: Graf zobrazující vzorky sady E – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství manganu v litině.

Tvrdost se zvyšuje se vzrůstajícím procentem manganu ve struktuře materiálu až do hodnoty 0,52 % Mn a následně dochází k poklesu. Tyto změny mají za příčinu legující prvky obsažené ve struktuře materiálu – jsou zapříčiněny změnou procentuálního zastoupení jednotlivých fází v mikrostruktuře daných zkušebních vzorků. Mikrostruktura daných vzorků je zobrazena v příloze H. Z naměřených výsledků vyplývá, že existuje jakýsi obsah manganu (cca 0,5 %), při kterém je tvrdost nejvyšší. Se zvyšujícím se obsahem manganu, až do cca 1 %, se odolnost proti opotřebení zvyšuje, ale následně dochází k poklesu. Z tohoto důvodu již větší obsah manganu již nepřináší lepší výsledky.

Z výsledků je také patrné, že nejméně odolným materiálem byla ocel s označením S235JR (etalon), která vykazovala cca třetinovou poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$ , tj. cca trojnásobný hmotnostní úbytek než vzorek s označením 5.

### 5.2.6 Sada F (chrom Cr) – naměřené hodnoty

Tabulka 5.17: Vzorky sady F – tvrdost, hustota a odolnost proti opotřebení [2].

Materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení $\psi_{abr}$ [-]			
			Střední velikost částic 44,5 $\mu$ m (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu$ m (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu$ m (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
2F	302 $\pm$ 35	7262 $\pm$ 28	1,80 $\pm$ 0,072	1,33 $\pm$ 0,021	1,14 $\pm$ 0,016	1,42
3F	<b>807 <math>\pm</math> 37</b>	7552 $\pm$ 31	<b>2,82 <math>\pm</math> 0,062</b>	<b>2,78 <math>\pm</math> 0,032</b>	<b>2,68 <math>\pm</math> 0,026</b>	2,76
4F	720 $\pm$ 31	7357 $\pm$ 20	2,60 $\pm$ 0,062	2,40 $\pm$ 0,030	2,39 $\pm$ 0,016	2,46
5F	697 $\pm$ 21	7474 $\pm$ 36	2,75 $\pm$ 0,076	2,49 $\pm$ 0,036	2,32 $\pm$ 0,023	2,52
6F	741 $\pm$ 19	7481 $\pm$ 25	2,54 $\pm$ 0,042	2,34 $\pm$ 0,055	2,33 $\pm$ 0,026	2,40
S235JR	161 $\pm$ 25	7857 $\pm$ 13	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabulka 5.17 uvádí výsledky měření hustoty materiálů sady D. Z naměřených údajů vyplývá, že s vzrůstajícím se obsahem chromu se hustota stále zvyšuje. Nejvyšší hustota byla naměřena u zkušební vzorku 6F a to 7481  $\pm$  25 kg.m<sup>-3</sup>.

Závislost % Cr na změnu hustoty v sadě vzorků F popisu následující funkční rovnice s označením 5.18:

Funkční rovnice 5.18 náleží k tab. 5.17.

$$\rho = 7311,51 - (41,98) \cdot \% Cr \quad (5.18)$$

$$R^2 = 0,19$$

$$F = 3,16$$

$$P < 0,098$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F < F_{krit.} \Rightarrow$  nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší.

Z funkční rovnice je patrné, že výsledek použité rovnice určuje vysokou sílu testu. Pravděpodobnost spolehlivosti je vyšší než 9,8 %.

Z experimentálního měření tvrdosti vyplývá, že se zvyšujícím se procentuálním zastoupením chromu naměřená tvrdost roste. Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena na



zkušební vzorku s označením 3F a to  $807 \pm 37$  HV. Následné zvyšování procentuálního zastoupení chromu již tvrdost nezvyšuje. Maximální hodnota tvrdosti byla naměřena při obsahu 1,91 % Cr. Nejnižší naměřenou hodnotu ze souboru zkušebních vzorků vykazoval vzorek s označením 2F a to  $302 \pm 35$  HV. Pro porovnání experimentálních hodnot byl použit etalon s označením S235JR, který dosahoval hodnot  $161 \pm 25$  HV.

Závislost % Cr na změnu tvrdosti v sadě vzorků F popisu následující funkční rovnice:

Funkční rovnice 5.19 náležící ke grafu na obrázku 5.29.

$$HV = 412,74 + (88,86) \cdot \% Ni \quad (5.19)$$

$$R^2 = 0,28$$

$$F = 5,25$$

$$P < 0,03$$

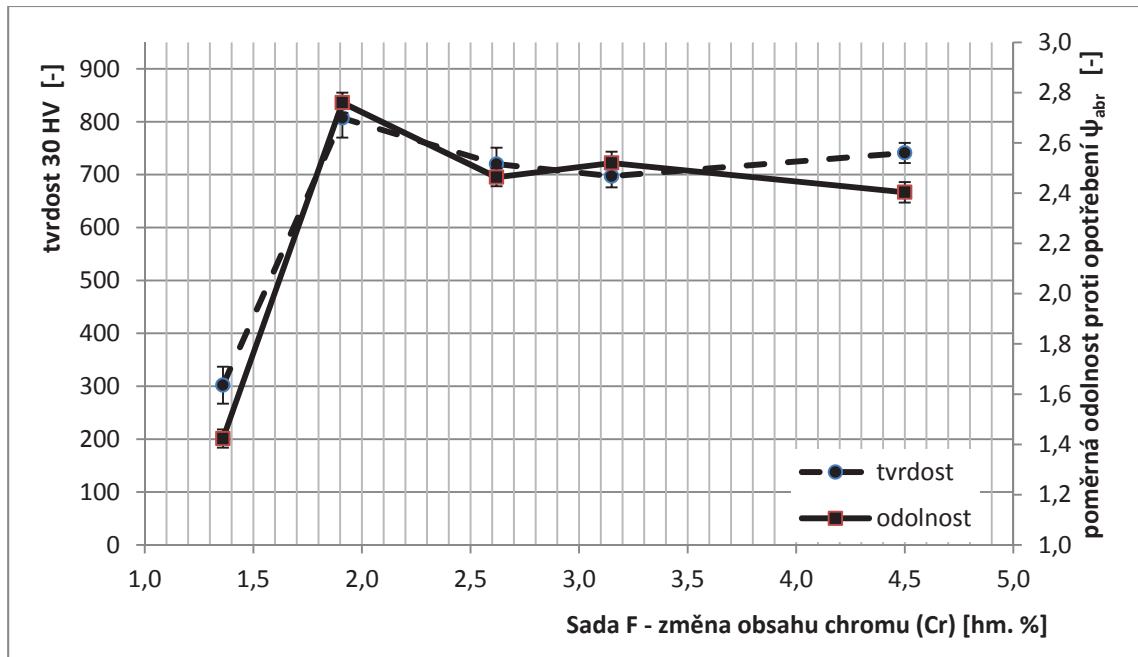
$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F < F_{krit.} \Rightarrow$  nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší.

Naměřené hodnoty odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ukazují, že abrazivní opotřebení je závislé opět na struktuře materiálu a velikosti abrazivních částic. Metalografická struktura všech zkoušených materiálů je zobrazena v příloze H. Z výsledků zjištěných u všech vzorků je patrný klesající trend poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nárůst hmotnostního úbytku se zvyšující se velikostí abrazivních částic. Výsledky pro jednotlivé velikosti částic mají klesající trend se zvyšující se střední velikostí částic, ale nedosahují v porovnání s ostatními sadami zkušebních vzorků uváděných v disertační práci velkých změn.

Zkušební vzorek s označením 3F vykazuje pro brusné plátno s označením P240 ( $44,5 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,82 \pm 0,062$  a na brusné plátno s označením P60 ( $275 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$   $2,68 \pm 0,026$ . Nejnižší průměrnou poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr.}$  tj. nejvyšší hmotnostní úbytek byl naměřen na zkušební vzorku s označením 1F. Grafu na obrázku 5.29 je zobrazuje závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství chromu v litině. Pro přehlednost byly jednotlivé body řady propojeny přímkami. Toto propojení, ale nevyjadřuje trend – slouží pouze pro usnadnění orientace. Z naměřených výsledků vyplývá, že poměrné odolnosti proti

opotřebení a tvrdosti spolu souvisí a nedochází k výrazným změnám – tedy že od obsahu cca. 1,3 % Cr již nedochází ke zlepšení poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení a tvrdosti.



Obrázek 5.29: Graf zobrazující vzorky sady F – závislost průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  a tvrdosti 30 HV na množství chromu v litině.

Závislost % Cr na změnu poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení v sadě vzorků F popisu následující funkční rovnice:

Funkční rovnice 5.20 náležící ke grafu na obrázku 5.29.

$$\psi_{abr} = 1,81 + (0,184) \cdot \% Cr \quad (5.20)$$

$$R^2 = 0,16$$

$$F = 2,60$$

$$P < 0,13$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F < F_{krit.} \Rightarrow$  nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně neliší.

### 5.2.7 Rozložení teplotního pole

V rámci předešlých experimentů bylo také měřeno rozložení teplotního pole během experimentálního měření. Cílem tohoto dílčího experimentu bylo určit vliv velikosti abraziva na výslednou teplotu zkušební vzorku při abrazivním opotřebení. Poslední krok experimentu se zabýval posouzením možného vlivu zvýšené teploty při zkoušce odolnosti proti opotřebení na brusném plátně na změny mechanických

vlastností litin se zvýšenou odolností proti opotřebení. Způsob měření je zobrazen na obrázku 5.30, Obrázek zachycuje rozložení teplotního pole pro zkušební vzorek s označením 5A.



Obrázek 5.30: Rozložení teplotního pole u vzorku 5A na brusném plátně P120. Linie vyznačuje oblast měření rozložení teplot na brusném plátně.

Výsledky těchto dílčích experimentů (určení rozložení teplotního pole) byly publikovány na zahraniční konferenci [6]. Ucelený soubor výsledků představuje soubor dat, který svým rozsahem přesahuje rámec práce. Z hlediska cílů této disertační práce jsou významné pouze hodnoty naměřené na sadě litin A, které uvádí tabulka 5.18.

Tabulka 5.18: Maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebení.

Označení vzorku	S235JR	1A	2A	3A	4A	5A
Tvrdość [-]	161 ± 25	667 ± 26	753 ± 40	631 ± 23	553 ± 31	372 ± 20
Průměrná $\psi_{abr}$ [-]	1,00	2,40	2,90	2,89	3,05	3,21
	Teplota [°C]					
44,5 μm (P240)	43,0 ± 0,1	45,8 ± 0,2	47,1 ± 0,2	44,6 ± 0,2	46,8 ± 0,3	48,1 ± 0,2
115,5 μm (P120)	45,3 ± 0,2	49,8 ± 0,2	49,8 ± 0,3	51,9 ± 0,1	48,5 ± 0,2	53,9 ± 0,2
275 μm (P60)	48,1 ± 0,1	51,1 ± 0,2	55,4 ± 0,1	57,3 ± 0,2	52,1 ± 0,3	58,2 ± 0,1
Průměrná hodnota	45,5	48,9	50,8	51,3	49,1	53,4

Závislost % C na změnu teploty v sadě vzorků A popisu následující funkční rovnice. Funkční rovnice 5.21 náležící ke grafu na obrázku 6.39.

$$T = 53,97 - (1,15) \cdot \% C \quad (5.21)$$

$$R^2 = 0,056$$

$$F = 77,5$$

$$P < 0,39$$

$$F_{krit.} = 7,38$$

Z vypočítaných údajů statistiky je patrné, že  $F > F_{krit}$ . => zamítáme nulovou hypotézu. Rozptyly obou souborů se statisticky významně liší.

### 5.2.8 Metalografie, mikrotvrdość a topografie opotřebeného povrchu

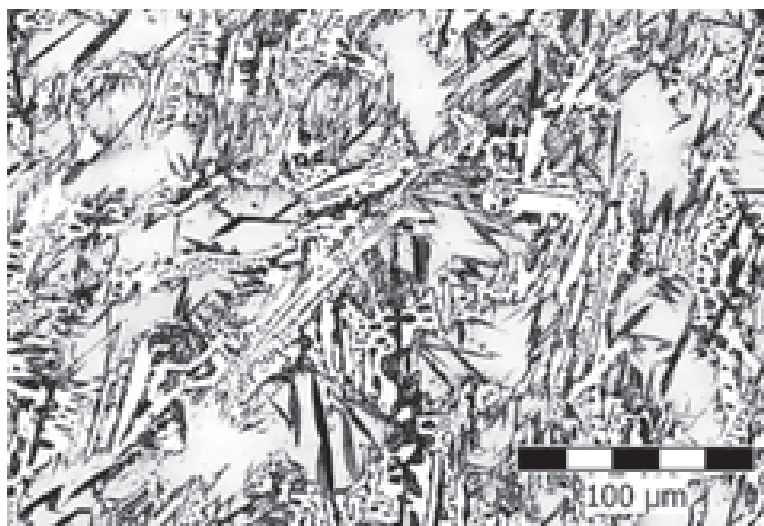
Popis mikrostruktury všech vzorků uvádí příloha H. Vzorky 3A, 4A a 5A jsou z hlediska výsledků této práce nejdůležitější. Proto byly podrobeny ještě dalším laboratorním zkouškám. Topografie opotřebeného povrchu byla z důvodu vysoké ceny zkoumána pouze na třech nejvýznamnějších zkušebních vzorcích. Na těchto vzorcích bylo provedeno:

- posouzení procentuálního obsahu jednotlivých strukturálních složek;
- měření mikrotvrdości jednotlivých strukturálních složek;
- snímkování opotřebeného povrchu na transmitním elektronovém mikroskopu.

#### Litina 3A

U litiny 3A byla určena nejvyšší celková tvrdost  $631 \pm 23$  HV 30 a průměrná poměrná odolnost proti opotřebení 2,89. Strukturu litiny 3A popisuje obrázek 5.31. Pódeutektická struktura litiny obsahuje:

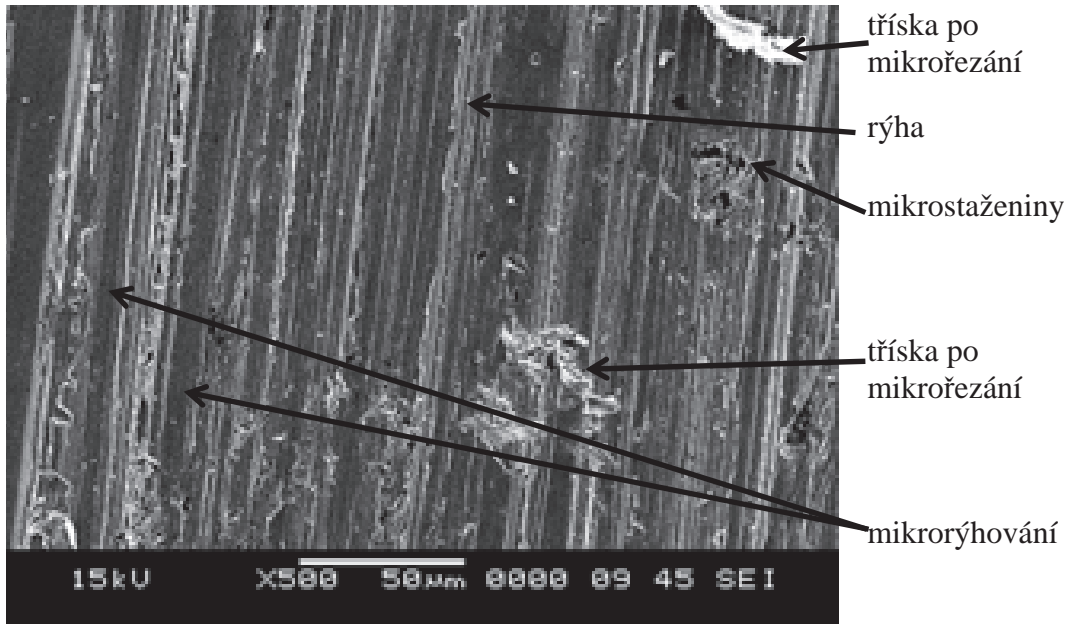
- |                         |      |                      |
|-------------------------|------|----------------------|
| • karbidické eutektikum | 53 % | $522 \pm 59$ HV 0,02 |
| • martenzit             | 32 % | $842 \pm 87$ HV 0,02 |
| • zbytkový austenit     | 15 % | $549 \pm 63$ HV 0,02 |



Obrázek 5.31: Vzorek 3A - Posouzení struktury a tvrdosti.

Z obrázku 5.31 je patrná mikrostruktura litiny 3A. V té jsou zastoupeny fáze karbidického eutektika, martenzitu a zbytkového austenitu. Z naměřených výsledků je

patrné, že největší podíl mělo karbidické eutektikum a to 53 % s naměřenou mikrotvrdostí  $522 \pm 59$  HV 0,02. Nejvyšší naměřená mikrotvrdost byla u martenzitu a to  $842 \pm 87$  HV 0,02, který byl zastoupen ve 32 %. Na vzorku litiny 3A byla zkoumána také topografie opotřebovaného povrchu (viz obrázek 5.32).



Obrázek 5.32: Vzorek 3A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.

Na obr. 5.32 je zobrazena topografie opotřebovaného povrchu zkušebního vzorku s označením 3A po abrazivní zkoušce na brusném plátně s označením P120 (střední velikost částic  $115,5 \mu\text{m}$ ). Na povrchu po zkoušce je patrné viditelné poškození s vytvořenými rýhami, které vznikly za pomoci abrazivních částic. Na povrchu jsou patrné také třísky po mikrořezání a vady materiálu ve formě mikrostaženin. Viditelné mikrorýhování je na povrchu zastoupenou ve větším procentu než mikrořezání.

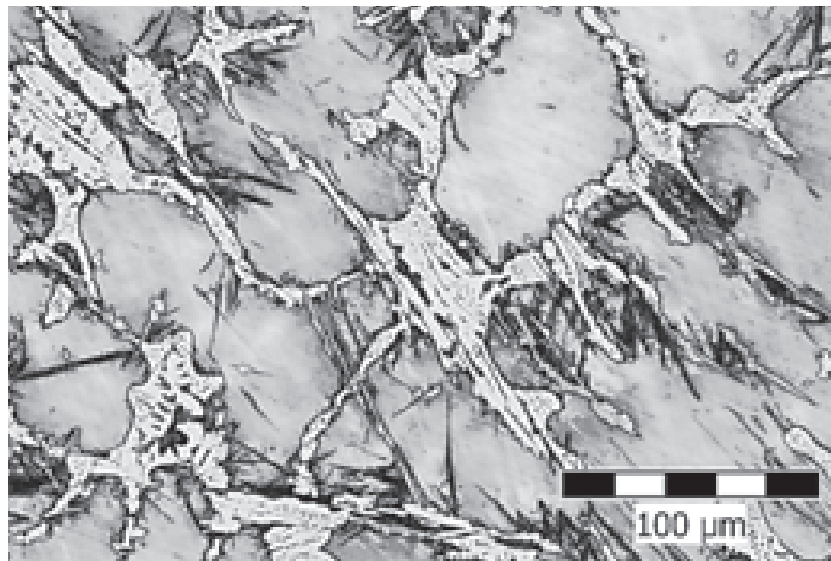
#### Litina 4A

U litiny 4A byla určena celková tvrdost:  $553 \pm 31$  HV 30 a průměrná poměrná odolnosti proti opotřebení 3,05. Strukturu litiny 4A popisuje obrázek 5.33. Podeutektická struktura litiny obsahuje:

- karbidické eutektikum      27 %       $560 \pm 43$  HV 0,02
- martenzit                      9 %       $756 \pm 72$  HV 0,02
- zbytkový austenit          64 %       $384 \pm 67$  HV 0,02

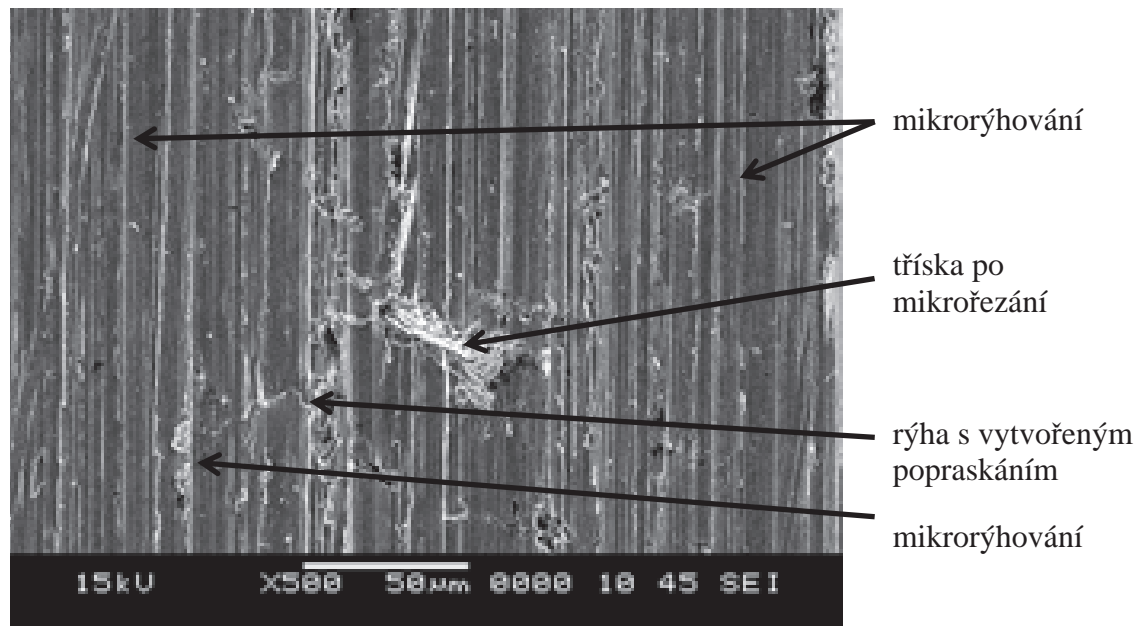
Z obrázku 5.33 je patrná mikrostruktura litiny 4A. Struktura je zastoupena fázemi ve formě karbidického eutektika, martenzitu a zbytkového austenitu.

Z naměřených výsledků je patrné, že největší podíl měl zbytkový austenit a to 64 % s naměřenou mikrotvrdostí  $384 \pm 67$  HV 0,02. Nejvyšší naměřená mikrotvrdost byla u martenzitu a to  $756 \pm 72$  HV 0,02, který byl zastoupen v 9 %.



Obrázek 5.33: Vzorek 4A - Posouzení struktury a tvrdosti.

Na vzorku litiny 4A byla zkoumána také topografie opotřebovaného povrchu (viz obrázek 5.34).



Obrázek 5.34: Vzorek 4A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.

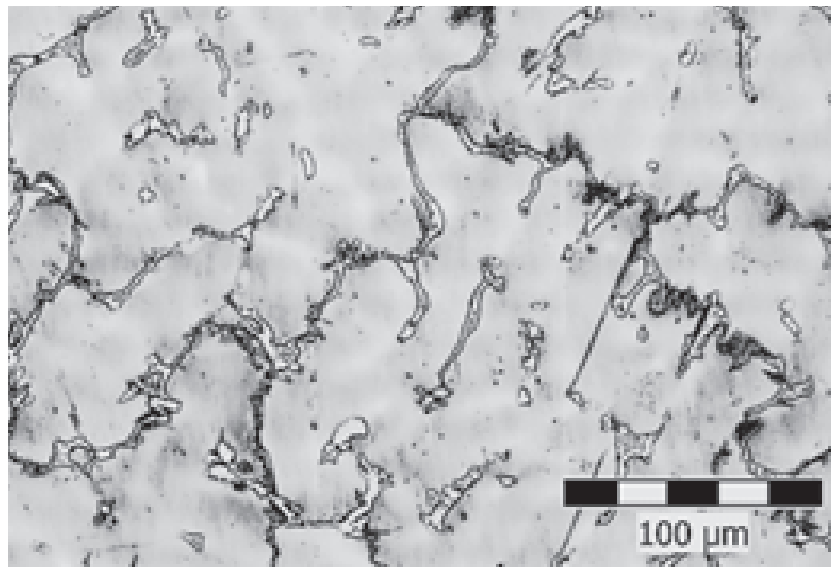
Na obr. 5.34 je zobrazena topografie opotřebovaného povrchu zkušebního vzorku s označením 4A po abrazivní zkoušce na brusném plátně s označením P120 (střední velikost částic  $115,5 \mu\text{m}$ ). Na povrchu po zkoušce je patrné viditelné poškození

procesem mikrorýhováním, které vzniklo za pomoci abrazivních částic. Na povrchu jsou patrné také třísky po mikrořezání. Vlivem zatížení zkušební vzorku během procesu abrazivního opotřebení a značné křehkosti vzorku, došlo při tvorbě rýh také k popraskání povrchu.

### **Litina 5A**

U litiny 5A byla určena celková tvrdost:  $372 \pm 20$  HV 30 a průměrná poměrná odolnost proti opotřebení 3,21. Strukturu litiny 5A popisuje obrázek 5.35. Podeutektická struktura litiny obsahuje:

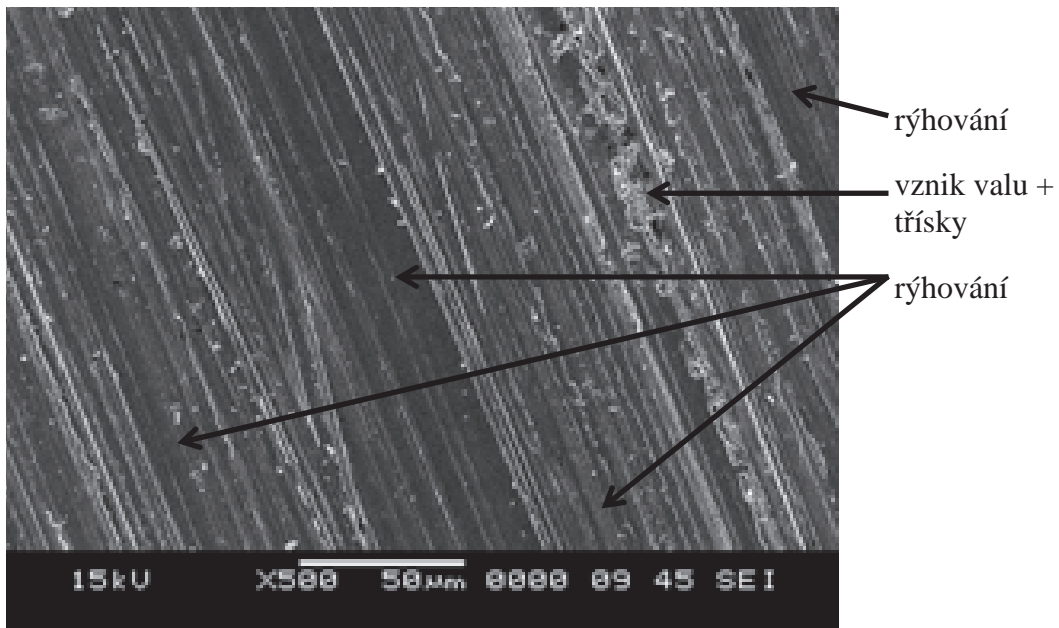
- karbidické eutektikum            8 %         $514 \pm 59$  HV 0,02
- martenzit                            1,5 %       $648 \pm 51$  HV 0,02
- zbytkový austenit                90,5 %     $465 \pm 63$  HV 0,02



Obrázek 5.35: Vzorek 5A - Posouzení struktury a tvrdosti.

Na obrázku 5.35 je patrná mikrostruktura litiny. Struktura zahrnuje fáze karbidického eutektika, martenzitu a zbytkového austenitu. Z naměřených výsledků je patrné, že největší podíl měl zbytkový austenit a to 90,5 % s naměřenou mikrotvrdostí  $465 \pm 63$  HV 0,02. Nejvyšší naměřená mikrotvrdost byla u martenzitu a to  $648 \pm 51$  HV 0,02, který byl obsažen v 1,5 %.

Na vzorku litiny 5A byla zkoumána také topografie opotřebovaného povrchu (viz obrázek 5.36).



Obrázek 5.36: Vzorek 5A - Posouzení topografie opotřebovaného povrchu.

Na obr. 5.36 je zobrazena topografie opotřebovaného povrchu zkušebního vzorku s označením 5A po abrazivní zkoušce na brusném plátně s označením P120 (střední velikost částic 115,5 µm). Na povrchu po zkoušce je patrné viditelné poškození rýhováním, které vzniklo za pomoci abrazivních částic spolu se vzniklým valem a třískami, které vznikly během procesu abrazivního procesu.



### 5.3 Odolnost proti abrazivnímu opotřebení a tvrdost návarových materiálů

Návarové materiály specifikované v přílohách B a C a dva základní materiály ostří a dlát (popsané v příloze D) byly podrobeny stejným laboratorním zkouškám jako sady litin. Naměřené hodnoty shrnuje tabulka 5.19.

Tabulka 5.19: Tvrdost HV 30 a odolnost proti opotřebení [7].

Zkoušený materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení $\Psi_{abr}$ [-]			
		Střední velikost částic 44,5 $\mu\text{m}$ (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu\text{m}$ (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu\text{m}$ (P60)	Průměrná hodnota $\Psi_{abr}$ [-]
ESAB OK 84.52	538 $\pm$ 32	1,94 $\pm$ 0,023	2,01 $\pm$ 0,044	2,09 $\pm$ 0,052	2,01
ESAB OK 74.78	232 $\pm$ 20	1,25 $\pm$ 0,022	1,20 $\pm$ 0,024	1,19 $\pm$ 0,016	1,21
WELCO 1702 S	252 $\pm$ 26	1,74 $\pm$ 0,021	1,73 $\pm$ 0,021	1,28 $\pm$ 0,027	1,58
WELCOLLOY 1745 S	<b>803 <math>\pm</math> 41</b>	<b>4,23 <math>\pm</math> 0,011</b>	<b>3,16 <math>\pm</math> 0,013</b>	<b>3,11 <math>\pm</math> 0,015</b>	<b>3,50</b>
WELCOLLOY 1750 S	299 $\pm$ 17	1,92 $\pm$ 0,034	1,75 $\pm$ 0,047	1,87 $\pm$ 0,0212	1,85
WELCO 1701 S	647 $\pm$ 28	2,98 $\pm$ 0,054	2,46 $\pm$ 0,211	2,28 $\pm$ 0,035	2,57
Ostří	389 $\pm$ 23	1,52 $\pm$ 0,025	1,29 $\pm$ 0,015	1,47 $\pm$ 0,032	1,43
Dláto	412 $\pm$ 27	1,58 $\pm$ 0,027	1,30 $\pm$ 0,020	1,38 $\pm$ 0,024	1,42
<b>5A</b>	<b>372 <math>\pm</math> 20</b>	<b>3,38 <math>\pm</math> 0,016</b>	<b>3,17 <math>\pm</math> 0,0019</b>	<b>3,07 <math>\pm</math> 0,026</b>	<b>3,21</b>
S235JR	161 $\pm$ 25	1,00	1,00	1,00	1

Tabulka 5.19 uvádí tvrdosti HV 30 a odolnosti proti opotřebení návarových materiálů. V tabulce je zobrazeno šest druhů návarových materiálů, které byly podrobeny zkouškám. Návarové materiály byly porovnány v laboratorních podmínkách s materiály z plužních ostří a dlát. Do experimentálního měření byl přiřazen i zkušební vzorek s označením 5A, který byl vybrán ze sad zkušebních vzorků litin. Zkušební vzorek s označením 5A vykazoval nejlepší výsledky poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ze všech zkoušených litin. Všechny naměřené výsledky byly porovnány s ocelí S235JR (etalon). Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla naměřena na zkušebním vzorku z návaru s označením WELCOLLOY 1745 S na všech zkušebních plátnech. Návarový materiál s označením WELCOLLOY 1745 S vykazoval nejvyšší tvrdost HV 30 a to 803  $\pm$  41. Nejnížší poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení ze souboru

zkušebních vzorků návarů byla naměřena na vzorku s označením ESAB OK 74.78 na všech zkušebních plátnech. Návarový materiál s označením ESAB OK 74.78 vykazoval i nejnižší tvrdost HV 30 a to  $232 \pm 20$ . Zkušební vzorek vyrobený z materiálu dláta vykazoval třetí nejvyšší hodnotu tvrdosti a to  $412 \pm 27$  ze souboru vzorků.

Zkušební vzorek vyrobený z materiálu dláta vykazoval pro brusné plátno s označením P240 ( $44,5 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr}$   $1,58 \pm 0,027$ , na brusné plátno s označením P120 ( $115,5 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr}$   $1,30 \pm 0,020$  a na brusné plátno s označením P60 ( $275 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr}$   $1,38 \pm 0,024$ . Zkušební vzorek s označením 5A, který zastupuje v disertační práci nově vzniklý typ materiálu, vykazuje druhou nejvyšší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Na vzorku s označením 5A byla poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení pro brusné plátno s označením P120 ( $115,5 \mu\text{m}$ )  $\psi_{abr}$   $3,17 \pm 0,0019$  a dosáhla tedy vyšší hodnoty v porovnání s návarem s označením WELCOLLOY 1745 S.

Z naměřených údajů tedy vyplývá, že nově vzniklá slitiny s označením 5A se může svými výsledky rovnat nejlepším návarovým materiálům ze souboru měření.

## 5.4 Provozní měření

V návaznosti na získané výsledky zkoušek návarových materiálů v laboratorních podmínkách byly všechny návarové materiály aplikovány na nová ostří a dláta orebních těles a podrobeny provozním zkouškám.

Získaná data jsou shrnuta v tabulkách zařazených v příloze F. Grafické zpracování těchto hodnot uvádějí přílohy I a J.

## 5.5 Ekonomické hodnocení dosažených výsledků

V rámci uvažované aplikace – použití nových slitin pro prodloužení životnosti abrazí namáhaných dílů orebních těles, je třeba posuzovat dvě varianty:

- renovaci navařováním – zde přichází v úvahu materiál WELCOLLOY 1745 S;
- renovaci výměnou – zde je uvažována náhrada za segment vyrobený ze slitiny 5A.

### 5.5.1 Ekonomické aspekty renovace navařováním

Při posuzování ekonomické výhodnosti renovace je výchozím bodem cena nového náhradního dílu. V tomto případě jsou ceny včetně DPH následující:

- plužní ostří: 421 Kč;
- dláto: 593 Kč.

Vzhledem k diskutabilnímu vyčíslení přínosu návaru na dláto, budou dále ve výpočtu uvažována pouze ostří. Pro porovnání ekonomické výhodnosti je použit zjednodušený model založený na následujících okrajových podmínkách:

Předpoklad je, že celková životnost ostří je cca. 100 ha, které vychází z dlouholetých zkušeností zemědělského podniku, u kterého měření bylo prováděno. Návar zvyšuje životnost ostří o 60 % (na 160 ha). Pokud je třeba zorat 160 ha, jsou dvě ekvivalentní možnosti – koupit 1,6 ostří (a po zorání 100 ha provést výměnu) nebo nové ostří opatřit návarem. V obou případech je třeba pořídit alespoň jedno nové ostří (v ceně 421 Kč). Tím lze dospět k závěru, že návar WELCOLLOY 1745 S by neměl stát více než 60 % ceny ostří (tedy 252 Kč). Obdobně lze stanovit maximální cenu pro návary s odlišnou odolností.

Dále vyčíslené ceny jsou založeny na běžné průmyslové praxi roku 2015 a jsou uváděny včetně DPH včetně nepřímých nákladů a amortizace. Spotřeby materiálu a technologické časy jsou založeny na zkušenostech získaných v rámci přípravy orební soustavy na experiment. Výpočet ceny návaru byl proveden dle rovnice (5.22):

$$N = N_n + N_p + N_e \quad (5.22)$$

Literatura [12, 39, 40] uvádí i další druhy nákladů – například  $N_v$  (náklady na demontáž nebo montáž nové či renovovaného ostří);  $N_{pd}$  (náklady na prostoje stroje) atd. tyto ale v rámci zjednodušeného modelu nebyly uvažovány.

## Náklady na přídavný materiál

Ceny materiálu jsou zjednodušeně vypočítány z ceny za 1 kg přídavného materiálu vynásobené spotřebou přídavného materiálu na vytvoření návaru (spotřeba byla určena na základě reálných hodnot zaznamenaných v rámci přípravy experimentů). Náklady na přídavný materiál pro jednotlivé návarové materiály uvádí tab. 5.20.

Tabulka 5.20: Náklady na přídavný materiál.

	OK 84.52	1702 S	1745 S	1750 S	1701 S	OK 74.78
Cena 1 kg elektrody [Kč]	392	922	1559	1464	1130	341
Spotřeba materiálu na ostří [kg]	0,339	0,381	0,328	0,351	0,410	0,320
Cena materiálu na jedno ostří [Kč]	132,89	351,28	511,35	513,86	463,30	109,12

## Náklady na pracnost

- Celková pracnost pro vytvoření návaru na jednom ostří byla v průměru 95 minut. Celková pracnost byla stanovena včetně doby přípravy před procesem svařování, doby svařování, mechanického očištění před navařování další vrstvy a závěrečného očištění. Náklady na pracnost obsahují také spotřební materiál, který se použil pro proces navařování a je již započítán v hodinové saze svářeče.
- Konečné náklady na práci svářeče byly 280 Kč/hod (náklady odpovídají fakturačním nákladům živnostníka v období roku 2012).

## Náklady na energii

- typ použitého svařovací agregátu: CEA TOP 250 AC/DC TIG;
- cena jedné kWh v podnikovém tarifu činí 4,89 Kč;
- čistá doba navařování jednoho ostří byla cca 35 minut;
- během procesu navařování byl pomocí klešťového multimetru měřen příkon svařovacího zdroje – 13,1 kW.

Výpočet nákladů na návar jednoho ostří vychází z rovnice (5.23), kam bylo dosazeno:

Náklady na práci:  $N_p = \text{hodinová mzda} \times \text{čas}$

$$N_p = 280 \times 95/60$$

$$N_p = 443,33 \text{ Kč.}$$

Náklady na energii:  $N_e = \text{příkon} \times \text{cena za 1 kWh} \times \text{čas}$

$$N_e = 13,1 \times 4,89 \times 35/60$$

$$N_e = 37,36 \text{ Kč}$$

Náklady na přídatný materiál:  $N_n = \text{cena spotřebovaného materiálu}$

$$\text{WELCOLLOY 1745 S: } N_n = 511,35 \text{ Kč}$$

$$\text{ESAB OK 84.52: } N_n = 132,89 \text{ Kč}$$

$$\text{WELCO 1701 S: } N_n = 463,30 \text{ Kč}$$

$$\text{ESAB OK 74.84: } N_n = 109,12 \text{ Kč}$$

$$\text{WELCO 1702 S: } N_n = 351,28 \text{ Kč}$$

$$\text{WELCOLLOY 1750 S: } N_n = 513,86 \text{ Kč}$$

Po dosazení vstupních dat do rovnice 5.22 byly stanoveny následující ceny:

$$\text{WELCOLLOY 1745 S: } N = 511,35 + 443,33 + 37,36 = 992,04 \text{ Kč;}$$

$$\text{ESAB OK 84.52: } N = 132,89 + 443,33 + 37,36 = 613,58 \text{ Kč;}$$

$$\text{WELCO 1701 S: } N = 463,30 + 443,33 + 37,36 = 943,99 \text{ Kč;}$$

$$\text{ESAB OK 74.84: } N = 109,12 + 443,33 + 37,36 = 589,81 \text{ Kč;}$$

$$\text{WELCO 1702 S: } N = 351,28 + 443,33 + 37,36 = 831,97 \text{ Kč;}$$

$$\text{WELCOLLOY 1750 S: } N = 513,86 + 443,33 + 37,36 = 994,55 \text{ Kč.}$$

Z vypočítaných cen je zřejmé, že ceny návarů převyšují přidanou užitnou hodnotu. To je pravděpodobně důvod, proč se technická praxe spíše přiklání neprovádět renovaci použitých komponentů, ale provedou výměnu opotřebovaného dílu za nový. Dnešní výrobci se snaží zvýšit životnost komponentů pomocí návarů aplikovaných již během výroby, tím je možné snížit finální cenu komponentů při zvýšení životnosti, avšak ekonomickou stránku nebylo možné zjistit od samotných výrobců zařízení.

### 5.5.2 Ekonomické aspekty renovace výměnou

Při renovaci výměnou je možné opotřebované segmenty vyměnit za ekvivalentní díly nebo zvážit záměnu materiálu. Z naměřených dat vyplývá, že slitina 5A má v porovnání se základním materiálem ostří poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení 1,44 (zvýšení životnosti o 44 % v porovnání se základním materiálem originální ostří). Z tohoto úhlu pohledu představuje vhodnou náhradu.

Otázka ekonomické výhodnosti této záměny je poměrně složitější než v případě aplikace návarů. Slitina 5A byla primárně navržena jako litina – tedy materiál vhodný k odlévání.<sup>5</sup> Slévárny kalkulují náklady na odlitky na základě takových detailů, jako spotřeba formovacího materiálu a jeho jakost nebo velikost tavby (šarže), na které závisí mimo jiné množství spotřebované energie.

Vzhledem k výše uvedenému by byl výpočet ceny založený na odhadovaných parametrech, (bez znalosti detailních poměrů dané slévárny), s nejvyšší pravděpodobností nepřesný a snadno zpochybnitelný. Proto byla oslovena slévárna ČKD Kutná Hora, která se v rámci České republiky specializuje na výrobu podobných odlitků s žádostí o cenovou nabídku na výrobu ostří.

Na základně předložené rozměrové specifikace a požadovaného chemického složení, které odpovídá slitině 5A vystavilo obchodní oddělení nabídku na dodávku 5 000 kusů ostří s jednotkovou cenou 195 Kč za kus, která je zobrazena v příloze O. Cenová nabídka je vyhotovená na výrobu ostří bez dodatečné aplikace nátěrových hmot, jakákoliv povrchová úprava podlehne opotřebení během prvních metrů orby a v důsledku znamená pouhé navýšení ceny bez navýšení užitné hodnoty. Vedlejším efektem struktury materiálu 5A (> 90 % austenit) je poměrně vysoká hodnota pohledových vlastností, díky které není dodatečná povrchová úprava nezbytná. Tato cena ponechává dostatečný prostor pro obchodní marže obchodníků. Proto lze předpokládat, že cena pro koncového uživatele nepřesáhne cenu originálního ostří a vzhledem k očekávané zvýšené životnosti bude představovat atraktivní alternativu.

---

<sup>5</sup> Originální ostří jsou kovaná. Jejich náhrada litými ostřími s sebou může nést komplikace spojené s odlišným chováním výkovek a odlitků. Odladění tohoto aspektu je pouze otázkou vhodného inženýrského řešení.

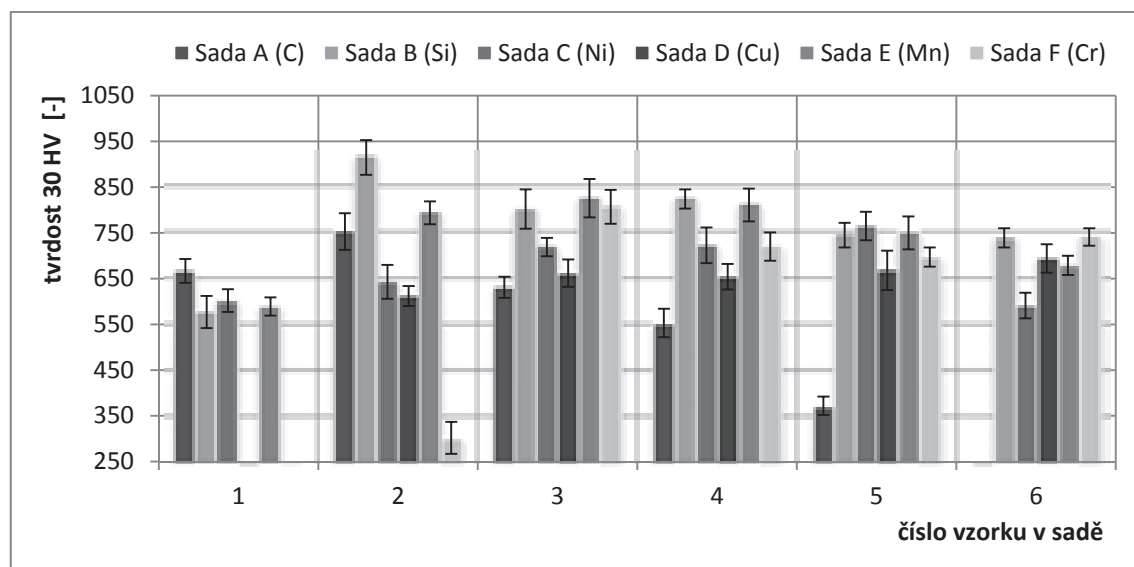
## 5.6 Dílčí závěry experimentů

Následující podkapitoly schňují naměřené výsledky s následným provnáním laboratorních a provozních experimentů.

### 5.6.1 Vliv chemického složení na tvrdost materiálu

Výsledky získané v rámci experimentů zaměřených na sady litin do značné míry potvrzují teoretické předpoklady. Tedy to, že tvrdost se zvyšuje se vzrůstajícím obsahem prvků C, Si, Mn a Cr [61]. U dalších posuzovaných prvků (Cu a Ni) znatelné navýšení hodnoty tvrdosti nebylo očekáváno, nicméně jak naznačuje teoretická pasáž této práce, oba zmiňované prvky mají vliv na strukturu litin.

Změna množství sledovaného prvku byla u navržených slitin z experimentálních důvodů záměrně volena v rozsahu, který může z určitého úhlu pohledu převyšovat konvenční rozpětí (např. C nebo Cu). To v důsledku vedlo k tomu, že i ty prvky, které obvykle (v rozmezí obvyklých hmotnostních podílů) nemají výrazný vliv na strukturu materiálu, vedly při vyšších koncentracích k znatelnému ovlivnění / modifikaci struktury materiálu a tím i k neočekávaným výkyvům v hodnotách tvrdosti. Vzájemné porovnání tvrdostí uvádí následující graf na obrázku 5.37.



Obrázek 5.37: Graf zobrazující porovnání dosažených tvrdostí v rámci jednotlivých sad vzorků.

V grafu na obr. 5.37 jsou zobrazeny naměřené údaje tvrdosti všech zkušebních sad a jejich směrodatné odchylky. V jednotlivých souborech se vždy měnila jedna významná složka chemického složení, přičemž množství ostatních prvků bylo

konstantní (v rámci výrobních tolerancí). V grafu na obr. 5.37 je celkem zobrazeno 33 hodnot měření ze souboru vzorků litin. Hodnoty tvrdosti jsou zobrazeny v šesti skupinách rozdělených podle čísla zorku v sadě. Soubor označený jako 1 obsahuje pouze zkušební vzorky ze sad označením A, B, C, E, vzorky s označením D a F nebyly v této sadě obsaženy. Soubor označený jako číslo 2 již obsahuje všechny zkušební vzorky ze sad označením A, B, C, D, E, F. Toto zobrazení je analogické i pro čísla vzorků v sadě pro 3, 4, 5, 6.

U vzorků litin s označením 6A, 1D, 1F byla prokázána velká vnitřní necelistvost, která již během výroby zkušebních vzorků zapříčinila nesoudržnost materiálu. Z tohoto důvodu nebyly jmenované vzorky začleněny do experimentálního měření, jak je uvedeno kap. 5.1.1.

Vzorky vykazující nejvyšší tvrdost uvádí následující tabulka 5.21. Ve všech případech se jedná o podeutektickou strukturu litiny, obsahující karbidické eutektikum, martenzit a u vzorků 3E a 4B také zbytkový austenit. Všechny tři vzorky se svým chemickým složením výrazně podobají.

Tabulka 5.21: Vzorky vykazující nejvyšší tvrdost.

Pořadí	Tvrdost 30 HV	Vzorek	Chemické složení [hmotn. %]								
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1.	915 ± 38	<b>2B</b>	3,67	1,72	0,53	2,22	3,78	0,15	0,01	0,02	87,9
2.	826 ± 42	<b>3E</b>	3,38	1,77	0,52	2,32	3,69	0,14	0,01	0,01	88,16
3.	824 ± 21	<b>4B</b>	3,64	1,22	0,52	2,21	3,77	0,15	0,02	0,02	88,45

Pro úplnost lze uvést také vzorky s nejnižší dosaženou tvrdostí, které uvádí tabulka 5.22. V tomto případě již taková shoda v chemickém složení není. Nejvyšší tvrdost byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 2B.

Tabulka 5.22: Vzorky vykazující nejnižší tvrdost.

Pořadí	Tvrdost 30 HV	Vzorek	Chemické složení [hmotn. %]								
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
31.	553 ± 31	<b>4A</b>	2,16	1,49	0,75	2,21	3,76	0,14	0,01	0,02	89,46
32.	372 ± 20	<b>5A</b>	1,75	1,35	0,71	2,16	3,74	0,12	0,01	0,01	90,15
33.	302 ± 35	<b>2F</b>	3,78	1,73	0,52	1,36	2,11	0,14	0,02	0,01	90,33

Tabulka 5.22 popisuje vzorky vykazující nejnižší tvrdost. Nejnižší tvrdost byla naměřena na zkušebním vzorku s označením 2F.



### 5.6.2 Vliv chemického složení na odolnost proti opotřebení

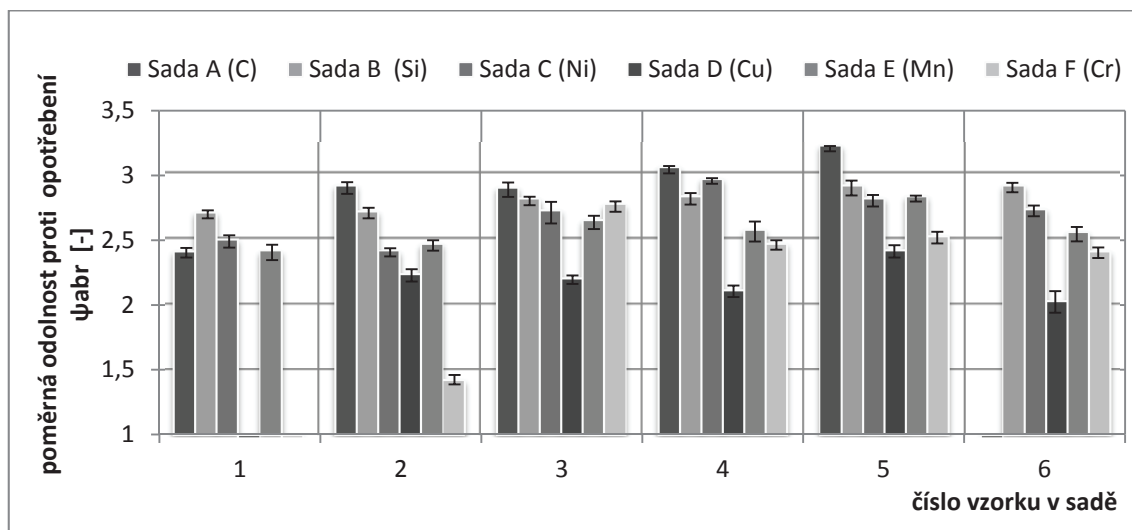
Pro usnadnění interpretace výsledků je uvažována průměrná hodnota  $\psi_{abr}$ . Výsledky uváděné v tabulkách 5.12 až 5.17 obecně potvrzují teoretický předpoklad, že odolnost proti opotřebení je do jisté míry úměrná tvrdosti (to potvrzují také obrázky grafů 5.22 až 5.29 zobrazujících vzájemný vztah tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, ve kterých křivka odolnosti kopíruje křivku tvrdosti).

V uvažovaných grafech lze vysledovat různé druhy odklonu od tohoto pravidla:

- a) U obrázků grafů pro Ni (obr. 5.26), Cu (obr. 5.27), Mn (obr. 5.28) a Cr (obr. 5.29) odolnost oproti opotřebení narůstá v závislosti na tvrdosti pouze do určité meze. Pokud tvrdost vzroste nad tuto hodnotu, odolnost materiálu začne klesat. Tento jev lze vysvětlit tím, že s dalším nárůstem tvrdosti se změní mechanismus úběru materiálu při abrazivním porušení (materiál se například začne oddělovat křehkým porušením). Což odpovídá závěrům uvedeným v [20, 65].
- b) U obrázků grafů pro C (obr. 5.22) a Si (obr. 5.25) se projevuje nepřímá úměrnost mezi tvrdostí a odolností oproti opotřebení. Tato skutečnost patrně souvisí s tím, že oba prvky mají výrazný vliv na strukturu materiálu. Tomuto jevu bude věnována pozornost dále.

Podle Cypina [66], by měli litiny, které budou odolávat silnému abrazivnímu účinku obsahovat, velký podíl tvrdých karbidů, které by měly být rovnoměrně. U karbidů typu  $M_7C_3$  měly hlavní osu orientovanou kolmo k opotřebovávanému povrchu a měly co nejmenší rozměr.

Vzájemné porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení uvádí následující graf na obr. 5.38.



Obrázek 5.38: Graf zobrazující porovnání dosažených průměrných hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  v rámci jednotlivých sad vzorků.

V grafu na obr. 6.38 jsou zobrazeny naměřené údaje poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení všech zkušebních sad a jejich směrodatné odchylky. V jednotlivých souborech se vždy měnila jedna významná složka chemického složení, přičemž množství ostatních prvků bylo konstantní (v rámci výrobních tolerancí). V grafu na obr. 5.38 je celkem zobrazeno 33 hodnot měření ze souboru vzorků litin. Hodnoty poměrné odolnosti jsou zobrazeny v šesti sadách označeny jako čísla vzorků v sadě. Soubor označený jako číslo 1 obsahuje pouze zkušební vzorky ze sad označením A, B, C, E, vzorky s označením D a F nebyly v této sadě obsaženy. Soubor označený jako číslo 2 již obsahuje všechny zkušební vzorky ze sad označením A, B, C, D, E, F. Toto zobrazení je chronologické i pro čísla vzorků v sadě pro 3, 4, 5, 6. Soubor označený jako číslo 6 obsahuje pouze zkušební vzorky ze sad označením B, C, D, E, F vzorek s označením nebyl v této sadě obsažen.

U vzorků litin s označením 6A, 1D, 1F byla prokázána velká vnitřní necelistvost, která již během výroby zkušebních vzorků zapříčinila nesoudržnost materiálu. Z tohoto důvodu nebyly jmenované vzorky začleněny do experimentálního měření, jak je uvedeno kap. 5.1.1.

Vzájemné porovnání bylo provedeno na základě průměrné hodnoty získané jako aritmetický průměr hodnot určených pro všechny tři různé zrnitosti. Nejvyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení vykazují vzorky, které uvádí tabulka 5.23.

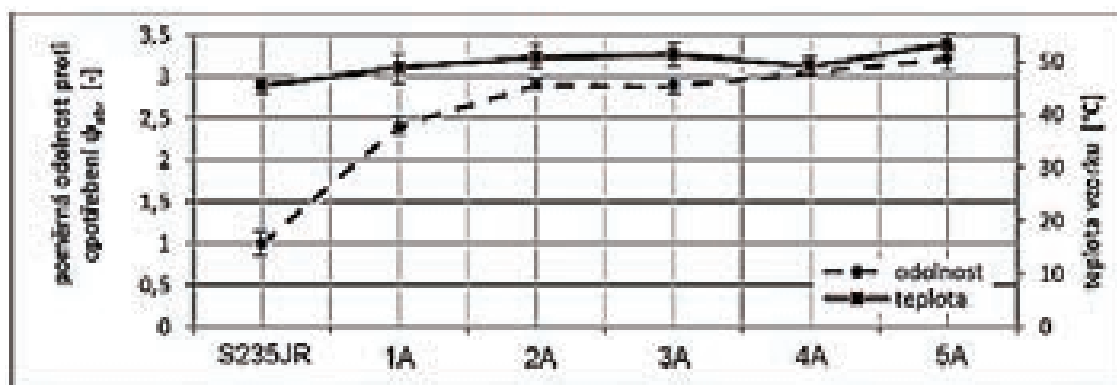
Tabulka 5.23: Vzorky vykazující nejvyšší odolnost.

Tvrдость 30 HV	$\varnothing \psi_{abr}$	Označení vzorku	Chemické složení [hmotn. %]								
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
372 ± 20	3,21	<b>5A</b>	1,75	1,35	0,71	2,16	3,74	0,12	0,01	0,01	90,15
553 ± 31	3,05	<b>4A</b>	2,16	1,49	0,75	2,21	3,76	0,14	0,01	0,02	89,46
723 ± 21	2,95	<b>4C</b>	3,45	0,68	0,54	2,49	3,14	0,13	0,01	0,02	89,54

Ve všech případech se jedná o pondeutektickou strukturu litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit. Pozoruhodné je, že vzorky s nejvyšší odolností proti abrazivnímu opotřebení mají téměř nejnižší tvrdosti v rámci celé množiny zkoušených vzorků. Odpověď na otázku, proč tomu tak je, naznačuje další z doprovodných měření, která byla prováděna v rámci hlavního experimentu – měření rozložení teplotního pole.

### 5.6.3 Význam rozložení teplot

Z hlediska disertační práce přineslo měření rozložení teplotního pole jeden zajímavý závěr – teplota (naměřená na špičce vzorku) je úměrná odolnosti vzorku vůči opotřebení. Závislost průměrné teploty povrchu zkušební vzorku na jeho průměrné odolnosti proti opotřebení pro zkušební sadu s označením A uvádí tabulka 5.18. Tyto hodnoty jsou graficky znázorněny na obrázku 5.39.



Obrázek 5.39: Graf zobrazující závislost průměrné teploty povrchu zkušební vzorku na jeho průměrné odolnosti proti opotřebení.

Graf na obrázku 5.39 zobrazuje závislost průměrné teploty povrchu zkušební vzorku na jeho průměrné odolnosti proti opotřebení. Nejnižší průměrná teplota byla naměřena na oceli S235JR a to 45,5 °C. Nejvyšší průměrná teplota byla naměřena na zkušební vzorku s označením 5A a to 53,4 °C, který dosahoval i nejvyšší poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení hodnoty  $\psi_{abr}$  3,21. U zkušební vzorku

s označením 5A však byla naměřena nejnižší tvrdost HV 30 a to  $372 \pm 20$  ze sady vzorků A. V tab. 5.24 jsou zobrazeny maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebením pro sadu zkušebních vzorků A.

Tabulka 5.24: Maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebením.

Označení vzorku	S235JR	1A	2A	3A	4A	5A
Tvrdost [-]	$161 \pm 25$	$667 \pm 26$	$753 \pm 40$	$631 \pm 23$	$553 \pm 31$	$372 \pm 20$
Průměrná $\psi_{abr}$ [-]	1,00	2,40	2,90	2,89	3,05	3,21
	Teplota [°C]					
44,5 $\mu\text{m}$ (P240)	$43,0 \pm 0,1$	$45,8 \pm 0,2$	$47,1 \pm 0,2$	$44,6 \pm 0,2$	$46,8 \pm 0,3$	$48,1 \pm 0,2$
115,5 $\mu\text{m}$ (P120)	$45,3 \pm 0,2$	$49,8 \pm 0,2$	$49,8 \pm 0,3$	$51,9 \pm 0,1$	$48,5 \pm 0,2$	$53,9 \pm 0,2$
275 $\mu\text{m}$ (P60)	$48,1 \pm 0,1$	$51,1 \pm 0,2$	$55,4 \pm 0,1$	$57,3 \pm 0,2$	$52,1 \pm 0,3$	$58,2 \pm 0,1$
Průměrná hodnota	45,5	48,9	50,8	51,3	49,1	53,4

V návaznosti na měření a získané výsledky byly učiněny i další závěry:

- materiály, které mají nejmenší odolnost proti opotřebením, se zároveň nejméně zahřívají;
- vliv obvodové rychlosti broušícího kotouče se více projevuje při broušení tvrdších materiálů;
- v laboratorních podmínkách nebyla dosažena tak vysoká teplota, která by byla příčinou změny mechanických vlastností zkoušených materiálů. Maximální teploty vzorků nepřesáhly  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Všechna měření probíhala za konstantních laboratorních podmínek. Jediný soubor proměnných, na kterých může být teplota závislá, je vázán na materiál zkušebního vzorku – na jeho tvrdost, chemické složení a strukturu materiálu vzorku. Tyto proměnné ve svém důsledku ovlivňují další vlastnosti a okolnosti – strukturu materiálu; mechanismus, kterým dochází k vlastnímu abrazivnímu opotřebením a odolnost vůči opotřebením. Vzhledem k tomu, že jsou všechny uváděné dílčí proměnné navzájem provázány, je třeba je posuzovat dvoufázově. Za tímto účelem byla provedena další série experimentů zaměřená na mikrostrukturu materiálu vzorků pro definování jejich vnitřní struktury. Získané výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.2.8.

Porovnáním získaných výsledků lze dospět k závěru, že se snižujícím se podílem tvrdých složek se stává tvárná matrice hlavní plochou, která je opotřebovaná (mikrorýhováním) a tvrdé složky se dostávají do role určitých „kluzných lišt“, které

jsou pomalu opracovávány mikrořezáním a moderují rychlost opotřebení. Pokud by ale tyto tvrdé složky nebyly přítomny vůbec, rychlost opotřebení by se rapidně zvýšila.

Tím je také doložen známý fakt, že tvrdé materiály nemusejí být z hlediska odolnosti proti opotřebení nejvýhodnější. Důvodem je, že při vysoké tvrdosti se mění mechanismus oddělování materiálu při abrazivním zatížení a to lze sledovat na vlivu struktury materiálu. Výsledky měření poukazují na skutečnost, že změna mechanismu úběru materiálu se projevuje také u materiálů s výrazně nižší tvrdostí. Tato změna má vliv na odolnost proti opotřebení a ve svém důsledku i na povrchovou teplotu opotřebovávaného vzorku.

Výše popisované materiály obsahují různý obsah poměrně tvrdých složek v matici. Naměřené mikrotvrdosti sice odpovídají rozpětí hodnot, které uvádí literatura [25], nicméně mají poměrně značný rozptyl plynoucí z poměru velikosti částic, které mají být měřeny a samotného měřicího aparátu. Obtíže při stanovení mikrotvrdosti jsou nicméně obvyklé a upozorňují na ně i ostatní autoři [22, 23, 24].

Z naměřených hodnot vyplývá, že čím méně tvrdých složek je obsaženo, tím lepší odolnost materiály vykazují. U zmiňovaných vzorků je složka Ni do 5 % což podporuje austenitizaci materiálu. Z naměřených údajů vyplývá, že největší tvrdost má martenzit. Zbytkový austenit má tvrdost nejmenší ze zmiňovaných měřených složek, ale u vzorku s označením 5A podpořil odolnost proti opotřebení. Za pomoci studie pomoci topografie opotřebované plochy lze odvodit, že materiály s větším množstvím tvrdých složek vykazují více stop po mikrořezání. Se snižujícím se množstvím tvrdých složek se začíná více uplatňovat mikrorýhování doprovázené vznikem valů. U materiálu 5A je pak mikrorýhování dominantním mechanismem opotřebení.

Tvrzení, že „čím měkčí materiál, tím větší je odolnost proti opotřebení“ má ale omezenou platnost. Referenční materiál S235JR tvrdé složky neobsahuje a odolnost proti opotřebení má výrazně nižší.

Z výše uvedených důvodů lze jako materiál vhodný pro prostředí se zvýšeným rizikem abraze doporučit slitinu 5A jejíž chemické složení je popsáno v tabulce 5.25.

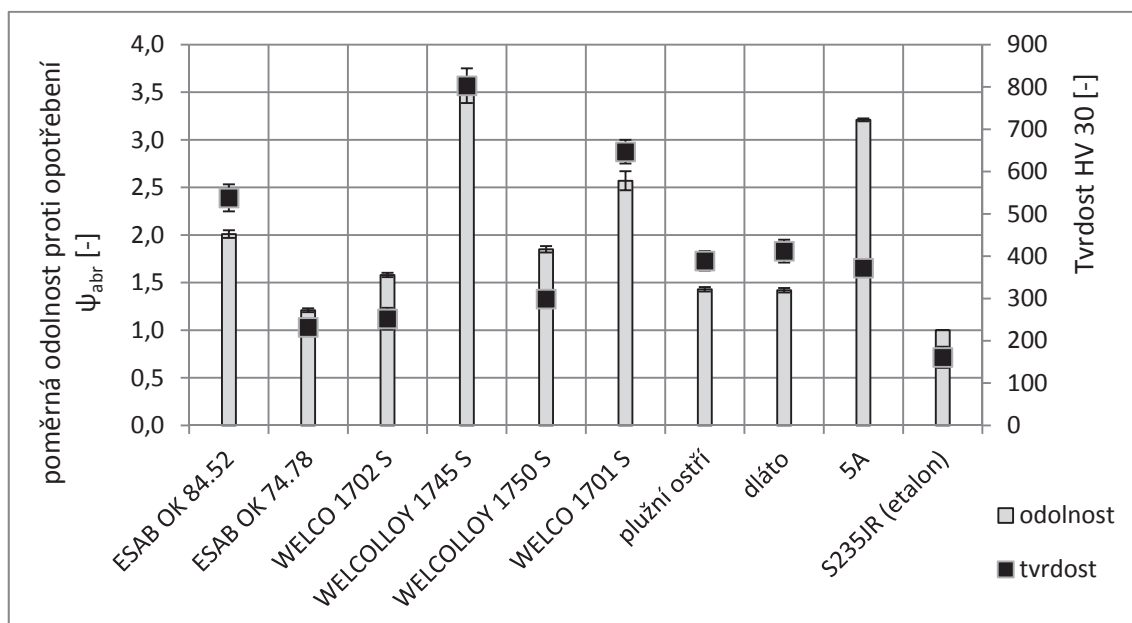
Tabulka 5.25: Doporučené chemické složení slitiny železa.

Chemické složení [hmotn. %]								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1,75 – 2,00	1,40	0,73	2,18	3,75	0,13	0,01	0,01	---

Z metalografického hlediska je výhodné dosáhnout podeutektické struktury litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit. Doporučené chemické složení vychází ze souboru naměřených výsledků ze sad zkušebních vzorků litin.

#### 5.6.4 Výsledky získané při zkoumání chování návarových materiálů v laboratorních podmínkách

Návarové materiály spolu s materiály ostří a dlát byly podrobeny stejným testům jako výše popisované sady litin. Z naměřených údajů vyplývá, že nejvyšších hodnot dosahuje návarový materiál WELCOLOY 1745 S, a to jak tvrdosti  $803 \pm 41$  HV, tak poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení  $4,23 \pm 0,011$  (pro střední velikost částic  $44,5 \mu\text{m}$  (P240)). Bližší představu o celkové situaci poskytne grafická interpretace dat na obrázku 5.40.



Obrázek 6.40: Graf zobrazující dosažené hodnoty tvrdosti a průměrné hodnoty poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jednotlivých materiálů.

V grafu na obrázku 5.40 jsou zobrazeny poměrné odolnosti proti opotřebení určené pro šest druhů návarových materiálů. Graf je založen na hodnotách tabulky 5.19, která shrnuje tvrdost HV 30 a odolnost proti opotřebení zkušebních materiálů ve formě návarů (pro šest druhů návarových materiálů, které byly podrobeny zkouškám).

Návarové materiály byly porovnány v laboratorních podmínkách s materiály plužních ostří a dlát. Do experimentálního měření byl zařazen i zkušební vzorek s označením 5A, který byl vybrán ze sad zkušebních vzorků litin. Zkušební vzorek

s označením 5A vykazoval nejlepší výsledky poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ze všech zkoušených litin. Všechny naměřené výsledky byly porovnány s ocelí S235JR (etalon). Z naměřených výsledků vyplývá, že nejvyšší poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení byla naměřena na zkušební vzorku z návaru s označením WELCOLLOY 1745 S na všech zkušebních plátnech. Návarový materiál s označením WELCOLLOY 1745 S vykazoval nejvyšší tvrdost HV 30 a to  $803 \pm 41$ . Nejnižší poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení ze souboru zkušebních vzorků návarů byla naměřena na vzorku s označením ESAB OK 74.78 na všech zkušebních plátnech. Návarový materiál s označením ESAB OK 74.78 vykazoval i nejnižší tvrdost HV 30 a to  $232 \pm 20$ . Zkušební vzorek vyrobený z materiálu dláta vykazoval třetí nejvyšší hodnotu tvrdosti a to  $412 \pm 27$  ze souboru vzorků.

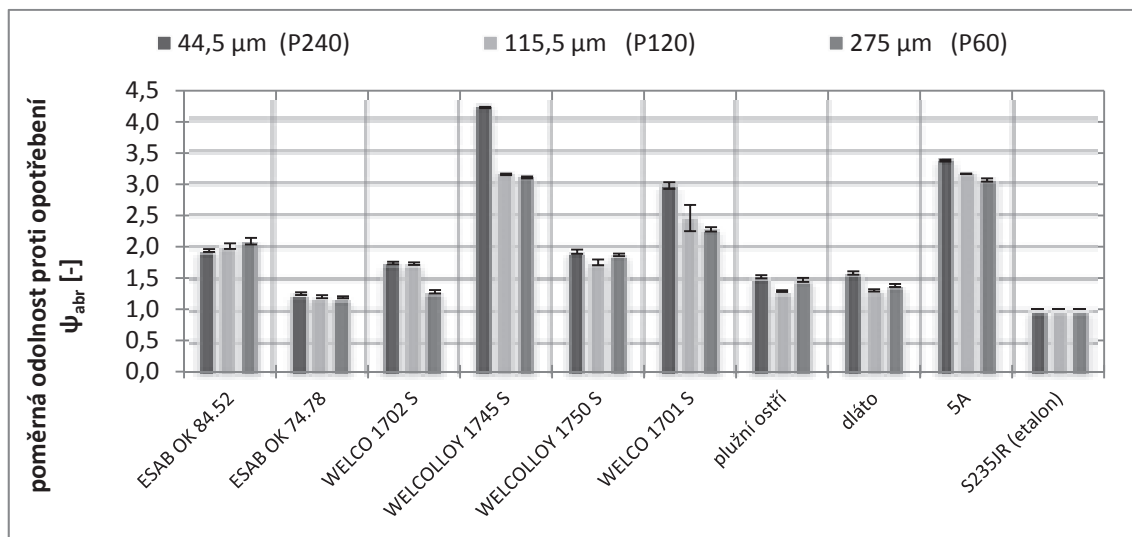
Zkušební vzorek vyrobený z materiálu dláta vykazoval pro brusné plátno s označením P240 (střední velikost částic  $44,5 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr} 1,58 \pm 0,027$ , na brusné plátno s označením P120 ( $115,5 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr} 1,30 \pm 0,020$  a na brusné plátno s označením P60 ( $275 \mu\text{m}$ ) poměrnou odolnost proti opotřebení  $\psi_{abr} 1,38 \pm 0,024$ . Zkušební vzorek s označením 5A, který zastupuje v disertační práci nově vzniklý typ materiálu, vykazuje druhou nejvyšší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Na vzorku s označením 5A byla poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení pro brusné plátno s označením P120 ( $115,5 \mu\text{m}$ )  $\psi_{abr} 3,17 \pm 0,0019$  a dosáhla tedy vyšší hodnoty v porovnání s návarem s označením WELCOLLOY 1745 S.

Z naměřených údajů tedy vyplývá, že nově vzniklá slitiny s označením 5A může tedy svými výsledky konkurovat nejlepším návarovým materiálům ze souboru měření.

Pokud se graficky znázorní hodnoty naměřených tvrdostí a průměrných hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení, je možné vysledovat že:

- slitiny s vysokým obsahem chromu (nad 30 %) mají také vysokou tvrdost;
- slitiny s obsahem chromu pod 15 % se svojí tvrdostí blíží slitině 5A;
- slitina 5A má sice jeden z nejnižších obsahů chromu, přesto nabízí jednu z nejvyšších průměrných hodnot odolnosti proti opotřebení;
- v porovnání se základními materiály dlát a ostří má slitina 5A přibližně dvojnásobnou odolnost proti opotřebení při obdobné tvrdosti.

Vzájemné porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jednotlivých návarů uvádí následující obrázek 5.41.



Obrázek 5.41: Graf zobrazující porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení jednotlivých materiálů.

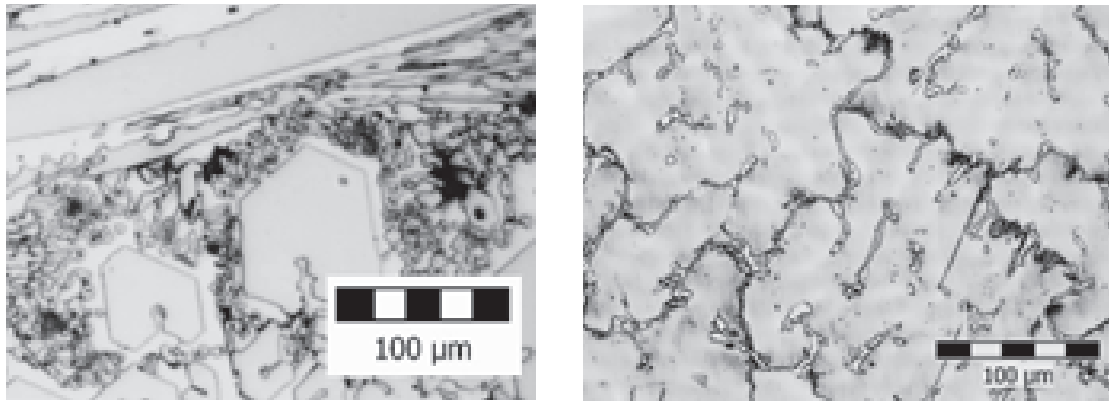
Z porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení pro jednotlivé zrnitosti plátna vyplývá, že slitina WELCOLLOY 1745 S má (v porovnání se slitinou 5A) vyšší odolnost pouze při použití abraziva o pro střední velikost částic 44,5 μm (P240). V ostatních případech byly pro obě jmenované slitiny naměřeny téměř shodné hodnoty odolnosti.

Tento závěr je o to zajímavější, že jsou srovnávány slitiny se zcela odlišným chemickým složením. Slitina WELCOLLOY 1745 S obsahuje vysoký obsah chromu (42,5 %) a uhlík (5,9 %), které jsou nezbytné pro vytvoření množství karbidů a martenzitu. Naproti tomu slitina 5A obsahuje těchto prvků výrazně méně (2,16 % Cr a 1,75 % C) a tudíž obsahuje martenzitu a karbidů výrazně méně. Porovnání skutečného chemického složení slitiny WELCOLLOY 1745 S a slitiny 5A uvádí tab. 5.26 a porovnání mikrostruktury obou materiálů uvádí obrázek 5.42.

Tabulka 6.26: Porovnání skutečného chemického složení slitiny WELCOLLOY 1745 S a slitiny 5A.

Chemické složení	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
WELCOLLOY 1745 S	5,9	0,15	1,8	0,15	0,05	0,05	42,5	0,04	0,13	0,15	0,11	49,0
5A	1,75	1,35	0,71	0,01	-	0,12	2,16	0,01	3,74	-	-	90,2





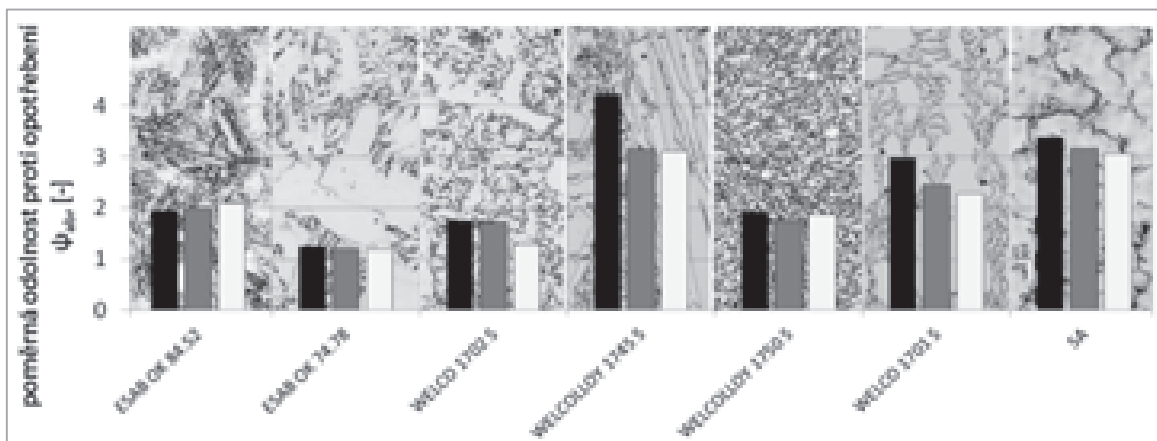
Obrázek 5.42: Porovnání mikrostruktury slitin WELCOLLOY 1745 S (vlevo) a slitiny 5A (vpravo).

Struktura WELCOLLOY 1745 S je charakteru nadeutektické bílé litiny obsahující karbidy chromu  $M_7C_3$ , matrice austeniticko-martenzitická. Struktura slitiny 5A je charakteru podeutektické struktury litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

Za povšimnutí také stojí skutečnost, že slitina WELCOLLOY 1745 S jako jediná vykazuje tak výrazně odlišnou hodnotu odolnosti při použití různě velkých abrazivních částic. Při tom možnost náhodného vlivu, který by vedl ke zkreslení dílčích výsledků, byla eliminována několikanásobným měřením. Odchylka hodnoty  $\psi_{abr} = 4,23 \pm 0,011$  je v celém souboru měření jedna z nejmenších.

Naměřené hodnoty popisují chování slitin s velmi různorodým chemickým složením a strukturou. Proto by jakákoliv další snaha odvození nových souvislostí vyplývajících z naměřených dat byla zavádějící.

Následující graf (obrázek 5.43) zobrazuje na svislé ose poměrnou odolnost proti opotřebení a na vodorovné ose zkoušený materiál. Na pozadí grafu je zobrazena mikrostruktura zkoušených návarových materiálů a vzorku 5A s ohledem na dosažené poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení.

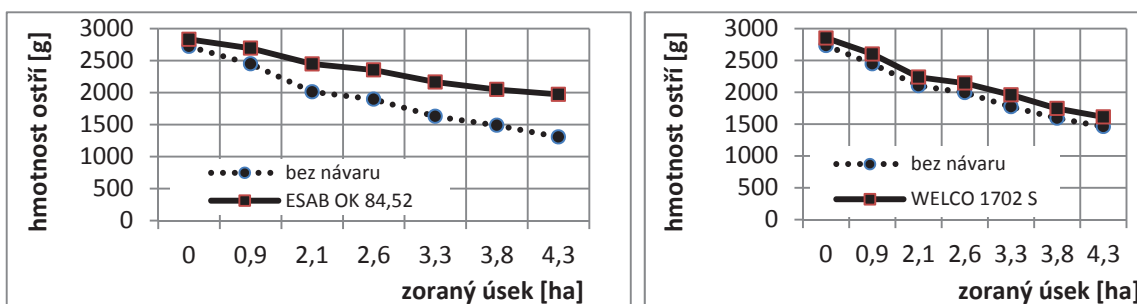


Obrázek 5.43: Graf zobrazující porovnání dosažených hodnot odolnosti na pozadí struktury zkoušených materiálů.

Z pohledu praktického využití výsledků bylo třeba určit chování slitin vystavených abrazivnímu opotřebení směsí různě velkých částic zejména pak na určení, zda odolnost slitiny WELCOLLOY 1745 S bude spíše vyšší (jak tomu je u jemnozrnného abraziva), nebo nižší (jaká je dosahována při hrubší zrnitosti abraziva). Toto bylo určeno v rámci provozních zkoušek.

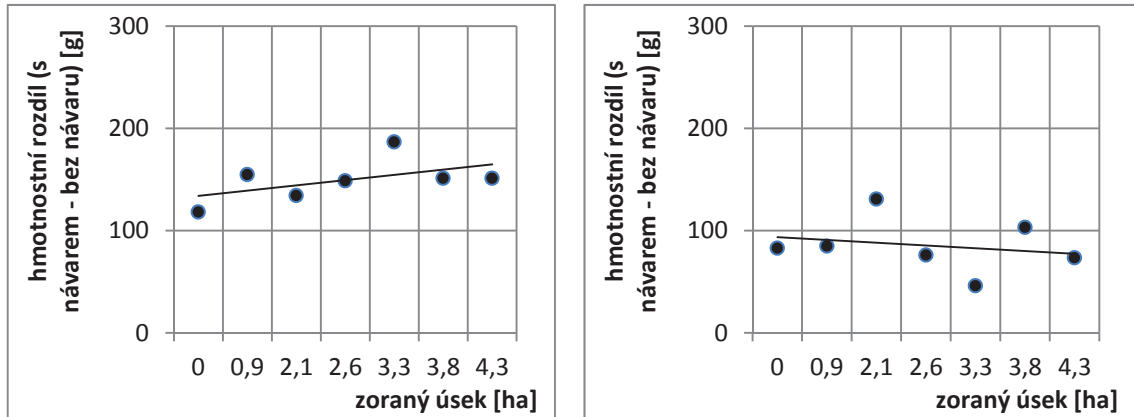
### 5.6.5 Výsledky získaných při zkoumání chování návarových materiálů v provozních podmínkách

Z hodnot naměřených v rámci provozních zkoušek (viz příloha F) byl pro každou slitinu vytvořen graf porovnávající hmotnostní úbytky na segmentu s návarem a bez návaru (porovnávány byly vždy segmenty protilehlých radlic). Příklad porovnání hmotnostních úbytků segmentů s návarem a bez návaru uvádí graf na obrázku 5.44. Postupné rozevírání vynesných linií svědčí o tom, že návary prodlužují životnost segmentu. Bohužel ne vždy ale bylo z takto vytvořených grafů zřejmé, zda se linie rozbíhají, nebo sbíhají.



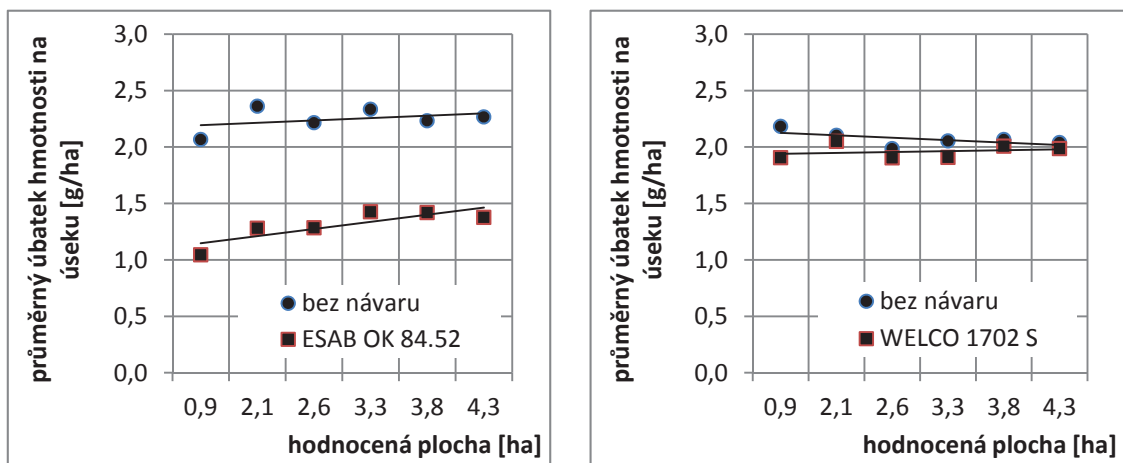
Obrázek 5.44: Graf zobrazující příklady porovnání hmotnostních úbytků segmentů s návarem a bez návaru.

Proto byl pro každý pár hodnot vypočítán „rozdíl v hmotnostních úbytcích“. Pokud se tento s postupem času zvětšoval (linie stoupá) lze tvrdit, že návar zvýšil odolnost segmentu. Obrázek 5.45 zobrazuje příklady vykreslení trendu v hmotnostních úbytcích.



Obrázek 5.45: Příklady vykreslení trendu v hmotnostních úbytcích.

Výše vykreslené trendy sice napovídají, do jaké míry návar prodlužuje životnost segmentu, ale míru ochrany kterou návar poskytuje lze kvantifikovat obtížně. Proto byly dále vypočítány hodnoty průměrných úbytků [g/ha]. Vzájemná vzdálenost vnesených přímek vyjadřuje do jaké míry je prodloužena životnost segmentu. Z podílu průměrů hodnot byl stanoven faktor ochrany  $f_d$ . Například hodnota faktoru + 0,32 představuje prodloužení životnosti o 32 %. Příklady průměrných úbytků materiálů na ploše 1 ha uvádí graf na obr. 5.46.



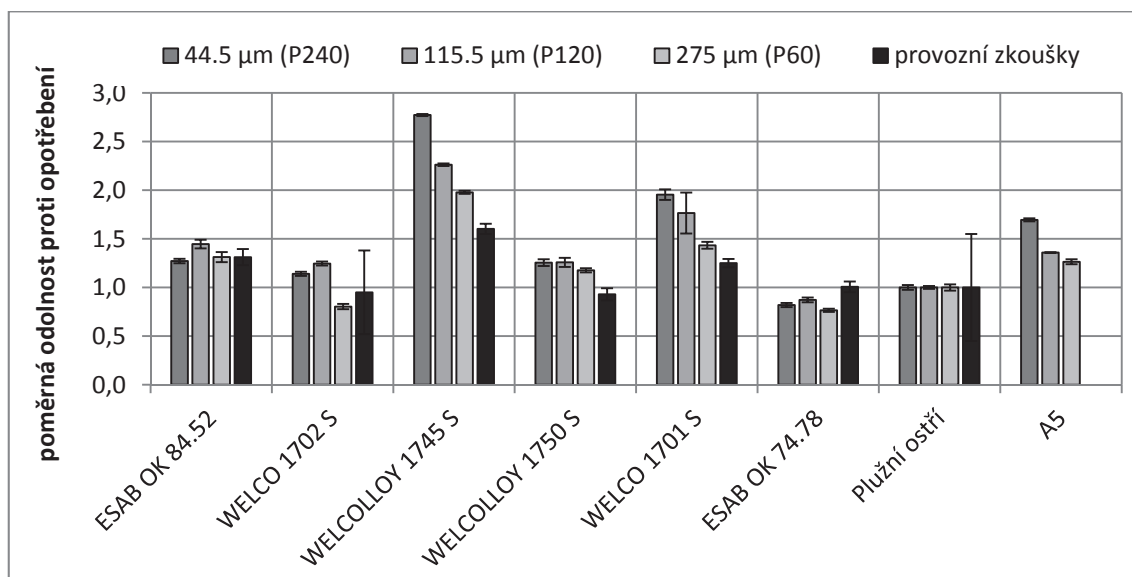
Obrázek 5.46: Graf průměrných úbytků materiálu na ploše 1ha a příslušný faktor ochrany – příklady.

Výše uvedené grafy (obrázky 5.44, 5.45 a 5.46) jsou pouze ilustrativní příklady. Kompletní zpracování dat uvádí příloha I (návary ostří) a příloha J (návary dlát).

Při porovnání obou souborů grafů (přílohy I a J) je možné pozorovat, že dláta podléhala opotřebení méně, než ostří (a to na obou stranách pluhu). To lze odůvodnit tím, že dláta byla již z výroby opatřena jednostranným návarem, který sám o sobě zvyšoval jejich životnost. Z toho důvodu také nelze hodnoty naměřené na dlátech a ostřích vzájemně kombinovat.

### Porovnání výsledků laboratorních a provozních experimentů

Srovnání hodnot poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení naměřených v laboratorních podmínkách s hodnotami naměřenými v provozních podmínkách je možné za předpokladu, že jsou všechny porovnávané hodnoty vztaženy ke stejné referenční hladině. Za tím účelem byly poměrné odolnosti jednotlivých návarů vztaženy k materiálu ostří (která byla podrobena oběma sériím experimentů). Vzájemné srovnání zachycuje následující graf na obrázku 5.47.



Obrázek 5.47: Graf zobrazující porovnání poměrných odolností proti opotřebení stanovených v laboratorních a provozních podmínkách.

Na grafu obr. 5.47 je zobrazeno porovnání poměrných odolností návarových materiálů, materiálu ostří a slitiny 5A proti opotřebení stanovených v laboratorních a provozních podmínkách. Z porovnání vyplývá, že vysoce tvrdé materiály (WELCOLLOY 1745 S (803 HV) nebo WELCO 1701 S (647 HV)) vykazují vyšší

odolnosti vůči jemnozrnným materiálům, zatímco v případě hrubozrnných materiálů (včetně pudy) se jejich odolnost výrazně snižuje. Ostatní „měkké“ materiály tuto tendenci nevykazují – jejich poměrná odolnost proti opotřebení se zdá být obdobná pro všechny tvrdosti.

Slitina 5A spadá do skupiny měkkých materiálů. Proto lze předpokládat, že v provozních podmínkách bude vykazovat přibližně stejnou odolnost proti opotřebení, jaké bylo dosaženo v laboratoři. Nejnižší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení se souboru zkušebních vzorků vykazoval návarovým materiál s označením ESAB OK 74.78.

### Porovnání odolnosti návarových materiálů dosažené v provozních měřeních

Z grafů uvedených v příloze I je možné vysledovat, jak se rychlost opotřebení v průběhu času mírně snižuje až do stabilní hodnoty. To je způsobeno postupným vyhlazováním povrchu – záběhem plochy. Jev je markantní v případě ostří navařeného materiálem WELCOLLOY 1750 S, u kterého směrnice hmotnostních rozdílů na zoraném úseku sice klesá, ale vypočítaný faktor ochrany má kladnou hodnotu. Vysvětlení lze nalézt ve třetím z relevantních grafů, kde na počátku skutečně průměrný úbytek ostří bez návaru je vyšší, než úbytek ostří s návarem. Po uplynutí určité doby se ale obě linie protnou a poměr se otočí.

V případě návarových materiálů WELCO 1702 S a WELCOLLOY 1750 S aplikovaných na ostří je zjevné, že opotřebení podléhají rychleji než základní materiál. To lze odůvodnit porovnáním tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Všechny zmiňované návarové materiály se svou odolností proti opotřebení blíží základnímu materiálu, ale mají nižší tvrdost. Experimentální výsledky vybraných návarových materiálů aplikovaných na ostří a jejich vzájemné porovnání uvádí tab. 5.27.

Tabulka 5.27: Tvrdost HV 30 a odolnost proti opotřebení.

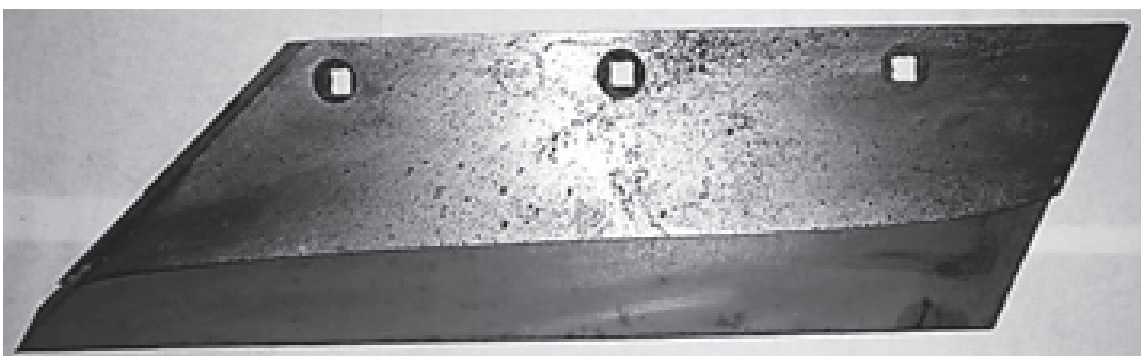
Zkoušený materiál	Tvrdost HV 30 [-]	Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení $\psi_{abr}$ [-]			
		Střední velikost částic 44,5 $\mu\text{m}$ (P240)	Střední velikost částic 115,5 $\mu\text{m}$ (P120)	Střední velikost částic 275 $\mu\text{m}$ (P60)	Průměrná hodnota $\psi_{abr}$ [-]
WELCO 1702 S	252 $\pm$ 26	1,74 $\pm$ 0,0081	1,73 $\pm$ 0,021	1,28 $\pm$ 0,027	1,58
WELCOLLOY 1750 S	299 $\pm$ 17	1,92 $\pm$ 0,034	1,75 $\pm$ 0,047	1,87 $\pm$ 0,21	1,85
Plužní ostří	389 $\pm$ 23	1,52 $\pm$ 0,0095	1,29 $\pm$ 0,015	1,47 $\pm$ 0,032	1,43

Pro doplnění je třeba uvést, že záporná hodnota koeficientu ochrany je ovlivněna vyšší počáteční hmotností segmentu. Samotný materiál ostří je opotřebováván stejně rychle, jako v případě, kdy návar nebyl aplikován. Ve zbylých případech návar prodlužuje životnost ostří a to:

- WELCOLLOY 1745 S ..... o 61 %;
- ESAB OK 84.52 ..... o 32 %;
- WELCO 1701 S ..... o 25 %;
- ESAB OK 74.84 ..... o 6 %.

Jako první je uveden pravděpodobně ten nejlepší, v současné době komerčně dostupný návarový materiál. Pokud by tento byl aplikován na ostří, prodloužila by se její životnost o 61 %.

Taková aplikace je podmíněna dodržením určitých okrajových podmínek – například ostří nesmí být nadměrně opotřebovaná (zbylý materiál musí poskytovat návaru dostatečnou oporu). Z provozních experimentů při tom vyplynulo, že po šesti dnech orby byla zbytková hmotnost ostří přibližně 60 % původní hmotnosti (opotřebení cca. 40 hmot. %). Odtud lze usuzovat, že maximální opotřebení ostří je cca. 80 hmotn. % (při vyšší hodnotě by již docházelo k degradaci nosné soustavy). Maximální životnost ostří lze odhadnout na 100 ha. Obrázek 5.48 uvádí porovnání opotřebované ostří vůči novému (obě ostří leží na sobě v zákrytu a tím dávají vyniknout linii, která vyjadřuje míru opotřebení).



Obrázek 5.48: Opotřebované ostří (po šesti dnech orby) přiložená na nové ostří.

V tomto stádiu opotřebování (40 %) je plocha vhodná pro aplikaci nového návaru poměrně omezená a navíc dodržení technologických podmínek navařování bude velmi obtížné – ostří je opotřebováním značně zúženo což povede k výraznému přestupu tepla do základního materiálu a tím k obtížné kontrole podmínek ochlazování.

Možnosti navařování takto opotřebovaných ostří byly konzultovány s odborníky v oboru. Z konzultací vyplynulo, že pokud by mělo být ostří renovována více než jedenkrát, nesmí její opotřebení přesáhnout cca hodnotu 15 %. To znamená, že by musela být navařována nejméně po každých dvou (až třech) dnech provozu a ideálně také před prvním použitím. To do hodnocení vnáší otázku, zda jsou takové renovace výhodné z ekonomického hlediska. Aplikací návarových materiálů na spodní stranu segmentu nevznikla vyšší spotřeba pohonných hmot. Pohonné hmoty se v průběhu provozních zkoušek zaznamenávaly a byly v rozmezí 25 – 32 l/ha. Spotřeba pohonných hmot nedosahovala vyšších hodnot než při orbě s komponenty bez návarových materiálů.

## 6 DISKUSE

V rešeršní a experimentální části byly určeny vytyčené body popsané v cílech disertační práce. Studium faktorů ovlivňujících odolnost proti opotřebení kovových materiálů je popsáno v kapitole 2 a vychází z několika předpokladů vlastností materiálů.

Experimentální část disertační práce se zabývá studiem faktorů ovlivňujících odolnost proti opotřebení kovových materiálů zejména s ohledem na litiny, návarové materiály a provozní zkoušky. Experimenty jsou zaměřeny na studium vlivu chemického složení na abrazivní opotřebení, hustotu a tvrdost materiálů.

Problematicke abrazivního opotřebení kovových materiálů je věnována řada publikací [95, 99, 100, 131, 132, 133, 134, 138]. V diskusi jsou proto porovnány výsledky experimentů pro kovové materiály, návary a provozní zkoušky. Stanovení poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení bylo provedeno na přístrojích, které se nachází na Katedře materiálu a strojírenské technologie na Technické fakultě České zemědělské univerzity v Praze. Experimentální měření abrazivního opotřebení bylo provedeno na brusném plátně dle ČSN 01 5084. Autoři [1, 2, 98, 99, 100, 126, 130, 133] prováděli také experimentální měření vlivu velikosti abrazivních částic na odolnost proti abrazivnímu opotřebení, z tohoto důvodu byl také zjišťován vliv velikosti abrazivních částic na sadách vzorků litin. Autoři [120, 125, 126] prováděli experimentální měření odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na brusném papíře SiC a autoři [120, 127, 129] prováděli studium odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na pryžovém kotouči. Jednotlivé porovnání výsledků mezi různými technikami je z tohoto důvodu velmi problematické a je vždy nutno porovnávat jednotlivé výsledky měření na stejných zařízeních a podmínkách. V příloze disertační práce s označením E a H jsou uvedeny mikrostruktury všech zkoušených materiálů, které odpovídaly zjištěným chemickým složením. Zjištěné mikrostruktury materiálů byly v souladu s porovnáním autorů [121, 123]. Z důvodu toho, že mnozí autoři používají k porovnání poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení různé druhy etalonu, je jejich porovnání velmi složité.

Experimentální výsledky poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byly porovnány s etalonem z materiálu S235JR, který dosahoval tvrdosti HV 30 v rozsahu  $161 \pm 25$ . Chemické složení etalonu S235JR je uvedeno v tabulce 4.9. Autoři [114, 140] místo poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení uvádějí hmotností, nebo objemové úbytky. Pro určení objemových úbytků je vždy zapotřebí znát přesné hodnoty



hustoty vzorků. V našem případě u návarových materiálů není možné, z důvodů prvotního promísení se základním materiálem by mohlo dojít k ovlivnění výsledků.

Tabulky 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 5.17 uvádí výsledky experimentálního posouzení sady vzorků litin se změnou chemického složení. Ze zjištěných výsledků poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení vyplývá, že změna není pouze funkcí tvrdosti, ale i funkcí mikrostruktury. Popis určených struktur vzorků litin je uveden v příloze H. Z mikrostruktury materiálů vyplývá, že nižší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení mají vzorky se strukturou podeutektickou obsahující karbidické eutektikum a martenzit. Vyšších hodnot poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení obsahují vzorky, které mají ve struktuře zbytkový austenit. Tyto poznatky jsou v souladu se zjištěním i dalších autorů [122, 128].

V podmínkách abrazivního opotřebení s rázovým zatížením může docházet k intenzivnímu křehkému porušení ořezových litin. Podle Cypina [66], následkem překročení kritické hodnoty zatížení vzniká porucha i v karbidech, která má za následek intenzivní vylamování a současně porušování kovové matrice. Důležitou roli mají přitom rozměry karbidů a jejich orientace vzhledem k opotřebovávanému povrchu.

Šebatinov a Boldyrev [57] zkoušeli vlastnosti bílých ořezových litin podobným vlastností, které jsou řešeny v disertační práci. Chemické složení a následné ochlazování byly zvoleny tak, aby výsledná matrice byla martenzitická s malým obsahem zbytkového austenitu. Výsledky zkoušek kombinovaného působení abrazivního opotřebení jsou, že litina s 2,5 % C, 2 % Mn, 12,3 % Cr, 3 % V, 0,2 % Ti, 1,2 % Cu a 0,5 % Ni má vysokou odolnost proti abrazivnímu opotřebení a tvrdost. Nejvyšší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení ze souboru zkušebních vzorků uvedených v disertační práci měla litina s 1,75 % C, 0,71 % Mn, 2,16 % Cr, 0,12 % Cu a 3,74 % Ni. Litina s označením 5A v porovnání s materiály zkoušenými Šebatinovem a Boldyrevem [57], měla o 20 % nižší poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, ale výrobní cena je nižší díky nižším hmotnostním procentům vanadu, chromu a mědi. Výsledné chemické složení je vždy nutné volit podle konkrétních požadovaných mechanických vlastností s ohledem na požadovanou aplikaci.

Vliv chemického složení na odolnost proti opotřebení je uvedeno v tabulkách 5.12 až 5.17. V uvedených grafech lze vysledovat, že pro Ni (obr. 5.26), Cu (obr. 5.27), Mn (obr. 5.28) a Cr (obr. 5.29) odolnost oproti opotřebení narůstá v závislosti na tvrdosti pouze do určité meze. Pokud tvrdost vzroste nad tuto hodnotu, odolnost

materiálu začne klesat. Tento jev lze vysvětlit tím, že s dalším nárůstem tvrdosti se změní mechanismus úběru materiálu při abrazivním porušení (materiál se například začne oddělovat křehkým porušením). Což odpovídá závěrům uvedeným v [20, 65]. Podle Cypina [66], by měly litiny, které budou odolávat silnému abrazivnímu účinku obsahovat velký podíl tvrdých karbidů, které by měly být rovnoměrně uspořádány. Karbidy typu  $M_7C_3$  by měly mít hlavní osu orientovanou kolmo k opotřebovávanému povrchu a co nejmenší rozměr.

Nejvyšší odolnost proti abrazivnímu opotřebení u návarových materiálů byla naměřena na materiálu s označením WELCOLLOY 1745 S, který je podrobně popsán v příloze C. Návarový materiál WELCOLLOY 1745 S obsahuje strukturu charakteru nadeutektické bílé litiny obsahující karbidy chromu  $M_7C_3$ , matrice austeniticko-martenzitická. Z experimentálních výsledků návarových materiálů vyplývá, že pokud se nacházejí v mikrostruktuře karbidy  $M_7C_3$ , výrazně se zvýší poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení, oproti mikrostruktuře bez těchto karbidů. Naměřené výsledky odpovídají zjištěním autorů [125, 133].

Měření rozložení teplotního pole probíhalo současně s měřením hodnot poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na vzorcích litin. Měření bylo provedeno bezkontaktně s pomocí termokamery Fluke Ti20. Cílem tohoto dílčího experimentu bylo určit vliv velikosti abraziva na výslednou teplotu zkušební vzorku při abrazivním opotřebení. Maximální naměřené hodnoty teploty při abrazivním opotřebení jsou uvedeny v tabulce 5.18. Naměřené výsledky jsou v souladu s autory [5], kteří prováděli studium vlivu teploty během procesu abrazivního opotřebení na kovových a nekovových materiálech na přístroji s brusným plátnem  $Al_2O_3$ .

Vybrané návarové materiály byly zkoušeny na odolnost proti opotřebení v provozních podmínkách. Provozní měření bylo provedeno na šestiradličném dvouramenném otočném pluhu Lemken Vari Diamant 160, viz obrázek 4.16. Ostří a dláta těles na pravé straně pluhu byla opatřena návary. Každé těleso bylo navařeno jiným návarovým materiálem. Popis návarových materiálů uvádí přílohy B a C, jejich mikrostruktury pak příloha E. Aplikace návarů byla vytvořena na spodní straně ostří. Pokud je návar umístěn na horní straně, je opotřebováván plošně svrchu. Při jeho umístění na spodní straně segmentu je opotřebováván spíše z boku. Přitom nejrychleji dochází k opotřebovávání relativně měkkého materiálu nad návarem a prvních návarových vrstev, kde došlo k promísení návarového a základního materiálu. Tím se vytváří ostrá hrana (tvořená poslední návarovou vrstvou), která podporuje řezání

zeminy. Nejvyšší odolnost byla naměřena u návarového materiálu s označením WELCOLLOY 1745 S a to o 61 % v porovnání s původním materiálem. Autoři [27, 28, 31, 131, 138] aplikovali různé druhy návarových materiálů na horní stranu ostří a dospěli také ke zvýšení životnosti soustavy. Zvýšení životnosti plužních ostří a dlát je v souladu s autory [27, 28, 31]. V práci jsou hodnoceny ekonomické aspekty renovace navařováním, které je v souladu s autory [39], kteří se zabývali technicko – ekonomickým hodnocením aplikace návarů u plužních čepelí. Autoři [27, 28] aplikovali návar ve formě úzkých housenek, ale celá plocha ostří nebyla pokryta návarem. Tato aplikace také vedla ke snížení opotřebení, ale je vhodná do jílovitých půd, kde je oblast mezi housenkami zaplněna hlínou a tím nedochází ke styku půdy s ostřím, který je vyroben ze základního materiálu.

Na základně získaných experimentálních měření byla oslovena slévárna ČKD Kutná Hora, která se v rámci České republiky specializuje na výrobu podobných odlitků s žádostí o cenovou nabídku na výrobu ostří. Dle předložené rozměrové specifikace a požadovaného chemického složení, které odpovídá slitině 5A vystavilo obchodní oddělení nabídku na dodávku 5 000 kusů ostří s jednotkovou cenou 195 Kč za kus, která je zobrazena v příloze O. Pokud by v případě realizace vyvstala otázka proveditelnosti (například kvůli nepředpokládané tvrdosti materiálu vlivem obsahu karbidů nebo kvůli nevhodnému konstrukčnímu návrhu dílu), bylo by toto nutné zohlednit při další objednávce.

## 7 Závěr a doporučení pro další rozvoj v oboru

V disertační práci je předložena studie faktorů ovlivňujících abrazivní opotřebení kovových materiálů. Teoretická část práce poukázala na skutečnost, že abrazivní opotřebení je velice komplikovaný problém, který si vzhledem ke svým ekonomickým důsledkům žádá velkou pozornost.

Ačkoliv se abrazivním opotřebením dlouhodobě zabývá celá řada autorů, komplexní popis všech aspektů a širších souvislostí na abrazivní opotřebení zatím není k dispozici. Proto přesná predikce vzniku tohoto druhu poškození, natož jeho redukce není možná, a je třeba stále čelit jeho důsledkům. Klíčová je volba materiálu za účelem snížení abrazivního opotřebení. Materiál by měl splňovat následující podmínky:

- potřebné vlastnosti, aby v provozních podmínkách odolal co možná nejdelší dobu;
- snadná výroba (za příznivých ekonomických podmínek);
- snadná renovace – možnost plošné i lokální opravy.

V návaznosti na znalosti byly definovány a následně vyrobeny unikátní sady slitin s přesně odstupňovanými změnami vybraných chemických prvků.

Tyto sady byly podrobeny sérii laboratorních zkoušek – měření tvrdosti a odolnosti proti abrazivnímu opotřebení na přístroji s vázanými částicemi, měření rozložení teplotního pole při abrazi.

Jednotlivé cíle práce byly naplněny následovně:

**Laboratorní zkoušky kovových materiálů různého chemického složení, podrobených abrazivnímu opotřebení.**

Naměřená data byla analyzována za účelem pochopení vlivu jednotlivých chemických prvků na odolnost materiálu. Údaje byly klíčem ke stanovení optimálního chemického složení. Z analýzy vyplývá, že chemické složení jako takové není jediným faktorem, který má vliv na odolnost proti abrazivnímu opotřebení. V úvahu je třeba vzít také mikrostrukturu materiálu a jeho tvrdost. Stěžejním výsledkem práce je navržené následující chemické složení slitiny, které je uvedeno v tab. 7.28.

Tabulka 7.28: Doporučené chemické složení slitiny železa.

Chemické složení [hmotn. %]								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1,75 – 2,00	1,40	0,73	2,18	3,75	0,13	0,01	0,01	---

Nově vzniklá (navržená) slitina má tvrdost  $372 \pm 20$  HV a podeutektickou struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit. Svou odolností proti abrazivnímu opotřebení předčí většinu doporučovaných návarových materiálů uvedených v disertační práci.

### **Stanovení vlivu velikosti abrazivní částice na změnu velikosti abrazivního opotřebení**

Vliv velikosti abrazivní částice na změnu míry abrazivního opotřebení byl posuzován na čtyřech různých materiálech – v laboratorních podmínkách byla posuzována tři různé zrnitosti abraziva s rozdílnou střední velikostí abrazivní částice (44,5  $\mu\text{m}$ , 115,5  $\mu\text{m}$  a 275  $\mu\text{m}$ ) v provozních (na ploše 52 ha) podmínkách pak byl posuzován vliv reálné půdy v provozních podmínkách. Z přiložených analýz vyplývá, že se jednalo o jemně písčitou půdu, která mimo jiné obsahovala cca. 40 % prachových zrn o velikosti 10 – 50  $\mu\text{m}$  a dalších cca. 30 % zrn křemičitého písku o velikosti 100 – 2 000  $\mu\text{m}$ .

Aby bylo možné oba typy měření vzájemně porovnat, byly odolnosti jednotlivých materiálů vztaženy k referenčnímu vzorku – porovnávána byla tedy poměrná odolnost. Tato část práce přinesla následující závěry:

- Tvrdé materiály (tvrdost HV 30 > 500) mají nejvyšší odolnost vůči jemnozrnnému abrazivu (44,5  $\mu\text{m}$ ). Odolnost vůči hrubozrnnému abrazivu (275  $\mu\text{m}$ ) je nižší (a to až o 25 %). Zemina se v tomto ohledu chová jako materiál s velkými zrny a odolnost tvrdých materiálů je oproti jemnozrnným materiálům snížena až o 40 %.
- Měkké materiály (tvrdost HV30 < 500) tento trend nevykazují – jejich odolnost vůči jemnozrnnému abrazivu je sice nižší, než jaké dosahují tvrdé materiály, ale na druhé straně je jejich odolnost vůči opotřebení na velikosti zrn abraziva závislá minimálně.

## **Stanovení vlivu velikosti abraziva na změnu výsledné teploty litin při abrazivním opotřebením**

Výše uváděné laboratorní experimenty byly doplněny o studium rozložení teplotního pole u abrazí opotřebovávaných materiálů. Studium přineslo následující výsledky:

- Teplota (v blízkosti stykových ploch) je úměrná odolnosti materiálu vůči opotřebením.
- Vliv obvodové rychlosti broušícího kola s abrazivem se více projevuje při broušení tvrdších materiálů.
- V laboratorních podmínkách nebyla dosažena tak vysoká teplota, která by umožnila změnu mechanických vlastností zkoušených materiálů. Maximální teploty vzorků nepřesáhly 100 °C.

## **Stanovení vlastností litin a návarů pomocí laboratorních zkoušek**

V rámci těchto zkoušek byly porovnávány tři skupiny materiálů. Materiál originálních dlát a ostří, materiál s nově navrhovaným chemickým složením a skupina vybraných návarových materiálů doporučených pro renovace opotřebovaných pluzních dílů. Získané výsledky dále sloužily k porovnání se sadou výsledků získaných v rámci provozních zkoušek.

## **Určení vlastností ostří a dlát v provozních podmínkách**

V rámci těchto zkoušek byly porovnávány dvě skupiny materiálů. Materiál originálních dlát a ostří a skupina vybraných návarových materiálů doporučených pro renovace opotřebovaných pluzních dílů. Výsledky sloužily k porovnání se sadou výsledků získaných v rámci laboratorních zkoušek. Mimo to ale tato část experimentální práce přinesla další užitečný závěr.

V rámci přípravy návarů na pluzní ostří (které představovaly cca. 20 hodin čistého technologického času navařování) byl shromážděn dostatek dat o technologických časech, spotřebě materiálu atd., které jednoznačně poukazují na fakt, že renovace pluzních ostří navařováním není z ekonomického hlediska přínosná. Toto tvrzení je v práci podpořeno ekonomickým rozbohem s jednoznačným výsledkem.

## **Stanovení vlastností chování návarových materiálů v laboratorních podmínkách vůči provozním podmínkám.**

Z porovnání výsledků získaných v rámci obou sad zkoušek vyplývá závěr, že chování v reálných podmínkách odpovídá spíše laboratorním zkouškám, při kterých jsou použity částice hrubozrnného abraziva. Navíc bylo prokázáno že, odolnost materiálu proti abrazi musí být posuzována v souvislosti s jeho tvrdostí. Přitom neznamená, že vysoká tvrdost znamená automaticky vysokou odolnosti proti opotřebení. Ta je totiž závislá také mikrostruktura materiálu. Z hlediska odolnosti proti opotřebení se jeví jako výhodná přítomnost karbidů spíše než fází vzniklých při kalení.

### **Celkový závěr**

Experimentální část práce prokázala, že přestože několik návarových materiálů může skutečně přispět k prodloužení životnosti plužních ostří (a to až o 60 %) tak jejich využití není z ekonomického hlediska přínosem.

V práci je dále definován nově vzniklý materiál, který nabízí životnost vyšší o 1,44 násobku více než původní materiál dodávaný od výrobce (zvýšení životnosti o 44 % v porovnání se základním materiálem originální ostří). Ostří z něj vyrobená je cenově levnější než originální ostří. Cenovou nabídku uvádí příloha O.

To lze považovat za přínos pro technickou praxi. Jednotlivé dílčí výsledky práce byly pravidelně publikovány v odborných publikacích SCOPUS a i na mezinárodních konferencích.

## **7.1 Přínosy disertační práce pro další rozvoj v oboru**

Disertační práce s názvem „Studium faktorů ovlivňujících odolnost proti opotřebení kovových materiálů“ se především zabývá vlivem chemického složení na změnu mechanických vlastností litin s ohledem na abrazivní opotřebení. Práce navazuje na problematiku abrazivního opotřebení, kterou se dlouhodobě zabývá Katedra materiálu a strojírenské technologie. Problematika abrazivního opotřebení je rozšířena o nové poznatky z oblasti bílých litin a provozních zkoušek.

V rámci provedených experimentálních měření byly porovnány mechanické vlastnosti kovových materiálů (především litin), návarových materiálů a základních materiálů dlát a ostří orebních těles. Návarové materiály byly navařovány dle schválených svařovacích postupů na plužní ostří a dláta orebních těles, které díky

vhodně zvoleným podmínkám nevykazovaly povrchové trhliny (na rozdíl od původních návarů obsahujících trhliny, díky nevhodným parametrům svařování).

Z provedených experimentálních měření vyplynulo, že litiny s nově navrženým chemickým složením dobře odolávají abrazivnímu opotřebením.

### **Přínos pro oblast vědy a výzkumu**

Přínosem této disertační práce pro oblast vědy a výzkumu je definice takového chemického složení litin, které vede k vytvoření podeutektické struktury litiny obsahující karbidické eutektikum a martenzit. V rámci disertační práce bylo ověřeno, že právě toto chemické složení zajišťuje strukturu materiálu (a díky ní mechanické vlastnosti) které zajišťují vysokou odolnost materiálu proti abrazivnímu opotřebením. Dále bylo ověřeno, že tyto nejen že mohou konkurovat, ale že v některých aspektech dokonce předčí návarové materiály, které právě v případě vysokých nároků na odolnost proti opotřebením používá současná technická praxe.

Výsledky disertační práce jsou dobře podpořeny poměrně velkým a uceleným souborem experimentálních měření. Nicméně provedená měření sledovala pouze cíle této disertační práce. Definované litiny představují progresivní materiály, které nepochybně mohou nabídnout užitečné vlastnosti i v jiných směrech. A zde se nabízí možnost pro další výzkumnou práci, které může vyjít z uvedených dat a rozpracovat je v novém směru (například rozšířením problematiky abrazivního opotřebením o nové poznatky z oblasti materiálového inženýrství v rámci studia mechanických vlastností jednotlivých strukturních složek pomocí měření na elektronovém mikroskopu).

### **Přínos pro praxi**

Tato disertační práce vznikla ve spolupráci s FS ČVUT v Praze, ČKD Kutná Hora, a.s. a dalšími významnými průmyslovými společnostmi. Zjištěné závěry v oblasti abrazivního opotřebením kovových materiálů budou využity v praxi a při výrobě zkušebních výrobků. Závěry experimentů a materiálové vlastnosti nově vzniklých materiálů budou využívány jako podklady pro následující vývoj v oblasti materiálového inženýrství v zemědělské technice. Získané výsledky disertační práce jsou podpořeny rozsáhlým souborem naměřených hodnot, které budou přínosem pro výše jmenované firmy z technických oborů.



## 8 Literatura

- [1] CIESLAR, J. BROŽEK, M, 2012. Experimental assessment of the resistance to abrasive wear of selected metal materials, Experimentální posouzení vlastností litin se zvýšenou odolností proti abrazivnímu opotřebení, Strojírenská technologie. roč. 17, no. 5 - 6. pp. 290-296. ISSN: 1211-4162.
- [2] CIESLAR, J. BROŽEK, M. BEDNÁŘ, B, 2013. An Experimental Assessment of Special Metal Castings in Reducing Abrasive Wear. Manufacturing Technology, roč. 13, č. 4, s. 423-428. ISSN: 1213-2489.
- [3] ČSN EN ISO 5579, 2014. Nedestruktivní zkoušení - Radiografické zkoušení kovových materiálů s použitím filmu a rentgenového nebo gama záření. Základní pravidla. Praha: Český normalizační institut. 16 s.
- [4] VALÁŠEK, P. CIESLAR, J, 2013. Dvoutělesová abraze polymerního kompozitu na bázi třísek železných kovů. Strojírenská technologie, roč. 18, č. 4, s. 285-290. ISSN: 1211-4162.
- [5] VALÁŠEK, P. KEJVAL, J. MÜLLER M, CIESLAR, J, 2015. Influence of two-body abrasion and heat intensity on metal and non-metal materials used in agriculture. Research in Agricultural Engineering (Zemědělská technika), roč. 61, č. 1, s. 40-46. ISSN: 1212-9151.
- [6] CIESLAR, J, 2012. Vliv velikosti abraziva na výslednou teplotu při opotřebení, XIV, International conference of young scientists, Zvolen, s. 29-34, ISBN 978-80-552-0628-8.
- [7] CIESLAR, J. BROŽEK, M, 2015. APPLICATION OF OVERLAY MATERIALS FOR REDUCING ABRASIVE WEAR. In 14th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development 2015 20.05.2015, Jelgava, Latvia. Jelgava, Latvia: Latvia University of Agriculture, pp. 835-840
- [8] MÜLLER, M. VALÁŠEK, P. CIESLAR, J, 2012. Pryžový kompozit na bázi druhotných surovin. Strojírenská technologie, roč. 17, č. 4, s. 246-250. ISSN: 1211-4162.
- [9] ASM HANDBOOK, VOL, 18. 1992. Friction, lubrication, and wear, Materials Park, Oh. American Society for Metals, s. 1879 ISBN 0-87170-377
- [10] ASTM STANDARDS, 1997. Friction and wear testing, Materials Park, Oh.: American Society for Testing and Materials, 185 p. ISBN 0-87170-617-2

- [11] ČSN 01 5084, 1973. Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně. Praha: Český normalizační institut, Praha, 4 s.
- [12] BROŽEK, M, 2007. Technicko – ekonomické hodnocení aplikace návarů u plužních čepelí. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., LV, No. 4, pp. 129 – 136. ISSN: 1211-8516.
- [13] BROŽEK, M, 2005. Abrasive Wear Resistance of Selected Hardfacing Materials. Manufacturing technology. V, c. 5, pp. 5 - 9. ISSN 1213-2489.
- [14] BROŽEK, M. NOVÁKOVÁ, A, 2008. Evaluation of sintered carbides wear resistance. In.: 7<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for rural development. Jelgava, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, pp. 209 - 213. ISBN 1691-3043.
- [15] BROŽEK, M. NOVÁKOVÁ, A. MIKUŠ, R, 2010. Study of wear resistance of hard facings using welding powders on the NiCrBSi basis. In.: Trends in Agricultural Engineering (TAE). Praha, Česká zemědělská univerzita. Technická fakulta. pp. 115-118. ISSN 978-80-213-2088-8.
- [16] ČIČO, P. BUJNA, M, 2011. Odolnosť tvrdonávarových materiálů v prevádzkových podmienkach. [Monografie]. Nitra: SPU, 119 s. ISBN 978-80-552-0628-8.
- [17] FILÍPEK, J. ČERNÝ, M, 2002. Vliv tepelného zpracování oceli na opotřebení volnými a vázanými abrazivními částicemi. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., L, No. 3, pp. 91-98.
- [18] ČSN EN ISO 6507, 2006. Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Český normalizační institut, Praha, 24 s.
- [19] BATOR, A. et al, 1994. Abrasive action of mineral grains against steel. Tribologia, 1994, č. pp. 421-431
- [20] SUCHÁNEK, J. KUKLÍK, V. ZDRAVECKÁ, E, 2007. Abrazivní opotřebení materiálů, Praha. 162 s. ISBN 978-80-01-03659-4
- [21] VOJÁČEK, A. 2007: Infračervené kvantové detektory a termokamery, URL: <http://www.automatizace.hw.cz>: [cit. 27.05.2012]
- [22] TABOR, D, 2000. The Hardness of Metals, Oxford University Press, p. 175, ISBN 0-19-850776-3.
- [23] Determination of Microhardness of Powder Metallurgy Materials, 1999. MPIF 51 (1994), Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products, Metal Powder Industries Federal, pp. 121-129

- [24] LUND, A. C. VOORHEES, P. W, 2013. The Effects of Elastic Stress on Microstructural Development: The Three-Dimensional Microstructure of a Gamma-Gamma' Alloy, *Acta Mater.*, Vol 50 (No. 10), pp. 2585–2598
- [25] GOKHALE, A. M, 2004. Quantitative Characterization and Representation of Global Microstructural Geometry, *Metallography and Microstructures*, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, pp. 428-447
- [26] MASLOV, J. N, 1979. *Teorie broušení kovů*. 1.vyd. SNTL, Praha: 246 s
- [27] MÜLLER, M. NOVÁK, P. HRABĚ, P, 2014. Inovace materiálově konstrukčních řešení plužní čepel v oblasti konvenčního zpracování půdy při pěstování cukrové řepy. *Listy cukrovarnické a řepařské*, roč. 130, č. 3, s. 94-99. ISSN: 1210-3306.
- [28] NOVÁK, P. MÜLLER, M. HRABĚ, P, 2015. Application of overlaying material on surface of ploughshare for increasing its service life and abrasive wear resistance. *Agronomy Research*, roč. 13, č. 1, s. 158-166. ISSN: 1406-894X
- [29] ESAB 84.52 URL: <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=139>: [cit. 05.08.2012]
- [30] ČIČO, P. KOTUS, M, 2012. Vysočanská, M.: Renovácia vyorávacích radlíc cukrovej repy – predĺženie životnosti. *Listy cukrov. řepař.*, 128, (9-10), s. 280–283.
- [31] BROŽEK, M, 2011. *Plužní čepel s návarem*. Česká zemědělská univerzita v Praze, CZ21776.
- [32] BAYHAN, Y, 2006. Reduction of wear via hardfacing of chisel ploughshare. *Tribology International*, 39, s. 570-574.
- [33] ESAB 74.78 URL: <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410069>: [cit. 05.08.2012]
- [34] WELCO 1702 S URL: <http://www.welco.cz/katalog/welco-1702s>: [cit. 05.08.2012]
- [35] WELCOLLOY 1745 URL: <http://www.welco.cz/katalog/welcolloy-1745>: [cit. 05.08.2012]
- [36] WELCO 1750 URL: <http://www.welco.sk/katalog/welcolloy-1750-0>: [cit. 05.08.2012]
- [37] WELCO 1701 S URL: <http://www.welco.cz/katalog/welco-1701s>: [cit. 05.08.2012]

- [38] ČSN EN ISO 9934-1, 2002. Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Všeobecné zásady, Praha: Český normalizační institut, 20 s.
- [39] POŠTA, J, 1997. Technologické možnosti renovace plužních čepelí. In: LEGÁT, V. aj.: Hodnocení jakosti orby a plužních čepelí. [Závěrečná zpráva grantu č. 309/10/16496/0]. ČZU, Praha, 57 s.
- [40] SUCHÁNEK, J. BAKULA, J. SMRKOVSÝ, E, 1984. Možnosti použití návarových materiálů při zvyšování odolnosti strojů proti abrazivnímu opotřebení. Zváranie, 33, č. 10. s. 312 – 315.
- [41] METALS ASM HANDBOOK, VOL. 8, 2000. Mechanical testing and evaluation, Metals Park, Oh.: American Society for Metals, 2235 s. ISBN 0-87170-389-0
- [42] VOCEL, M. DUFEK, V. et al, 1976. Tření a opotřebení strojních součástí. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 376 s. ISBN 04-224-76
- [43] VOJTĚCH, D, 2010. Materiály a jejich mezní stavy. Praha: Vysoká škola chemicko technologická, 212 s.
- [44] BÍZEK, V. MAŘÁNEK, P, 2010. Učební texty RT Level 1, 2. Praha: ATG s.r.o., 148 s.
- [45] CZICHOS, H. SAITO, T. SMITH, L, 2006. Handbook Springer of Materials Measurement Methods. 1209 s. ISBN 3-540-20785-6
- [46] METALS ASM HANDBOOK, VOL. 18, 1992. Friction, lubrication, and wear, Metals Park, Oh.: American Society for Metals, 1879 s. ISBN 0-87170-380-7
- [47] POŠTA, J. VESELÝ, P. DVOŘÁK, M, 2002. Degradace strojních součástí. [Monografie]. Praha: ČZU, 67 s. ISBN 80-213-0967-9
- [48] AVIENT, J. GODDARD, J. WILMAN, H, 1960. An experimental Study of Friction and Wear. Proc. Roal Soc., London, A 258, pp. 159 - 179.
- [49] BOWDEN, F. P. TABOR, D, 1964. The Friction and Lubrication of Solids. Oxford, Clarendon Press, 372 s.
- [50] BECKMAN, G. KLEIS, I, 1983. Abtragverschleib von Metallen. Leipzig, 184 s.
- [51] GARBAR, I. I, 2001. Structural properties of steel after two-body abrasive wear. In: Franek, F., Bartz, W.J., Pauschitz, A. (Eds.): The second World Tribology Congress, Abstract of Papers, Vienna, 2001, 150 s.
- [52] METALS ASM HANDBOOK, VOL. 11, 2002, Failure analys and prevention, Metals Park, Oh.: American Society for Metals, 761 s. ISBN 0-87170-704-7

- [53] ČSN 01 5050, 1968. Základní druhy opotřebení. Názvosloví. Praha: Český normalizační institut. 8 s.
- [54] BOYES, J. W, 1969. Development and Use of an Abrasion test for Cast Irons and Steel. Iron and Steel, č. 1, pp. 57-63
- [55] POŠTA, J, 1995. Technologie údržby a oprav. Praha, ČZU, 198 s.
- [56] HAVLÍČEK, J. aj., 1989. Provozní spolehlivost strojů. 2. přepr. vyd. Praha, 1989, SZN. 616 s.
- [57] ŠEBATINOV, M. P. BOLDYREV, J. V, 1987. Vlijanije termoobrabotki na strukturu i svojstva belogo čuguna. Litej. Proizvodstvo, number. 2, pp. 8-10
- [58] VOJTĚCH, D, 2010. Materiály a jejich mezní stavy, VŠCHT, Praha, 212 s.
- [59] PLUHAŘ, J. et al., 1989. Nauka o materiálech, SNTL, Praha, 522 s.
- [60] CHOTĚBORSKÝ, R, 2006. Nauka o materiálech, Praha, 134 s. ISBN 80-213-1442-7
- [61] JACKSON, R. S, 1970. The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe-Cr-C metastable system, Journal of the Iron and Steel Institute, vol. 208, pp. 163-167.
- [62] MACEK, K. et al., 2003. Strojírenské materiály, Praha: ČVUT Praha, 204 s.
- [63] FUCHS, H. O. Stephens, R. I, 1980. Metal Fatigue in Engineering, New York: 1st Ed. Wiley, 318 s.
- [64] PÍŠEK, F. JENÍČEK, L. Ryš, P, 1968. Nauka o materiálu I. Sv. 2: Vlastnosti kovů, Praha: Academia, 1002 s.
- [65] JACKSON, R. S, 1970. The austenite liquidus surface and constitutional diagram for the Fe-Cr-C metastable system, Journal of the Iron and Steel Institute, vol. 208, pp. 163-167.
- [66] CYPIN, I. I. 1983. Belyje iznosostojkije čuguny. Struktura i svojstva. Moskva, Metallurgija,.
- [67] HÖSCHL, C. 1971. Pružnost a pevnost ve strojírenství, Praha: SNTL, 376 s.
- [68] HERTZBERG, R. W, 1989. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, New York, Wiley, 680 s.
- [69] HERTZBERG NAPIÓRKOWSKI, J. 2005. Zużyciowe oddziaływanie gleby na elementy robocze narzędzi rolniczych. Inżynieria Rolnicza, 17 s.
- [70] CHOTĚBORSKÝ, R, 2011. Nauka o materiálech, Praha, 413 s. ISBN 978-80-213-2236-3
- [71] BROŽ, L., et al, 1988. Hutnictví železa, Praha: SNTL Praha, 464 s.

- [72] ASHBY, M. F. GAUDHI, C. TAPLI, D. M, R, 1979. Acta Metallurgica, 729 s.
- [73] ARZBERGER, J. et al, 1980. Oceli, Výrobní program II. díl – vlastnosti a použití, sv. I – IV, Ostrava: Hutnictví železa, 1248 s.
- [74] MACEK, K. et al, 2003. Strojírenské materiály, Praha: ČVUT Praha, 204 s.
- [75] PÍŠEK, F. JENÍČEK, L. RYŠ, P, 1966. Nauka o materiálu I. Sv. 1: Obecná nauka o kovech, Praha: Academia, 634 s.
- [76] RYŠ, P. CENEK, M. MAZANEC, K. HRBEK, A, 1975. Nauka o materiálu I. Sv. 4: Železo a jeho slitiny, Praha: Academia, 544 s.
- [77] MACEK, K. ZUNA, P. JANOVEC, J, 2001. Tepelné úpravy kovových materiálů, Praha: ČVUT Praha, 100 s.
- [78] OCHODEK, V, 2001. Struktura svaru, In Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Druhé upravené vydání. Ostrava: ZERROS, s. 95–101. ISBN 80-85771-85-3.
- [79] AMBROŽ, O. KANDUS, B. KUBÍČEK, J, 2001. Technologie svařování a zařízení, Ostrava, 395 s. ISB: 80-857771-81-0
- [80] FOLDYNA, V. HENNHOFFER, K. HLAVATÝ, I. L. et al., 1999. Materiály a jejich svařitelnost, Ostrava, 296. s. ISBN 80-857771-63-2
- [81] BAJDA, M, Navařování kovů, Ostrava 12 s. URL: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD\\_comple.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_comple.pdf): [cit. 01.09.2013]
- [82] GODDARD, J. WILMAN, H, 1962. A Theory of Friction and Wear during the Abrasions of Metals. Wear, 5, pp. 114-135.
- [83] JONES, J. R, 2005, Lubrication, Friction, and Wear, NASA-SP-8063, 1971, 75 s. URL: [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710021995\\_1971021995.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710021995_1971021995.pdf): [cit. 18.06.2012]
- [84] CHRUŠČOV, M. M, 1960. Sovremennye napravlenija v razvitii nauki iznosostojkosti metallov. Trudy III, konf. po treniju, AN SSSR, Moskva, TOM I, pp. 8-12
- [85] CHRUŠČOV, M. M. BABIČEV, M. A, 1960. Issledovanija iznašivanija metallov. Izdatelstvo akademii nauk SSSR, Moskva. pp. 15-22
- [86] CHRUŠČOV, M. M. BABIČEV, M. A, 1970. Abrazivnoje iznašivanije. Izd. Nauka, Moskva, 71 s.

- [87] LARSEN-BADSE, J, 1972. Some effect of specimen size on abrasive wear. *Wear*, 19, pp. 27-35.
- [88] RABINOWICZ, E. MUTIS, A, 1965. Effect of Abrasive Particle Size on Wear. *Wear*, 8, pp. 381-390
- [89] RICHARDSON, R. C, 1979. The Wear of metals by Relatively Soft Abrasives. *Wear*, 10, pp. 291-309.
- [89] RICHARDSON, R. C. D, 1967. The Wear of metals by Hard Abrasives.. *Wear*, 10, pp. 353-382.
- [91] WELLINGER, K. UETZ, H, 1955. Gleitverschleiss, Spühlverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von Körn. VID Forschung Heft 449, Düsseldorf, 40 p.
- [92] RICHARDSON, R. C. D, 1968. The Wear of metals by Relatively Soft Abrasives. *Wear*. 10, pp. 245-275.
- [93] STATON, J, 2005. Radiographic Testing Classroom Training Book, The American Society for Nondestructive Testing, Inc. America, 185 p.
- [94] STROUD, M. F. WILMAN, H, 2002. The Proportion of the Croove Volume removed as Wear in Abrasion of Metals. *Brit. J. Appl. Phys.*, č. 5, pp. 173-178.
- [95] RABINOWICZ, E. et al, 1961. A study of abrasive Wear under - body Conditions. *Wear*, 4, pp. 345 – 355.
- [96] SUH, N. P, 1986. Tribophysics, Prentise-Hall, Inc. s. 3-11
- [97] VOCEL, M, 1978. Návrh materiálové volby na strojní součásti pracující v intenzivníabrazi. [Výzkumná zpráva]. Praha, SVÚM. 26 s.
- [98] BROŽEK, M, 2004. Abrasive wear resistance of selected hardfacing materials. *Strojírenská technologie*. IX, č. 4, s. 26 – 31.
- [99] BROŽEK, M, 2004. The Evaluation of The Overlays Abrasive Resistance. *Acta Technologica Agriculturae*. 7, č. 2, s. 29 – 33.
- [100] BROŽEK, M. NOVÁKOVÁ, A, 1991. Porovnání odolnosti proti abrazivnímu opotrebení vybraných návarových materiálu. *Zemed. Techn.*, 37, s. 31-37.
- [101] LARSEN-BADSE, J, 1968. Influence of Grit Diameter and speciment size on wear duting sliding abrasion. *Wear*, č. 12, pp. 35-53.
- [102] NATHAN, G. K. JONES, W. J. D, 1966. The Empirical Relationship between Abrasive Wear and the Applied Conditions. *Wear*, 9, pp. 300-309

- [103] NATHAN, G. K. JONES, WJ. D, 1967. Influence of the Hardness of Abrasive on the Abrasive Wear of Metals. Proc.Inst.Mech.Engrs, vol. 181, Part 30, pp. 215-221
- [104] DOBROVOLSKIJ, A. G. KOŠELENKO, P. I, 1989. Abrasivnaja iznosostojkost materialov. Izd. Technika, Kijev, 125 s.
- [105] ROUČKA, D, 2010. Metalurgie litin. 62 s.  
URL: zdroj: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiL876A0fMAhWDGRQKHStBCoQFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fsiforum.cz%2Fupload%2Fsoubory%2Fdatabazepredmetu%2FCME%2FMetalurgie%2520litin.pdf&usg=AFQjCNF2pMwKUd4f7MT1BfmEO0bk1A-FAg&bvm=bv.122448493,d.d24>: [cit. 01.06.2013].
- [106] EYRE, T. S, 1979. Wear Resistance of Metals. Treatise on Materials Science and Technology, vol. 13, Wear, Academic Press, Inc., pp. 363-442,
- [107] FILÍPEK, J. ČERNÝ, M. JANDÁK, J, 2000. Abrasive Wear of Heat-treated Steel under Soil Conditions. Res. Agr. Eng., 46, No. 1, pp. 1-5.
- [108] GARBAR, I. I, 1998. Correlation Between Abrasive Weasistance and Changes in Structure and Residual Stress of Steels. Tribology Letter, 5, pp. 223-229
- [109] GARBAR, I. I, 2001. Structural properties of steel after two-body abrasive wear. In: Franek, F., Bartz, W.J., Pauschitz, A. (Eds.): The second World Tribology Congress, Abstract of Papers, Vienna, 150 p.
- [110] BOYES, J. W, 1969. Development and Use of an Abrasion test for Cast Irons and Steel. Iron and Steel, č. 1, pp. 57-63
- [111] GOST 23.208-79, 1979. Ensuring of wear resistance of products. Wear resistance testing of materials by friction against loosely fixed abrasive particles 5, 4 p.
- [112] NEALE, M. J, 1997. Tribology and the needs of industry. In: Hutchings, I.M,(ed.) New Directions in Tribology (Plenary and Invited Papers from the First World Tribology Congress), MEP, London, pp. 57-65
- [113] ADENSKO, J. et al., 2003 Microstructure selection criteria for cast irons with more than 10 wt.% chromium for wear applications, Material Characterization, vol. 49, pp. 83-93.
- [114] PTÁČEK, L. et al, 1999. Nauka o materiálu I a II, Brno: CERM s.r.o Brno, 1999, 855 s.



- [115] MARATRAY, F, 1970. Factors affecting the structure of chromium and chromiummolybdenum white irons, AMAX Inc., Paris, France, 320 p.
- [116] EDUARD, S, 2007. Statistika pro ekonomy, 267 s. ISBN 978-80-86730-06-6  
URL: zdroj: <http://www.lslany.cz/priroda.html>: [cit. 05.08.2012].
- [117] SPRÁVA LÁNY, 2012. Přírodní podmínky LS Lány zdroj: <http://www.lslany.cz/priroda.html>: [cit. 11.09.2013].
- [118] PODSTAWKA, M. ZAVADIL, T. CIESLAR, J. 2016. NDT a diagnostika v údržbě letecké techniky (ndt and diagnostics in aircraft maintenance) DIAGO, s. 29-38
- [119] RENDÓN, J. OLSSON, M. 2009. Abrasive wear resistance of some commercial abrasion resistant steels evaluated by laboratory test methods,” *Wear* 267, pp. 2055–2061.
- [120] AL-RUBAIE, K. S, 2000. Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys, *Wear*, vol. 243, pp. 92-100.
- [121] BERNS, H. FISCHER, A, 1985. Abrasive wear resistance and microstructure of Fe-Cr-C-B hard surfacing weld deposits, In. *Proceeding 5th International Conference on Wear of Materials*, Vancouver, B. C. Canada, ASME, New York, pp. 625-633.
- [122] BUCHANAN, V. E., et al, 2008. A comparison of the abrasive wear behaviour of iron-chromium based hardfaced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying, *Wear*, vol. 264, s. 542-549.
- [123] BUCHELY, M. F. et al, 2005 The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys, *Wear*, vol. 259, pp. 52-61.
- [124] COLACO, R. VILAR, R, 2003. Abrasive wear of metallic matrix reinforced materials, *Wear*, vol. 255, pp. 643-650.
- [125] FULCHER, J. K, et al, 1983. The effect of carbide volume fraction on the low stress abrasion resistance of high Cr-Mo white cast irons, *Wear*, vol. 84, pp. 313-325.
- [126] GARBAR, I. I, 1998. Correlation between abrasive wear resistance and changes in structure and residual stresses of steel, *Tribology Letters*, vol. 5, pp. 223-229.
- [127] GUNDLACH, R. B. PARKS, J. L, 1978. Influence of abrasive hardness on the wear resistance of high chromium irons, *Wear*, vol. 46, s. 97-108.

- [128] GÜLENC, B. KAHRAMAN, N, 2003. Wear behaviour of bulldozer rollers welded using a submerged arc welding process, *Materials and Design*, vol. 24, pp. 537-542.
- [129] KRISHNAN, S. N., et al, 2006 Wear behaviour of a steel weld-joint, *Wear*, 2006, vol. 260, pp. 1285-1294.
- [130] LARSEN-BASSE, J, 1968. Influence of grit diameter and specimen size on wear during sliding abrasion, *Wear*, vol. 12, s. 35-53.
- [131] MÜLLER, M. CHOTĚBORSKÝ, R. HRABĚ, P. 2015. Application of Overlay Material on Soil Processing Tools for Purpose of Increasing their Abrasive Wear Resistance. *Listy cukrovarnické a řepařské*, roč. 131, č. 9-10, s. 279-283. ISSN: 1210-3306.
- [132] CHOTĚBORSKÝ, R. et al, 2008. Abrasive wear of high chromium Fe-Cr-C hardfacing alloys, *Research of Agriculture Engineering*, 2008, vol. 54, no. 4, s. 192-198.
- [133] CHOTĚBORSKÝ, R. et al, 2009. Effect of abrasive particle size on abrasive wear of hardfacing alloys, *Research of Agriculture Engineering*, 2009, vol. 55, no. 3, s. 1-13.
- [134] CHOTĚBORSKÝ, R. LINDA, M, 2014. Evaluation of friction force using a rubber wheel instrument. *Agronomy Research*, 2014, roč. 12, č. 1, s. 247-254. ISSN: 1406-894X
- [135] RATIA, V. et al, 2014. Effect of abrasive properties on the high-stress three-body abrasion of steels and hard metals *TRIBOLOGIA - Finnish Journal of Tribology* 1 vol 32, 16 p.
- [136] SEVIM, V. ERYUREK, I. B, 2006. Effect of abrasive particle size on wear resistance in steels, *Mater. Des.* 27, pp. 173–181.
- [137] CORONADO, J. J. SINATORA, A, 2011. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1, *Wear* 271, pp. 1794–1803.
- [138] MÜLLER, M. NOVÁK, P. CHOTĚBORSKÝ, R. HRABĚ, P, 2012. Efektivní zvýšení životnosti plužní čepele. *Mechanizace zemědělství*, 2012, roč. 62, č. 8, s. 68-70. ISSN: 0373-6776.
- [139] TIANFU, J. FUCHENG, Z, 1997. The work-hardening behavior of medium manganese steel under impact abrasive wear condition. *Mater. Lett.* 31, pp. 275–279

- [140] CHOTĚBORSKÝ, R. HRABĚ, P, 2013. Effect of destabilization treatment on microstructure, hardness and abrasive wear of the high chromium hardfacing. Research in Agricultural Engineering (Zemědělská technika), roč. 59, č. 4, s. 128-135. ISSN: 1212-9151.
- [141] ČSN EN 1561, 2012. Slévárství - Litiny s lupínkovým grafitem. Český normalizační institut, Praha, 32 s.
- [142] ČSN EN 1563, 2012. Slévárství - Litiny s kuličkovým grafitem. Český normalizační institut, Praha, 40 s.
- [143] ČSN EN 1563, 2012. Slévárství – Temperované litiny. Český normalizační institut, Praha, 24 s.
- [143] ČSN EN 1563, 2012. Slévárství – Litina s vermikulárním grafitem. Český normalizační institut, Praha, 28 s.
- [144] ŠKEŘÍK, M, 2012. Učební texty IRT Level 1, 2. Infračervená termografie. Praha: ATG s.r.o., 97 s.

## Příloha A: Sady litin a jejich chemické složení

### Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku [1]

Tabulka A.1: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady A.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1A	<b>3,95</b>	1,82	0,7	2,25	3,78	0,14	0,01	0,01	87,34
2A	<b>3,51</b>	1,72	0,73	2,22	3,71	0,14	0,01	0,01	87,95
3A	<b>2,79</b>	1,57	0,72	2,22	3,72	0,13	0,01	0,01	88,83
4A	<b>2,16</b>	1,49	0,75	2,21	3,76	0,14	0,01	0,02	89,46
5A	<b>1,75</b>	1,35	0,71	2,16	3,74	0,12	0,01	0,01	90,15

### Zkušební sada B – vzorky litin se změnou obsahu křemíku

Tabulka A.2: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady B.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1B	3,75	<b>2,16</b>	0,48	2,21	3,76	0,15	0,01	0,01	87,47
2B	3,67	<b>1,72</b>	0,53	2,22	3,78	0,15	0,01	0,02	87,90
3B	3,75	<b>1,49</b>	0,4	2,16	3,74	0,14	0,02	0,01	88,29
4B	3,64	<b>1,22</b>	0,52	2,21	3,77	0,15	0,02	0,02	88,45
5B	3,68	<b>0,95</b>	0,53	2,19	3,78	0,14	0,01	0,01	88,71
6B	3,73	<b>0,79</b>	0,53	2,15	3,72	0,13	0,01	0,01	88,93

### Zkušební sada C – vzorky litin se změnou obsahu niklu

Tabulka A.3: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady C.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1C	3,49	0,71	0,58	2,46	<b>0,14</b>	0,13	0,01	0,01	92,47
2C	3,44	0,69	0,55	2,44	<b>1,11</b>	0,12	0,01	0,02	91,62
3C	3,46	0,71	0,57	2,55	<b>2,13</b>	0,12	0,02	0,02	90,42
4C	3,45	0,68	0,54	2,49	<b>3,14</b>	0,13	0,01	0,02	89,54
5C	3,41	0,75	0,58	2,53	<b>3,92</b>	0,14	0,01	0,01	88,65
6C	3,45	0,73	0,52	2,42	<b>4,81</b>	0,13	0,01	0,01	87,92

## Zkušební sada D – vzorky litin se změnou obsahu mědi

Tabulka A.4: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady D.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	<b>Cu</b>	P	Mo	Fe
2D	3,45	0,94	0,67	2,25	0,12	<b>0,89</b>	0,01	0,01	91,66
3D	3,44	0,97	0,61	2,39	0,11	<b>1,95</b>	0,01	0,01	90,51
4D	3,4	1,01	0,65	2,37	0,11	<b>2,91</b>	0,01	0,01	89,53
5D	3,45	1,04	0,68	2,35	0,12	<b>3,91</b>	0,01	0,01	88,43
6D	3,47	1,07	0,62	2,38	0,11	<b>4,74</b>	0,01	0,01	87,59

## Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu

Tabulka A.5: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady E.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	<b>Mn</b>	Cr	Ni	Cu	P	Mo	Fe
1E	3,49	1,81	<b>0,13</b>	2,32	3,76	0,13	0,01	0,01	88,34
2E	3,48	1,84	<b>0,35</b>	2,31	3,78	0,13	0,01	0,01	88,09
3E	3,38	1,77	<b>0,52</b>	2,32	3,69	0,14	0,01	0,01	88,16
4E	3,49	1,82	<b>0,67</b>	2,29	3,73	0,13	0,02	0,02	87,83
5E	3,35	1,79	<b>0,89</b>	2,3	3,71	0,14	0,02	0,02	87,78
6E	3,45	1,78	<b>2,01</b>	2,31	3,73	0,13	0,01	0,01	86,57

## Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu [2]

Tabulka A.6: Skutečné chemické složení zkušebních vzorků sady F.

Označení vzorku	Skutečné chemické složení [hmotn. %]								
	C	Si	Mn	<b>Cr</b>	Ni	Cu	P	Mo	Fe
2F	3,78	1,73	0,52	<b>1,36</b>	2,11	0,14	0,02	0,01	90,33
3F	3,79	1,74	0,53	<b>1,91</b>	2,14	0,13	0,01	0,02	89,73
4F	3,75	1,72	0,52	<b>2,62</b>	2,15	0,14	0,01	0,01	89,08
5F	3,79	1,7	0,53	<b>3,15</b>	2,01	0,13	0,01	0,01	88,68
6F	3,76	1,73	0,52	<b>4,5</b>	2,16	0,14	0,01	0,01	87,17

## Příloha B: Popis návarových materiálů ESAB

### ESAB OK 84.52

Elektrody doporučené pro navařování funkčních ploch, odolávajících korozním vlivům, při současném namáhání rázy (např. součástí armatur, čerpadel, válců na kontilitě, nožů nástrojů apod.), ale také k opravám opotřebovaných zápustek nebo při renovaci stříhacích a protlačovacích zařízení. Navařený kov má martenzitickou strukturu. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [29]:

- velmi dobrá odolnost proti abrazi;
- velmi dobrá korozní odolnost;
- dobrá pevnost a houževnatost;
- odolnost proti rázům;
- vhodná pro práci za studena;
- odolnost proti abrazi.

Tabulka B.1: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [2].

Zkušební vzorek ESAB OK 84.52	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	0,25	0,5	0,5	0,03	-	-	13,0	-	-	-	-	-
Skutečné	0,27	0,41	0,63	0,02	0,02	0,11	14,9	0,05	0,02	0,01	0,01	83,6

### ESAB OK 74.78

Elektroda s bazickým obalem, nízko navlhavá elektroda vhodná pro svařování vysoko pevných ocelí pro konstrukce pracující při nízkých teplotách. Svarový kov poskytuje dobrou vrubovou houževnatost i při teplotách do -40 °C. Elektroda je vhodná pro svary kolejí i návary jejich opotřebovaných částí. Velmi nízký obsah vlhkosti v obalu umožňuje použití všude, kde nemůže být aplikován předehřev. Elektroda je doporučována zejména pro tupé svary kolejnic s pevností 800 - 900 MPa. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [33]:

- vhodná pro vysoko pevnostní oceli;
- vhodná pro práci za studena;
- dobrá houževnatost a pevnost;
- odolnost proti rázům;
- odolnost proti abrazi;
- nízký obsah vodíku.

Tabulka B.2: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [33].

Zkušební vzorek ESAB OK 74.78	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	0,06	0,4	1,5	-	-	-	0,1	-	0,1	-	-	-
Skutečné	0,09	0,21	2,2	0,25	0,18	0,05	0,37	0,17	0,26	0,10	0,09	96,0

## Příloha C: Popis návarových materiálů WELCO

### WELCO 1702 S

Elektrody jsou používány především při renovacích nástrojů z oceli, oceli na odlitky a tvrdé manganové oceli opotřebovaných vlivem rázů, úderů a tlaku. Jsou vhodné pro spojování a návary austenitických tvrdých Mn-ocelí s obsahem 12 až 14 % Mn. Umožňují snadné svařování a mají snadno odstranitelnou strusku. Elektrody jsou doporučovány například pro renovace zubů u rypadel a bagrů, válců, razníků, funkčních částí drtičů kamene, nárazové desky, atp. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [34]:

- extrémní odolnost vůči tlaku, rázům a úderům;
- tvrdost po zpevnění až 430 HB (cca. 460 HV);
- možnost spojování tvrdých 12 - 14 % Mn ocelí;
- žádné zápaly;
- lehce odstranitelná struska;
- nízký obsah vodíku.

Tabulka B.3: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [34].

Zkušební vzorek WELCO 1702 S	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	0,75	0,15	11,7	0,02	-	-	0,75	0,35	3,1	-	-	-
Skutečné	0,79	0,11	13,1	0,01	0,12	0,19	0,92	0,09	4,5	0,01	0,01	80,2

### WELCOLLOY 1745 S

Vysoce legovaná návarová trubičková elektroda poskytující návar s odolností proti otěru a při namáhání tlakem a rázy. Elektroda tvoří návar s vysokým podílem karbidů chromu v tvrdé, houževnaté matici. Návar odolává opotřebení otěrem a rázy a může být aplikován na Mn ocele i nízkolegované uhlíkové ocele. Umožňuje snadné zapálení oblouku (i opětovné). Netvoří téměř žádnou strusku, povrch svaru je jemně šupinatý, bez zápalů. Elektroda je doporučována například pro stroje na těžbu zeminy, stavební stroje, zemědělské stroje, cihelny, stroje pro stavbu a údržbu silnic atd. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [35]:

- vysoký navařovací výkon;
- vysoká výtěžnost;
- necitlivost vůči vodě a navlhání;
- Snížené množství vneseného tepla;
- nízký svařovací proud;
- vysoký navařovací výkon;
- žádné struskové vměstky.



Tabulka B.4: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [35].

Zkušební vzorek WELCOLLOY 1745 S	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	5,5	-	1,5	-	-	-	40,0	-	-	-	-	-
Skutečné	5,9	0,15	1,8	0,15	0,05	0,05	42,5	0,04	0,13	0,15	0,11	49,0

### WELCOLLOY 1750 S

Vysokolegovaná návarová trubičková elektroda určená speciálně pro nástroje vysoko namáhané tlakem a rázem. Návar je možno zpevnit za studena a je tvořený Mn - ocelí legovanou niklem a chromem. Je vhodný zejména pro silné základní vrstvy při opravách velmi opotřebovaných částí drtičů a na mezivrstvy při navařování tvrdých Mn - ocelí. Elektroda se používá především pro renovace strojů na těžbu žuly, stavebních strojů, drtičů atp. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [36]:

- nepatrné tepelné ovlivnění základního materiálu;
- žádná strusková vměstka;
- odolnost elektrody vůči vodě a navlhání;
- nízký svařovací proud.
- vysoký navařovací výkon a vysoká výtěžnost;

Tabulka B.5: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [36].

Zkušební vzorek WELCOLLOY 1750 S	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	0,4	0,8	14,5	-	-	-	15,0	-	-	1,0	-	-
Skutečné	0,57	0,64	16,1	0,10	0,13	0,10	17,2	0,09	0,11	1,45	0,04	65,5

### WELCO 1701 S

Tvrdo-návarová elektroda na chrom-karbidové bázi, poskytující návary odolné proti otěru při středním namáhání rázy. V porovnání s podobnými typy elektrod se vyznačuje hlavně lepší ovladatelností svarové lázně. To umožňuje dobrou stavbu svaru, návar je plochý, stejnoměrný, nevyžaduje další opracování. Struska je lehce odstranitelná. Elektroda je vhodná pro aplikace vystavené opotřebením otěrem, tlakem při středním namáhání rázy, např. těžba uhlí, zeminy, štěrk, písek apod., pro navařování zubů bagrů, stříhacích lišt, dopravních šneků, hladkých vodících ploch, konců ventilů

a strojních dílů s pracovní teplotou do 200 °C. Za výhody tohoto materiálu jsou označovány [37]:

- tvoří velmi tvrdý povrch už při první vrstvě;
- tvoří hladké povrchy;
- další opracování není nutné;
- struska je lehce odstranitelná;
- odolává oxidaci do 1000 °C;
- pracovní teplota do 200 °C.

Tabulka B.6: Směrné chemické složení deklarované výrobcem [37].

Zkušební vzorek WELCO 1701 S	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Směrné	4,3	-	1,3	-	-	-	38,0	0,8	-	-	1,3	-
Skutečné	4,9	0,15	1,9	0,11	0,08	0,06	41,6	1,13	0,05	0,17	1,59	48,3

## Příloha D: Popis materiálů ostří a dlát ořebních těles

### Originální materiál dláta

Tabulka D.1: Skutečné chemické složení základního materiálu dláta.

Složení	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Skutečné	0,32	0,21	1,13	0,05	0,02	0,36	0,53	0,05	0,30	0,02	0,01	96,96



Obrázek D.1: Dláto – Podeutektoidní ocel, struktura odpovídá popuštěnému mantenzitu, se zbytkovým austenitem; (100x zvětšeno; leptáno – Nital (4 %)).

### Originální materiál ostří

Tabulka D.2: Skutečné chemické složení základního materiálu ostří.

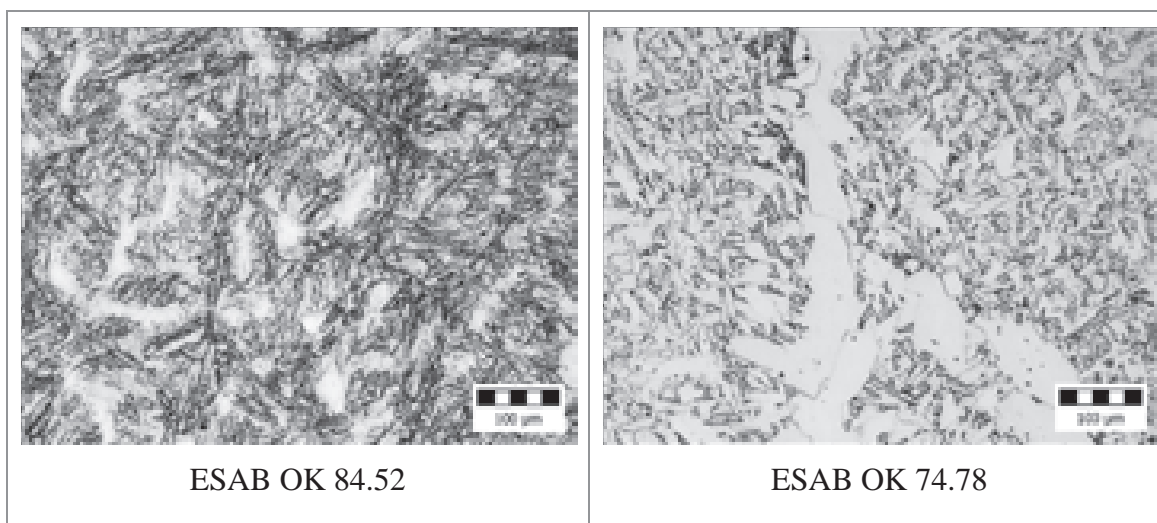
Složení	Chemické složení [hmotn. %]											
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Ni	V	W	Fe
Skutečné	0,25	0,27	1,32	0,07	0,02	0,31	0,36	0,06	0,13	0,01	0,01	97,19



Obrázek D.2: Ostří – Podeutektoidní ocel, struktura odpovídá popuštěnému mantenzitu, se zbytkovým austenitem; (100x zvětšeno; leptáno – Nital 4 %).

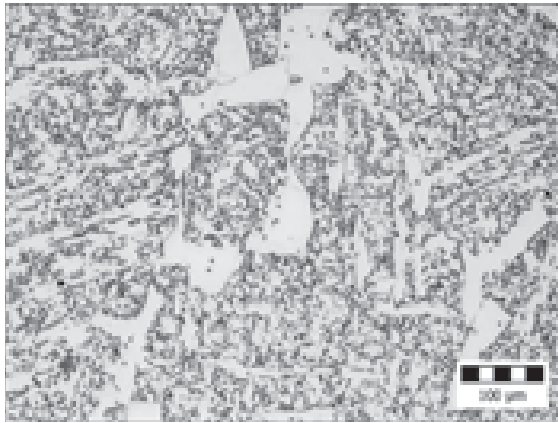
## Příloha E: Návarové materiály a jejich struktura

ESAB OK 84.52	Struktura martenzitická se zbytkovým austenitem odpovídá dendritické struktuře lité chromové oceli; (200x zvětšeno; leptáno – Nital (4 %)).
ESAB OK 74.78	Struktura martenzitická se zbytkovým austenitem odpovídá dendritické struktuře lité chromové oceli; (200x zvětšeno; leptáno – Nital (4 %)).
WELCO 1702 S	WELCO 1702 S – Podeutektoidní ocel s austenitickou strukturou obsahující s karbidické částicemi; (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))
WELCOLLOY 1745 S	Struktura charakteru nad-eutektické bílé litiny obsahující karbidy chromu $M_7C_3$ , matrice austeniticko-martenzitická; (zvětšení: 200x; leptáno: Nital (4 %))
WELCOLLOY 1750 S	Struktura charakteru chrom-manganové oceli s martenziticko-austenitickou strukturou obsahující zbytkový austenit s karbidy; (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %)).
WELCO 1701 S	Struktura charakteru nad-eutektoidní bílé litiny obsahující karbidy $M_{23}C_6$ ; (zvětšení: 200x; leptáno: Nital (4 %)).

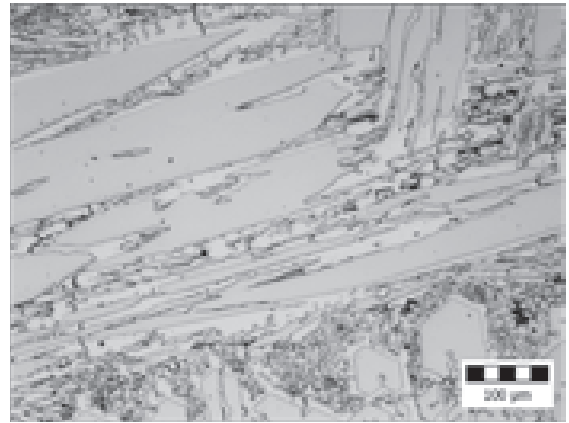


ESAB OK 84.52

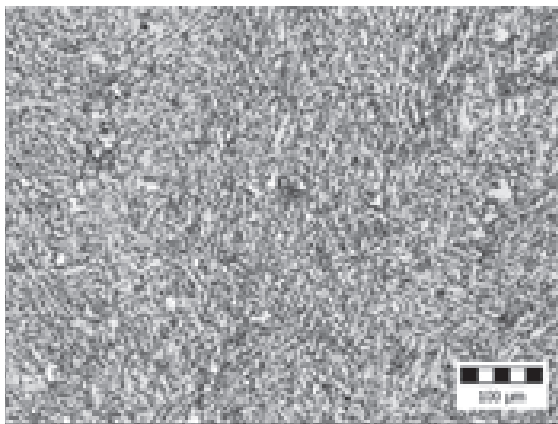
ESAB OK 74.78



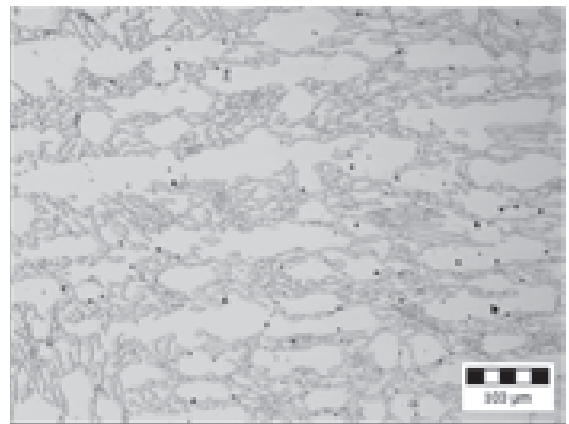
WELCO 1702 S



WELCOLLOY 1745 S



WELCOLLOY 1750 S



WELCO 1701 S

## Příloha F: Provozní zkoušky – naměřené hodnoty

Tabulka F.1: Provozní zkoušky materiálu ostří – naměřené hodnoty.

Úsek [ha]	Ostří – návar ESAB OK 84.52					Ostří – návar WELCO 1702 S				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem
0	5222	5548	326	---	---	5245	5751	507	---	---
11	4711	5163	452	3,87	2,91	4846	5332	485	3,02	3,18
25	4193	4770	577	3,43	2,59	4249	4702	453	3,32	3,50
31	3874	4574	701	3,62	2,62	4073	4500	426	3,15	3,37
39	3581	4257	676	3,50	2,76	3722	4133	411	3,25	3,46
46	3273	4092	819	3,53	2,64	3474	3890	416	3,21	3,37
52	3037	3882	845	3,50	2,67	3221	3621	400	3,24	3,41

Úsek [ha]	Ostří – návar WELCOLLOY 1745 S					Ostří – návar WELCOLLOY 1750 S				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem
0	5200	5427	227	---	---	5251	5642	391	---	---
11	4800	5193	394	3,03	1,77	4872	5179	307	2,88	3,51
25	4201	4801	600	3,33	2,09	4291	4657	366	3,20	3,29
31	4022	4700	678	3,17	1,96	4100	4343	243	3,10	3,49
39	3682	4452	770	3,25	2,09	3763	4074	311	3,18	3,35
46	3443	4357	914	3,18	1,94	3533	3740	207	3,11	3,45
52	3184	4169	985	3,23	2,02	3279	3521	242	3,16	3,40

Úsek [ha]	Ostří – návar WELCO 1701 S					Ostří – návar ESAB OK 74.78				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem
0	5215	5719	504	---	---	5220	5566	346	---	---
11	4772	5394	621	3,35	2,46	4853	5193	341	2,78	2,82
25	4270	4912	643	3,15	2,69	4306	4657	351	3,05	3,03
31	4003	4790	787	3,26	2,50	4129	4469	340	2,93	2,95
39	3732	4492	761	3,17	2,62	3818	4160	343	3,00	3,00
46	3459	4332	873	3,18	2,51	3545	3964	418	3,03	2,90
52	3212	4117	904	3,21	2,57	3363	3721	358	2,98	2,96

Tabulka F.2: Provozní zkoušky materiálu dlát – naměřené hodnoty.

Úsek [ha]	Dlátó – návar ESAB OK 84.52					Dlátó – návar WELCO 1702 S				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem
0	2720	2831	111	---	---	2733	2851	118	---	---
11	2447	2693	245	2,07	1,05	2445	2600	155	2,18	1,91
25	2012	2446	435	2,36	1,28	2102	2236	134	2,10	2,05
31	1896	2353	457	2,22	1,28	1994	2143	149	1,99	1,90
39	1628	2164	536	2,33	1,43	1772	1958	187	2,05	1,91
46	1488	2048	560	2,23	1,42	1592	1743	151	2,07	2,01
52	1306	1971	666	2,27	1,38	1460	1611	151	2,04	1,99

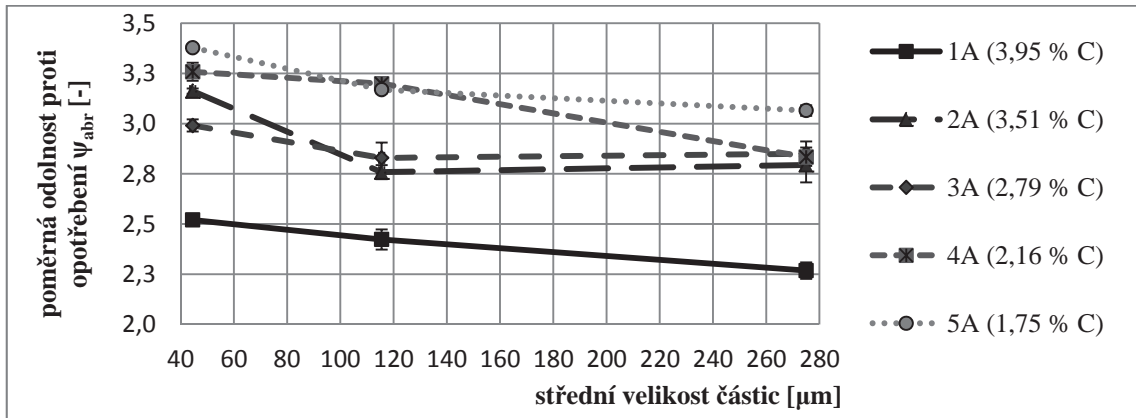
Úsek [ha]	Dlátó – návar WELCOLLOY 1745 S					Dlátó – návar WELCOLLOY 1750 S				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	S návarem		Bez návaru	S návarem
0	2702	2832	130	---	---	2762	2845	83	---	---
11	2382	2697	315	2,43	1,02	2499	2584	85	1,99	1,98
25	2049	2484	435	2,18	1,16	2102	2233	131	2,20	2,04
31	1859	2363	504	2,27	1,26	1966	2042	76	2,14	2,16
39	1651	2284	632	2,25	1,17	1800	1846	46	2,06	2,14
46	1463	2184	721	2,25	1,17	1588	1691	103	2,13	2,09
52	1331	2084	753	2,20	1,20	1469	1543	74	2,07	2,09

Úsek [ha]	Dlátó – návar WELCO 1701 S					Dlátó – návar ESAB OK 74.78				
	Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]		Hmotnost [g]		Rozdíl v hm. úbytcích [g]	Průměrný úbytek na úseku [g/ha]	
	Bez návaru	s návarem		Bez návaru	S návarem	Bez návaru	s návarem		Bez návaru	S návarem
0	2717	2857	140	---	---	2703	2864	161	---	---
11	2479	2723	244	1,80	1,01	2403	2627	224	2,28	1,80
25	2101	2473	372	2,05	1,28	2095	2243	148	2,03	2,07
31	1998	2372	375	1,93	1,30	1912	2118	206	2,13	2,01
39	1753	2203	450	2,06	1,40	1759	1901	143	2,02	2,06
46	1636	2138	502	1,96	1,30	1536	1737	200	2,11	2,04
52	1475	2016	541	1,99	1,35	1418	1602	185	2,06	2,02

# Příloha G: Výsledky experimentálních měření vzorků litin

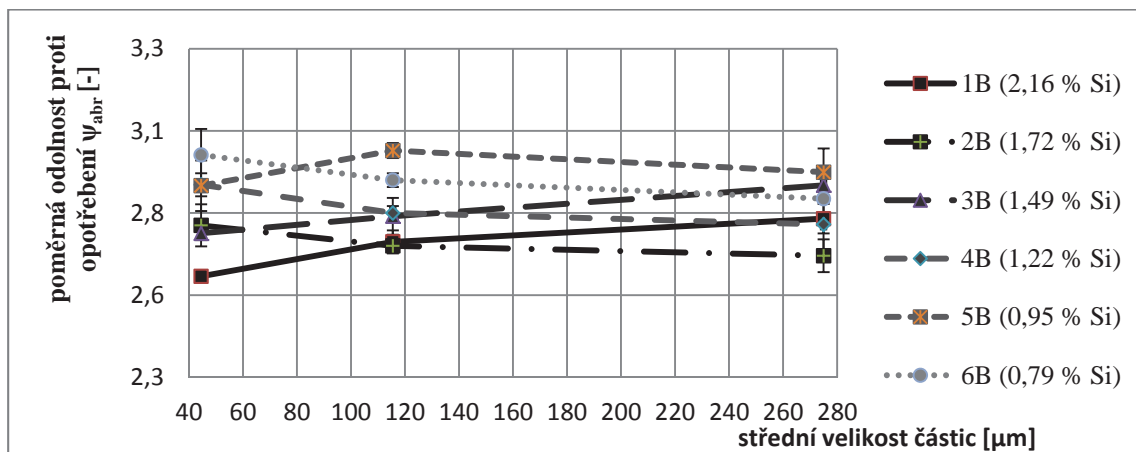
Grafy zobrazující závislosti poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

## G.1 Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku



Obrázek G.1: Graf zobrazující vzorky sady A – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

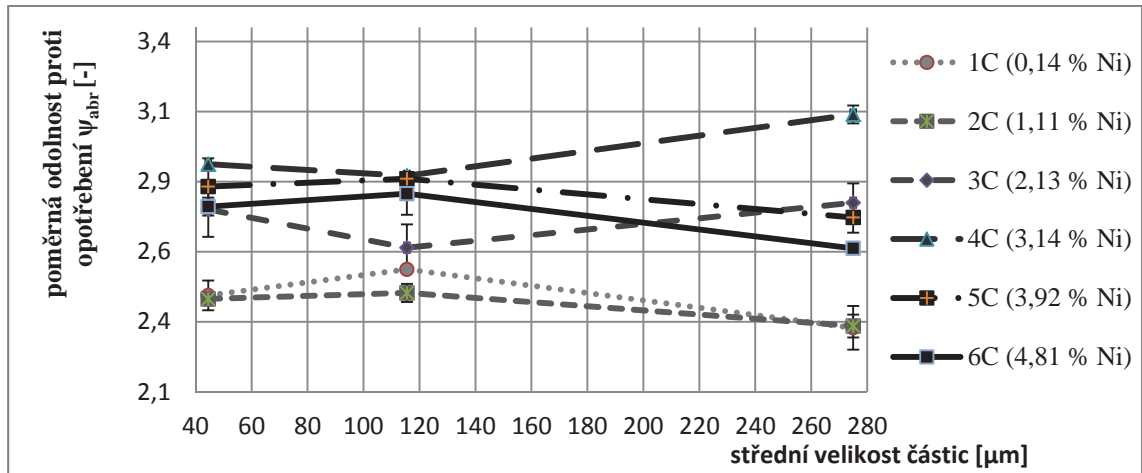
## G.2 Zkušební sada B – vzorky se změnou obsahu křemíku



Obrázek G.2: Graf zobrazující vzorky sady B – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

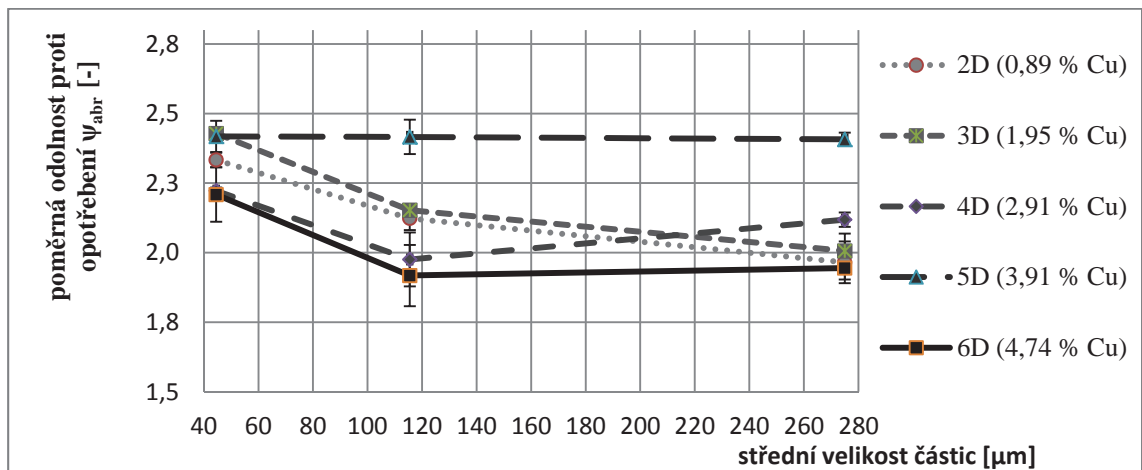


### G.3 Zkušební sada C – vzorky se změnou obsahu niklu



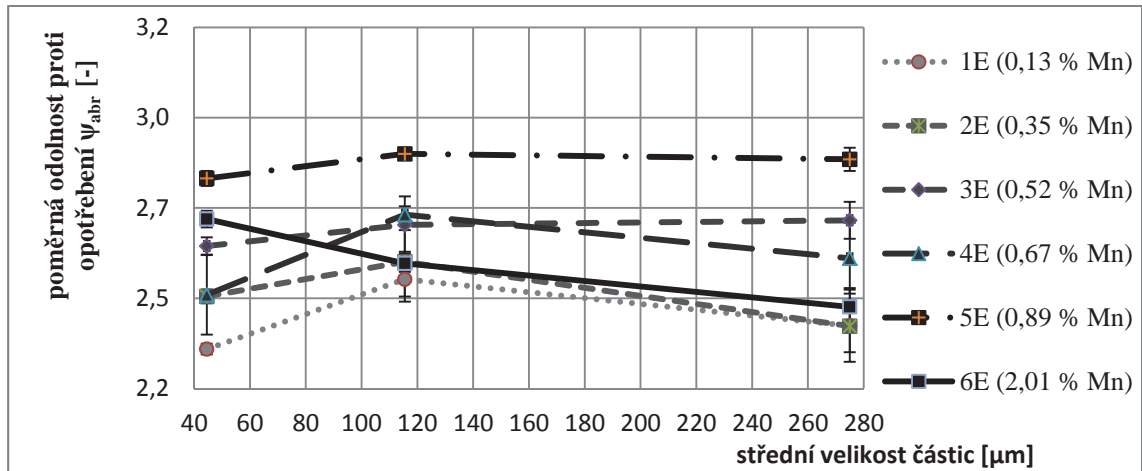
Obrázek G.3: Graf zobrazující vzorky sady C – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

### G.4 Zkušební sada D – vzorky se změnou obsahu mědi



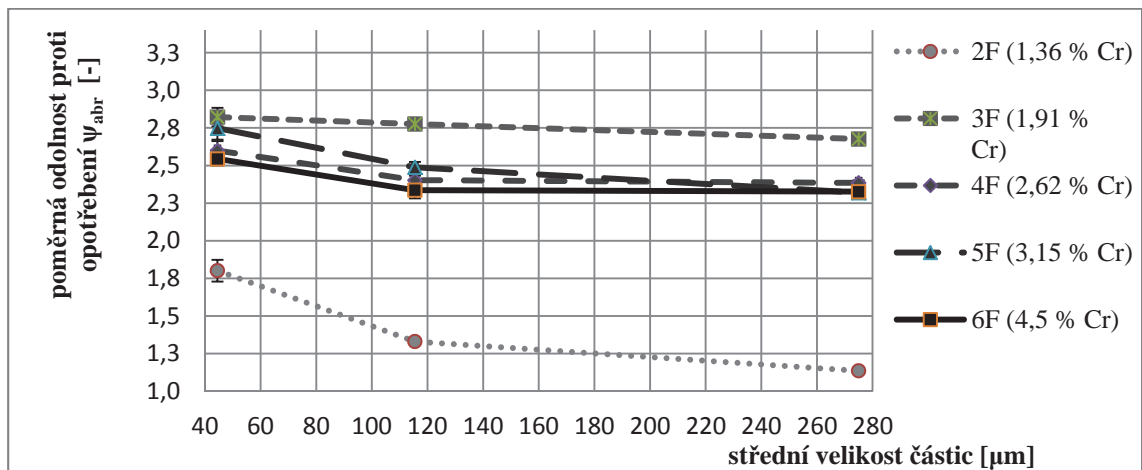
Obrázek G.4: Graf zobrazující vzorky sady D – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

## G.5 Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu



Obrázek G.5: Graf zobrazující vzorky sady E – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

## G.6 Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu



Obrázek G.6: Graf zobrazující vzorky sady F – závislost poměrné odolnosti proti opotřebení  $\psi_{abr}$  na střední velikosti částic brusného plátna.

## **Příloha H: Sady litin a jejich struktura**

### **H.1 Popis určených struktur vzorků litiny**

#### **Zkušební sada A – vzorky se změnou obsahu uhlíku**

- 1A** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum a martenzit.
- 2A** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit.
- 3A** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 4A** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 5A** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 6A** -----

#### **Zkušební sada B – vzorky litin se změnou obsahu křemíku**

- 1B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum a martenzit.
- 2B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit.
- 3B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 4B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 5B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.
- 6B** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

#### **8.1.1 Zkušební sada C – vzorky litin se změnou obsahu niklu**

- 1C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum a martenzit.
- 2C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit.
- 3C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 4C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.
- 5C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.
- 6C** Podedeutická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

### **8.1.2 Zkušební sada D – vzorky litin se změnou obsahu mědi**

**1D** -----

**2D** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit.

**3D** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**4D** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**5D** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

**6D** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů, a segregace mědi.

### **8.1.3 Zkušební sada E – vzorky se změnou obsahu manganu**

**1E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum a martenzit.

**2E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a grafit.

**3E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**4E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**5E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

**6E** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

### **8.1.4 Zkušební sada F – vzorky se změnou obsahu chromu**

**1F** -----

**2F** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a grafit.

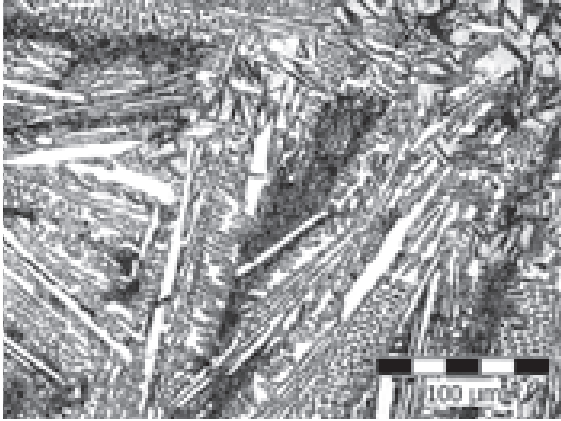
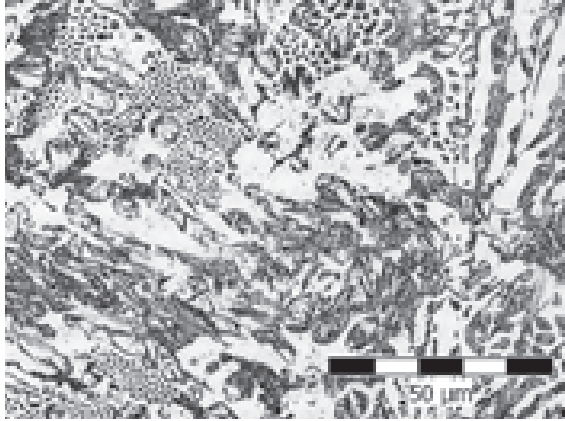
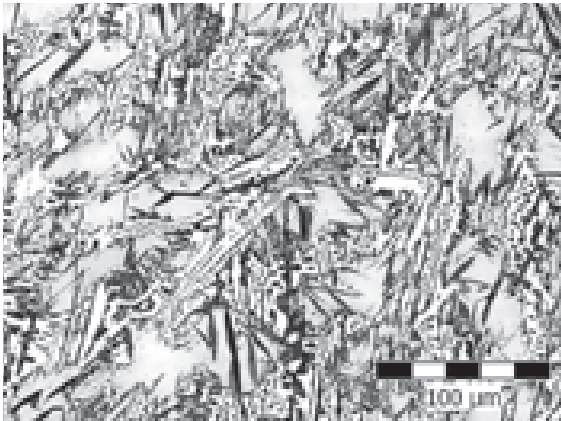
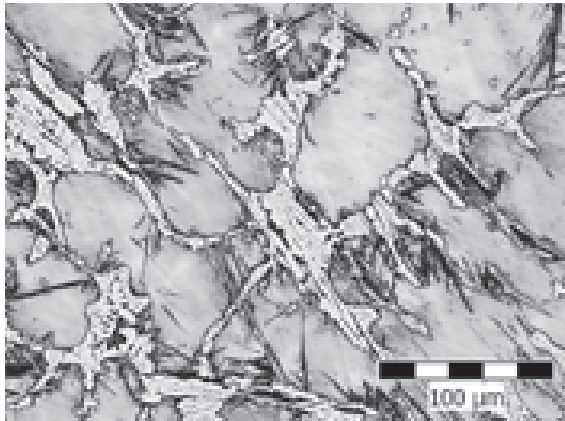
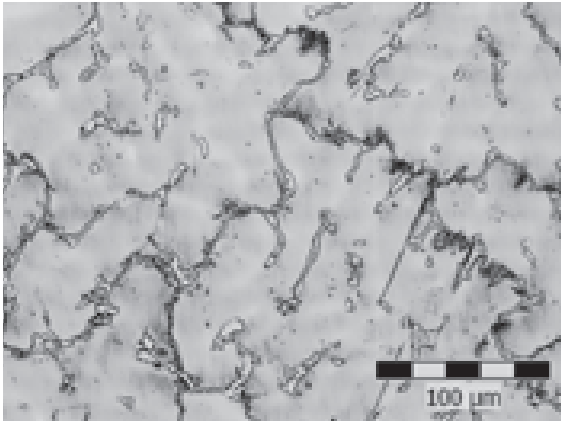
**3F** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**4F** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, martenzit a zbytkový austenit.

**5F** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

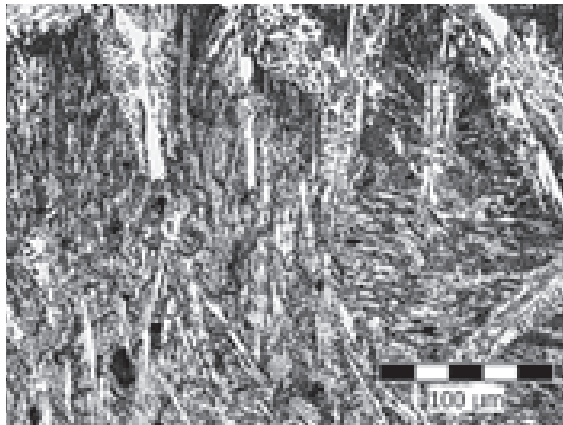
**6F** Podedutektická struktura litiny obsahující karbidické eutektikum, austenit a velmi malé množství martenzitu v blízkém okolí karbidických útvarů.

## H.2 Zobrazení mikrostruktury jednotlivých vzorků

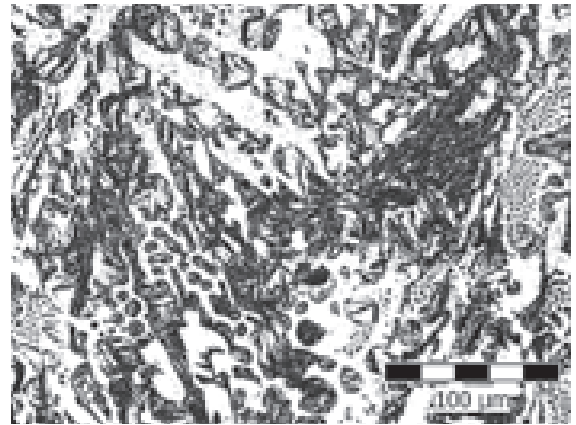
Sada A (uhlík C)	
	
<b>1A</b> (zvětšení: 200x; leptáno: Villela-Bain)	<b>2A</b> (zvětšení: 200x; leptáno: Nital (4 %))
	
<b>3A</b> (zvětšení: 200x; leptáno: Villela-Bain)	<b>4A</b> (zvětšení: 200x; leptáno: Villela-Bain)
	<p style="text-align: center;">-----</p>
<b>5A</b> (zvětšení: 200x; leptáno: Villela-Bain)	<b>6A</b> -----

Obrázek H.1: Vzorky sady A - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.

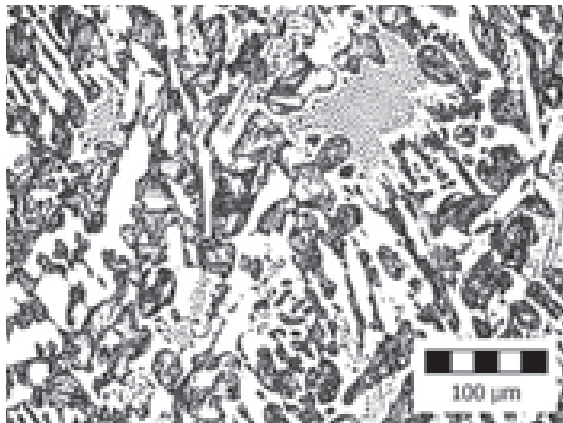
**Sada B (křemík Si)**



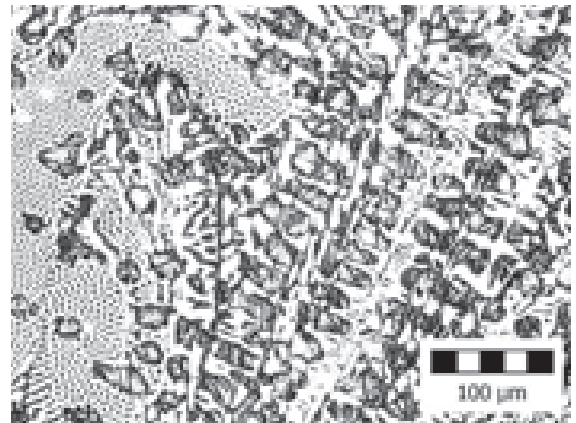
**1B** (zvětšení: 200x; leptáno: Nital (4 %))



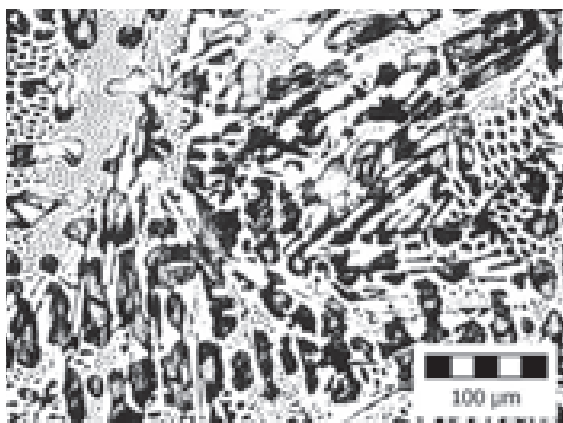
**2B** (zvětšení: 200x; leptáno: Nital (4 %))



**3B** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



**4B** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



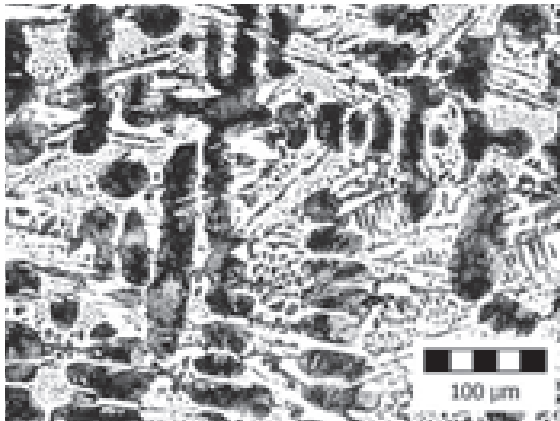
**5B** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



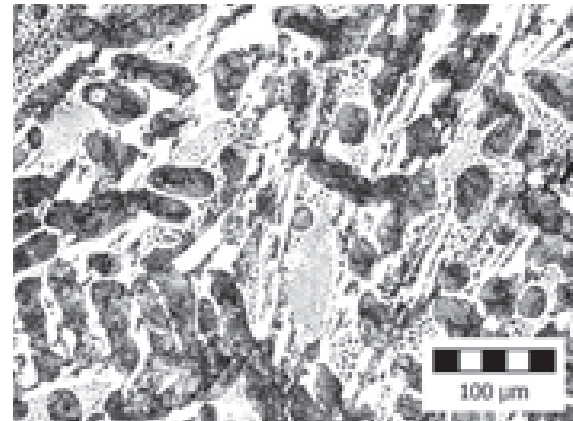
**6B** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))

Obrázek H.2: Vzorky sady B - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.

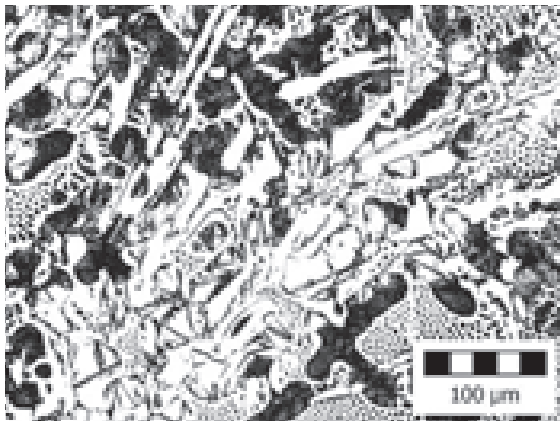
**Sada C (nikl Ni)**



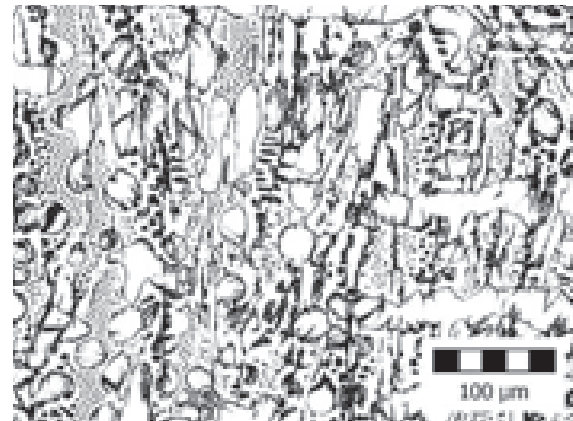
**1C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



**2C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



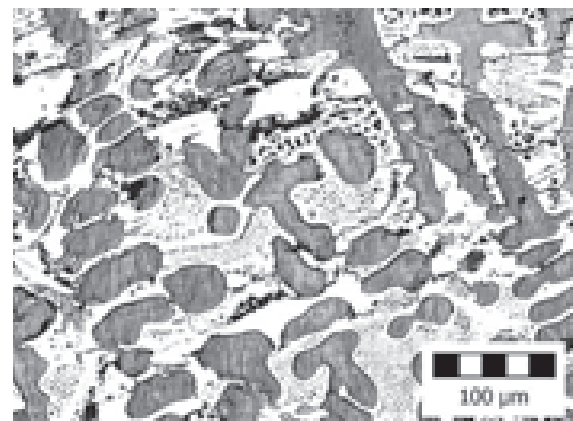
**3C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



**4C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



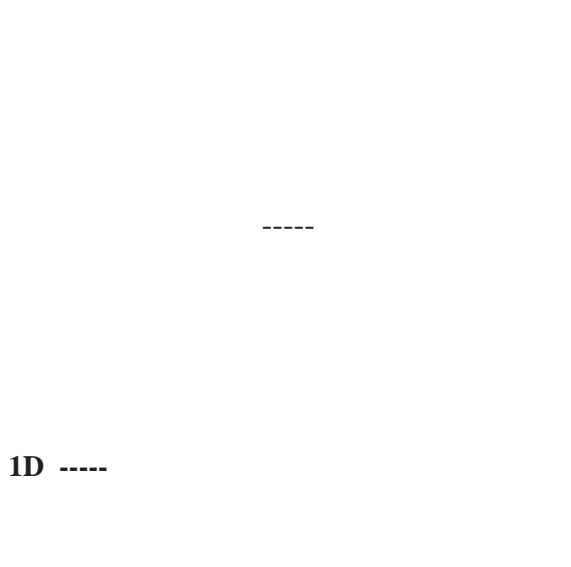
**5C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))



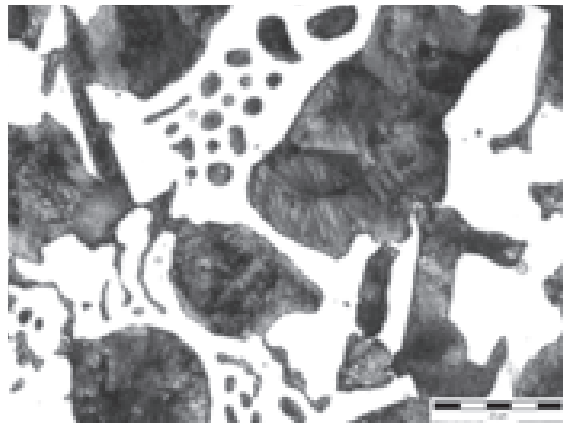
**6C** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))

Obrázek H.3: Vzorke sady C - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.

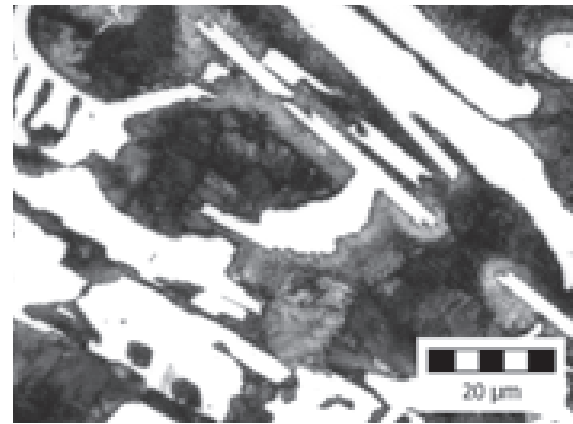
**Sada D (měď Cu)**



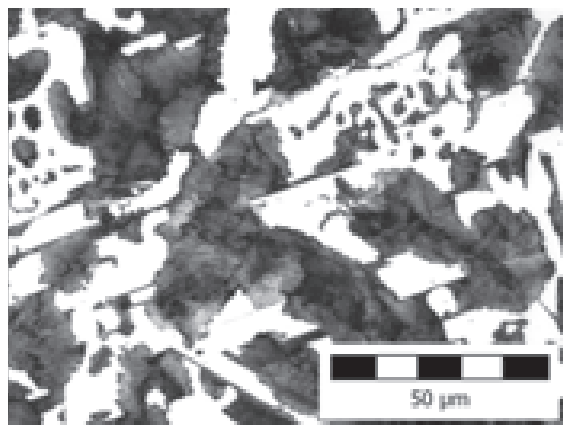
**2D** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



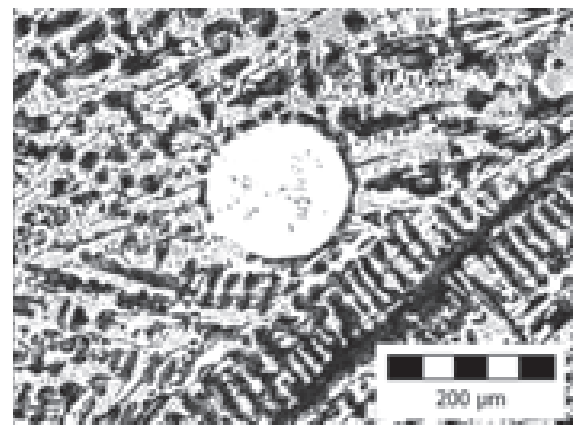
**3D** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



**4D** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



**5D** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))

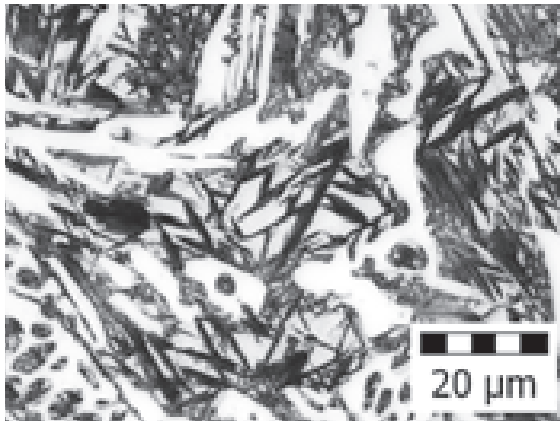


**6D** (zvětšení: 100x; leptáno: Nital (4 %))

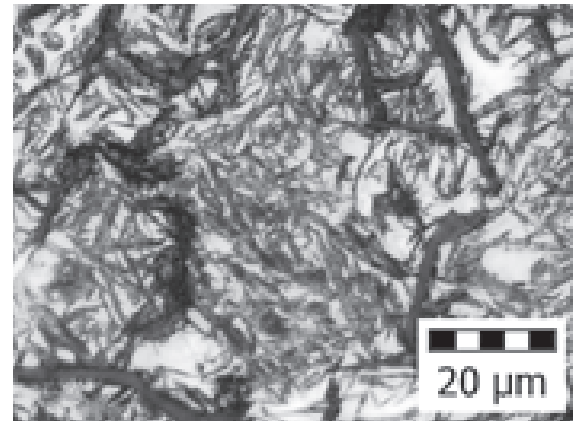
Obrázek H.4: Vzorky sady D - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.



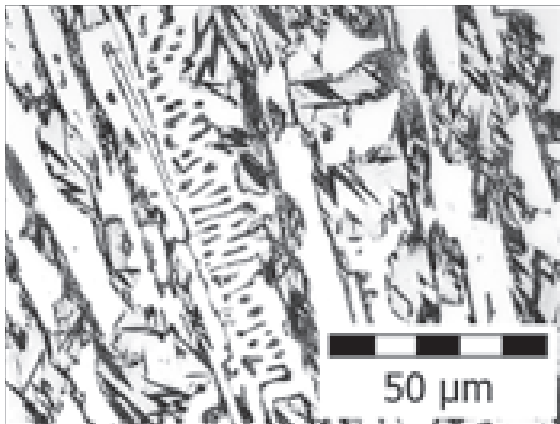
**Sada E (mangan Mn)**



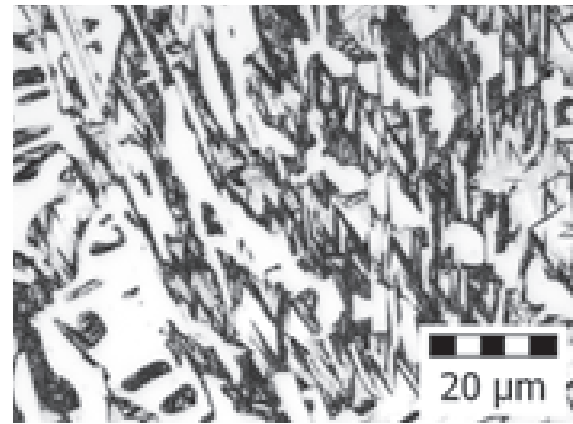
**1E** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



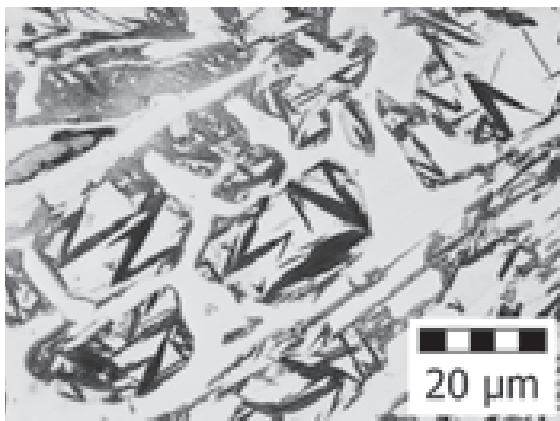
**2E** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



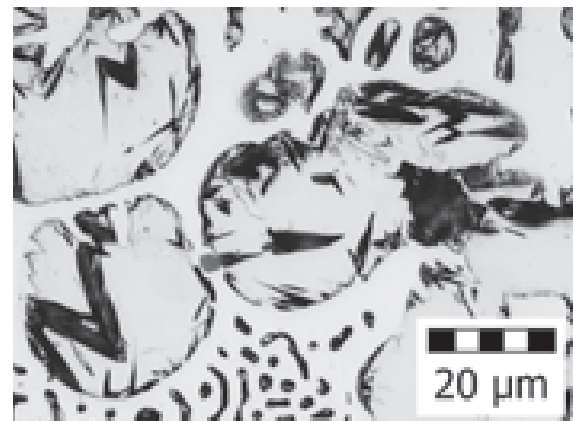
**3E** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



**4E** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



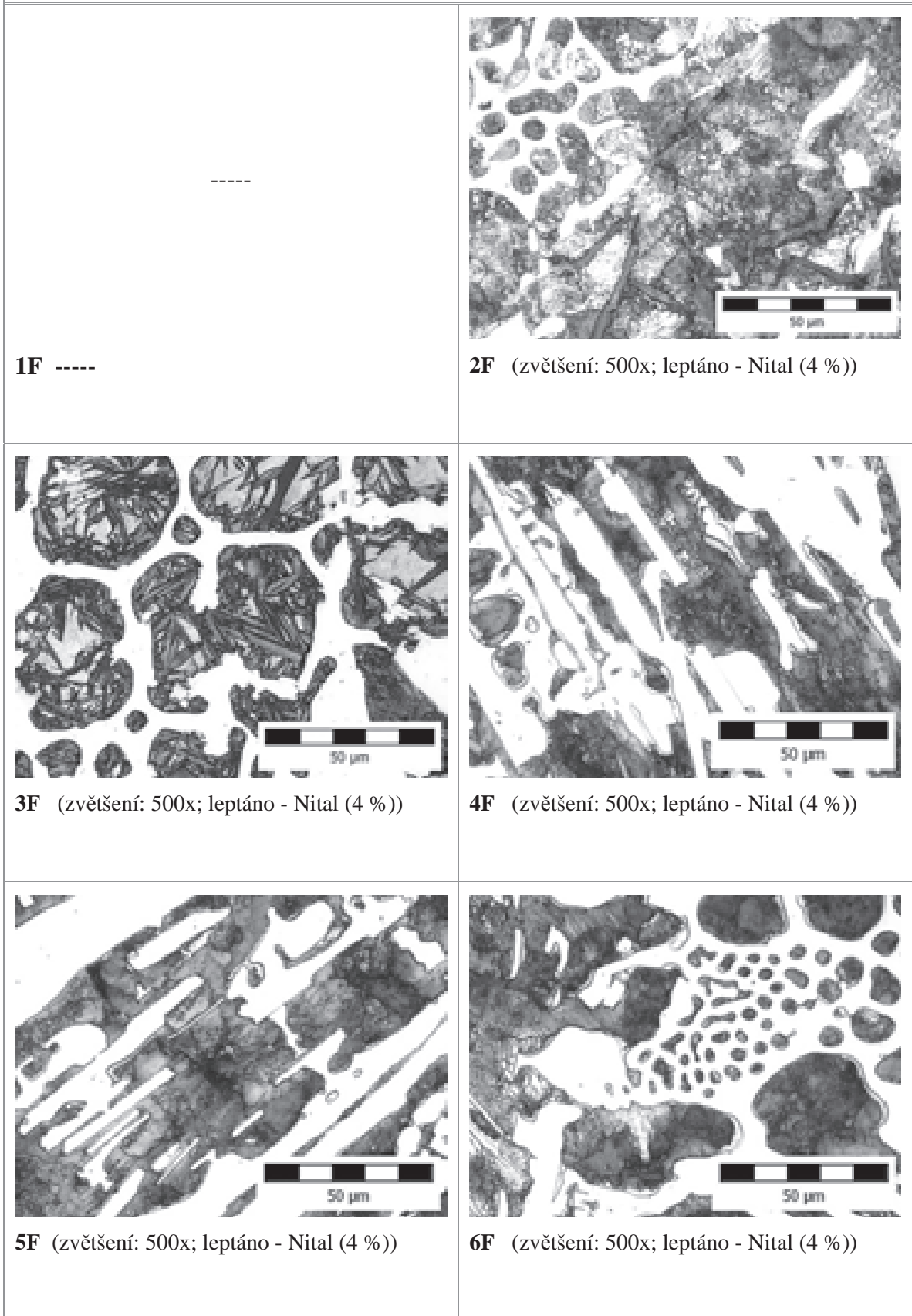
**5E** (zvětšení: 500x; leptáno: Nital (4 %))



**6E** (zvětšení: 500x; leptáno: Villela-Bain)

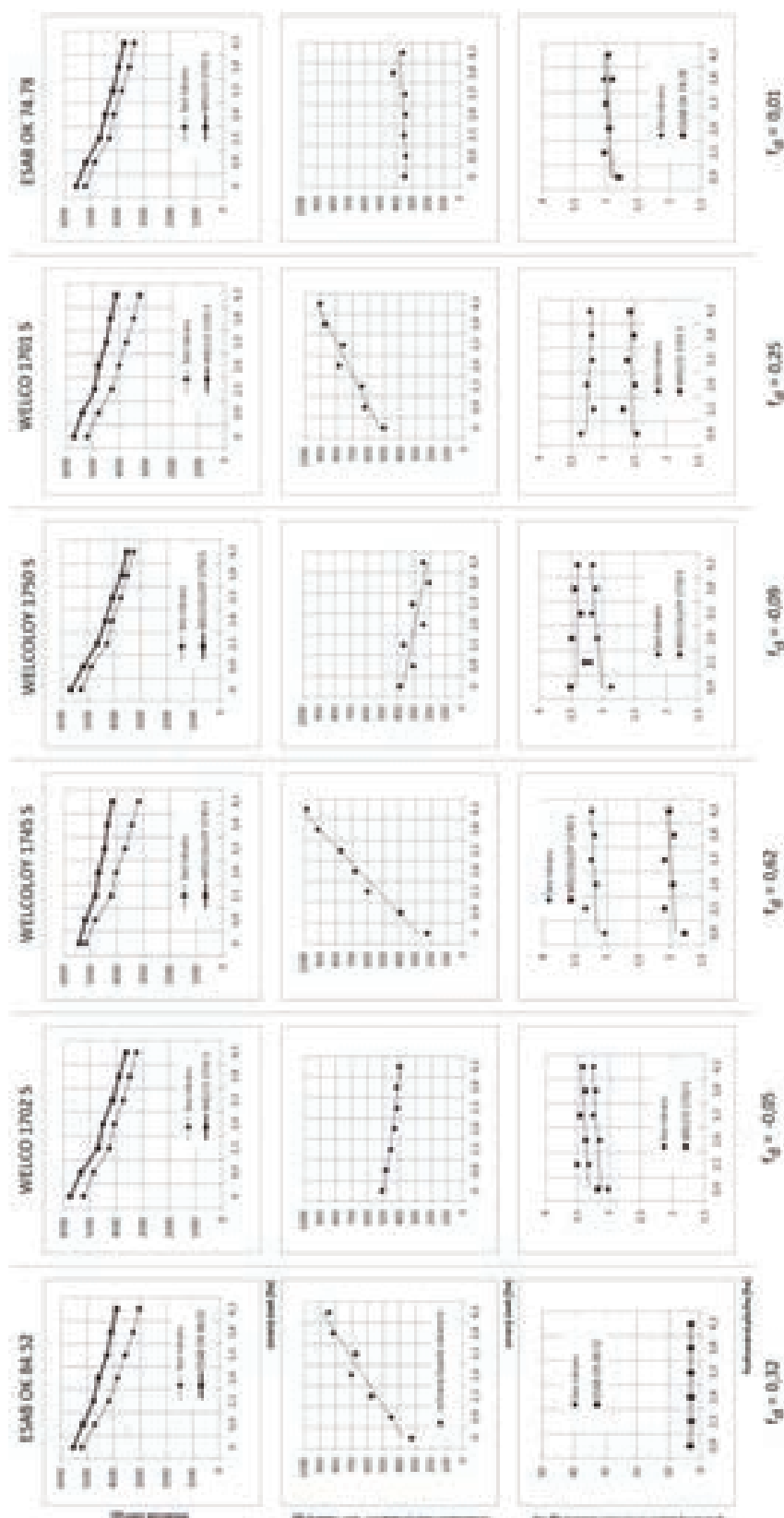
Obrázek H.5: Vzorčky sady E - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.

**Sada F (chrom Cr)**



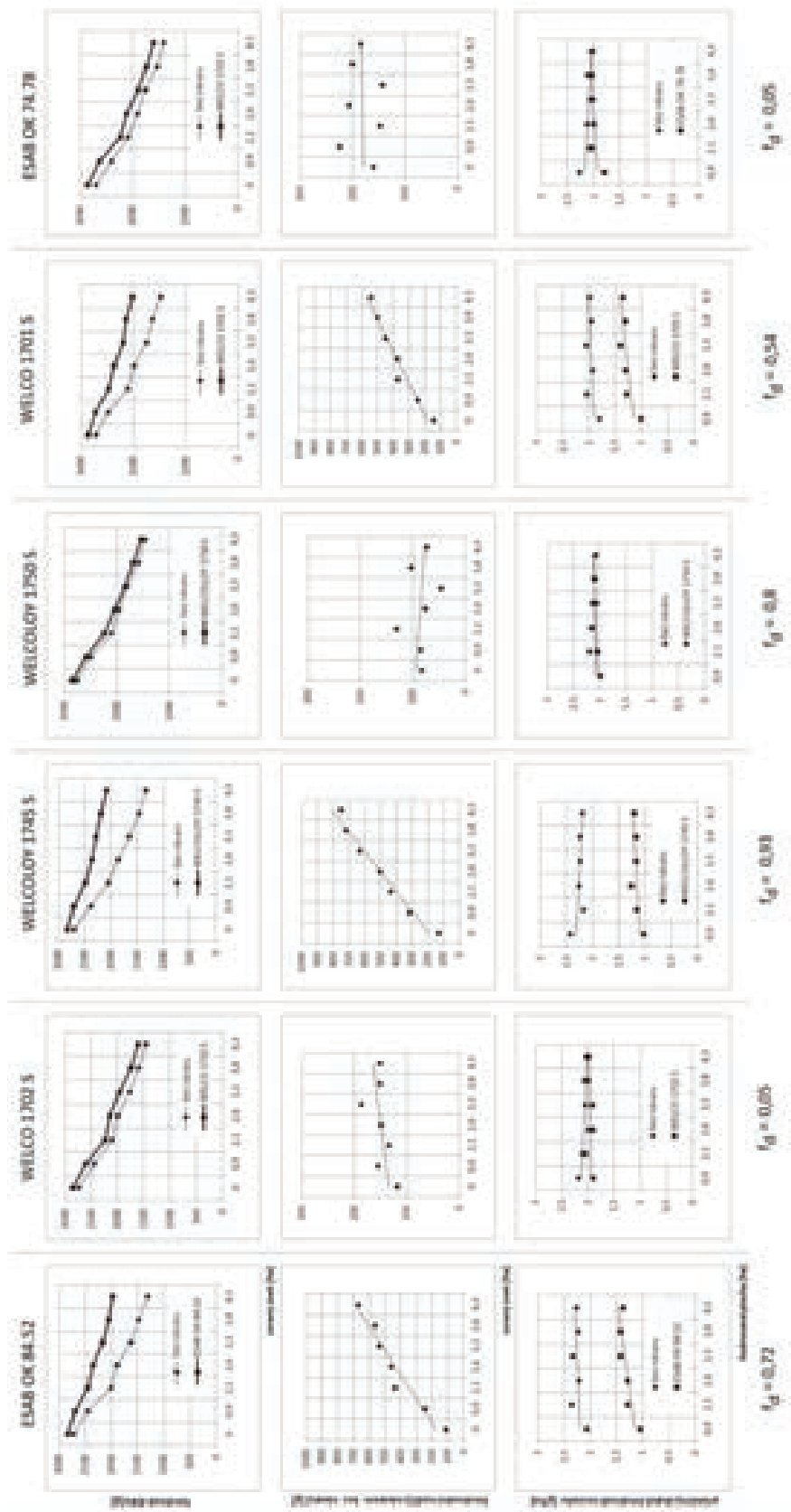
Obrázek H.6: Vzorok sady F - Mikroskopická struktura a metalografické hodnocení.

# Příloha I: Návary ostří – grafické zpracování naměřených hodnot.



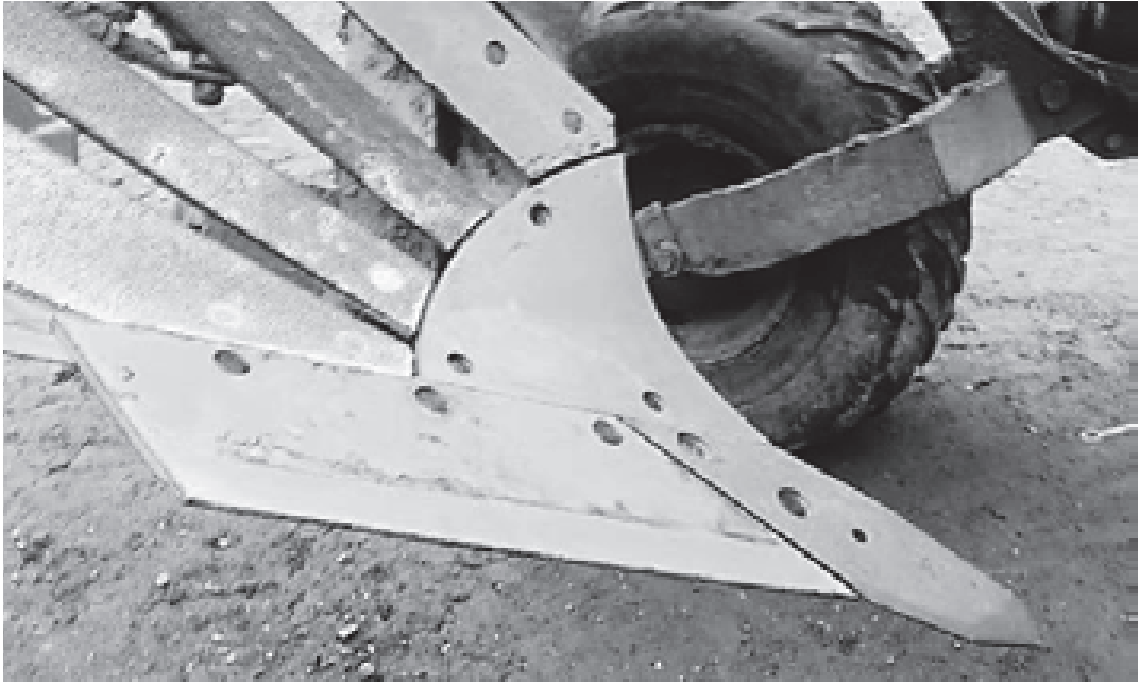
Obrázek I.1: Graf zobrazující návary ostří – grafické zpracování naměřených hodnot.

# Příloha J: Návary dlát – grafické zpracování naměřených hodnot

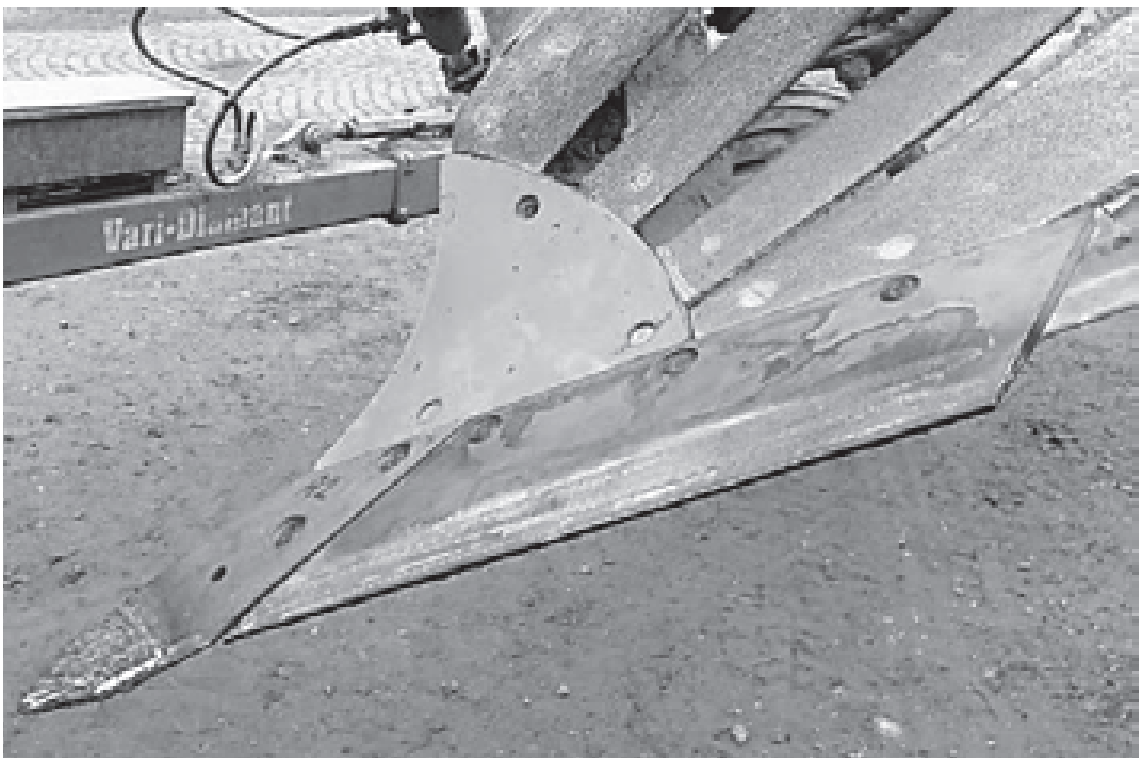


Obrázek J.1: Graf zobrazující návary dlát – grafické zpracování naměřených hodnot.

## Příloha K: Fotodokumentace provozních zkoušek



Obrázek K.1: Osazení novým dlátem a ostřím bez návarů.



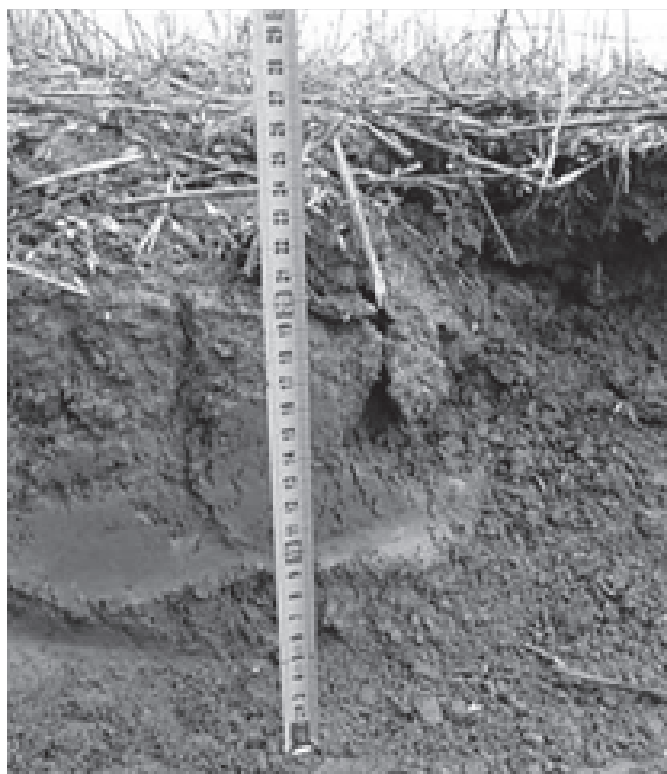
Obrázek K.2: Osazení novým dlátem a ostřím s návarů.



Obrázek K.3: Oblast provozních zkoušek (před započítím zkoušek).



Obrázek K.4: Průběh provozních zkoušek.

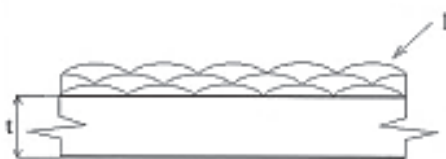


Obrázek K.5: Hloubka orby.



Obrázek K.6: Průběžná kontrola opotřebení ploch opatřených návary.

## Příloha L: Příklad schváleného postupu svařování (WPS)

Specifikace postupu svařování <i>Welding procedure specification</i>						Číslo WPS/WPS no. 076-1	Rev.: 1			
Předpis <i>Specification</i>			DLE ČSN EN ISO 15609		Číslo WPQR <i>WPQR no.</i>	042/07				
Metoda svařování <i>Welding method</i>		111	Ručně/manual		Typ spoje <i>Joint type</i>	Návr - vícevrstvý				
			Základní materiál <i>Base metal</i>		Viz svařovací plán / <i>See welding plan</i>		kto Viz svařovací plán / <i>See welding plan</i>			
			(Skupina dle ISO 15 608 <i>Group no. acc. to ISO 15 608</i> )		1		to		6	
Rozsah tloušťek [mm] <i>Thickness range [mm]</i>			1-4 mm		Min. prům. [mm] <i>Min. dia. [mm]</i>		N.A.			
Přidávaný materiál/Filér materiál <i>Skupina dle EN 439 (Značka)/Group acc. to EN 439 (name)</i>			A		WELCO 1701 S		B			
Ochranný plyn <i>Shielding gas</i>			Není - N/A		Tavidlo <i>Flux</i>			Není - N/A		
Poznámka: Přesný detail spoje viz. svařovací plán <i>Note: For joint details see welding plan</i>										
Vrstva <i>Layer no.</i>	Metoda <i>Method</i>	Přidávaný mat. <i>Filér mat.</i>	ø <i>[mm]</i>	Polarita <i>Polarity</i>	I <i>[A]</i>	U <i>[V]</i>	Rychlost svařování <i>Travel speed [cm/min]</i>	Tepelný příkon <i>Heat input [kJ/cm]</i>		
1-n	111	A	3,2	DC+	100-160	N/A				
Technika/technique										
Odstranění kofene <i>Gauging</i>		Příprava a čištění svařové plochy <i>Preparation and cleaning</i>			Čištění svaru <i>Weld cleaning</i>		Další <i>Other</i>			
Není - N/A		Broušení, kartáčování/grinding, brushing			Broušení, kartáč/grinding, brushing					
Rozkvy <i>Weave</i>		Údaje pro pulsní svařování <i>Pulse welding data</i>			Předfuk		Zapálení obločku			
Max 5mm		Horní proud <i>Upper current</i>		Spodní proud <i>Lower current</i>		N/A s		N/A A N/A s		
		N/A A N/A s		N/A A N/A s		Spoj trubka-trubkovnice/tube-to-tubeheet				
Průměr wolframové elektrody <i>Diameter of tungsten electrode</i>		Ochrana kofene <i>Backing gas</i>			Místek <i>Tube distance</i>		Průměr trubky <i>Tube diameter</i>		Síla stěny [mm] <i>Wall thickness</i>	
Není - N/A		Není - N/A			Min. N/A mm		Min. N/A mm		N/A - N/A	
Polohy svařování: <i>Positions:</i>		PA			Tloušťka trubkovnice <i>Tubeheet thickness</i>		Min		N/A mm	
Tepelné zpracování/heat treatment					Rozmístění trubek <i>Pitch</i>		Není - N/A			
Předehřev <i>Pre-heat</i>		Mezivrstevná teplota <i>Interpass</i>		Dohřev <i>Post-weld heat maintenance</i>		Žhání na snížení pruhů <i>Post-weld heat treatment</i>		Přesutí el. <i>Redrying</i>		
Není - N/A		Max. 150°C		N/A °C / N/A hod		N/A °C / N/A hod		Není - N/A		
Poznámky <i>Note</i>										
Výrobce <i>Manufacturer</i>			Připravil <i>Prepared by</i>		Datum <i>Date</i>		Schválil <i>Approved by</i>		Datum <i>Date</i>	
STROJON, spol.s r.o. Průmyslová ul 53301 Pardubice			Ing. Andrej Mích, Ph.D		5.12.2012		Ing. Andrej Mích, Ph.D		5.12.2012	



## **Příloha M: Popis a charakteristika půdních podmínek provozních zkoušek [117]**

### **Orografické a hydrologické poměry**

Geomorfologicky je oblast provozních podmínek charakterizována takto:

- provincie: ČESKÁ VYSOČINA;
- subprovincie: Poberounská soustava;
- oblast: Brdská oblast;
- celek: Křivoklátská vrchovina;
- podcelek: Lánská pahorkatina;
- okrsek: Klíčavská pahorkatina.

Klíčovská pahorkatina je převážně tvořená proterozoickými břidlicemi a drobnými s vložkami spilitů, žil křemenného porfyru. Je to značně členitá pahorkatina s erozně denudačním reliéfem a se zbytky zarovnaného povrchu rozčleněnými údolími.

### **Geologické poměry**

Na území Středočeského kraje – Lány se vyskytují permokarbonské horniny (pískovce, slepence, jílovce), mezozoické horniny (pískovce, jílovce) a proterozoické horniny assyntsky zvrásněné s různě silným variským přepracováním (břidlice, fylity, svory až pararuly). Geologické podmínky území se nacházejí na hranici Kladenské části Středočeské pánve. Podmínky jsou zde vyplněny karbonským spodním šedým souvrstvím, jehož podloží tvoří proterozoické fylity.

### **Pedologické poměry**

Nejrozšířenějším půdním typem v oblasti je kambizem typická mezotrofní. Tato půda je středně bohatá, písčitohlinitá až hlinitopísčítá půda s humózním horizontem o mocnosti kolem 20 cm. Půdní profil je hnědé barvy nebo okrové se značnou příměsí různých druhů malých štěrků. Geologickým podložím na území jsou především spility, porfyry, porfyrity. V oblasti se nachází kambizem, která je typická oligotrofní a je charakteristická nepatrným humózním horizontem se světlým zbarvením. Geologickým podkladem vrstev jsou nejčastěji algonkické břidlice. Kambizem eutrická je půda, která má nepatrnou vrstvou pokryvného humusu a v důsledku rychlého zvětrávání, která se mísí s minerální zeminou.

## Klimatické poměry

Oblast Lány spadá z hlediska klimatické charakteristiky do mírně teplé oblasti třídy MT11. Oblast je charakteristická suchým, dlouhým a teplým létem. Nejvíce srážek přichází ve vegetačním období. Zima je mírně teplá a krátká a kdy sněhová pokrývka v dnešní době má velmi krátké trvání.

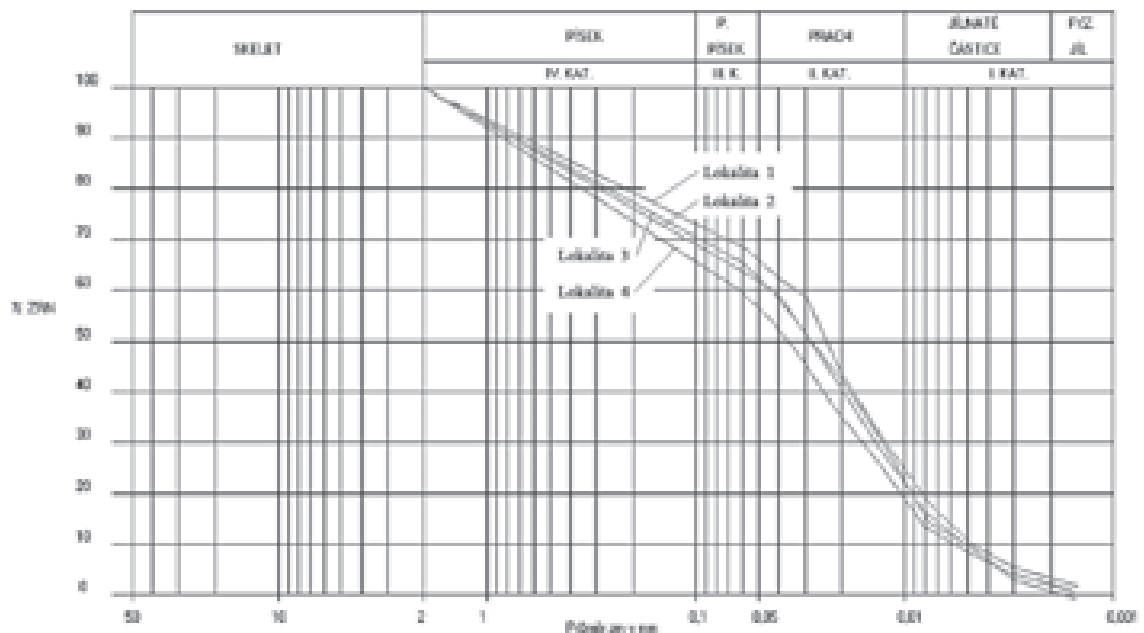
Celkové klimatické podmínky v oblasti by bylo možné shrnout jako mírně suché a mírně teplé s úhrnem srážek okolo 510 mm a průměrnou roční teplotou 7,1 – 8,9 °C.

ZRNITOSTNÍ ČÁRA:			
Místní druh:	Hlína jemnozrnná	Zrnitostní kategorie:	
Lokalita:	1	< 0,002 mm (Fyz. síl)	3,34 %
Číslo sondy:		< 0,01 mm (I. Kat.)	24,77 %
Hloubka:	0-10 cm	0,01 - 0,05 mm (II. Kat.)	40,2 %
		0,05 - 0,1 mm (III. Kat.)	3,14 %
		0,1 - 2 mm (IV. Kat.)	28,87 %

ZRNITOSTNÍ ČÁRA:			
Místní druh:	Hlína jemnozrnná	Zrnitostní kategorie:	
Lokalita:	2	< 0,002 mm (Fyz. síl)	2,22 %
Číslo sondy:		< 0,01 mm (I. Kat.)	22 %
Hloubka:	0-10 cm	0,01 - 0,05 mm (II. Kat.)	40,42 %
		0,05 - 0,1 mm (III. Kat.)	8,1 %
		0,1 - 2 mm (IV. Kat.)	29,47 %

ZRNITOSTNÍ ČÁRA:			
Místní druh:	Hlína jemnozrnná	Zrnitostní kategorie:	
Lokalita:	3	< 0,002 mm (Fyz. síl)	0,72 %
Číslo sondy:		< 0,01 mm (I. Kat.)	22,59 %
Hloubka:	0-10 cm	0,01 - 0,05 mm (II. Kat.)	39,88 %
		0,05 - 0,1 mm (III. Kat.)	3,32 %
		0,1 - 2 mm (IV. Kat.)	33,89 %

ZRNITOSTNÍ ČÁRA:			
Místní druh:	Hlína jemnozrnná	Zrnitostní kategorie:	
Lokalita:	4	< 0,002 mm (Fyz. síl)	1,91 %
Číslo sondy:		< 0,01 mm (I. Kat.)	19 %
Hloubka:	0-10 cm	0,01 - 0,05 mm (II. Kat.)	37,5 %
		0,05 - 0,1 mm (III. Kat.)	9,19 %
		0,1 - 2 mm (IV. Kat.)	34,24 %



Obrázek M.1: Zrnitostní čáry vzorků půdy v dané oblasti.

## Příloha N: Statistické zpracování naměřených hodnot

V rámci experimentálních měření provedených v souvislosti s předkládanou disertační prací bylo naměřeno množství hodnot. Dané hodnoty bylo nutné nejprve analyzovat a až na základě provedených analýz bylo možné vyvodit příslušné závary. Tato příloha si klade za cíl předložit přehled statistických nástrojů použitých v dané práci a identifikovat místa, kde byly tyto nástroje použity. Vytvoření funkčních rovnic bylo provedeno v programu STATISTICA.

### N.1 Matematické vzorce použité pro zpracování naměřených hodnot [116]

#### Aritmetický průměr

Aritmetický průměr je nejznámějším a nejužívanějším typem průměru. V této práci je použita forma nazývaná „prostý aritmetický průměr“. Jeho výpočet nepředpokládá předběžné uspořádání hodnot.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{N.1})$$

#### Rozptyl a směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka definuje, do jaké míry se od sebe dané soubory hodnot liší. Pokud je soubor hodnot podobný, lze hovořit o tom, že odchylka je malá a naopak velká směrodatná odchylka velká signalizuje velké odlišnosti v souboru hodnot.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (\text{N.2})$$

Teorie statistiky nabízí výrazně větší množství statistických nástrojů, od těch jednodušších (jako například vzorec pro výpočet mediánu) až po složité testy určené k odhalení extrémních a nekonzistentních hodnot (například Grubbsův nebo Dixonův test extrémních odchylek). Použití těchto pokročilejších nástrojů je ale podmíněno jistou minimální množinou statistických dat, na které je daný nástroj aplikován. Například pokud je měření opakováno dvakrát, je výpočet aritmetického průměru smysluplný, zatímco stanovení mediánu nové poznatky nepřinese. Stejně tak pokud se měření opakuje 3x nemá použití již zmiňovaného Grubbsova testu extrémních

odchylek příliš velký smysl. Následující tabulka uvádí přehled o množinách dat, která byla v rámci jednotlivých experimentů naměřena a zároveň uvádí, který nástroj byl pro jejich analýzu použit.

Tabulka N.1: Přehled použití statistických nástrojů.

Název měření	Počet měřených vzorků	Počet opakování měření na jednom vzorku	Statistický nástroj	
			Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka
Sady litin				
Chemické složení	34	2	✓	
Tvrдость HV30	34	3	✓	✓
Poměrná odolnost proti opotřebení	34	3	✓	✓
Teploty při abrazivním opotřebení	34	5	✓	
Měření mikrotvrlosti	5 (sada A)	15 (3x na složku)	✓	

Tabulka N.2: Přehled použití statistických nástrojů – provozní zkoušky.

Název měření	Počet měřených vzorků	Počet opakování měření na jednom vzorku	Statistický nástroj	
			Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka
Návarové materiály				
Chemické složení	8	2	✓	
Tvrдость HV30	7	3	✓	✓
Poměrná odolnost proti opotřebení	7	3	✓	✓
Plužní dláta a ostří				
Chemické složení	7	2	✓	
Tvrдость HV30	7	3	✓	✓
Poměrná odolnost proti opotřebení	7	3	✓	✓

# Příloha O: Cenová nabídka na dodávku odlitků ostří ze slitiny 5A



**CKD Kutná Hora**  
*Development of metal castings*

phone: +420 327 506 118  
 fax: +420 327 506 333  
 e-mail: info@ckd.cz

Karlovo n. p. 187  
 324 01 Kutná Hora  
 Czech Republic  
 The company is registered in the Business Register of the Municipal Court in Prague, section B, entry 234.

## Nabídka pro disertační práci

Jiří Cieslar

Datum: 11.1.2016

Předmět: **Nabídka č. 1101/2016**

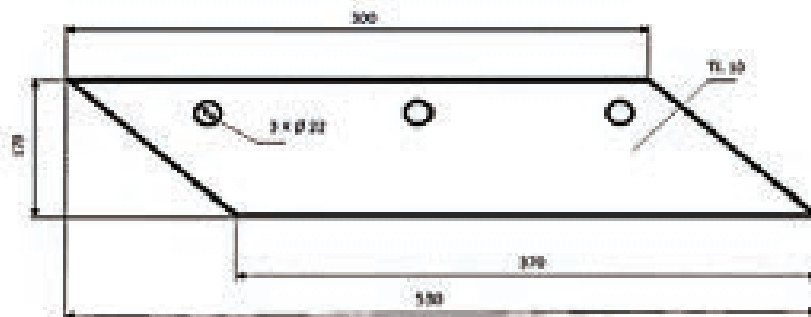
Vážený pane Cieslare,

na základě Vaší poptávky Vám zasíláme následující nabídku na výrobu tepelně zpracovaných odlitků.

Pozice	Název	Výkres č.	Množství	Hmotnost	Cena odlitku	Cena odlitku
			Kusů/k	kg	CZK/KG	CZK/PC
1	Přiloha čepce	5A	5000	5,2	37,5	187,5

Materiál – chemická slitina

Označení voorku	Chemické složení (hm. %)								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	P	Mo	Fe
5A	1,75	1,35	0,72	2,15	3,74	0,12	0,01	0,05	90,15



Ceny byly stanoveny EXW – Kutná Hora, Česká Republika bez DPH a vztahují se na specifikované technické - dodací podmínky.

V případě dramatického navýšení cen vstupního materiálu, energií a dalších o více než 5 % si vyhraujeme právo zahrnout dodatečné náklady na materiál.

Tato nabídka platí pouze pro disertační práci: " Studium faktoriál ověřujících odolnost proti otopření laserem při materiálu"

Š. Šedivý,  
 Hana Ryšáková  
 Sales Manager  
 CKD Kutná Hora A.S.  
 Phone: +420 327 506 333  
 E-mail: hana.rysakova@ckd.cz



ČKD Kutná Hora, a.s.  
 Karlovo n. p. 187, 324 01 Kutná Hora  
 IČ: 00000011, DIČ: CZ00000011  
 324 01 Kutná Hora  
 podnikový úřad