



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VYSOCE LEGOVANÉ LITINY NI-RESIST A JEJICH VLASTNOSTI

HIGH-ALLOYED CAST IRONS NI-RESIST AND THEIR PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Anna Matulová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Anna Matulová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Vysoce legované litiny Ni–resist a jejich vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysoce legované austenitické litiny typu Ni–resist vykazují řadu specifických vlastností, díky nimž jsou v praxi používány v mnoha aplikacích. Mohou sloužit jako materiály korozivzdorné v různých prostředích, žárovzdorné i žárovevné a v některých případech i jako otěruvzdorné. Právě na tuto aplikaci bude zaměřena především praktická část diplomové práce.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je sestavit literární rešerši shrnující vlastnosti litin typu Ni–resist a jejich použití v praxi. Praktická část bude zaměřena na srovnání odolnosti proti opotřebení u několika značek litin Ni–resist mezi sebou i se vhodně zvoleným referenčním materiálem.

Seznam doporučené literatury:

MORRISON, J.C., R. COVERT, W. SPEAR. Ni–Resist and Ductile Ni–Resist Alloys. Nickel Development Institute, 1998. Reference Book Series No. 11018.

SÝKORA, P. Metalurgie výroby austenitické litiny s kuličkovým grafitem. Slévárenská ročenka, 2000, p. 141 – 156. ISBN 80-238-5151-9.

APTEKAR, L.I., YU.E. ABRAMENKO. Structure and properties of austenitic nickel cast irons. Metal Science and Heat Treatment, 1977, vol. 19, no. 4, p. 280 – 292. ISSN 0026-0673 .

ROHRING, K. Austenitische Gusseisen. Konstruieren und Giessen 2004, 29 (2), s. 2 – 33. ISSN 0341-6615.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vysoce legovanými litinami Ni-resist a jejich vlastnostmi. V teoretické části je popsáno jejich chemické složení a jednotlivé prvky, ze kterých se tyto litiny skládají, jejich charakteristické vlastnosti a příklady použití v praxi. Dále se práce zaměřuje na opotřebení materiálů, především pak na odolnost proti abrazivnímu opotřebení, neboť litiny typu Ni-resist vykazují řadu specifických vlastností, jako je korozivzdornost, žárovzdornost i žárovevnost a také otěruvzdornost, na kterou je tato diplomová práce zaměřena. Pozornost je věnována i dalším otěruvzdorným materiálům, jelikož jsou v praktické části srovnávány vzorky z různých materiálů, za účelem určení vhodnějšího materiálu pro výrobu deskových odlitků do vytloukacích roštů.

Klíčová slova

Ni-resist, austenitická litina, opotřebení, odolnost proti abrazivnímu opotřebení, otěruvzdornost

Abstract

This master's thesis deals with high-alloyed Ni-Resist cast irons and their properties. The theoretical part describes their chemical composition and individual elements from which are these cast irons composed, their characteristic properties and examples of use in practice. Furthermore, the work focuses on the wear of materials, especially on abrasive wear, because Ni-Resist casts iron exhibit a number of specific properties, such as corrosion resistance, refractoriness and heat resistance and also abrasion resistance, on which is this thesis focused. Attention is also paid to other abrasion resistant materials, because specimens from different materials are compared in the practical part in order to find a more suitable material for the production of plate castings into the shakeouts.

Keywords

Ni-Resist, austenitic cast iron, wear of materials, abrasive wear resistance testing, wear resistance

Bibliografická citace

MATULOVÁ, Anna. *Vysoce legované litiny Ni-resist a jejich vlastnosti* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117035>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....

Bc. Anna Matulová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za veškerou odbornou pomoc, ochotu, vstřícnost a za poskytnutí cenných rad při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

Obsah

Úvod	10
1 Chemické složení	11
1.1 Nikl	12
1.2 Uhlík	13
1.3 Křemík	14
1.4 Chrom	14
1.5 Mangan	14
1.6 Měď	15
1.7 Fosfor	15
1.8 Niob	15
1.9 Molybden	15
1.10 Hořčík	15
2 Vlastnosti a použití austenitických litin	17
2.1 Mechanické vlastnosti	17
2.1.1 Mechanické vlastnosti za normálních teplot	17
2.1.2 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot	19
2.1.3 Mechanické vlastnosti za snížených teplot	19
2.2 Technologické vlastnosti	19
2.3 Fyzikální vlastnosti	20
2.4 Použití	20
3 Opotřebení materiálů	23
3.1 Základní mechanizmy opotřebení	23
3.1.1 Adhezivní	23
3.1.2 Abrazivní	24
3.1.3 Erozivní	25
3.1.4 Kavitační	25
3.1.5 Únavové	26
3.1.6 Vibrační	26
3.2 Zkoušení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení	27
3.2.1 Zkouška opotřebení na brusném plátně	27

3.2.2	Zkouška opotřebení na pryžovém kotouči	29
3.2.3	Zkouška opotřebení v Bondově bubnovém přístroji	29
3.2.4	Zkouška opotřebení v brusné nádobě	30
3.3	Abrazivní opotřebení austenitických litin.....	31
3.4	Další otěruvzdorné materiály.....	31
3.4.1	Bílé otěruvzdorné litiny.....	31
3.4.2	Austenitické korozivzdorné oceli	33
4	Experimentální část	35
4.1	Použité materiály	35
4.2	Měření otěruvzdornosti.....	36
4.2.1	Příprava vzorků	36
4.2.2	Zkouška opotřebení na brusném plátně.....	37
4.2.3	Výsledky měření	39
4.2.4	Měření měrné hmotnosti	43
4.2.5	Výpočet poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení	44
4.3	Měření tvrdosti	45
4.4	Metalografický rozbor	46
4.4.1	Výroba metalografických výbrusů	46
4.4.2	Analýza mikrostruktury.....	48
4.5	Elektronový mikroskop	55
4.6	Ekonomické zhodnocení.....	59
4.6.1	Vsázka Ni-resist	59
4.6.2	Vsázka Cr-Ni ocel	60
4.6.3	Hodnocení výsledků	60
	Závěr	61
	Seznam použitých zdrojů a literatury	63
	Seznam obrázků a tabulek	66

Úvod

Austenitické litiny patří mezi vysokolegované litiny. Hlavním legujícím prvkem je nikl, jehož koncentrace se pohybuje v rozsahu přibližně 12 až 37 %. Tyto litiny vyvinula americká společnost International Nickel v letech 1925 až 1930 a označila je obchodním názvem Ni-Resist. Bylo zjištěno, že při vysokém obsahu niklu obsahují litiny austenitickou kovovou matici i za pokojové a nižší teploty, jelikož nikl rozšiřuje teplotní rozsah existence austenitu. A právě díky stabilitě austenitické matrice v širokém teplotním pásmu je umožněno použití těchto slitin při nízkých i vysokých teplotách. Strukturu tvoří homogenní austenitická matrice a grafit. Austenitické litiny obsahující chrom mají ve struktuře ještě k tomu karbidy. Vysoce legované litiny Ni-resist se dělí na dvě základní skupiny – s lupínkovým a s kuličkovým grafitem, podle toho, v jaké podobě je grafit v matrici vyloučen. Austenitická litina s kuličkovým grafitem byla vyvinuta na počátku padesátých let minulého století [1], [2], [3], [4].

Austenitické litiny se řadí mezi materiály s vysokou cenou vsázkových surovin. To je ovlivněno především vysokou cenou niklu. I když jsou materiálové náklady na výrobu odlitků z těchto litin výrazně vyšší než u nelegovaných litin, význam jejich použití je nezanedbatelný. Jsou charakteristické svými specifickými vlastnostmi, kterými mohou konkurovat austenitickým korozivzdorným ocelím nebo žárovevným ocelím a zároveň mají výborné slévárenské vlastnosti, kterými se blíží běžným grafitickým litinám. Jejich typickými vlastnostmi jsou např. výborná korozivzdornost, žárovzdornost i žárovevnost, či některé význačné fyzikální vlastnosti např. nemagnetičnost. Dále jsou odolné proti opotřebení, teplotním šokům, korozi v mořské vodě, mají vysokou tepelnou stabilitu, tažnost, zaručené vlastnosti při nízkých teplotách atd. Ve srovnání s legovanými oceli mají odlitky lepší kvalitu povrchu, z čehož plyne následná nižší čistírenská pracnost. V odlitcích s rozdílnou tloušťkou stěn vznikají menší zbytková pnutí, z čehož plyne menší náchylnosti materiálu na vznik trhlin v přechodech tloušťky stěn [1], [3], [4], [5].

1 Chemické složení

Austenit je v čistém železe a ve slitinách Fe-C stabilní jedinež za vyšších teplot. Za normálních teplot totiž dochází k transformaci austenitu. Pro zajištění stabilní austenitické matrice za nízkých teplot je nutný vysoký obsah prvků stabilizujících austenit, jako je nikl, mangan nebo měď. Chemické složení litiny Ni-resist závisí na jednu stranu na požadavku stabilní austenitické matrice a na druhou stranu na požadovaných vlastnostech [1], [3], [6].

Jednotlivé druhy austenitických litin lze rozdělit dle normy ČSN EN 13835 (viz tab. 1). V běžné praxi jsou také využívány americké normy ASTM nebo německé normy DIN 1694. Nejstarší norma, která se zaměřuje na austenitické litiny je norma ASTM A 439 (viz tab. 2 a 3) [4], [5].

Tab. 1 Chemické složení austenitické litiny v [hmot. %] dle normy ČSN EN 13835 [3]

Značení	C max.	Si	Mn	Ni	Cr	P max.	Cu
EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	3,0	1,0–2,8	0,5–1,5	13,5–17,5	1,0–3,5	0,25	5,5–7,5
EN-GJSA-XNiCr20-2	3,0	1,5–3,0	0,5–1,5	18,0–22,0	1,0–3,5	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiMn23-4	2,6	1,5–2,5	4,0–4,5	22,0–24,0	0,2 max.	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiCrNb20-2	3,0	1,5–2,4	0,5–1,5	18,0–22,0	1,0–3,5	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNi22	3,0	1,0–3,0	1,5–2,5	21,0–24,0	0,5 max.	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNi35	2,4	1,5–3,0	0,5–1,5	34,0–36,0	0,2 max.	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	2,0	4,0–6,0	0,5–1,5	34,0–36,0	1,5–2,5	0,08	0,5 max.
EN-GJLA-XNiMn13-7	3,0	1,5–3,0	6,0–7,0	12,0–14,0	0,2 max.	0,25	0,5 max.
EN-GJSA-XNiMn13-7	3,0	2,0–3,0	6,0–7,0	12,0–14,0	0,2 max.	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiCr30-3	2,6	1,5–3,0	0,5–1,5	28,0–32,0	2,5–3,5	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	2,6	5,0–6,0	0,5–1,5	28,0–32,0	4,5–5,5	0,08	0,5 max.
EN-GJSA-XNiCr35-3	2,4	1,5–3,0	0,5–1,5	34,0–36,0	2,0–3,0	0,08	0,5 max.

Tab. 2 Chemické složení austenitické LLG v [hmot. %] dle normy ASTM A 439 [7]

Značení	Ni	Cr	Si	Cu	Mn	C max.	jiné
NiMn 13 7	12,0–14,0	0,2 max.	1,5–3,0	–	6,0–7,0	3,0	–
Ni-Resist 1	13,5–17,5	1,5–2,5	1,0–2,8	5,5–7,5	0,5–1,5	3,0	–
Ni-Resist 1b	13,5–17,5	2,5–3,5	1,0–2,8	5,5–7,5	0,5–1,5	3,0	–
Ni-Resist 2	18,0–22,0	1,5–2,5	1,0–2,8	0,5 max.	0,5–1,5	3,0	–
Ni-Resist 2b	18,0–22,0	3,0–6,0	1,0–2,8	0,5 max.	0,5–1,5	3,0	–
Nicrosilal	18,0–22,0	1,5–4,5	3,5–5,5	–	0,5–1,5	2,5	–
Ni-Resist 3	28,0–32,0	2,5–3,5	1,0–2,0	0,5 max.	0,5–1,5	2,6	–
Ni-Resist 4	29,0–32,0	4,5–5,5	5,0–6,0	0,5 max.	0,5–1,5	2,6	–
Ni-Resist 5	34,0–36,0	0,1 max.	1,0–2,0	0,5 max.	0,5–1,5	2,4	–
Ni-Resist 6	18,0–22,0	1,0–2,0	1,5–2,5	3,5–5,5	0,5–1,5	3,0	1,0 Mo

Tab. 3 Chemické složení austenitické LKG v [hmot. %] dle normy ASTM A 439 [7]

Značení	Ni	Cr	Si	Cu max.	Mn	C max.	jiné
Ni-Resist D-2	18,0–22,0	1,75–2,75	1,0–3,0	0,5	0,70–1,25	3,0	–
Ni-Resist D-2W	18,0–22,0	1,50–2,20	1,5–2,2	0,5	0,5–1,5	3,0	0,12–0,20 Nb
Ni-Resist D-2B	18,0–22,0	2,75–4,00	1,5–3,0	0,5	0,70–1,25	3,0	–
Nicrosilal Spheronic	18,0–22,0	1,0–2,5	4,5–5,5	0,5	0,5–1,5	3,0	–
Ni-Resist D-2C	21,0–24,0	0,5 max.	1,0–3,0	0,5	1,8–2,4	2,9	–
Ni-Resist D-2M	22,0–24,0	0,2 max.	1,5–2,5	0,5	3,75–4,50	2,6	–
Ni-Resist D-3A	28,0–32,0	1,0–1,5	1,0–2,8	0,5	1,0 max.	2,6	–
Ni-Resist D-3	28,0–32,0	2,5–3,5	1,0–2,8	0,5	1,0 max.	2,6	–
Ni-Resist D-4A	29,0–32,0	1,5–2,5	4,0–6,0	0,5	0,5–1,5	2,6	–
Ni-Resist D-4	28,0–32,0	4,5–5,5	5,0–6,0	0,5	1,0 max.	2,6	–
Ni-Resist D-5	34,0–36,0	0,1 max.	1,0–2,8	0,5	1,0 max.	2,4	–
Ni-Resist D-5B	34,0–36,0	2,0–3,0	1,0–2,8	0,5	1,0 max.	2,4	–
Ni-Resist D-5S	34,0–37,0	1,15–2,25	4,9–5,5	0,5	1,0 max.	2,3	–
Ni-Resist D-6	12,0–14,0	0,2 max.	2,0–3,0	0,5	6,0–7,0	3,0	–

Austenitických litin existuje mnoho druhů, ať už s kuličkovým grafitem nebo v menší míře s lupínkovým grafitem. Stojí za tím jejich mnohoúčelové využití a možnost aplikace za extrémních podmínek. Austenitické LKG mají zpravidla lepší mechanické vlastnosti než austenitické LLG. Fyzikální a technologické vlastnosti už ale bývají srovnatelné [1].

Minimální koncentrace legujících prvků, které se uvádí v normách, jsou vyžadovány, aby byla záruka vytvoření čistě austenitické základní hmoty za studena. Jinak ve struktuře hrozí vznik martenzitu, čímž má litina výrazně vyšší tvrdost a je také feromagnetická. V odlitcích, kde dochází k pomalému ochlazení, především v tlustostěnných odlitcích by se měl obsah austenitotvorných prvků pohybovat na horní hranici normy. Podstatná je segregace slitinových prvků, jelikož je jejich koncentrace v okolí grafitu rozdílná než ve středu mezi grafitovými kuličkami. Obsah karbidotvorných prvků by měl být na spodní hranici dané normou, kvůli sklonu litiny k vytváření karbidů, samozřejmě pokud není vznik karbidů žádoucí. K tomu je příhodné udržovat koncentraci grafitotvorných prvků co nejvyšší [1].

1.1 Nikl

Nikl je v litině Ni-resist, jak už napovídá její název, hlavním legujícím prvkem, a je tedy obsažen vždy. Koncentrace niklu se pohybuje v rozmezí cca 12 až 37 % (dle ASTM A 439 viz tab. 2 a 3). Tento obsah je poněkud vyšší než u obvyklých nerezových ocelí. Je to důležité z hlediska chybějícího podpůrného efektu jinak vysokého obsahu chromu. Nikl má vliv na pevnost a tažnost materiálu, které zvyšuje, kdežto mez kluzu a tvrdost téměř neovlivňuje. Pomocí niklu je také možné měnit tepelnou roztažnost litiny. Část niklu lze nahradit jinými austenitotvornými prvky, jako je mangan nebo měď [3], [4].

Jak už bylo zmíněno dříve, ve struktuře austenitických litin je požadavek na homogenní austenitickou matici. Pouze u některých druhů těchto litin se připouští určitý obsah karbidů. Pro zaručení austenitické matrice a zabránění případné koroze pod napětím by složení litiny mělo korespondovat s následujícím vzorcem pro výpočet niklového ekvivalentu [3], [4]:

$$Ni_{\text{ekv.}} = \% Ni + \% Cr + 2 \cdot \% Mn > 23,5 \quad (1)$$

Při nižších hodnotách hrozí nestabilita austenitu a jeho transformace na martenzit za nízkých teplot nebo i za pokojové teploty, a to především za současného působení mechanického namáhání. Z důvodu případného vyčerpání niklu v segregáčních zónách je třeba nastavit poněkud vyšší obsah niklu pro větší tloušťky stěn odlitků [3], [4].

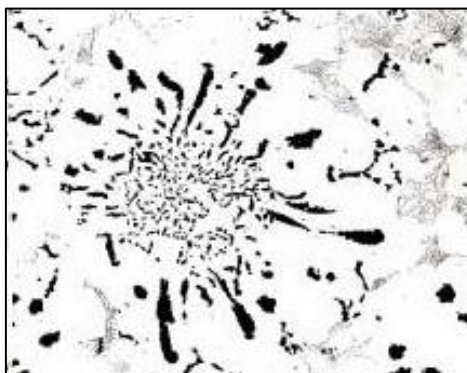
1.2 Uhlík

Uhlík je typickým prvkem obsaženým u litinových odlitků. V austenitických litinách je však koncentrace uhlíku nižší než u ostatních nelegovaných a nízkolegovaných litin. Přísada niklu totiž způsobuje zvýšení aktivity uhlíku, čímž dochází ke snížení jeho rozpustnosti v tavenině, respektive k posunutí eutektického bodu k nižším hodnotám koncentrace uhlíku [3], [4], [6].

Uhlíkový ekvivalent se v austenitických litinách stanovuje z následující rovnice, která uvažuje vliv křemíku a niklu [3], [4]:

$$C_e = \% C + 0,33 \cdot \% Si + 0,047 \cdot \% Ni - 0,0055 \cdot \% Ni \cdot \% Si \quad (2)$$

Uhlík způsobuje grafitickou expanzi, díky níž jsou odlitky méně náchylné ke vzniku staženin a ředin. Vysoký obsah uhlíku také snižuje teplotu tuhnutí, snižuje viskozitu taveniny, tím pádem zlepšuje tekutost a dosazovací schopnost litiny. Z tohoto hlediska se doporučuje udržovat koncentraci uhlíku na horní hranici uváděné v normě. Nicméně naopak nižší obsah uhlíku zvyšuje mechanické vlastnosti austenitických litin, jako je pevnost, tažnost a houževnatost. Pro optimalizaci struktury odlitku je nutné zachovat vyvážený poměr mezi obsahem uhlíku a křemíku, v závislosti na tloušťce stěn odlitku, aby se eliminovalo riziko vzniku nežádoucího degenerovaného grafitu, především tzv. chunky grafitu (obrázek 1). Překročením obsahu uhlíku nad eutektickou koncentraci hrozí také zejména u masivních odlitků tvorba primárního grafitu a jeho následná flotace [3], [4], [6], [7].



Obr. 1 Chunky grafit ve struktuře austenitické litiny [3]

1.3 Křemík

Dalším podstatným prvkem je křemík, který například zlepšuje zabíhavost nebo snižuje tvorbu karbidů chromu, čímž se zvýší tažnost materiálu, ale naopak se sníží tvrdost a mez kluzu. Množství křemíku v austenitické litině se odvíjí podle tloušťky stěny odlitku. U tlustostěnných odlitků totiž hrozí vznik již zmíněného degenerovaného grafitu, tzv. chunky grafitu, což způsobí výrazné zhoršení mechanických vlastností. Aby se tomu zabránilo, je důležité dodržet úzké tolerance pro změny uhlíku, niklu a křemíku. Použití křemíku je nezbytné z hlediska očkování litiny, kde se využívají slitiny na bázi FeSi, avšak bez obsahu vápníku a KVZ, především ceru [3], [4], [6].

1.4 Chrom

Karbidy chromu se v litině vytváří vlivem vysoké koncentrace uhlíku, jsou velmi stabilní a právě díky nim jsou litiny odolné proti opotřebení. Rozpustnost chromu je v základní hmotě omezená do obsahu přibližně 0,5 %, kdy chrom zůstává rozpuštěn převážně v austenitu. Naopak při vyšší koncentraci chromu se zvyšuje tvrdost, a tím snižuje obrobiteľnosť odlitků. To je zapříčiněno vznikem feromagnetických karbidů typu $(\text{FeCr})_3\text{C}$ a $(\text{FeCr})_7\text{C}_3$, které nelze rozložit ani tepelným zpracováním. Napomáhají ale ke zvýšení korozivzdornosti, pevnosti, otěruvzdornosti a zlepšují vlastnosti materiálu za vysokých teplot. Problém však nastane, když se karbidy chromu vyloučí ve formě souvislého síťoví, neboť dojde k značnému poklesu mechanických vlastností. Vyšší obsah chromu může také vést ke zvýšení rizika vzniku staženin a ředin v odlitcích. Při výrobě austenitické litiny s vysokou houževnatostí za studena, která je legovaná manganem, je důležitý obsah chromu do maximálně 0,1 až 0,2 %. Druhy austenitických litin s obsahem chromu nad 3 % mají zvýšenou odolnost proti erozi. Podíl karbidů ovlivňuje v austenitické litině jak tloušťka stěny odlitku, tak i uhlíkový ekvivalent, s jehož růstem se podíl karbidů snižuje [1], [3], [4], [6], [7].

1.5 Mangan

Mangan se v litinách Ni-resist stejně jako nikl využívá pro stabilizaci austenitu. Z toho důvodu je možné určité množství manganu aplikovat při výrobě spolu s niklem. Lze tak mimo jiné snížit náklady na výrobu, ale na druhou stranu mangan nezvyšuje odolnost materiálu proti korozi ani žáruvzdornost a při vyšším obsahu (cca nad 2 %) vytváří karbidy, které jsou nemagnetické a zhoršují obrobiteľnosť materiálu. Vyšší obsah manganu se uplatňuje u výroby specifických nemagnetických typů austenitických litin, například GG-NiMn 13 7 (Nomag) a GGG-NiMn 13 7 (Nodumag), značených podle německé normy DIN 1694. Vzniklé karbidy v litém stavu lze rozložit pomocí tepelného zpracování při teplotě 800 až 900 °C. Austenitická litina GGG-NiMn 23 4 se používá jako kryogenní materiál, jelikož rozšiřuje oblast austenitu k nižším teplotám až do -196 °C, a tím je zachována houževnatost a tažnost materiálu [1], [3], [4], [6], [7], [8].

1.6 Měď

Měď je možné rovněž, tak jako manganem, nahradit část niklu za účelem snížení nákladů. Přestože měď neiniciuje vznik austenitu, tak jeho tvorbu podporuje. Měď je také přidávána pro její příznivý vliv na odolnost materiálu proti korozi v kyselém prostředí. Používá se zejména v austenitických LLG, neboť v austenitických LKG narušuje tvorbu kuličkového grafitu [1], [3], [4], [7].

1.7 Fosfor

Ve většině norem je uvedena přípustná koncentrace fosforu, která v austenitických litinách s kuličkovým grafitem nemá překročit 0,08 %. Je to z důvodu nepříznivého vlivu fosforu na mechanické vlastnosti, zhoršení pevnosti, houževnatosti a kvůli zachování dobré svařitelnosti. Například při výrobě vložek válců z austenitické LKG je žádoucí co nejnižší obsah fosforu pro dosažení lepších třecích vlastností materiálu. U odlitků s běžnými tloušťkami stěn se doporučuje obsah fosforu max. 0,05 %, nicméně při rostoucí tloušťce stěny se maximální koncentrace fosforu snižuje [1], [3], [6], [8].

1.8 Niob

Niob se přidává do austenitické LKG za účelem zlepšení svařitelnosti zejména u některých typů litin Ni-resist, které neobsahují chrom. Pomocí legování niobem lze předejít vzniku mikrotrhlin ve svaru. Je však třeba kontrolovat koncentraci křemíku, hořčíku a fosforu, jejichž obsah má spolu s niobem příznivý účinek na svařitelnost, a také dodržet správný svařovací postup. Vliv tohoto působení není zcela jasný. Vychází se z předpokladu, že hořčík tvoří s dusíkem nestabilní nitrid rozkládající se kolem 800 °C. Niob se poté váže na volný dusík. Obsah přídatků niobu se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 % [1], [3], [4], [7], [8].

1.9 Molybden

Obsah molybdenu není dle norem v různých třídách slitin Ni-resist specifikován, avšak využívá se stejně jako u ocelí a nízkolegovaných litin zejména pro zvýšení žárovevnosti. Molybden je možné přidávat do austenitické litiny až do obsahu 2 % [1], [3], [7].

1.10 Hořčík

Stejně jako u nelegovaných LKG, tak i u austenitických LKG, se hořčík používá pro vznik kuličkového grafitu a jeho koncentrace se má pohybovat od 0,040 do 0,060 %. Při vyšším obsahu hořčíku hrozí tvorba většího množství struskových vměstků, vznik vměstků také po hranicích zrn nebo vyšší náchylnost ke vzniku karbidů. Vlivem vysoké koncentrace niklu

se zvyšuje rozpustnost hořčíku v tavenině. Nicméně ani při obsahu hořčíku nad 0,060 % není pravidlem, že vznikne nežádoucí tvar grafitu, jelikož to závisí na celé řadě aspektů v průběhu metalurgického procesu výroby. Na druhou stranu nízký obsah hořčíku je také nežádoucí, kvůli požadovanému tvaru kuličkového grafitu. Aby byla zaručena svařitelnost materiálu, je nutné udržovat obsah hořčíku co nejnižší, ale zároveň dostatečný pro vznik zrnitého grafitu. Většinou je obsah hořčíku dostačující pro zajištění zrnitého grafitu 0,05 % [1], [3], [8].

2 Vlastnosti a použití austenitických litin

Austenitické litiny mají kromě mnoha příznivých mechanických, technologických nebo fyzikálních vlastností také velmi dobré slévárenské vlastnosti, díky čemuž je možné vyrábět odlitky s komplexními tvary a jejich použití je tak do značné míry univerzální [2].

2.1 Mechanické vlastnosti

Austenitické litiny Ni-resist jsou velmi flexibilním materiálem z hlediska použití za různých teplot. Tato kapitola popisuje jejich typické mechanické vlastnosti jak za normálních teplot, tak i za zvýšených a snížených teplot.

2.1.1 Mechanické vlastnosti za normálních teplot

Litiny s kuličkovým grafitem Ni-resist mají modul pružnosti v hodnotách 90 až 130 GPa. Oproti konvenčním litinám s kuličkovým grafitem jsou tyto hodnoty výrazně nižší, ale v porovnání s litinami Ni-resist s lupínkovým grafitem se téměř neliší [6], [9].

Většina typů litiny Ni-resist má srovnatelnou pevnost v tahu a mez kluzu, což vychází ze společné austenitické matrice. Na druhou stranu tažnost a houževnatost se v různých typech podstatně mění podle chemického složení, zejména podle obsahu chromu, molybdenu a křemíku. Druhy austenitických litin s nízkým obsahem chromu (D-2C a D-5) mají tažnost v rozmezí 25 až 40 % a podle toho přiměřenou houževnatost. Jiné druhy (D-2, D-2B, D-3 a D-5B), které obsahují 2 až 3 % chromu, mají tažnost 5 až 20 % a s tím také související nižší houževnatost. Mechanické vlastnosti austenitických LKG nejsou s ohledem na stabilitu austenitické matrice výrazně ovlivněny tepelným zpracováním [6], [9].

Mechanické vlastnosti austenitických litiny podle evropské normy EN 13835 jsou uvedeny v tabulce 4. V tabulkách 5 a 6 jsou pro porovnání uvedeny mechanické vlastnosti dle americké normy ASTM A 439, nejprve pro austenitickou litinu s kuličkovým grafitem a poté pro austenitickou litinu s lupínkovým grafitem.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti austenitických litin dle normy EN 13835 [3]

Značení	R _m [Mpa]	R _{p0,2} [Mpa]	tažnost [%]	modul pružnosti [GPa]	nárazová práce [J]	tvrdost [HB]	R _d [MPa]
EN-GJLA-XNiCuCr15-6-2	170–210	–	2	85–105	–	120–215	700–840
EN-GJSA-XNiCr20-2	370–480	210–250	7–20	112–130	11–24	140–255	–
EN-GJSA-XNiMn23-4	440–480	210–240	25–45	120–140	20–30	150–180	–
EN-GJSA-XNiCrNb20-2	370–480	210–250	8–20	112–130	11–24	140–200	–
EN-GJSA-XNi22	370–450	170–250	20–40	85–112	17–29	130–170	–
EN-GJSA-XNi35	370–420	210–240	20–40	112–140	18	130–180	–
EN-GJSA-XNiSiCr35-5-2	380–500	210–270	10–20	130–150	7–12	130–170	–
EN-GJLA-XNiMn13-7	140–220	–	–	70–90	–	120–150	630–840
EN-GJSA-XNiMn13-7	390–470	210–260	15–18	140–150	15–25	120–150	–
EN-GJSA-XNiCr30-3	370–480	210–260	7–18	92–105	5	140–200	–
EN-GJSA-XNiSiCr30-5-5	390–500	240–310	1–4	90	1–3	170–250	–
EN-GJSA-XNiCr35-3	370–450	210–290	7–10	112–123	4	140–190	–

Tab. 5 Mechanické vlastnosti austenitických LKG dle ASTM A 439 [7]

Značení	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	tažnost [%]	modul pružnosti [GPa]	nárazová práce [J]	tvrdost [HB]
Ni-Resist D-2	370–480	210–250	7–20	112–130	14–27	140–200
Ni-Resist D-2W	370–480	210–250	8–20	112–130	14–27	140–200
Ni-Resist D-2B	390–500	210–260	7–15	112–133	12	150–255
Nicrosilal Spheronic	370–440	210–260	10–18	–	–	180–230
Ni-Resist D-2C	370–450	170–250	20–40	85–112	21–33	130–170
Ni-Resist D-2M	440–480	210–240	25–45	120–140	24–34	150–180
Ni-Resist D-3A	370–450	210–270	13–18	112–130	16	130–190
Ni-Resist D-3	370–480	210–260	7–18	92–105	8	140–200
Ni-Resist D-4A	380–500	210–270	10–20	130–150	10–16	130–170
Ni-Resist D-4	390–500	240–310	1–4	91	–	170–250
Ni-Resist D-5	370–420	210–240	20–40	112–140	20	130–180
Ni-Resist D-5B	370–450	210–290	7–10	112–123	7	140–190
Ni-Resist D-5S	370–500	200–290	10–20	110–145	12–19	130–170
Ni-Resist D-6	390–470	210–260	15–18	140–150	–	120–150

Tab. 6 Mechanické vlastnosti austenitických LLG dle ASTM A 439 [7]

Značení	R _m [MPa]	R _d [MPa]	tažnost [%]	modul pružnosti [GPa]	tvrdost [HB]
NiMn	140–220	630–840	–	70–90	120–150
Ni-Resist 1	170–210	700–840	2	85–105	120–215
Ni-Resist 1b	190–240	860–1100	1–2	98–113	150–250
Ni-Resist 2	170–210	700–840	2–3	85–105	120–215
Ni-Resist 2b	190–240	860–1100	1–2	98–113	160–250
Nicrosilal	190–280	–	2–3	–	140–250
Ni-Resist 3	190–240	700–910	1–3	98–113	120–215
Ni-Resist 4	170–240	560	–	105	150–210
Ni-Resist 5	120–180	560–700	1–3	74	120–140
Ni-Resist 6	170–210	700–840	–	–	130–180

2.1.2 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot

Předností austenitických LKG je také jejich žárovzdornost. Lze tak v materiálu omezit vznik trhlin a lomů za vysokých teplot, a to zejména díky širokému rozsahu austenitické struktury a zároveň relativně vysoké pevnosti a houževnatosti v daném pásmu teplot. Oproti běžným nelegovaným litinám mají austenitické litiny výrazně vyšší odolnost ke změně struktury, objemu a oxidaci materiálu. Jelikož neprodělávají takové fázové změny, mají vynikající odolnost proti vysokoteplotnímu namáhání a cyklování za teplot 675 °C a vyšších [6], [9].

2.1.3 Mechanické vlastnosti za snížených teplot

Litiny Ni-resist s kuličkovým grafitem zásluhou austenitické matrice neztrácí svou houževnatost a tvárnost ani za silně snížených provozních teplot. Typ D-2M má vyšší obsah niklu a manganu, které stabilizují austenitickou fázi i za extrémně nízkých teplot, klesajících k hodnotám až –196 °C [6], [9].

2.2 Technologické vlastnosti

Odlitky z litin typu Ni-resist vykazují dobrou odolnost proti korozi i erozi závislejší na obsahu legur, zejména pak niklu a chromu. S jejich růstem roste i odolnost materiálu v tomto prostředí. Doporučuje se minimální obsah chromu 2 % u materiálů vystavených korozním médiím, jako je například pára, solné suspenze, korozní kapaliny s relativně vysokou rychlostí nebo mořská a brakická voda [6], [9].

S rostoucím množstvím legur souvisí také zvyšující se odolnost austenitické litiny proti oxidaci, nebo proti opalu (okujení). Během oxidace vzniká pevná vrstva, jejíž přilnavost zvyšuje rostoucí obsah niklu. S rostoucím obsahem křemíku a chromu klesá rychlost tvorby oxidické vrstvy (okují) [6].

Ni-resist litina typu D-2 a D-4 lze využít za účelem přizpůsobení vysoké teplotní roztažnosti materiálů, jako jsou hliník, měď, bronz nebo austenitické nerezové oceli. Na druhou stranu pro dosažení maximální rozměrové stálosti se doporučuje typ D-5 a D-5B, například pro výrobu dílů obráběcích stojů, sklářských forem nebo skříní plynových turbín [9].

2.3 Fyzikální vlastnosti

U litin Ni-resist se hustota pohybuje v rozmezí od 7,3 do 7,7 kg/dm³. Vyšším hodnotám hustoty odpovídá vyšší obsah niklu v litině [6].

Elektrický odpor mají austenitické litiny vyšší oproti běžným litinám, ale teplotní součinitel elektrického odporu mají zase naopak nižší [2], [6].

Některé druhy těchto litin jsou takřka úplně nemagnetické, jako například D-2 a D-2C, které jsou používány pro svou nízkou magnetickou permeabilitu, z důvodu zamezení vytvoření nadměrného tepla a ztrátám energie z vířivých proudů. Slitiny s vysokým obsahem chromu jsou slabě magnetické. Příčinou je velké množství feromagnetických karbidů [2], [9].

2.4 Použití

Odlitky z litiny Ni-resist je možné díky jejich výhodným vlastnostem využít v širokém spektru odvětví, ať už jde o automobilový průmysl, chemický průmysl nebo i potravinářství. V této kapitole jsou uvedeny některé příklady použití tohoto materiálu v praxi.

U chemických zařízení i v potravinářském průmyslu se požaduje, aby součásti byly schopné odolat dlouhým dobám provozu za různých korozních nebo erozivních podmínek. Proto se v tomto odvětví používají slitiny Ni-resist nejčastěji na výrobu dmychadel, kompresorů, částí kondenzátorů, kryogenní zařízení, části pecí, potrubí, kotle, odlitky čerpadel a oběžná kola, dopravníky, ventily a armatury ventilů, zařízení pro stáčení a vaření piva, konzervářské stroje, zařízení pro lihovary, šnekové podavače, zařízení pro zpracování ryb, těžké desky a grily, mlýnky na maso, drtiče a balicí zařízení aj. [7]

Neustálým vývojem nových technologií a zvyšující se poptávkou po elektřině je třeba zvýšit také účinnost výroby elektřiny. Jsou požadovány vyšší tlaky, vyšší provozní teploty a jsou tak kladeny nároky na lepší konstrukční materiály. Řada litin Ni-resist je proto v mnoha případech ekonomickým a efektivním řešením. Možnost užití například jako části turbín, spínačů, oporové mřížky atd. [7]



Obr. 2 Odlitek oběžného kola čerpadla z litiny Ni-resist [10]

Dalším významným odvětvím pro aplikaci Ni-resist litiny je doprava, ať už se jedná o dopravu osobní, nákladní či hromadnou. Je možné je použít v motorech na benzín, naftu a LPG, v nákladních automobilech, autobusech, železničních lokomotivách, stacionárních elektrárnách i pohonných jednotkách námořních a leteckých. Konkrétní použití v praxi je na válcové vložky, výfukové potrubí spalovacích motorů, vedení výfukových ventilů, vložky drážek pístních kroužků pro hliníkové písty, pouzdra trysek turbodmychadel, kryty trysek a jiné části [7].



Obr. 3 Odlitek řemenice z austenitické LKG [11]

Díky mimořádné odolnosti austenitické litiny proti korozi v mořské vodě ji lze uplatnit na nejrůznější odlitky využívané pro širokou škálu aplikací u námořnictva nebo v ropném průmyslu [7].

S ohledem na nízké koeficienty tepelné roztažnosti je u austenitické litiny typu 5 a D-5 požadavkem rozměrová stabilita. Jejím použitím lze docílit zvýšení přesnosti mnoha obráběcích strojů, měřidel a přístrojů. Nejčastěji se jedná o aplikace základových můstků a pracovních podpěr, tvářecí nástroje, sklářské formy, části nástrojů, měřicí nástroje, optické části, vřetenové skříně apod. [7]



Obr. 4 Odlitek z austenitické LLG odlévaný metodou přesného lití [12]

3 Opotřebení materiálů

Opotřebení je proces, při kterém dochází k trvalé změně povrchu nebo rozměru pevných těles. Z hlediska jejich funkce je to proces nežádoucí, protože vždy vede k degradaci materiálu součásti nebo pokud se včas nezastaví, může vést k celkové havárii. Opotřebení vzniká vždy na povrchu součásti v místě vzájemného působení funkčních povrchů těles, kde se povrchy proti sobě pohybují, nebo kde přicházejí do styku s tuhými částicemi. Opotřebení může nastat také působením funkčního povrchu tělesa a média, kdy je povrch součásti vystaven působení proudu plynů, kapalin, případně proudu kapalného nebo plynného média s obsahem tuhých částic různé velikosti. Mimo mechanické účinky mohou proces opotřebení doprovázet i jiné vlivy, např. chemické nebo elektrické [13], [14], [15].

Důležité je zvolit vhodný materiál součásti, aby byla zajištěna životnost stroje či strojního zařízení a zároveň použity minimální výrobní a provozní náklady. Současně nelze zanedbat významné vlivy, kterými jsou provozní mechanické a tepelné namáhání a charakter degradačních procesů působící na jejich povrchu. Z hlediska optimální volby materiálů je zásadním faktorem znalost jejich chování v různých podmínkách provozu. Často se posuzuje namáhání vyvolané působením statických a dynamických sil, jelikož překročením meze pevnosti či meze únavy u součástí dojde k náhlé změně kvality materiálu – k lomu [13].

Změny povrchů těles při opotřebení mají negativní dopad na jejich funkci, což se projeví zhoršením vlastností a chování strojních součástí v provozu s jejich vazbou na okolí. Změnami struktury dochází k degradaci mechanických vlastností. Vibrace mohou způsobit změny geometrie, vedoucí ke ztrátě funkčnosti. Na změnu kvality a drsnosti povrchu působí např. oxidace, jelikož iniciuje porušení, zvyšuje hlučnost, způsobuje ekologické a ekonomické ztráty, poruchy, popř. i havárie. Proces opotřebení závisí na kvalitě materiálu a na prostředí, ve kterém probíhá [14].

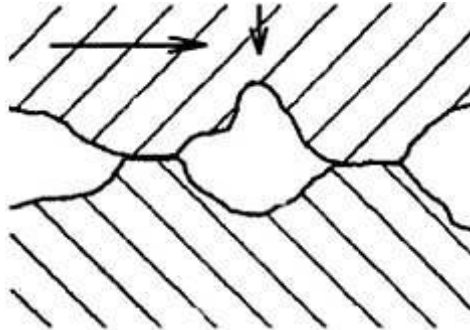
3.1 Základní mechanismy opotřebení

Mechanismy opotřebení se dělí na 6 základních druhů, a to na adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. V praxi se setkáváme s kombinací více účinků a vlivů. Mnohdy opotřebení jednoho typu vyvolá rozvoj jiného typu. Často nelze jednoznačně stanovit jeden druh opotřebení jediným probíhajícím procesem, ale současně probíhá více druhů opotřebení. Podle charakteristických projevů lze určit typ opotřebení, který se na procesu podílí nejvýrazněji. Během procesu může docházet ke změně podílu jednotlivých druhů opotřebení účastnících se procesu [13], [15].

3.1.1 Adhezivní

Adhezivní opotřebení je druh opotřebení, kde při dotyku funkčních povrchů součástí dochází k porušení povrchových vrstev jejich relativním pohybem a ke vzniku mikrosvarů s následným porušováním těchto mikrospojů. Tímto dochází k uvolňování a vytrhávání částic

materiálu a zároveň k přenášení materiálu z jednoho povrchu na druhý a naopak. Na tento proces má vliv přítomnost média mezi funkčními povrchy. Přítomnost maziva zhoršuje podmínky pro vznik mikrosvarů. Pokud nejsou kluzné povrchy odděleny, adheze a následné opotřebení způsobí téměř nevyhnutelně zadření, což může vést v konečné fázi k destrukci stroje. Na obrázku 5 je schéma adhezivního opotřebení [14], [15].



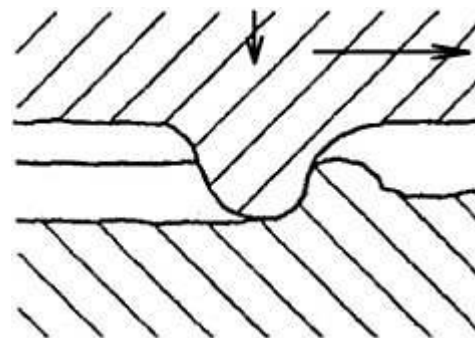
Obr. 5 Adhezivní opotřebení [16]

3.1.2 Abrazivní

Pro abrazivní opotřebení (schéma viz obrázek 6) je typické oddělování a přemísťování částic materiálu při rozrývání a řezání měkkého povrchu jednoho tělesa drsnějším povrchem druhého tvrdšího tělesa. Jedná se o částice volné nebo určitým způsobem vázané. Další typ abrazivního opotřebení nastává, pokud jsou tvrdé částice přítomny mezi dvěma funkčními povrchy během relativního pohybu, obvykle při drcení a mletí hmot. Toto opotřebení povrchu nastává ale i u kluzných dvojic v případě, že tvrdé nečistoty vnikají mezi nedostatečně utěsněné funkční povrchy. Charakteristickým poškozením jsou rýhy tvořené na součásti. Často také dochází k zamáčknutí volných částic do měkkého povrchu a jejich následnému rýhování tvrdšího povrchu. Velmi tvrdé částice, které se uvolní z povrchu, způsobí zvýšení a urychlení procesu opotřebení. Vznik abrazivního opotřebení závisí na tvrdosti povrchů daného materiálu. Mnohdy je uváděno, že procesy abraze způsobují až 50 % případů opotřebení [13], [14], [15].

Faktory ovlivňující abrazivní opotřebení [14]:

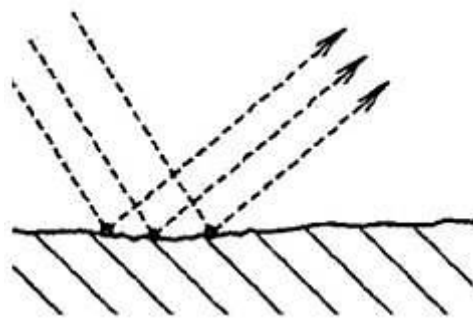
- Velikost abrazivních částic
- Tvar a morfologie částic
- Úhel dopadu částic a vliv tření částicemi
- Tvrdost abraziva
- Množství abraziva
- Vliv pevnosti abraziva
- Struktura materiálu
- Vliv legování materiálu
- Vliv tepelného zpracování
- Vliv vlhkosti abraziva
- Kluzné vlastnosti částic
- Vliv teploty



Obr. 6 Abrazivní opotřebení [16]

3.1.3 Erozivní

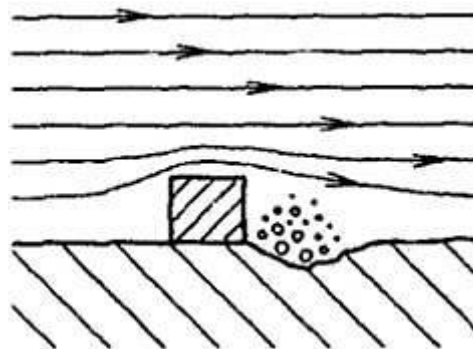
Erozivním opotřebením je způsobeno poškozování funkčního povrchu tělesa pevnými částicemi v proudu kapaliny nebo plynu, nebo samotným proudem kapaliny, páry, kapek nebo plynu. Povrch součásti je porušen nerovnoměrně a mnohdy výrazně zvlňně. Každá částice při nárazu přeměňuje svou kinetickou energii v deformační práci působící plastickou deformací na povrchu součásti v podobě stopy – rýhování, následkem čehož dochází k oddělování částic. Během mechanismu eroze může být materiál z povrchu vytlačen nebo oddělen částicí, která s dostatečnou energií vnikla do povrchu. Částice může také zatížit povrch pouze v elastické oblasti nebo dojde k elasticko-plastické deformaci a částice se odrazí. Záleží také na úhlu dopadu erozivní částice na povrch a hloubce ovlivněného materiálu. Schéma mechanismu erozivního opotřebením je na obrázku 7 [14], [15].



Obr. 7 Erozivní opotřebením [16]

3.1.4 Kavitační

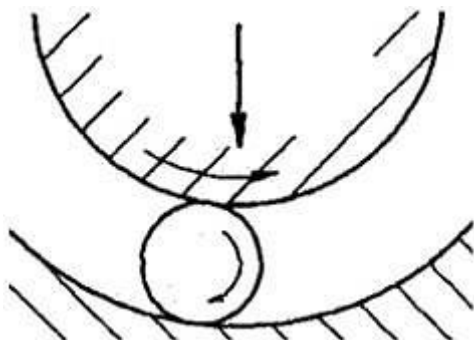
Při kavitačním opotřebením dochází k oddělování částic a poškozování povrchu součástí v blízkosti místa, kde zanikají kavitační bubliny v kapalině (viz obr. 8). Při proudění kapaliny vznikají v oblasti poklesu jejího tlaku pod tlak nasycených par při dané teplotě malé kavitační dutiny – bubliny vyplněné parami. Zánikem bubliny dochází k pohybu kapaliny, tím k hydrodynamickým rázům, v jejichž blízkosti je povrch součástí namáhán, a s tím se poji vytrhávání částic z povrchu. V důsledku kavitačního opotřebením se mění kvalita povrchu tělesa, která se může vyskytovat v podobě zvrásnění, zdrsňění, změny tvaru reliéfu tělesa, výskytu trhlin, kaveren nebo makrolomů [14], [15].



Obr. 8 Kavitační opotřebením [16]

3.1.5 Únavové

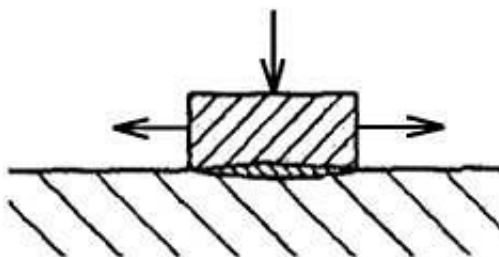
Únavové opotřebení charakterizuje kumulace poruch v povrchové vrstvě materiálu při cyklickém namáhání, které způsobuje v místě maximálního smykového namáhání porušení materiálu v podobě vzniku a šíření trhlin vyvolaných únavou materiálu. Na obrázku 9 je znázorněno únavové opotřebení. Vlivem vysokého smykového namáhání se odděluje materiál a vytvořená lomová plocha se chová podle mechanismu křehkého porušování s charakteristickým lasturovým lomem. Protože se tento proces projevuje vydrolováním materiálu a vznikem důlků, bývá tento jev označován jako tzv. pitting [14], [15].



Obr. 9 Únavové opotřebení [16]

3.1.6 Vibrační

Vibrační opotřebení (viz schéma na obr. 10) vzniká během působení normálového zatížení a současně kmitavých tečných pružných deformací nebo tečných posuvů s malou amplitudou. Vibrace se tvoří v souvislosti s mechanickým kmitáním těles s různými amplitudami. Mezi známé příklady patří poškození hřídelů s nalisovanými náboji nebo poruchy nepohyblivých uložení způsobené při periodickém zatěžování. Vibrace spolu s malou tuhostí nebo vůlemi jsou příčinou poruch spojek a valivých ložisek. Při vibračním opotřebení se tvoří částice připomínající produkty koroze, které působí silně abrazivně a jejich vlivem dochází k poruchám i velmi tvrdých povrchových vrstev [14], [15].



Obr. 10 Vibrační opotřebení [16]

3.2 Zkoušení odolnosti materiálu proti abrazivnímu opotřebení

V průběhu provozních zkoušek odolnosti materiálů proti abrazivnímu opotřebení nepůsobí pouze abraze, ale také další degradační procesy, proměnné zatížení a jeho frekvence, okolní prostředí apod. Je nutné, aby provozní zkoušky splňovaly hlavní požadavky, kterými jsou stejné podmínky abrazivního opotřebení jako v provozu, zkušební vzorek musí být částí skutečného zařízení, přítomnost zkušebních vzorků musí mít jen minimální vliv v provozních podmínkách a v porovnání s celkovou životností dané součásti musí být uskutečnění provozní zkoušky poměrně krátké [13].

U laboratorních zkoušek se usiluje o udržení konstantní intenzity opotřebení pomocí statického zatížení a stálé abrazivity částic. Avšak při provozních zkouškách se intenzita opotřebení mění s časem i místem. Z toho důvodu bude na jednotlivých místech funkčního povrchu různý gradient procesu opotřebení. Podmínky provozních zkoušek mnohdy nelze snadno reprodukovat. Při hodnocení procesu opotřebení v provozních zkouškách je tak nutné aplikování statistických metod. Pokud se zvýší počet zkoušek nebo se sníží hodnota standardní odchylky, případně obojí, zvýší se přesnost určení střední životnosti součásti či provozního uzlu [13].

Mezi laboratorní zkoušky abrazivního opotřebení patří široká škála testů na zkušebních zařízeních od přístroje s brusným plátnem (kluzná abraze bez rázového zatížení) až po laboratorní čelist'ový drtič (modelování procesů opotřebení při drcení). Tyto zkoušky jsou výhodné z hlediska poměrně nízké ceny, snadného řízení jejich parametrů nebo možnosti v krátké době vyzkoušet mnoho různých materiálů. Při volbě zkušebního zařízení a parametrů laboratorní zkoušky je důležitý stav abraziva, jestli je pevně vázané nebo volné, tvar a velikost částic abraziva, jejich tvrdost, směr a rychlost relativního pohybu při opotřebení a velikost sil působících v průběhu abraze. Usiluje se o nalezení korelace mezi laboratorními a provozními zkouškami. Zásadní problémy jsou rozdílný mechanismus opotřebení povrchových vrstev než v provozu, absence rázového zatěžování a odlišná abraziva v laboratorních zkouškách a v provozu. V závislosti na podmínkách v oblasti kontaktu opotřebovávaného povrchu s abrazivními částicemi se experimentální zařízení modelující kluznou abrazi dělí na přístroje s vázanými částicemi (hrot, brusné plátno nebo brusný kotouč), s volnými částicemi, s vrstvou volných částic mezi stykovými povrchy nebo zařízení modelující procesy abraze v reálných podmínkách provozu [13].

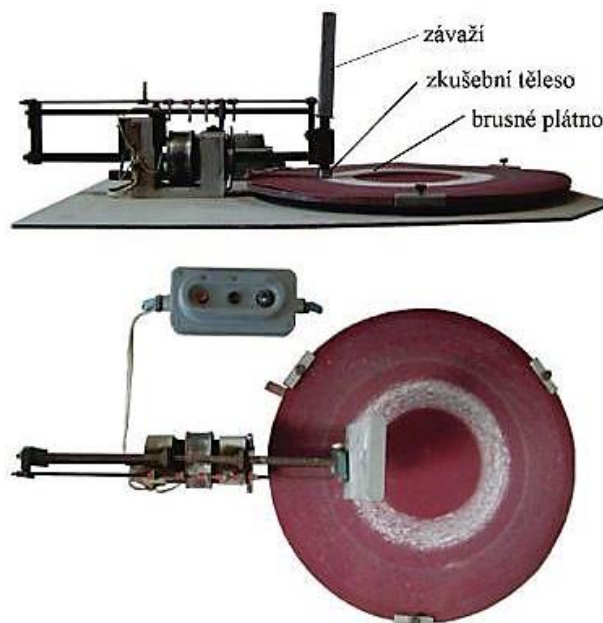
3.2.1 Zkouška opotřebení na brusném plátně

Zkouška opotřebení na brusném plátně se používá pro stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení nejčastěji. Zkouška je do detailu popsána normou ČSN 01 5084. Zkušební přístroje se vyznačují svou jednoduchostí a spolehlivostí s poměrně malým rozptylem výsledků ($\pm 5\%$). Na druhou stranu základním nedostatkem jsou případné změny abrazivity brusných pláten. Z toho důvodu je nezbytná průběžná kontrola brusných pláten za použití etalonových vzorků, které mají definované chemické složení a mikrostrukturu. Když se jednotlivé abrazivní částice dostávají opakovaně do kontaktu

s opotřebovaným povrchem zkoušených vzorků, dochází k poklesu abrazivity brusného plátna postupným otupováním a vylamováním abrazivních částic. Při znečištění abraziva částicemi otěru také hrozí, že se změní i mechanismus opotřebení [13], [17].

Zkušební přístroj (viz obrázek 11) se skládá z rovnoměrně rotující kruhové desky, která má průměr 480 mm. Na tuto desku s vertikální osou rotace se pružnými svorkami upíná brusné plátno s umělým korundem. Brusné plátno je k dostání v rolích po 50 m, z těch jsou postupně odřezávány potřebné kotouče plátna. Na rotující brusné plátno je přitlačován vzorek ze zkoušeného materiálu silou 32 N na dráze 50 m. Válcový vzorek nejčastěji o průměru 10 mm a délce 70 mm je držen pomocí upínací hlavy, která během zkoušky umožňuje axiální pohyb vzorku, a je přitlačován silou vyvozenou závažím. Mezi vzorkem a brusným plátnem je tlak 0,32 MPa. Šroubový mechanismus tvořený pohybovým šroubem a maticí s narážkami zajišťuje radiální posuv vzorku. Na obvodu kruhové desky se nachází patka, která po každé otáčce narazí do narážky matice, a tím ji pootočí o 90°. Zkušební těleso se tak v průběhu zkoušky posunuje od středu ke kraji brusného plátna nebo naopak. Tím je zajištěno, že vzorek je broušen neustále na nové ploše plátna. Kruhová deska s brusným plátnem rotuje rychlostí 22 ot./min a radiální posuv vzorku je 3 mm/ot. Jakmile doběhne třecí dráha, přístroj se vypne koncovým vypínačem. Až se přejede celá plocha brusného plátna, nahradí se novým plátnem. Ještě než se vzorky zkouší, jejich funkční povrch je broušen na drsnost $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ [13], [17].

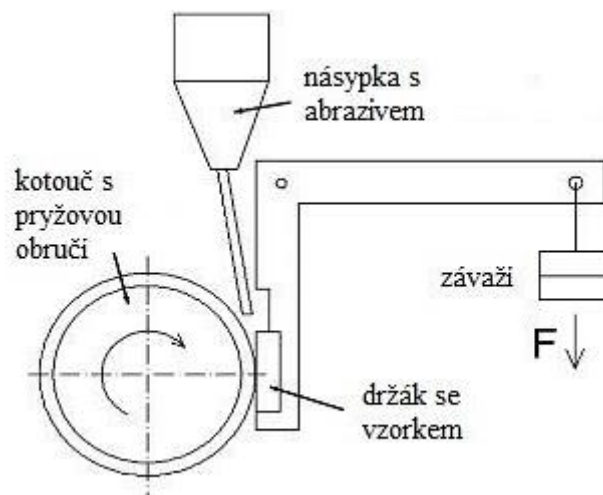
Vyhodnocení zkoušky se stanoví na základě naměřených hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků, které se porovnávají s etalonem. Etalonem pro zkoušku opotřebení na brusném plátně je vzorek z oceli 12 014.20 s tvrdostí 95–105 HV, nebo se použije jiný vhodný materiál. Během zkoušek se systematicky mění etalony a vzorky ze zkoušených materiálů dle schéma 1-2-1-2-1. Dva etalony na začátku každé série zkoušek nejsou do vyhodnocení započteny. Ze zkoušky je zjištěna poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení ψ_a , která se stanoví z poměru objemového otěru etalonového materiálu a objemového otěru zkoušeného materiálu [13], [17].



Obr. 11 Zkouška opotřebení na brusném plátně [18]

3.2.2 Zkouška opotřebení na pryžovém kotouči

Během zkoušky opotřebení na pryžovém kotouči dochází ke kluzné abrazi mezi částicemi sypanými mezi vzorek a rotujícím kotoučem (obrázek 12). Tímto způsobem lze simulovat podmínky podobné provozu strojních zařízení, které například pracují v zemině, zpracovávají paliva nebo nerostné suroviny. Nevýhodou tohoto zkušebního přístroje je však nižší reprodukovatelnost experimentálních výsledků za předpokladu použití abraziva s různou velikostí částic. Do procesu abrace se totiž zapojují jen velké částice. Malé částice při průchodu oblastí kontaktu na opotřebovávaný povrch nepůsobí [13].

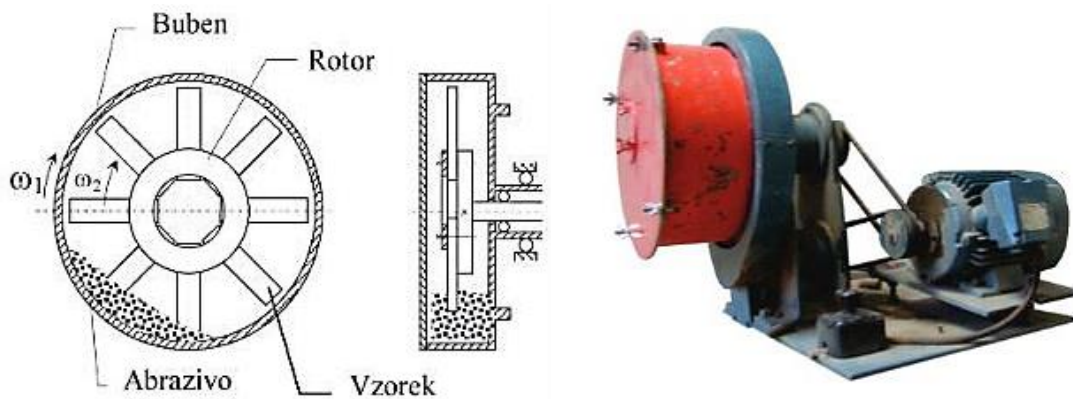


Obr. 12 Zkouška opotřebení na pryžovém kotouči [19]

3.2.3 Zkouška opotřebení v Bondově bubnovém přístroji

Zkouška opotřebení v Bondově bubnovém přístroji, znázorněná na obrázku 13, se vyznačuje svou jednoduchostí a spolehlivostí v provozu. Avšak jejím nedostatkem je značná časová náročnost a jen omezená aplikovatelnost získaných experimentálních dat. Výsledky zkoušek slouží většinou k hodnocení odolnosti materiálů pancířů a mlecích elementů při rozmělnování nerostných surovin [13].

Při zkoušce jsou vzorky upevněny na rotoru, který se otáčí současně ve stejném směru s bubnem přístroje. Mezi rotorem a bubnem je abrazivo, které je unášeno děrovaným opláštěním na vnitřní straně bubnu. Vzorky jsou opotřebovávány během relativního pohybu v abrazivu. Míra opotřebení závisí na zvoleném abrazivu a časové délce intervalů měření. Na konci zkoušky se vzorky demontují a změří se úbytek jejich hmotnosti [17].

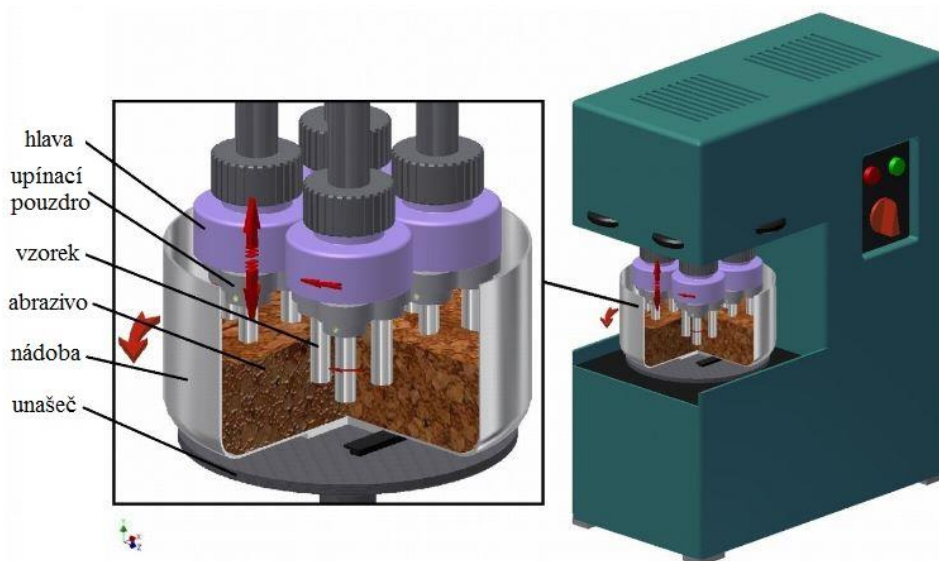


Obr. 13 Bubnový přístroj podle Bonda [20]

3.2.4 Zkouška opotřebení v brusné nádobě

Pro zkoušku opotřebení v brusné nádobě (na obrázku 14) se používá zkušební brusná nádoba s abrazivními částicemi, do které se umísťují zkušební vzorky. Povrch vzorků je opotřebováván vzájemným pohybem vzorků a volných částic. Mezi hlavní výhody přístrojů s brusnou nádobou patří možnost použití různých druhů částic z reálných podmínek abraze nebo zkoušení materiálů i za vysokých teplot. Naopak nevýhodou těchto přístrojů jsou kromě velmi malé intenzity procesu opotřebení také neustálý pokles abrazivity volných částic, který je způsoben otupováním řezných hran či jejich znečišťováním otěrem. Z toho důvodu je nutné během zkoušek pravidelně obměňovat abrazivo [13].

Zkouška spočívá v upnutí vzorků tvaru válečků do upínacích pouzder. Pouzdra se vzorky rotují a jako součást rotační hlavy současně provádí další pohyb rotace ve stejném směru. Ve směru opačném na směr rotace hlav se otáčí nádoba, kterou vyplňuje abrazivní materiál. Zkouška je používána pro testy abrazivních materiálů nebo ji lze uplatnit podobně jako u Bondova přístroje na testování materiálů vzorků. Jelikož má tato zkouška malou intenzitu abraze, využívá se často k testování vrstev, povlaků a nekovových materiálů [17].



Obr. 14 Zkouška opotřebení v brusné nádobě [17]

3.3 Abrazivní opotřebení austenitických litin

Austenitické litiny mají vysokou odolnost proti opotřebení a dobré kluzné vlastnosti, a to zásluhou především rovnoměrně rozloženého grafitu v matrici. Při vyšších teplotách se na povrchu austenitických litin tvoří z oxidů niklu vrstva ochranného filmu, která rovněž napomáhá zvýšení odolnosti proti opotřebení. Některé druhy austenitických litin mají velmi dobré vlastnosti, co se týče opotřebení také v kombinaci s řadou materiálů v oblasti teplot pod bodem mrazu až do 820 °C. Z hlediska odolnosti materiálu proti opotřebení nejsou vhodné typy se zvýšeným obsahem chromu, jelikož obsahují masivní karbidy, které mohou opotřebení naopak zvyšovat. U všech těchto materiálů je vhodné použít mazací prostředky na bázi sulfidů molybdenu, neboť se díky nim vytváří na styčných plochách lesklý sklovitý povlak tvrdší než základní materiály, který zvyšuje jak vzájemnou odolnost proti opotřebení, tak i odolnost proti korozi. Grafit a sulfid manganu jsou rovněž dobrým mazivem. Tvrdost austenitické litiny s dobrou odolností proti opotřebení se pohybuje v rozmezí 130 až 175 HB. Vyšší tvrdost pak často značí přítomnost hrubých karbidů [2], [3], [6], [7].

3.4 Další otěruvzdorné materiály

Kromě litin typu Ni-resist existuje řada dalších otěruvzdorných materiálů. Tato diplomová práce se zabývá srovnáním otěruvzdornosti austenitické litiny s jinými materiály. Z toho důvodu se tato kapitola zaměřuje na některé materiály, které byly použity pro porovnání v experimentální části práce a vyznačují se vysokou odolností proti abrazivnímu opotřebení.

3.4.1 Bílé otěruvzdorné litiny

Použití bílých litin na odlitky, které mají být odolné proti abrazivnímu účinku, nastalo už v době objevení bílé litiny pro výrobu temperované litiny a používaly se v litém stavu. Později se však začali pro otěruvzdorné odlitky využívat nelegované bílé litiny s vyšším obsahem uhlíku a nižším obsahem Si, které jsou ovšem nevhodné pro temperování. Strukturu těchto litin tvoří základní fáze – tvrdý karbid Fe_3C (cementit) a relativně měkký perlit nebo ferit. Pro jejich nízkou cenu se nelegované nebo nízkolegované bílé litiny používají v některých případech doposud. Jejich odolnost proti abrazivnímu opotřebení je ale poměrně nízká [21].

Legující přísady se do bílých litin začaly přidávat v třicátých letech minulého století. Došlo tak k vývoji martenzitických bílých litin, kde se perlitická či feritická matrice nahradila martenzitem a zbytkovým austenitem. Směs martenzitu a austenitu vzniká v případě vhodného složení bílé litiny už během ochlazování odlitků ve formě nebo na vzduchu. Tímto se vyznačují litiny Ni-Hard (typu 1 nebo 2), které jsou v zásadě nízkokřemíkové bílé litiny legované 3–5 % Ni a 1–3,5 % Cr. Pomocí různých tepelných zpracování lze snížit vnitřní pnutí nebo transformovat zbytkový austenit na martenzit nebo dolní bainit. Časem došlo na vývoj dalších bílých litin legovaných chromem nebo kombinací chromu a molybdenu, popřípadě dalšími prvky (Mn, Ni, Cu, Al) [9], [21].

Legované bílé litiny je možné dělit na pět hlavních skupin [13]:

- Chromniklové bílé litiny, které obsahují 3–5 % Ni a 1–4 % Cr. Jeden druh obsahuje zvýšený obsah Cr (7–11 %). Tyto litiny mají označení Ni-Hard 1 až 4.
- Chromové bílé litiny s 11–35 % Cr. Mohou obsahovat další legury jako Mo a/nebo Ni do 1,5 %.
- Chromomolybdenové bílé litiny s 11–23 % Cr, až do 3 % Mo. Mnohdy ještě legovány Ni nebo Cu.
- Chromovanadové bílé litiny s 12–20 % Cr a do 6% V.
- Chromomanganové bílé litiny s 12–24 % Cr a do 5% Mn.

Typické součásti vyráběné z bílé litiny jsou například nárazové lišty drtičů, rotory a skříně kalových a bagrových čerpadel, lopatky a obložení komor tryskačů, hydrocyklóny, kolena potrubních tras na dopravu hydrosměsí, briketovací formy, součásti mlýnů na mletí uhlí, těžbu a mletí hornin apod. Na obrázku 15 je příklad použití odlitku z bílé chromové litiny [13], [21].



Obr. 15 Odlitek do zařízení pro jemné mletí cementu z bílé chromové litiny [22]

Bílé chromové litiny

Strukturu bílých otěruvzdorných litin představuje matrice a karbidy. Proces krystalizace udává množství, tvar, rozměry i rozložení primárních i eutektických karbidů v odlitcích z bílých otěruvzdorných litin. Velký objemový podíl primárních nebo eutektických karbidů je příčinou vysoké tvrdosti potřebné pro odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu účinku částic. Regulace struktury kovové matrice je možná za pomoci legování nebo tepelným zpracováním. Avšak karbidickou fází od ztuhnutí odlitku nelze měnit. Je nutné zajistit správnou rovnováhu mezi odolností proti opotřebení a houževnatostí, která je potřebná pro odolnost proti opakovaným nárazům [13], [21].

Hlavní legujícím prvkem bílých chromových litin je, jak už napovídá název, chrom. Koncentrace chromu se v těchto litinách pohybuje v rozmezí 11–35 %. Cr slouží jako částečná náhrada Fe v orthorhombickém cementitu $(Fe,Cr)_3C$ nebo vytvoří komplexní karbidy - trigonální $(Fe,Cr)_7C_3$ a kubický $(Fe,Cr)_{23}C_6$. Komplexní karbidy Cr jsou tvrdší než legovaný cementit, což má za následek zvýšení otěruvzdornosti a pevnosti bílých litin. Karbidy chromu mají široké rozpětí mikrotvrdosti způsobené anizotropií vlastností a rozdílným obsahem Fe v karbidech. Vysokochromové litiny se dělí do čtyř skupin v závislosti na obsahu Cr (11-14, 14-18, 18-23 a 23-28 %). Složení těchto bílých otěruvzdorných litin dle normy EN 12513 jsou uvedena v tab. 7. Současně se u těchto litin vyskytují tři úrovně obsahu C podle požadované aplikace a dále se leguje prvky zajišťujícími jejich prokalitelnost (Mo, Ni, Cu) [13], [21].

Tab. 7 Chemické složení a tvrdost vysocechromových bílých litin podle EN 12513 [21]

Značení	tvrdost HV (min.)	obsah prvků [hmot. %]								
		C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Ni max.	Cr	Mo max.	Cu max.
EN-GJN-HV600 (XCr11)	600	1,8–2,4	1,0	0,5–1,5	0,08	0,08	2,0	11–14	3,0	1,2
		2,4–3,2								
		3,2–3,6								
EN-GJN-HV600 (XCr14)	600	1,8–2,4	1,0	0,5–1,5	0,08	0,08	2,0	14–18	3,0	1,2
		2,4–3,2								
		3,2–3,6								
EN-GJN-HV600 (XCr18)	600	1,8–2,4	1,0	0,5–1,5	0,08	0,08	2,0	18–23	3,0	1,2
		2,4–3,2								
		3,2–3,6								
EN-GJN-HV600 (XCr23)	600	1,8–2,4	1,0	0,5–1,5	0,08	0,08	2,0	23–28	3,0	1,2
		2,4–3,2								
		3,2–3,6								

3.4.2 Austenitické korozivzdorné oceli

Austenitické korozivzdorné oceli jsou nemagnetické a skládají se z méně než 0,10 % uhlíku, 16–22 % chromu, 8–40 % niklu, 0–5 % molybdenu. Eventuálně také obsahují dusík, titan, niob, měď či křemík. Díky dostatečnému obsahu austenitotvorných prvků, jako jsou nikl, mangan, uhlík a dusík, dosahují austenitické struktury jak za normální teploty, tak i při teplotách pod bodem mrazu [23].

Austenitické oceli mají sice poměrně nízkou mez kluzu (230–300 MPa), zato však vysokou houževnatost (až $240 \text{ J} \cdot \text{cm}^2$) při teplotách až $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ a tažnost, která se pohybuje v rozmezí 45 až 65 %. Pomocí tváření za studena lze zvýšit mez kluzu na 510–960 MPa, ale zároveň dojde ke snížení tažnosti na 10–25 % [23].

Austenitické korozivzdorné oceli se dělí na tři základní skupiny [23]:

- chrom-niklové oceli – 0,01–0,15 % uhlíku, 12–25 % chromu, 8–38 % niklu;
- chróm-mangan-niklové – 0,02–0,15 % uhlíku, 12–22 % chromu, 5–12 % manganu, 3–8 % niklu;
- chróm-manganové – 0,02–0,08 % uhlíku, 10–18 % chromu, 14–25 % manganu, 3–8 % niklu.

Dle požadavků je možné přidávat i další legury, jako jsou dusík, molybden, měď, křemík, titan a niob [23].

Chromniklové oceli

Austenitická Cr-Ni ocel je žárovzdorná v oxidačním prostředí 900–1100 °C. Má dobrou tvařitelnost za tepla i za studena, zaručenou svařitelnost, ale její obrobiteľnosť je snižená. Chromniklové oceli mají také velmi dobrou otěruvzdornost a používají se na vysoce tepelně i mechanicky namáhané součásti, jako jsou části žihacích pecí, komory, rošty, poklopy a nosné elementy, kalírny. Tyto oceli lze aplikovat i pro parní kotle, pouzdra termočlánků, sklářské formy a také pro mořirny neželezných kovů, díky jejich odolnosti vůči kyselému prostředí [24].

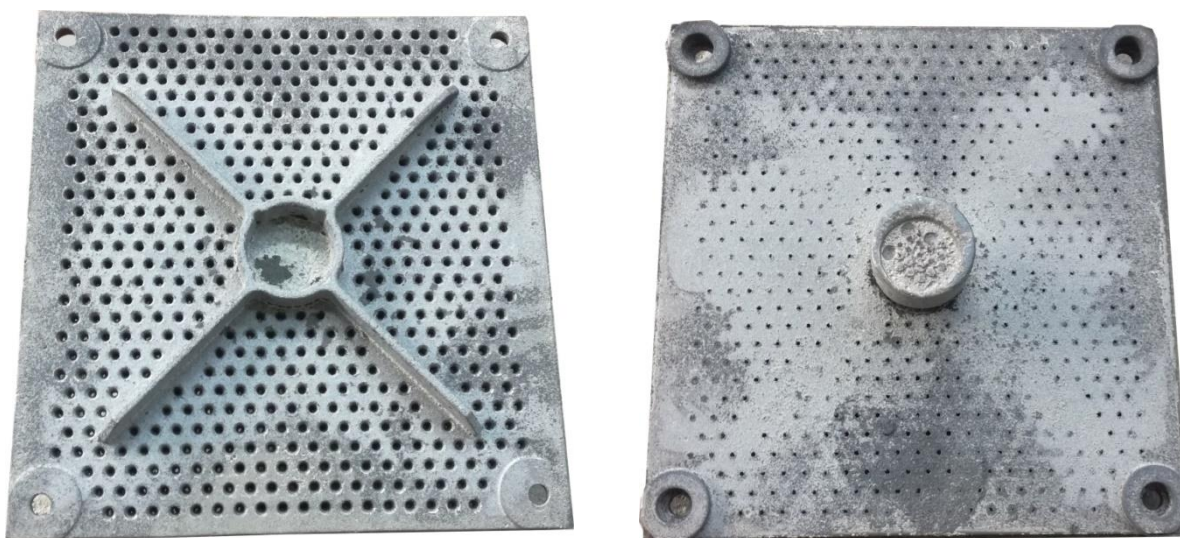
Otěruvzdorné oceli mají vysoký obsah legujících prvků – chromu a niklu. Využívají se především v případech, kdy dochází kromě statického a dynamického namáhání materiálu také k třecímu a rázovému abrazivnímu opotřebení. Používané součásti a nástroje jsou tak vystaveny zvýšenému riziku opotřebení, případně poškození. Proto se často využívají v těžebním průmyslu, dopravě a zpracování nerostných surovin. Na obrázku 16 je příklad použití odlitku z otěruvzdorné oceli [25].



Obr. 16 Odlitek rozdělovače tryskacího média z otěruvzdorné oceli [26]

4 Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části diplomové práce bylo určení a porovnání otěruvzdornosti litiny Ni-resist s dalšími zvolenými referenčními materiály. Potřebná měření a zkoušky byly prováděny v laboratořích na FSI VUT v Brně a na Mendelově univerzitě v Brně. Byl vybrán deskový odlitek používaný jako součást vytloukacího roštu. Odlitek o rozměrech 505×490×15 mm a hmotnosti přibližně 30 kg je zobrazen na obrázku 17. Originální odlitek je vyráběn z chromniklové oceli. Cílem bylo nalezení vhodnější náhrady za tento materiál. Z toho důvodu byly kromě otěruvzdornosti porovnávány i další parametry. Mimo jiné byly vypočítány také náklady na vsázkový materiál u obou těchto materiálů za účelem stanovení příznivější finanční bilance. Jako vhodná náhrada byla ověřována austenitická litina Ni-resist. Tento materiál byl vybrán i kvůli výrazně lepším slévárenským vlastnostem austenitické litiny oproti Cr-Ni oceli.



Obr. 17 Surový odlitek z litiny Ni-resist (vlevo spodní část odlitku, vpravo horní část)

4.1 Použité materiály

Pro experiment byly kromě litiny Ni-resist (odpovídající značce EN-GJSA-XNiMn13-7 pouze se zvýšeným obsahem Cr pro zajištění vzniku karbidů) zvoleny další čtyři materiály – bílá chromová litina (EN-GJN-HV600(XCr23)), uhlíková ocel (G20Mn5), duplexní ocel (Duplex Gr4A) a chromniklová ocel z originálního odlitku desky (přibližně odpovídající značce GX40CrNiSi25-12). Materiály byly v litém stavu, pouze duplexní ocel byla po rozpouštěcím žihání na teplotě 1130 °C s ochlazením do vody. Případné tepelné zpracování u originální desky není známo. Z každého materiálu byly pro tuto diplomovou práci poskytnuty části odlitků z jednotlivých materiálů. Z těch byly následně na metalografické pile (viz obr. 18) vyřezány různé vzorky, které byly dále použity pro měření chemického složení, tvrdosti, hustoty, otěruvzdornosti nebo metalografické hodnocení.

Chemická analýza byla provedena na atomovém emisním spektrometru Q4 Tasman a naměřené chemické složení jednotlivých zkoušených materiálů je uvedeno v tabulce 8.

Tab. 8 Chemické složení použitých materiálů v [hmot. %]

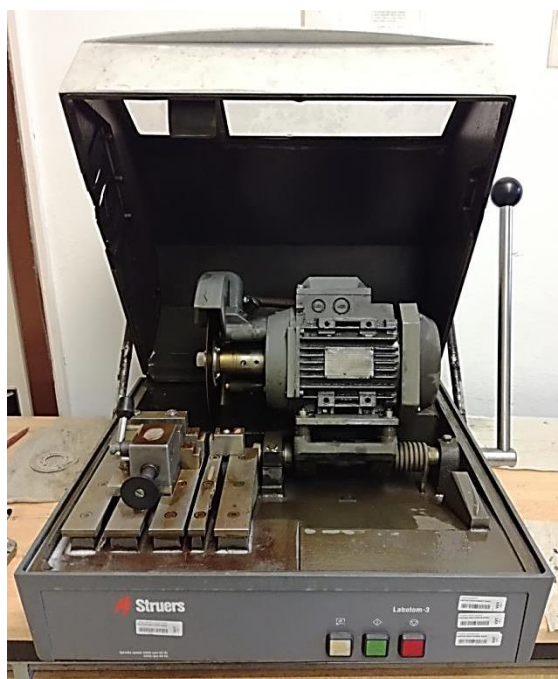
Materiál	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti	Mg	N
Ni-resist	2,56	2,04	6,40	0,036	<0,150	1,89	0,13	12,63	0,11	0,08	0,05	0,049
Cr litina	3,29	0,35	0,59	0,018	<0,150	24,58	0,70	1,56	0,09	–	–	0,034
G20Mn5	0,22	0,31	1,73	0,014	0,015	0,07	0,02	0,05	0,09	–	–	0,007
Duplex	0,03	0,41	0,93	0,018	<0,150	22,89	2,97	5,05	0,06	–	–	0,187
Cr-Ni ocel	0,43	0,85	0,73	0,022	<0,150	24,07	0,09	13,14	0,12	–	–	0,087

4.2 Měření otěruvzdornosti

Po odlití, ztuhnutí a dostatečném zchladnutí odlitků se na vytloukacím roštu uvolňuje pomocí vibrační formovací směs společně s odlitky z rámu. Použitá formovací směs je transportována k dalšímu zpracování a odlitek na další operaci. Během tohoto procesu dochází k namáhání součástí vytloukacího roštu, které jsou v přímém kontaktu s odlitkem a formovací směsí z hlediska vysoké teploty a zejména působením abrazivního opotřebovávání. Jelikož byl tento odlitek původně z Cr-Ni oceli nahrazen litinou Ni-resist, bylo třeba zjistit, zda mají oba materiály srovnatelnou otěruvzdornost.

4.2.1 Příprava vzorků

Pro ověření otěruvzdornosti byla zvolena zkouška na brusném plátně, neboť nejlépe odpovídá abrazivnímu opotřebování při provozu vytloukacího roštu. Vzorky pro zkoušku opotřebování byly nařezány na rozměr 10×10×8 mm pomocí metalografické rozbrušovací pily Struers Labotom-3 (obrázek 18).



Obr. 18 Metalografická rozbrušovací pila Struers Labotom-3

Z pěti materiálů bylo vyřezáno šest vzorků. Z každého materiálu jeden vzorek až na bílou chromovou litinu, která obsahuje jehlicovité primární karbidy a z níž byly vyřezány dva vzorky každý v jiném směru. To z důvodu, aby bylo možné sledovat opotřebení na ploše kolmé na směr uložení karbidů v kovové matici a na ploše rovnoběžné se směrem uložení karbidů. Následně byla vyřezána další série šesti vzorků, takže bylo připraveno celkem 12 vzorků k měření otěruvzdornosti, z každého materiálu dva. První skupina vzorků je na obrázku 19 a druhá skupina na obrázku 20.

Označení vzorků vzhledem k materiálu:

1 – litina Ni-resist

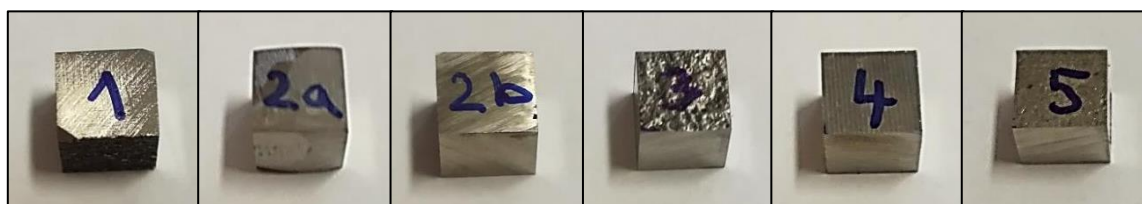
2a – bílá chromová litina (s karbidy kolnými na opotřebovanou plochu vzorku)

2b – bílá chromová litina (s karbidy rovnoběžnými s opotřebovanou plochou vzorku)

3 – uhlíková ocel

4 – duplexní ocel

5 – Cr-Ni ocel



Obr. 19 Vzorky na měření abrazivního opotřebení – 1. měření



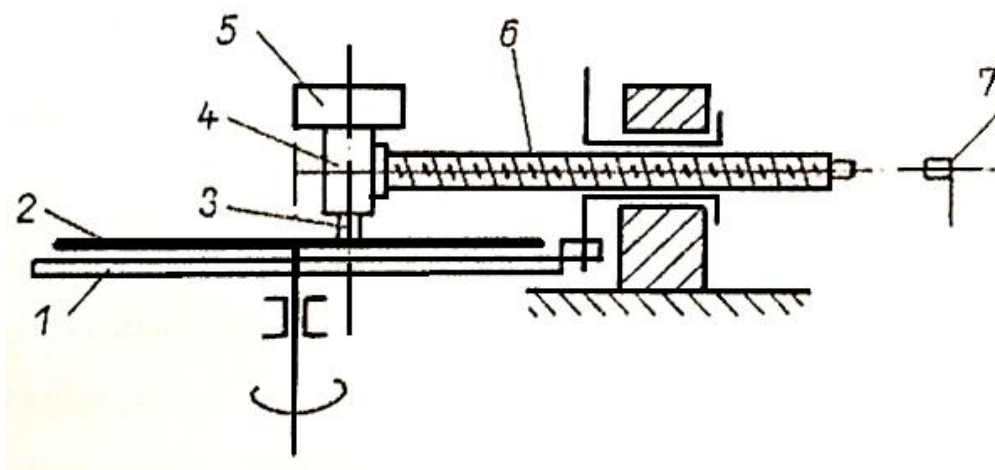
Obr. 20 Vzorky na měření abrazivního opotřebení – 2. měření

4.2.2 Zkouška opotřebení na brusném plátně

Měření probíhalo na Mendelově univerzitě v Brně za použití přístroje na měření opotřebení s brusným plátnem (obrázek 21). Na obrázku 22 je znázorněno schéma přístroje. Byl použit brusný papír značky GLOBUS s korundovým brusivem o zrnitosti P 120.



Obr. 21 Příklad přístroje na měření opotřebení na brusném plátně na Mendelově univerzitě v Brně



Obr. 22 Schéma přístroje s brusným plátnem [9]

Na začátku měření byl každý vzorek nejprve zvážen na laboratorní váze KERN KB 500-2 (obrázek 23) s přesností na setinu gramu. Poté byl vzorek (3) připevněn do upínací hlavice (4) a zatížen závažím (5). Po spuštění přístroje začala rotovat kruhová deska (1) s brusným plátnem (2). Každou otočku patka, která byla umístěna na boční straně kruhové desky, narazila do zářezky. Tím pootočila pohybový šroub (6), čímž došlo k posunutí vzorku dál od středu brusného plátna, a tak byl vzorek broušen novou neopotřebovanou plochou plátna.

Kruhová deska se zastavila, jakmile vzorek ujel dráhu 50 m a pohybový šroub narazil do koncového vypínače (7). Následně byl vzorek vyjmut z přístroje a před začátkem dalšího měření byl zvážen pro výpočet hmotnostního úbytku vzorku. Takto proběhla další měření, dokud vzorek nepřešel postupně zbytek plochy brusného plátna. Na každém plátně bylo uskutečněno pět měření jednoho vzorku, a tím pádem jeden vzorek ujel dráhu 250 m. Celkem bylo tedy spotřebováno 12 brusných pláten na 12 vzorků a bylo provedeno 60 měření hmotnostního úbytku.



Obr. 23 Váha KERN KB 500-2 [27]

4.2.3 Výsledky měření

Byly provedeny dvě série měření. V jedné sérii měření bylo vždy šest vzorků a každý byl měřen pětkrát. Každá série měření je nazvána pracovním názvem Zkouška č. 1 a Zkouška č. 2.

Zkouška č. 1

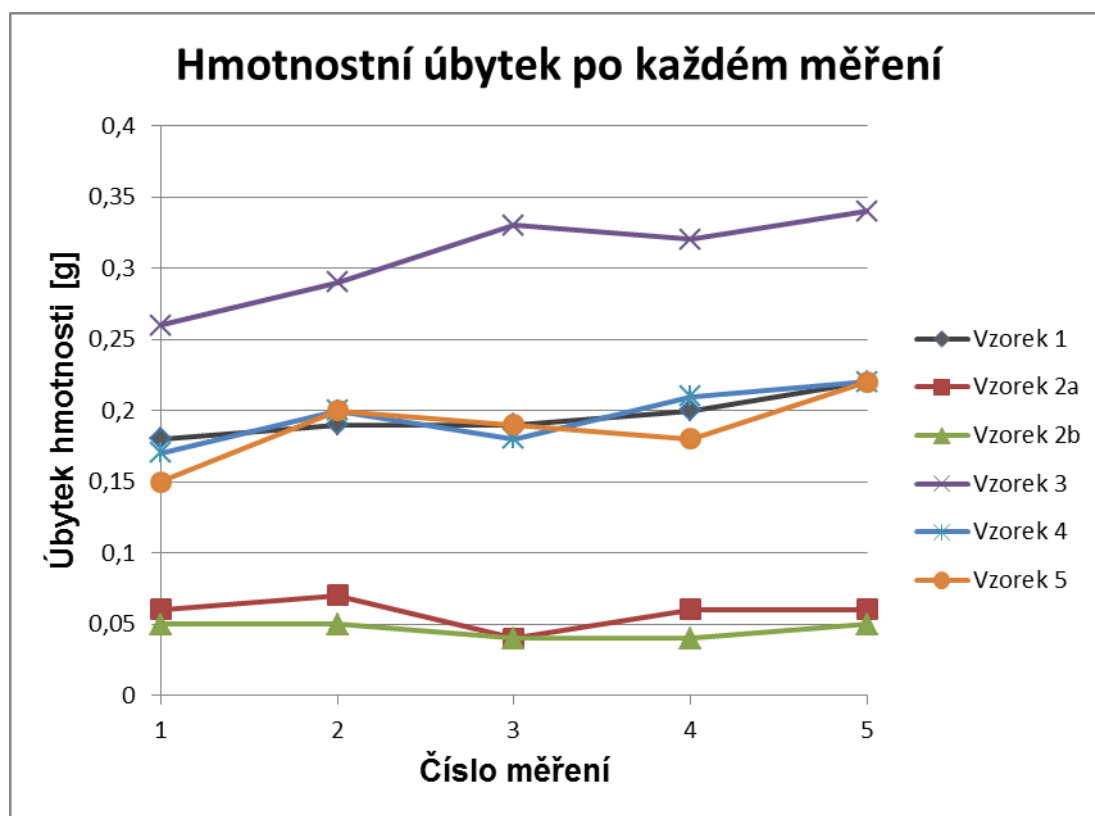
V tabulce 9 jsou uvedeny výsledné hodnoty po Zkoušce č. 1, kdy byla zaznamenána hmotnost vzorků před začátkem měření a následně po každém měření. V tabulce 10 je pak z těchto hodnot vypočítán hmotnostní úbytek po každém měření, celkový úbytek, aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Z této tabulky byl také vytvořen graf hmotnostních úbytků znázorněný na obrázku 24 a graf celkových úbytků na obrázku 25. Pomocí těchto grafů je názorně zobrazen průběh měření, z kterého plyne, že k největšímu úbytku materiálu docházelo u vzorku 3 z uhlíkové oceli, k nejmenšímu úbytku u vzorků 2a a 2b z bílé chromové litiny a střednímu úbytku u vzorků 1, 4 a 5.

Tab. 9 Hmotnost vzorků po každém měření v [g] – zkouška č. 1

Vzorek	Počáteční hmotnost	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5
1	5,34	5,16	4,97	4,78	4,58	4,36
2a	5,71	5,65	5,58	5,54	5,48	5,42
2b	5,28	5,23	5,18	5,14	5,10	5,05
3	5,24	4,98	4,69	4,36	4,04	3,70
4	5,93	5,76	5,56	5,38	5,17	4,95
5	5,28	5,13	4,93	4,74	4,56	4,34

Tab. 10 Hmotnostní úbytek po každém měření v [g] – zkouška č. 1

Vzorek	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Celkový úbytek	\bar{x}	σ
1	0,18	0,19	0,19	0,20	0,22	0,98	0,20	0,014
2a	0,06	0,07	0,04	0,06	0,06	0,29	0,06	0,010
2b	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,23	0,05	0,005
3	0,26	0,29	0,33	0,32	0,34	1,54	0,31	0,029
4	0,17	0,20	0,18	0,21	0,22	0,98	0,20	0,019
5	0,15	0,20	0,19	0,18	0,22	0,94	0,19	0,023



Obr. 24 Graf hmotnostních úbytků podle jednotlivých vzorků – zkouška č. 1



Obr. 25 Graf celkových hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků – zkouška č. 1

Zkouška č. 2

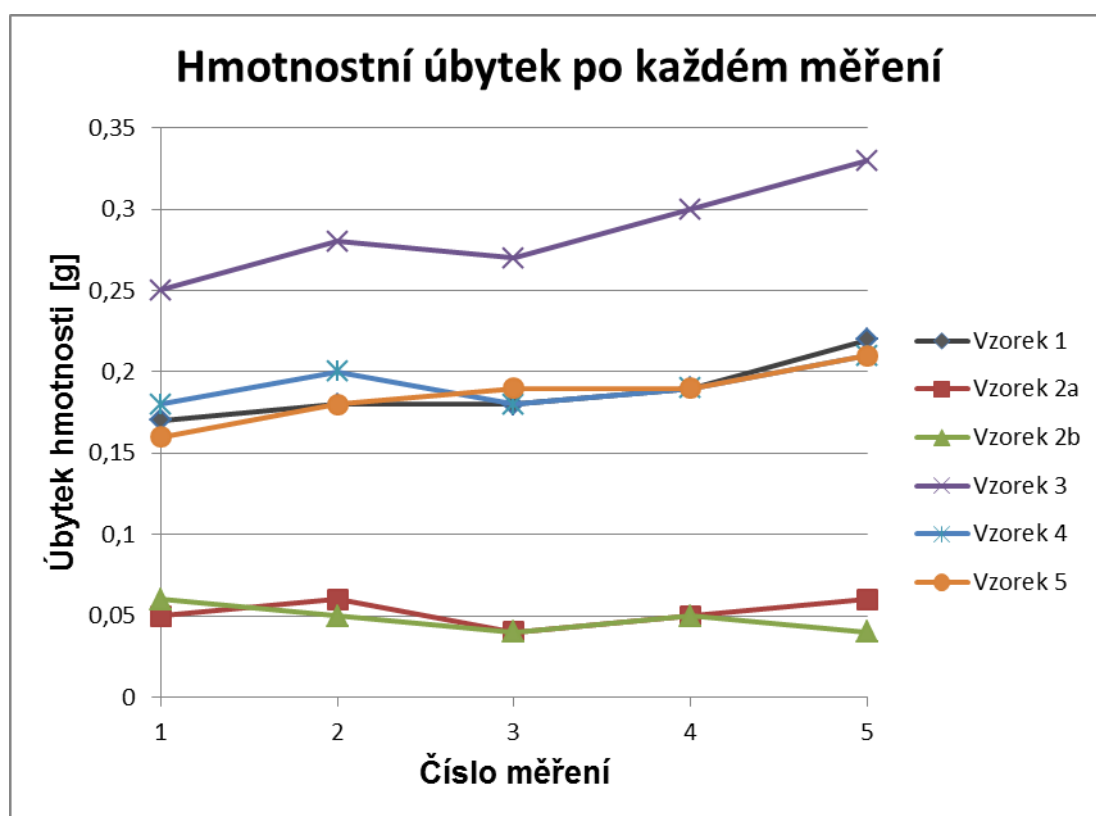
V tabulce 11 jsou uvedeny výsledné hodnoty po Zkoušce č. 2, kdy byla zaznamenána hmotnost vzorků před začátkem měření a následně po každém měření. V tabulce 12 je pak z těchto hodnot vypočítán hmotnostní úbytek po každém měření, celkový úbytek, aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Z této tabulky byl také vytvořen graf hmotnostních úbytků znázorněný na obrázku 26 a graf celkových úbytků na obrázku 27. Grafy zobrazují obdobné výsledky jako u Zkoušky č. 1.

Tab. 11 Hmotnost vzorků po každém měření v [g] – zkouška č. 2

Vzorek	Počáteční hmotnost	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5
1	5,45	5,28	5,10	4,92	4,73	4,51
2a	5,38	5,33	5,27	5,23	5,18	5,12
2b	5,92	5,86	5,81	5,77	5,72	5,68
3	5,60	5,35	5,07	4,80	4,50	4,17
4	5,80	5,62	5,42	5,24	5,05	4,84
5	5,68	5,52	5,34	5,15	4,96	4,75

Tab. 12 Hmotnostní úbytek po každém měření v [g] – zkouška č. 2

Vzorek	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	Celkový úbytek	\bar{x}	σ
1	0,17	0,18	0,18	0,19	0,22	0,94	0,19	0,017
2a	0,05	0,06	0,04	0,05	0,06	0,26	0,05	0,007
2b	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,24	0,05	0,007
3	0,25	0,28	0,27	0,30	0,33	1,43	0,29	0,027
4	0,18	0,20	0,18	0,19	0,21	0,96	0,19	0,012
5	0,16	0,18	0,19	0,19	0,21	0,93	0,19	0,016



Obr. 26 Graf hmotnostních úbytků podle jednotlivých vzorků – zkouška č. 2



Obr. 27 Graf celkových hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků – zkouška č. 2

4.2.4 Měření měrné hmotnosti

Pro výpočet poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení bylo zapotřebí zjistit měrnou hmotnost jednotlivých materiálů. Byla měřena pomocí váhy pro vyhodnocení indexu hustoty MK 2200 (obrázek 28) metodou dvojího vážení. Vzorek daného materiálu byl nejprve zvážen na vzduchu, poté byl položen na drátek připevněný k víku nádoby váhy, ponořen do vody v nádobě a znovu zvážen. Přístroj následně vypočítal výslednou měrnou hmotnost materiálu. Bylo provedeno pět měření každého materiálu a z nich spočítán aritmetický průměr. Hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 13.



Obr. 28 Váha MK 220 [28]

Tab. 13 Měření měrné hmotnosti v [g/cm³]

Materiál	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4	Měření 5	\bar{x}
1	7,59	7,55	7,54	7,55	7,55	7,56
2	7,39	7,40	7,38	7,38	7,36	7,38
3	7,83	7,92	7,77	7,81	7,85	7,84
4	7,78	7,78	7,76	7,76	7,76	7,77
5	7,74	7,74	7,72	7,73	7,76	7,74

4.2.5 Výpočet poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení

K hodnocení otěruvzdornosti materiálu se používá výpočet poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ψ_a , která se podle normy ČSN 01 5084 vypočítá ze vzorce [29]:

$$\psi_a = \frac{W_{oPZ}}{W_{oZ}} = \frac{W_{hPZ}}{W_{hZ}} \cdot \frac{\rho_Z}{\rho_{PZ}} \quad (3)$$

kde značí [29]:

ψ_a poměrnou odolnost proti abrazivnímu opotřebení

W_{oPZ} průměrný objemový úbytek porovnávacích zkušebních těles [mm³]

W_{oZ} průměrný objemový úbytek zkoušených těles [mm³]

W_{hPZ} průměrný hmotnostní úbytek porovnávacích zkušebních těles [g]

W_{hZ} průměrný hmotnostní úbytek zkoušeného tělesa [g]

ρ_{PZ} měrná hmotnost porovnávacího zkušebního tělesa [g/cm³]

ρ_Z měrná hmotnost zkoušeného tělesa [g/cm³]

Jako porovnávací zkušební těleso byl zvolen materiál č. 3 z uhlíkové oceli, jakožto materiál s nejnižší otěruvzdorností. Dosazením naměřených hodnot do vzorce (3) byly vypočítány hodnoty poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení (viz tab. 14) vycházející ze zkoušky č. 1 a 2. Poté byly tyto hodnoty zprůměrovány a spočítán procentuální rozdíl hodnot mezi vzorkem z litiny Ni-resist a z Cr-Ni oceli. Čím je hodnota ψ_a vyšší, tím je lepší odolnost proti abrazi. Z uvedeného vychází otěruvzdornost litiny Ni-resist o přibližně 5 % nižší než otěruvzdornost Cr-Ni oceli, což ale nelze pokládat za zásadní rozdíl, a proto lze považovat otěruvzdornost těchto dvou materiálů za srovnatelnou. Nejvyšší otěruvzdornost mají dle očekávání vzorky z bílé chromové litiny a naopak nejnižší z porovnávaných materiálů má vzorek z uhlíkové oceli. Je zajímavé, že při porovnání vzorků 2a a 2b z bílé chromové litiny

vykazuje vzorek 2b s karbidy rovnoběžnými se zkoušenou plochou vyšší otěruvzdornost než vzorek 2a s karbidy kolnými na zkoušenou plochu. Částečně to totiž odporuje informacím z některých literárních zdrojů [30], [31]. Ovšem důvody nebyly dále zkoumány, neboť to nebylo cílem práce.

Tab. 14 Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení

Ψ_a	Zkouška č. 1	Zkouška č. 2	\bar{x}
Ψ_{a1}	1,52	1,47	1,49
Ψ_{a2a}	5,00	5,18	5,09
Ψ_{a2b}	6,31	5,61	5,96
Ψ_{a4}	1,56	1,48	1,52
Ψ_{a5}	1,62	1,52	1,57

4.3 Měření tvrdosti

Tvrdość byla měřena podle Brinella na tvrdoměru LECO LCB (obrázek 29). Indentorem byla kulička z tvrdokovu o průměru 5 mm, která byla zatěžovací silou $F = 7357 \text{ N}$ vtlačována do zkoušeného vzorku materiálu po dobu 10 s. Následně byly změřeny dva na sebe kolmé průměry vtisku, který v materiálu zanechal indenter. Na každém vzorku bylo provedeno 5 měření a z naměřených hodnot vypočten aritmetický průměr. Poté byla pomocí převodní tabulky určena tvrdost materiálu. Výsledné hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tab. 15. Vyplývá z nich, že nejnižší tvrdost vykazuje vzorek č. 5 z chromniklové oceli. Zatímco nejvyšší tvrdost vzorek č. 2a z bílé chromové litiny s karbidy kolnými ke zkoušené ploše, což se předpokládalo. Překvapením byl však velký rozdíl tvrdosti mezi vzorky 2a a 2b. Dle výsledků se zdá, že tvrdost zkoušených vzorků nemá zásadní vliv na poměrnou odolnost proti otěru. Kdy např. nejměkčí vzorek (č. 5 – originální deska) měl třetí nejlepší otěruvzdornost.



Obr. 29 Tvrdoměr – Brinell LECO LCB

Tab. 15 Naměřené průměry vtisků v [mm] a výsledná tvrdost HBW5/750

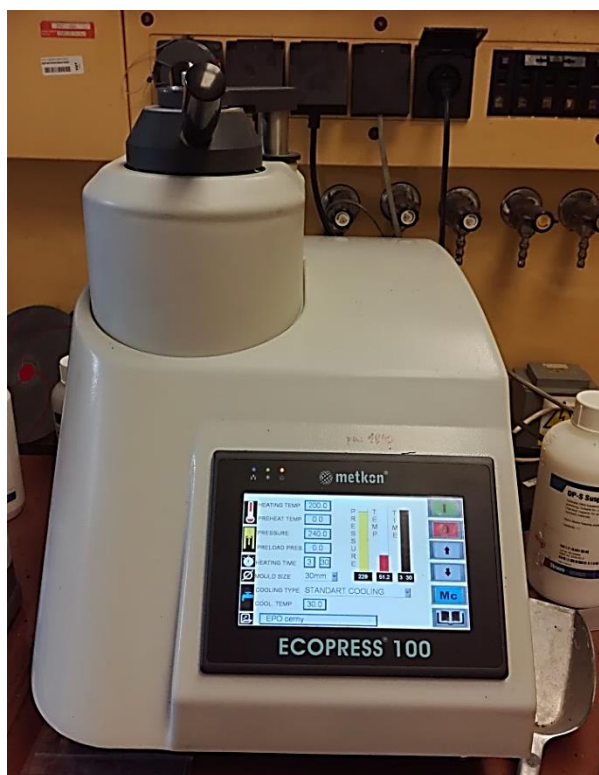
vzorek	vtisk 1	vtisk 2	vtisk 3	vtisk 4	vtisk 5	\bar{x}	tvrdost (HB)
1	1,934	1,835	1,825	1,936	1,818	1,869	259
2a	1,230	1,247	1,239	1,233	1,252	1,240	601
2b	1,317	1,350	1,427	1,354	1,360	1,361	498
3	2,260	2,271	2,279	2,305	2,303	2,284	171
4	2,107	2,091	2,164	2,121	2,099	2,116	199
5	2,323	2,409	2,329	2,356	2,319	2,347	160

4.4 Metalografický rozbor

Byl proveden metalografický rozbor za účelem pozorování mikrostruktury jednotlivých materiálů a také reliéfu vzniklého na povrchu vzorku během měření otěruvzdornosti.

4.4.1 Výroba metalografických výbrusů

Po měření otěruvzdornosti byly vzorky 1 až 5 nařezány na metalografické rozbrušovací pile (viz obrázek 18). Řez byl veden kolmo k té ploše vzorku, která byla vystavena abrazivnímu opotřeбенí během měření otěruvzdornosti. Následně byly vzorky po dvou zalisovány za tepla do plastické hmoty tak, aby bylo možné pozorovat profil broušeného povrchu v řezu. K lisování vzorků byl použit lisovací přístroj od firmy Metkon ECOPRESS 100 (obrázek 30). Byly zhotoveny tři výlisky o průměru 30 mm se šesti vzorky.



Obr. 30 Lisovací přístroj ECOPRESS 100

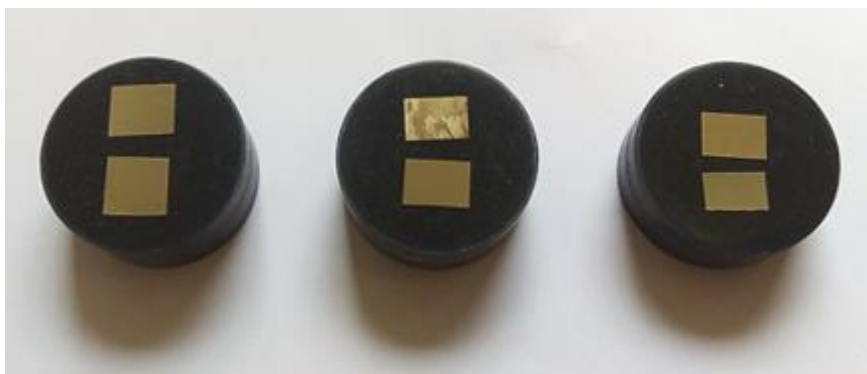
Po označení vzorků a sražení hran byly vzorky broušeny a leštěny na automatickém přístroji Struers LaboPol-5 (obrázek 31). Broušení vzorků probíhalo pod tekoucí vodou rychlostí 300 ot./min po dobu 5 minut. Až byly vzorky dostatečně vybroušeny, byly omyty vodou, lihem a usušeny.

Poté byly vzorky leštěny leštícími kotouči. Nejprve kotoučem MD Largo 9 μm a pak MD Nap 3 μm . Jednotlivá leštění vzorků probíhala za rovnoměrného kapání diamantové leštící emulze na rotující kotouč rychlostí 150 ot./min po dobu 5 minut. Na závěr se vzorky leštily korundovým brusivem (1 μm), následně byly znovu omyty vodou, lihem a osušeny.



Obr. 31 Automatický přístroj Struers LaboPol-5

Na takto připravených vzorcích byly potom pozorovány pomocí světelného mikroskopu MTM 406 mikrostruktury jednotlivých materiálů. Pro sledování struktur bylo nutné některé vzorky ještě naleptat speciálními leptadly. Vzorek z uhlíkové oceli byl leptán pomocí 3% Nitalu. Vzorek z Cr-Ni oceli a z duplexní oceli byl leptán pomocí leptadla Kalling. Hotové leštěné metalografické vzorky jsou vyfoceny na obrázku 32.



Obr. 32 Metalografické vzorky – leštěné

4.4.2 Analýza mikrostruktury

Na obrázcích 33 až 44 jsou snímky mikrostruktury jednotlivých zkoumaných vzorků. Ke každému vzorku jsou zobrazeny vždy dva snímky. Horní snímek ve zvětšení 100x a spodní snímek ve zvětšení 400x. Každý snímek byl pořízen tak, aby bylo možné pozorovat reliéf na povrchu vzorku, který vznikl během měření otěruvzdornosti.

V mikrostruktuře litiny Ni-resist (obrázky 33 a 34) lze vidět kuličkový grafit uložený v základní kovové matici tvořené austenitem a karbidy chromu. Při větším zvětšení je možné pozorovat v povrchové vrstvě částečně vytrhané karbidy.

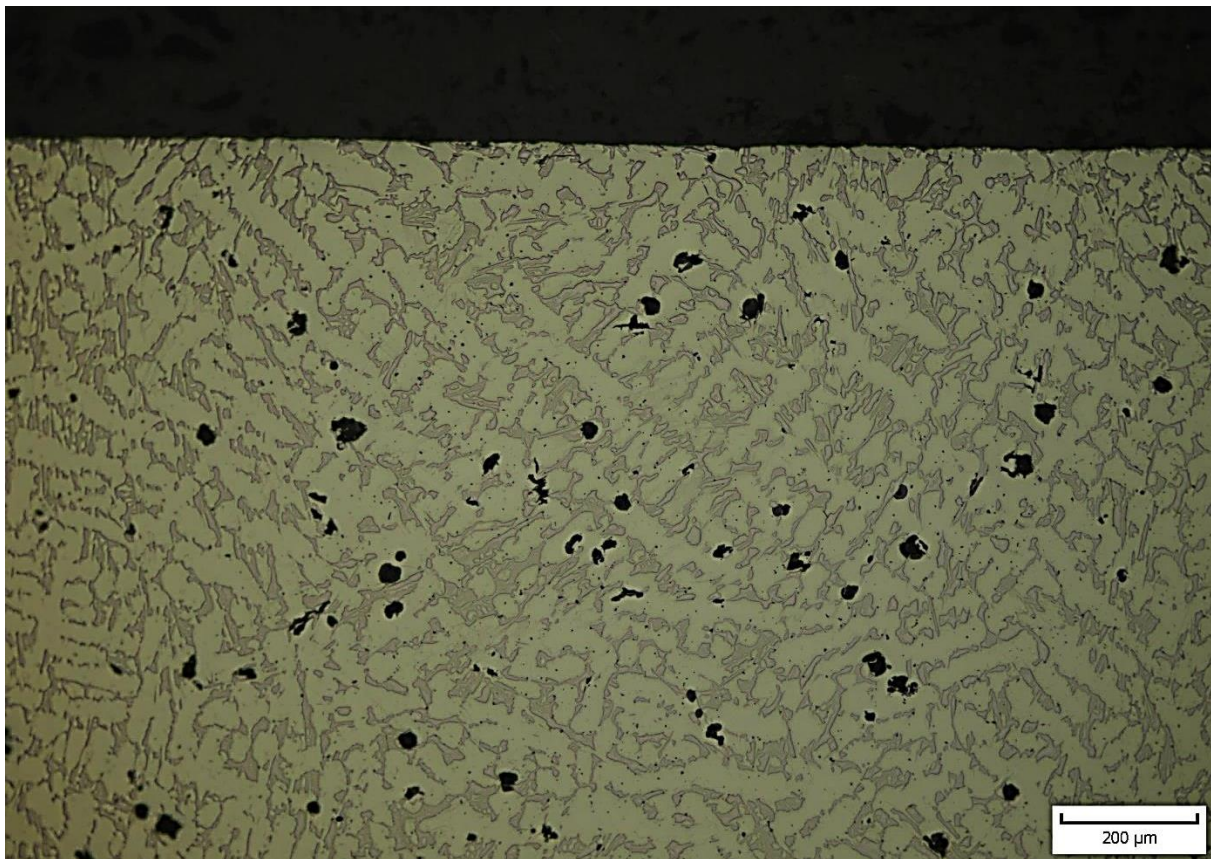
Na obrázcích 35 a 36 je v bílé chromové litině dobře patrný směr karbidů kolmý na opotřebovávanou plochu. U většího zvětšení lze vidět výraznější reliéf povrchové vrstvy a také větší množství vytrhaných karbidů.

Směr karbidů je zřetelný také u druhého vzorku z bílé chromové litiny (obrázek 37 a 38). Karbidy jsou rovnoběžné s měřenou plochou. Povrchová vrstva je výrazně více poškozena. Kvůli nepříznivému směru karbidů jsou totiž více vytrhávány.

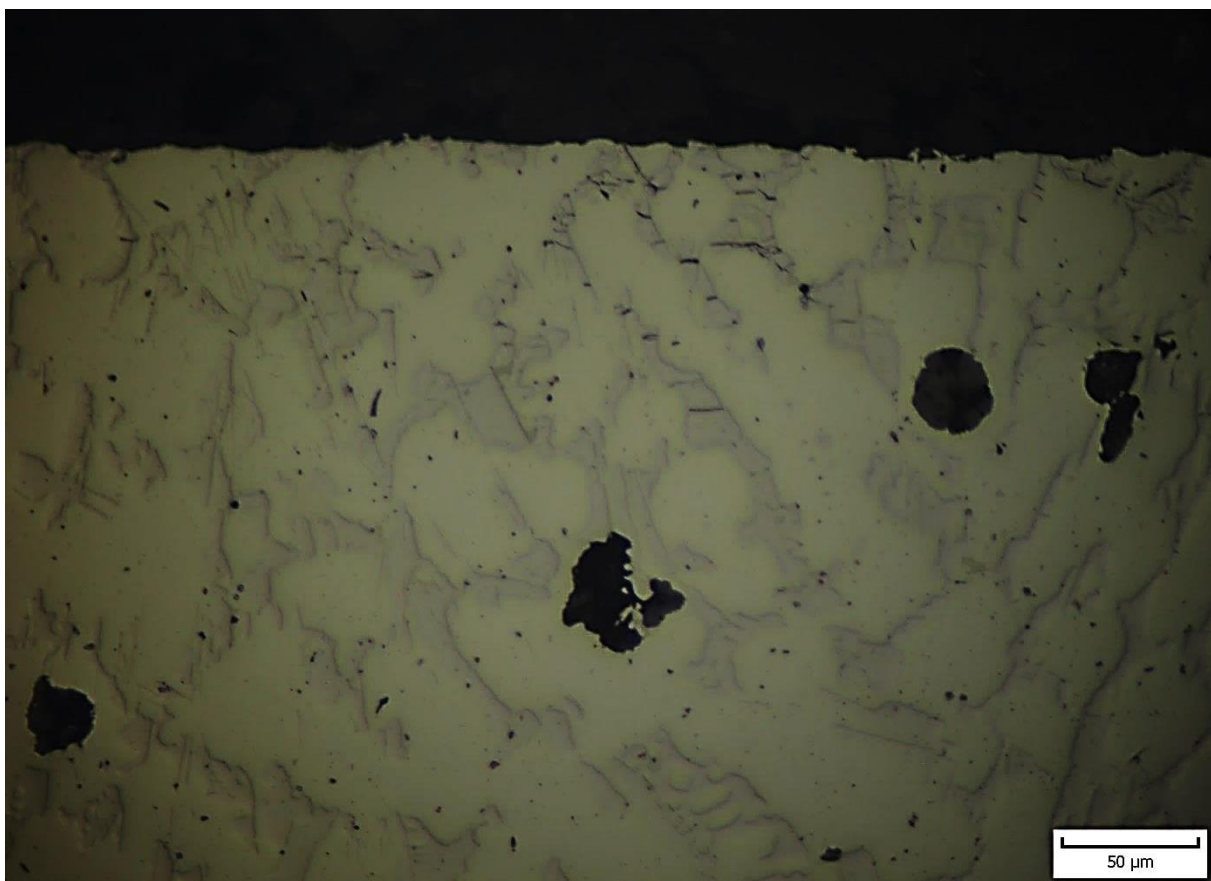
Naleptání pomohlo u uhlíkové oceli (obrázek 39 a 40) zvýraznit perliticko-feritickou matici. Nicméně nelze přesně určit, zda dochází k většímu opotřebovávání některé složky více než druhé.

U vzorku z duplexní oceli (obrázek 41 a 42) lze po naleptání vidět světlejší místa znázorňující oblasti výskytu austenitu. Podobně jako u uhlíkové oceli ani zde nelze přesně určit, zda dochází k většímu opotřebovávání některé složky více než druhé.

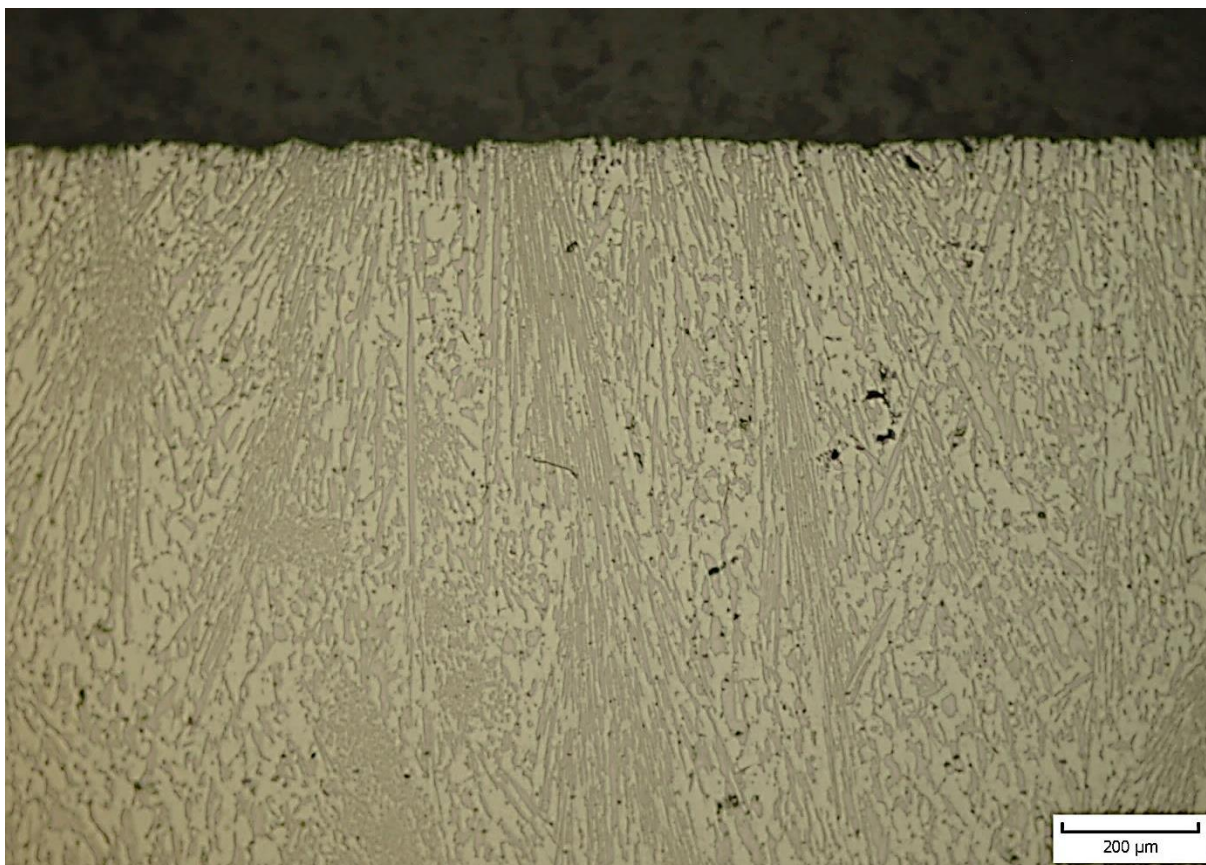
Na vzorku z chromniklové oceli (obrázek 43 a 44) byla leptáním zviditelněna dendritická struktura a po hranicích dendritů se objevily karbidy, u kterých však není patrné, že by docházelo k jejich vytrhávání.



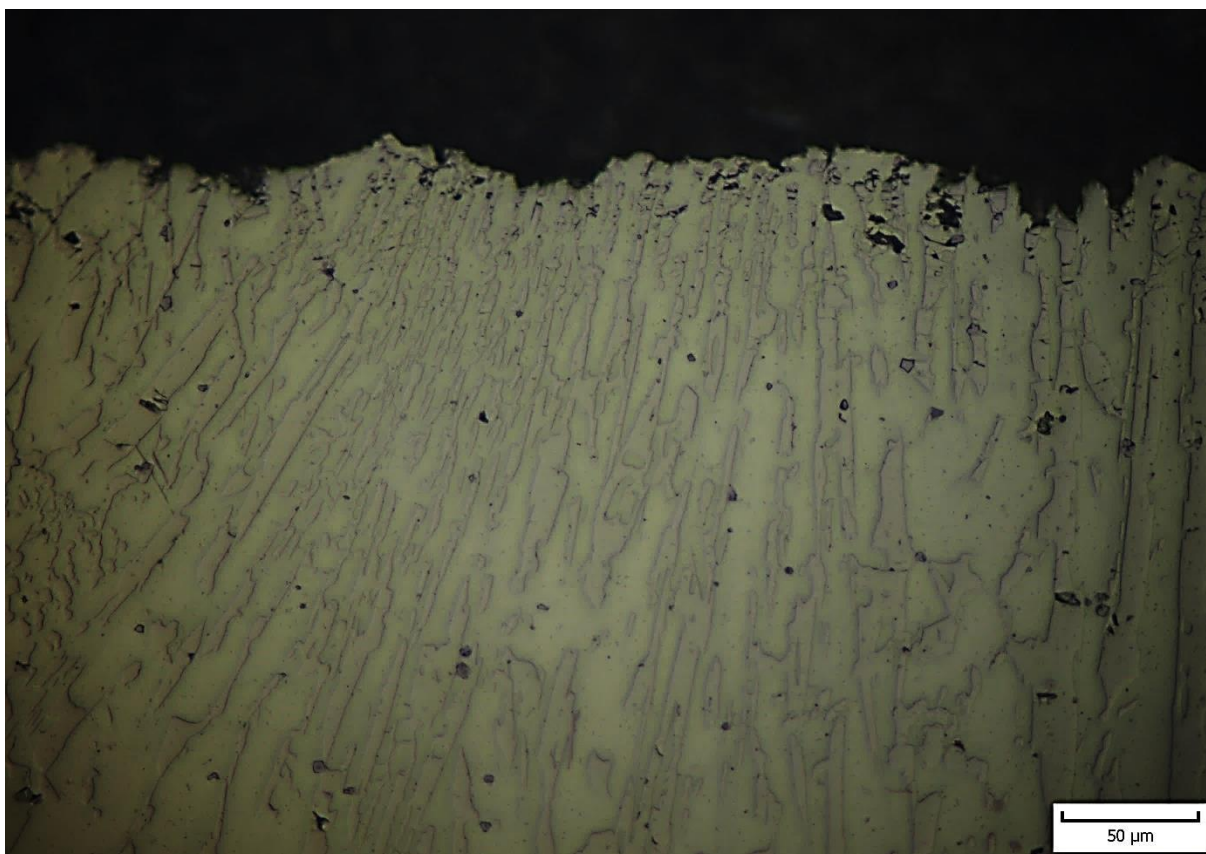
Obr. 33 Mikrostruktura vzorku z litiny Ni-resist (zvětšení 100x)



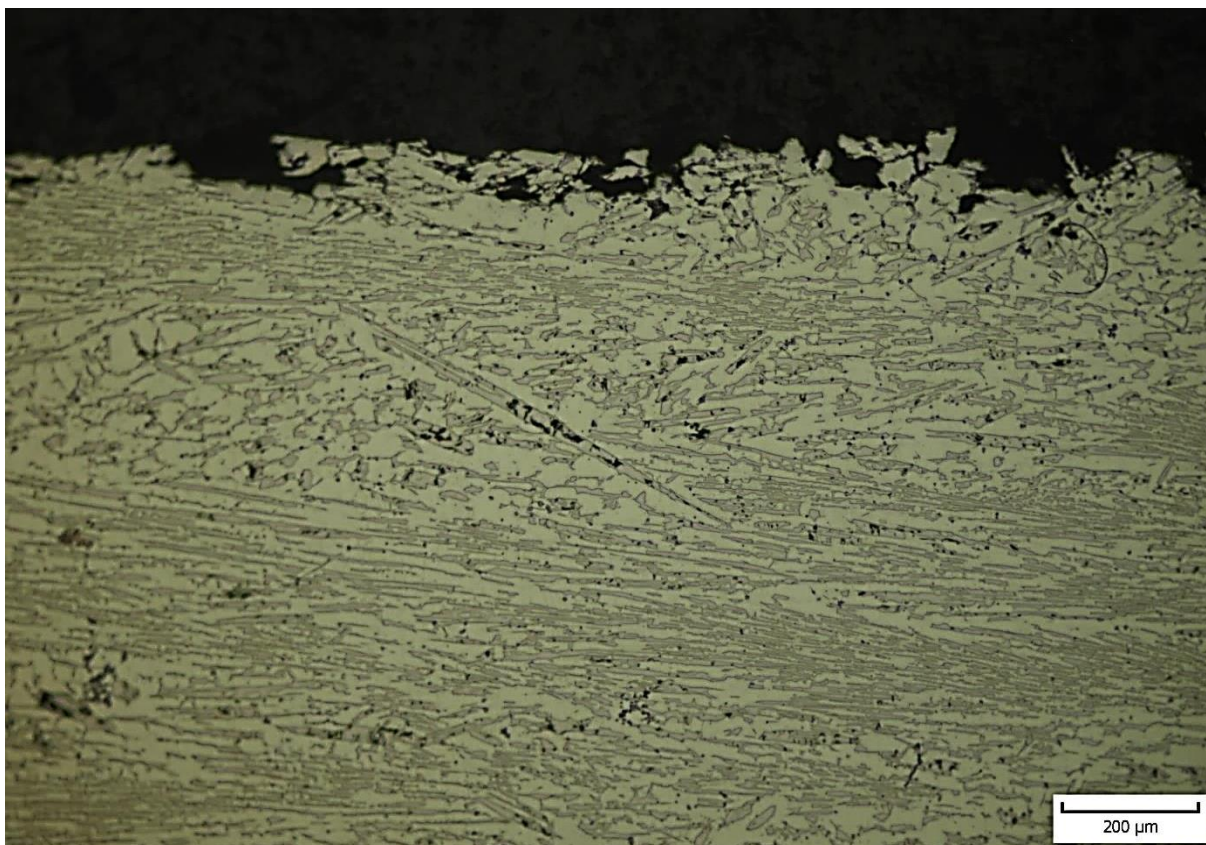
Obr. 34 Mikrostruktura vzorku z litiny Ni-resist (zvětšení 400x)



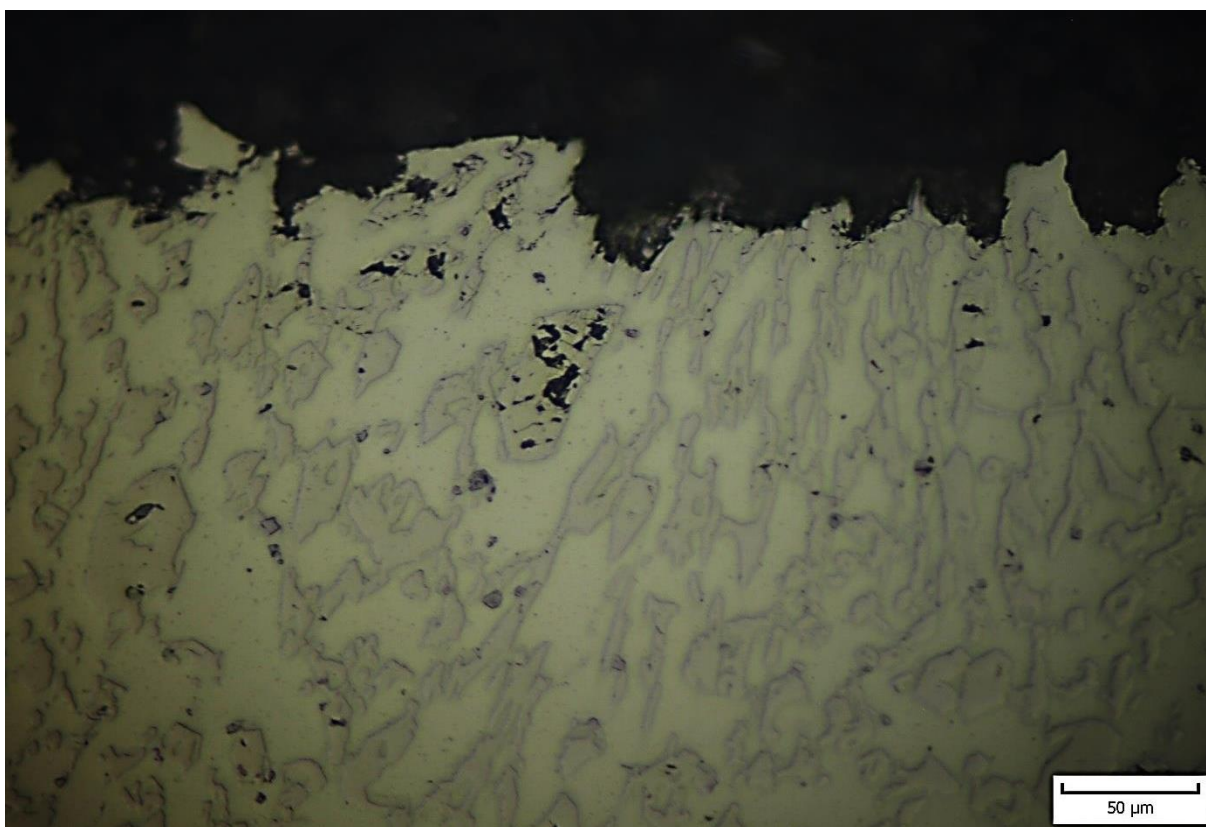
Obr. 35 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v kolmém směru (zvětšení 100x)



Obr. 36 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v kolmém směru (zvětšení 400x)



Obr. 37 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v rovnob. směru (zvětšení 100x)



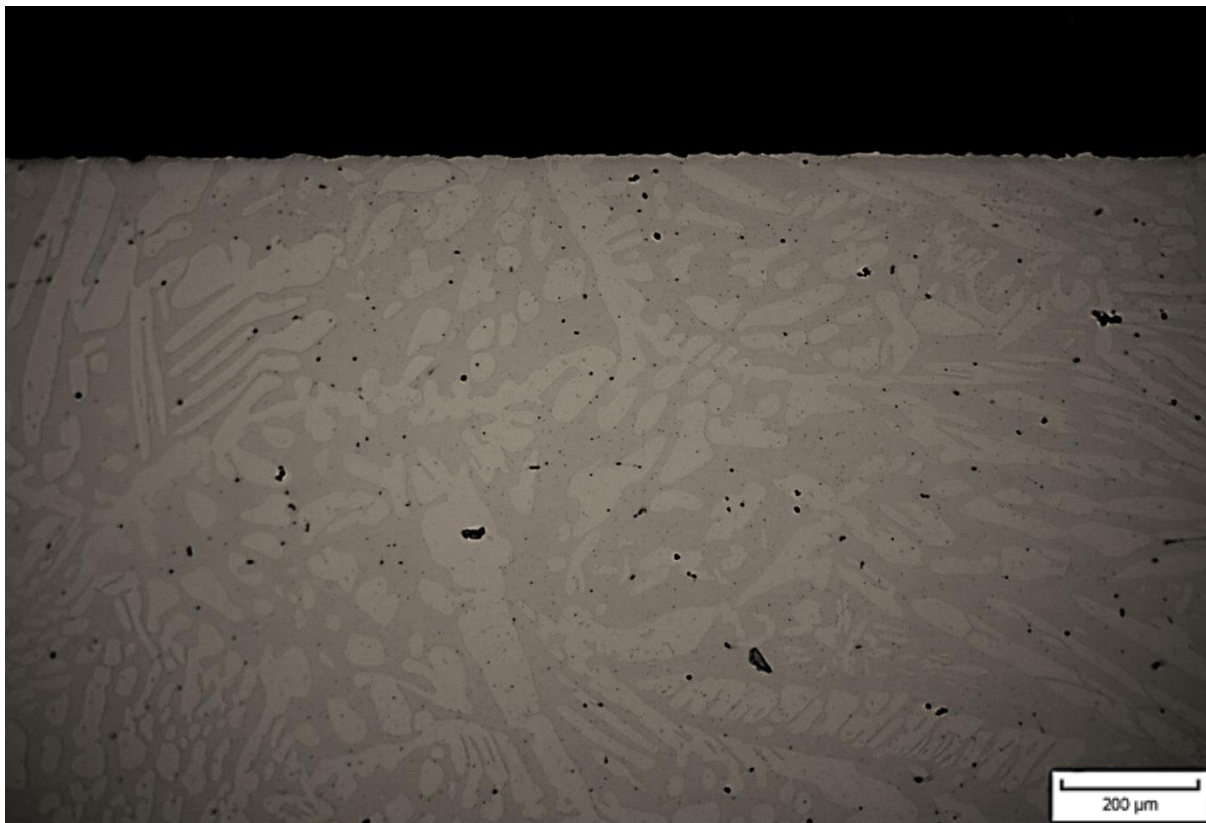
Obr. 38 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v rovnob. směru (zvětšení 400x)



Obr. 39 Mikrostruktura vzorku z uhlíkové oceli (zvětšení 100x)



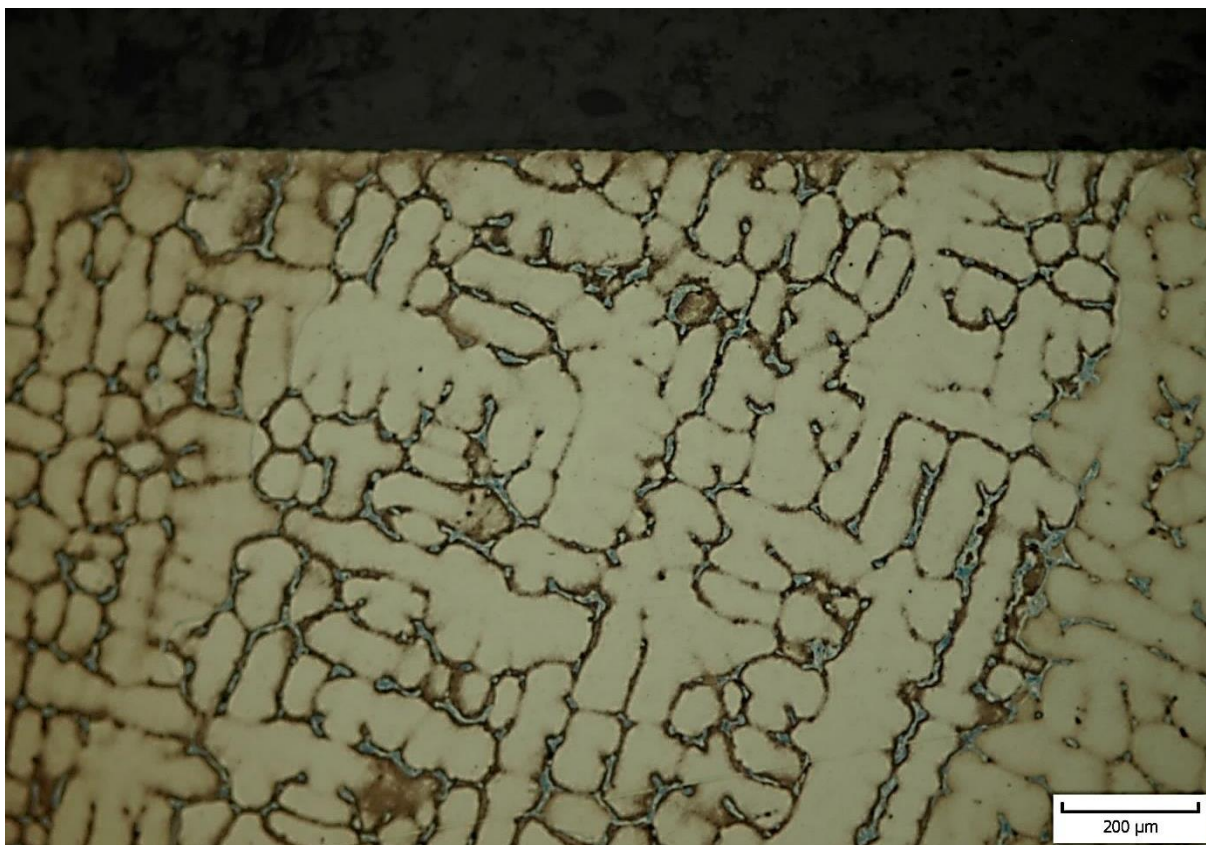
Obr. 40 Mikrostruktura vzorku z uhlíkové oceli (zvětšení 400x)



Obr. 41 Mikrostruktura vzorku z duplexní oceli (zvětšení 100x)



Obr. 42 Mikrostruktura vzorku z duplexní oceli (zvětšení 400x)



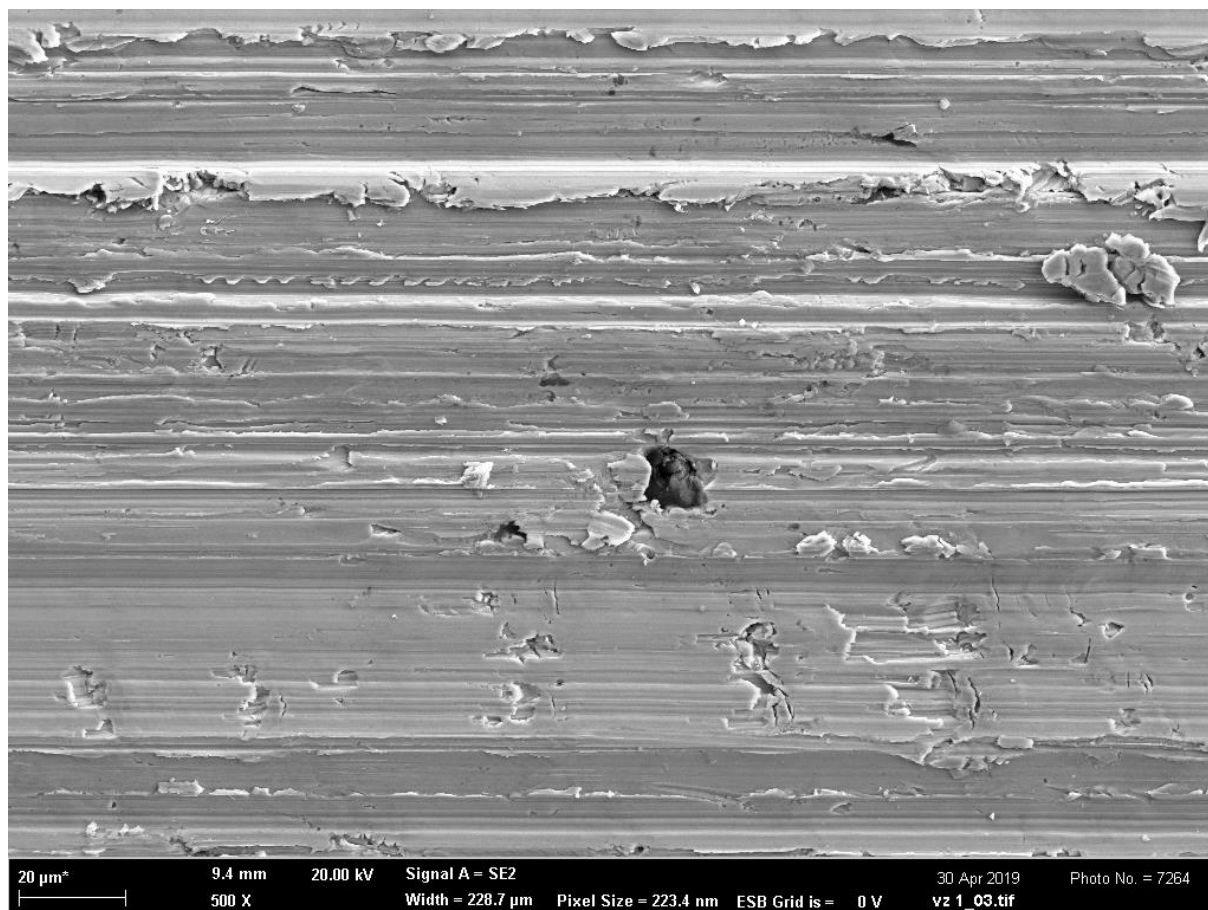
Obr. 43 Mikrostruktura vzorku z Cr-Ni oceli (zvětšení 100x)



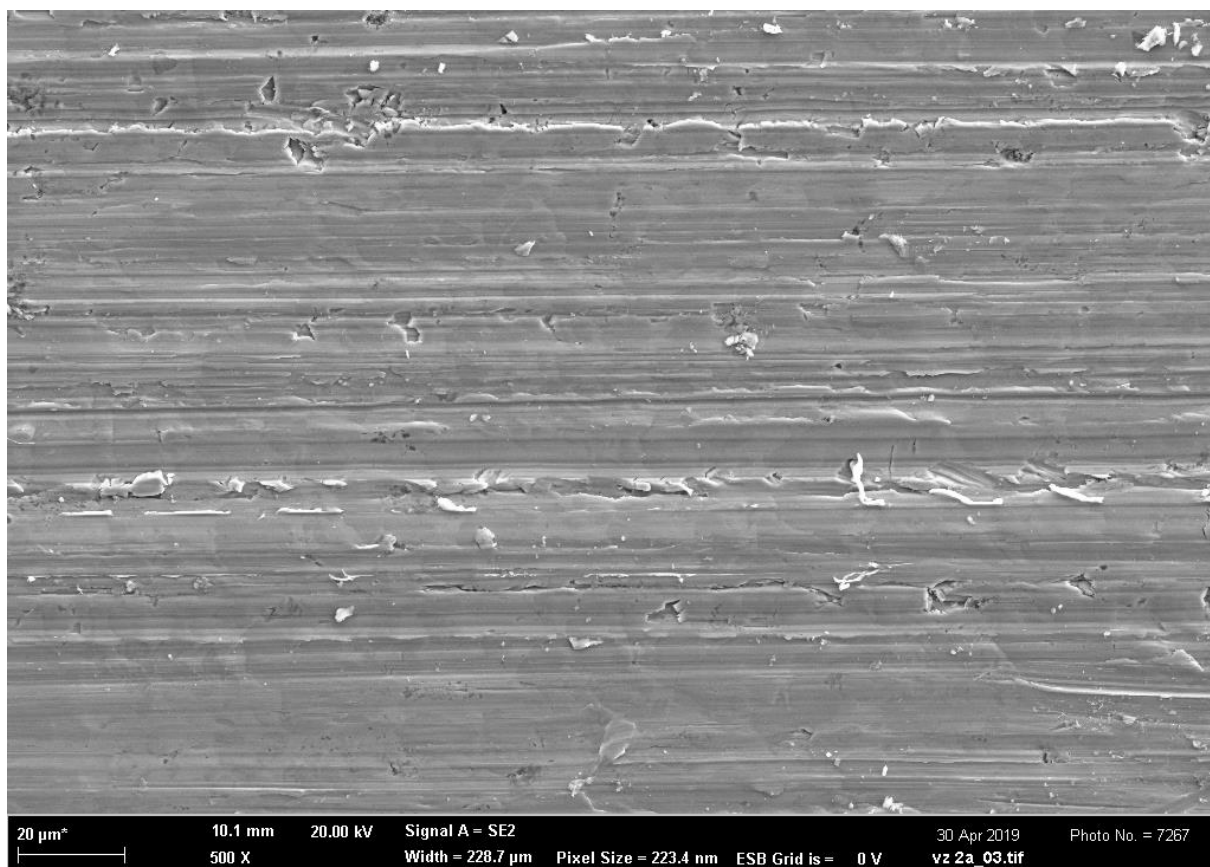
Obr. 44 Mikrostruktura vzorku z Cr-Ni oceli (zvětšení 400x)

4.5 Elektronový mikroskop

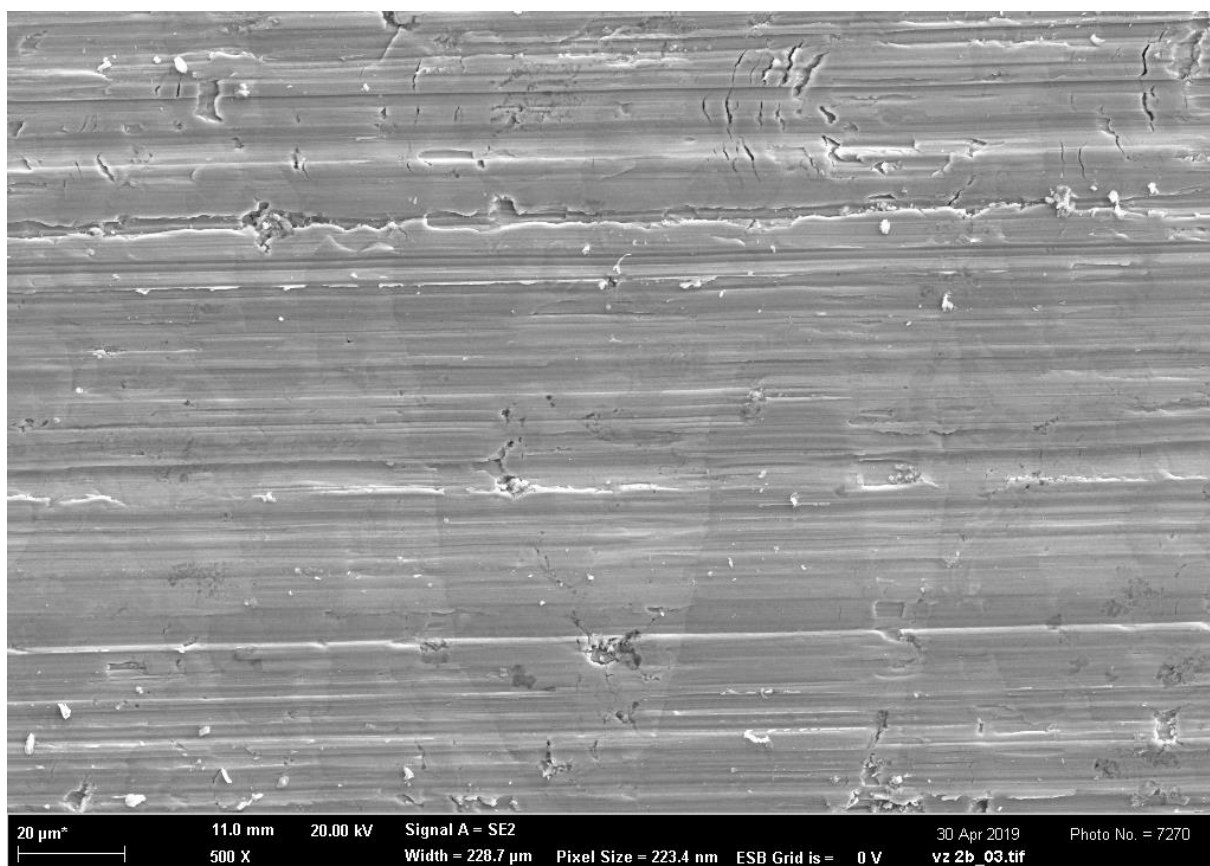
Po zkoušce opotřebení na brusném plátně bylo na opotřebené ploše zkoušených vzorků provedeno pozorování struktury pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu Zeiss – ULTRA PLUS. Na všech vzorcích na obrázcích 45 až 50 jsou jasně patrné rýhy, někde i částice brusiva, které zůstaly v materiálu po kontaktu brusiva z brusného papíru se vzorkem během zkoušky. Všechny snímky jsou zvětšeny 500 krát. Vzorky 1, 4 a 5 jsou dle míry poškození povrchu srovnatelné, což souhlasí i dle výpočtu poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Navíc na vzorku 1 lze vidět v centrální části snímku kuličku grafitu, která byla odkryta po odtržení vrchní slupky matrice. Vzorky 2a a 2b jsou z bílé chromové litiny a dle výpočtu vyšlo, že mají nejlepší otěruvzdornost. Také na snímcích na nich lze pozorovat nejmenší poškození. Naopak povrch vzorku 3 z uhlíkové oceli je výrazně a hluboce rozrušen. Tím je potvrzena jeho nízká otěruvzdornost.



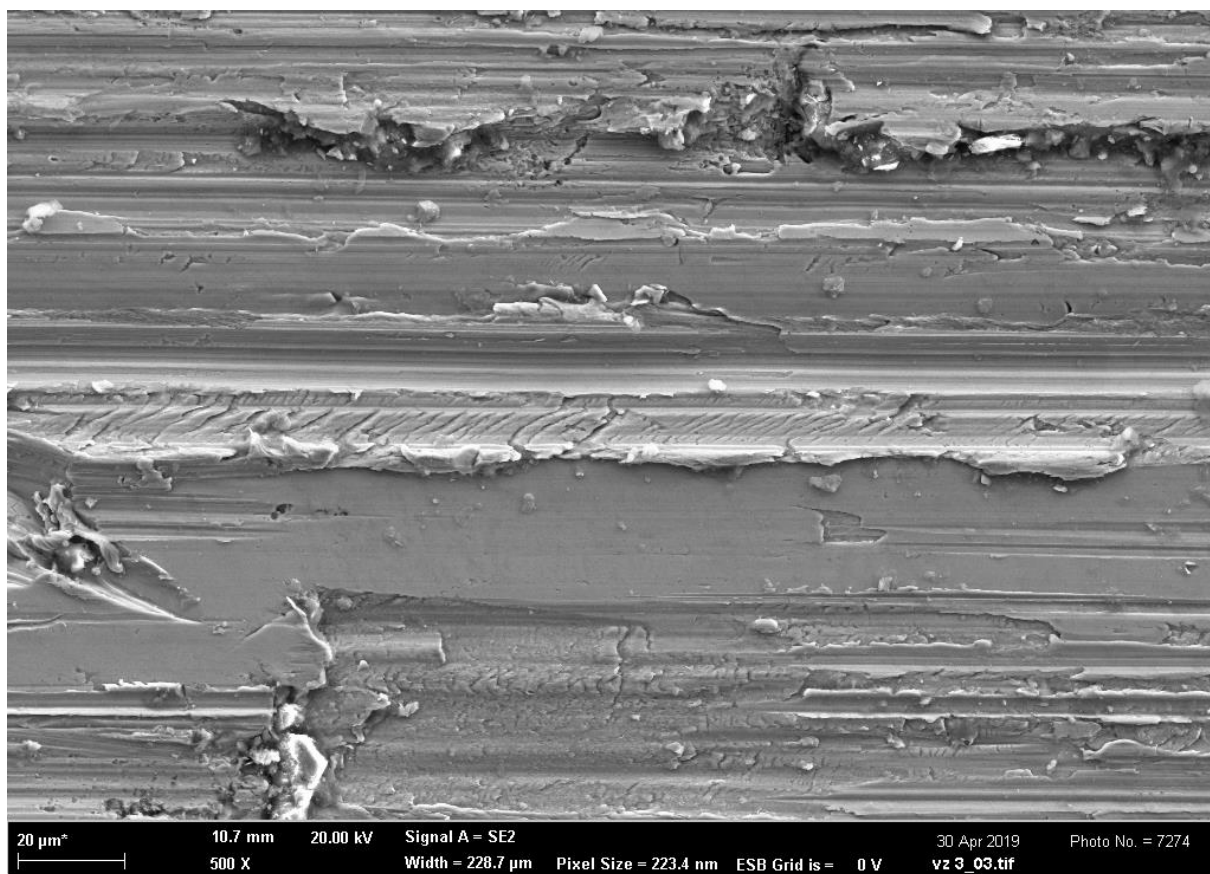
Obr. 45 Povrch vzorku 1 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)



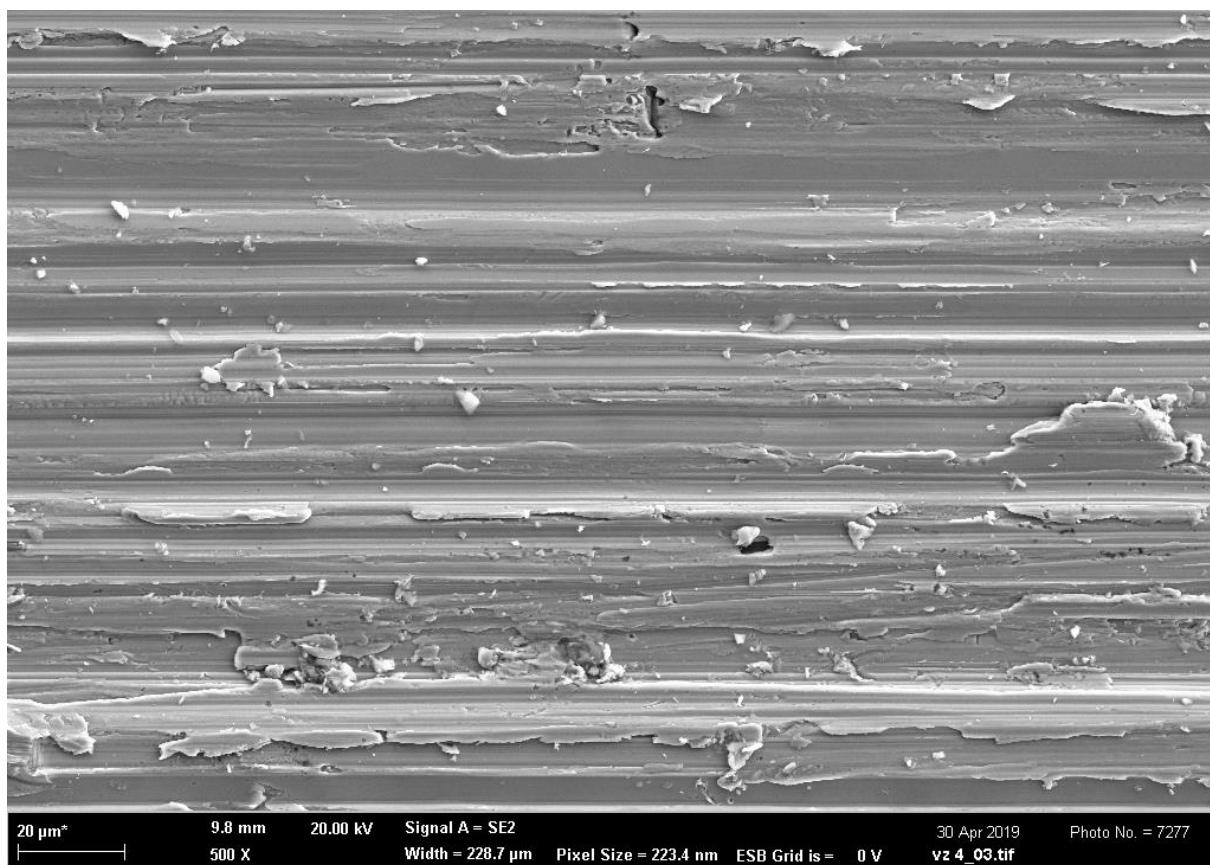
Obr. 46 Povrch vzorku 2a po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)



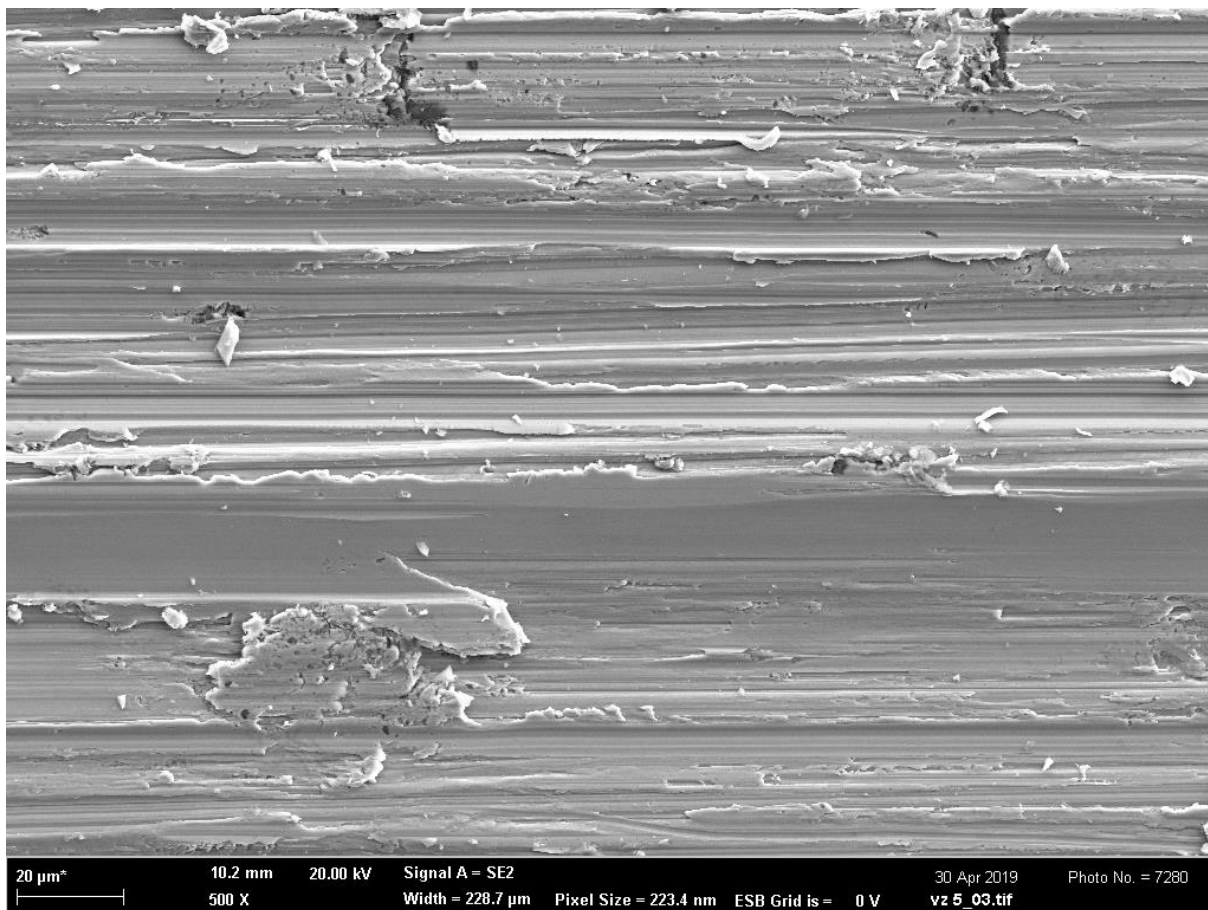
Obr. 47 Povrch vzorku 2b po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)



Obr. 48 Povrch vzorku 3 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)



Obr. 49 Povrch vzorku 4 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)



Obr. 50 Povrch vzorku 5 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x)

4.6 Ekonomické zhodnocení

Tato kapitola se zabývá výpočtem finanční bilance nákladů na vsázkové suroviny při tavně litiny Ni-resist a Cr-Ni oceli. Jak už bylo zmíněno dříve, odlitek tvaru desky do vytlukačícího roštu, který byl původně odléván z chromniklové oceli, se začal odlévat z litiny Ni-resist. Proto je třeba zjistit, zda byl tento krok změny materiálu z ekonomického hlediska vhodný.

4.6.1 Vsázka Ni-resist

Pomocí výpočtů byla z chemického složení litiny Ni-resist a všech dalších přísadových složek stanovena hmotnost jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu. Následně byla na základě ceny vsázkových surovin vypočítána celková cena vsázky na 100 kg kovu. Výsledné náklady na výrobu 100 kg litiny Ni-resist jsou 6201 Kč.

Tab. 16 Stanovení hmotnosti jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu

Materiál	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Fe	Hmotnost (kg)
ocel kulatina	0,12	0,50	0,18			99,2	77,2
nauhličovadlo	99					0	1,7
Ni					100	0	12,6
FeMnC	6,59	76,50	0,60			16,31	7,9
FeSi75	0,20		73,66			26,14	2,5
FeCr800	8,36		1,34	61,45		28,85	3,1
Výsledné složení	2,58	6,40	2,04	1,89	12,63	74,44	100

Tab. 17 Stanovení nákladů vsázkových surovin na 100 kg kovu

Materiál	Cena (Kč/kg)	Hmotnost (kg) ve 100 kg	Cena na 100 kg (Kč)
ocel kulatina	25,00	72,2	1805,00
nauhličovadlo	27,00	1,7	46,50
Ni	295,00	12,6	3727,00
FeMnC	42,50	7,9	335,60
FeSi75	40,00	2,5	98,90
FeCr800	61,00	3,1	187,70
Výsledné složení		100	6201

4.6.2 Vsázka Cr-Ni ocel

Pomocí výpočtů byla z chemického složení chromniklové oceli a všech dalších přísadových složek stanovena hmotnost jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu. Následně byla na základě ceny vsázkových surovin vypočítána celková cena vsázky na 100 kg kovu. Výsledné náklady na výrobu 100 kg Cr-Ni oceli jsou 8512 Kč.

Tab. 18 Stanovení hmotnosti jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu

Materiál	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Ni	% Fe	Hmotnost (kg)
ocel kulatina	0,12	0,50	0,18			99,2	46,9
nauhličovadlo	99					0	0,3
Ni					100	0	13,1
FeMnC	6,59	76,50	0,60			16,31	0,6
FeSi75	0,20		73,66			26,14	0,7
FeCr010	0,07		0,65	62,90		36,38	38,3
Výsledné složení	0,43	0,73	0,85	24,07	13,14	60,77	100

Tab. 19 Stanovení nákladů vsázkových surovin na 100 kg kovu

Materiál	Cena (Kč/kg)	Hmotnost (kg) ve 100 kg	Cena na 100 kg (Kč)
ocel kulatina	25,00	46,9	1173,00
nauhličovadlo	27,00	0,3	8,40
Ni	295,00	13,1	3877,00
FeMnC	42,50	0,6	27,50
FeSi75	40,00	0,7	27,80
FeCr010	88,80	38,3	3398,00
Výsledné složení		100	8512

4.6.3 Hodnocení výsledků

Z výpočtů nákladů na vsázkové suroviny v kapitole 4.6.1 a 4.6.2 vyplývá, že náklady na 100 kg vsázky pro výrobu dané litiny Ni-resist jsou o 2311 Kč nižší. Nahrazením Cr-Ni oceli litinou Ni-resist se tak snížili výdaje na vsázkové suroviny o více než 27 %.

Závěr

Austenitické litiny Ni-resist mají řadu specifických vlastností, kterými jsou například výborná korozivzdornost, žárovzdornost a žárovevnost, vysoká tepelná stabilita, zaručené vlastnosti za nízkých teplot nebo nemagnetičnost. Díky nim mohou konkurovat vysoce legovaným austenitickým korozivzdorným ocelím nebo žárovevným ocelím. Navíc na rozdíl od těchto materiálů mají výborné slévárenské vlastnosti. Z austenitických litin je proto možné vyrábět i tvarově velmi náročné odlitky. Jejich využití je tak možné v mnoha různých odvětvích, ať už v průmyslu automobilovém, chemickém, potravinářském atd.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo měření a následné porovnání otěruvzdornosti litiny Ni-resist s dalšími referenčními materiály. U vybraného odlitku namáhaného na abrazivní opotřebení byla ověřena náhrada původního materiálu Cr-Ni oceli litinou Ni-resist jak z hlediska otěruvzdornosti materiálu, tak i z hlediska výrobních nákladů. Kromě austenitické litiny a chromniklové oceli byly jako další materiály k porovnávání zvoleny bílá chromová litina, uhlíková ocel a duplexní ocel. Na vzorcích zhotovených z vybraných pěti materiálů byla kromě otěruvzdornosti měřena také tvrdost a měrná hmotnost a byla provedena analýza mikrostruktury.

Pro zkoušku odolnosti proti abrazivnímu opotřebení bylo zhotoveno 12 vzorků z daných pěti porovnávaných materiálů, a na každém vzorku proběhlo 5 měření opotřebení na brusném plátně. Z celkem 60 naměřených hodnot hmotnostních úbytků a na základě měrné hmotnosti jednotlivých materiálů byla dle normy ČSN 01 5084 vypočítána poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení. Nejvyšší hodnotu, a tím pádem nejvyšší otěruvzdornost měla dle očekávání bílá chromová litina. Ta ovšem vzhledem ke své křehkosti není vhodná pro výrobu dynamicky namáhaných odlitků, jakými součásti vytloukacích roštů jsou. Naopak nejnižší otěruvzdornost měla uhlíková ocel. Litina Ni-resist, duplexní ocel a Cr-Ni ocel měly otěruvzdornost víceméně srovnatelnou. Otěruvzdornost litiny Ni-resist byla přibližně o 5 % nižší než Cr-Ni oceli. To však vzhledem k porovnávání ekonomičnosti výroby těchto dvou materiálů není nutno považovat za podstatný rozdíl.

Ze vzorků použitých k měření odolnosti proti abrazivnímu opotřebení byly zhotoveny metalografické výbrusy, na kterých byla následně pomocí světelného mikroskopu pozorována mikrostruktura a reliéf vzniklý na povrchu vzorků během měření otěruvzdornosti. Snímky mikrostruktur jednotlivých vzorků jsou uvedeny v kapitole 4.4.2. U vzorků z bílé chromové litiny lze kromě směru karbidů uložených v kovové matici také vidět nehomogenitu opotřebované povrchové vrstvy způsobenou vytrháváním křehkých karbidů během měření otěruvzdornosti. V mikrostruktuře austenitické litiny lze pozorovat kuličkový grafit uložený v austenitické matici a také vytrhané karbidy, ale v menší rozsahu než u bílé litiny. Na vzorcích z uhlíkové, duplexní a Cr-Ni oceli není kromě zviditelněné struktury patrné, zda dochází k opotřebování některé složky více než druhé.

Pro bližší představu o stavu plochy, která byla vystavena abrazivnímu opotřebení, bylo provedeno pozorování struktury na elektronovém mikroskopu. V kapitole 4.5 jsou snímky, na nichž lze vidět různou míru opotřebení povrchů vzorků, tj. různě velké rýhy, které zůstaly

v materiálu po měření odolnosti proti abrazivnímu opotřebení. Poškození povrchu vzorků viditelné na snímcích odpovídá výsledné otěruvzdornosti. U snímků vzorků z bílé chromové litiny lze pozorovat nejmenší poškození povrchu, což jen potvrzuje nejlepší výslednou otěruvzdornost. U uhlíkové oceli byla naměřena nejnižší otěruvzdornost a na snímku lze vidět výrazné a hluboké rozrušení povrchu vzorku. U vzorků z litiny Ni-resist, duplexní oceli a Cr-Ni oceli je poškození srovnatelné, což také souhlasí s vypočtenou otěruvzdorností.

Poslední část se zabývala ekonomickým zhodnocením austenitické litiny Ni-resist oproti Cr-Ni oceli. Na základě provedených výpočtů vsázek bylo zjištěno, že náklady na 100 kg vsázky pro výrobu litiny Ni-resist jsou o více než 27 % nižší než náklady na výrobu Cr-Ni oceli. S ohledem na relativně srovnatelné výsledky poměrné odolnosti proti abrazivnímu opotřebení těchto dvou materiálů, výrazně lepší slévárenské vlastnosti litiny Ni-resist a její ekonomičnost lze jednoznačně určit její přínos jakožto náhrady originálního odlitku z chromniklové oceli.

Seznam použitých zdrojů a literatury

1. SÝKORA, Pavel. Metalurgie výroby austenitické litiny s kuličkovým grafitem. *Slévárenská ročenka*. 2000, s. 141 – 156. ISBN 80-238-5151-9.
2. APTEKAR, L. I., YU.E. ABRAMENKO. Structure and properties of austenitic nickel cast irons. *Metal Science and Heat Treatment*. 1977, vol. 19, no. 4, p. 280–292. ISSN 0026-0673.
3. RÖHRING, K. Austenitische Gusseisen. *Konstruieren und Giessen*. 2004, **29**(2), 2–33. ISSN 0341-6615.
4. KAŇA, Václav. Výroba a vlastnosti austenitických litin. *Slévárenství*. 2017, **LXV**(1–2), s. 6–11. ISSN 0037-6825.
5. ČECH, Jan, Antonín ZÁDĚRA a Jaroslav ŠENBERGER. Výroba těžkých odlitků z austenitických litin s kuličkovým grafitem. *Slévárenství*. 2009, **LVII**(9–10), s. 337–341. ISSN 0037-6825.
6. OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem*. Monografie, Metal Casting and Foundry Consult, Otahal Consult Brno, 1. vydání, Brno, 2006, 562 s.
7. MORRISON, J.C., R. COVERT, W. SPEAR. *Ni-Resist and Ductile Ni-Resist Alloys*. Nickel Development Institute, 1998. Reference Book Series No. 11018.
8. MORRISON, J.C. Practical Production of Ni-Resist Castings. *Foundry Management & Technology*. 1998, **126**(8), 54–64. ISSN 0360-8999.
9. Austenitic Ductile Irons. *Ductile Iron Society* [online]. USA, 2013 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <https://www.ductile.org/didata/Section5/5intro.htm#AUSTENITIC%20DUCTILE%20IRONS>
10. Oil & Gas Components 2 : Special Irons. *Lawai* [online]. Taiwan, 2017 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: [http://www.lawai-alloytube.com/products_show.asp?seq=941&title=Type%20D-2%20\(%E2%89%88Ductile%20Ni-Resist\)&keys=LAWAI%20ALLOY](http://www.lawai-alloytube.com/products_show.asp?seq=941&title=Type%20D-2%20(%E2%89%88Ductile%20Ni-Resist)&keys=LAWAI%20ALLOY)
11. Foundry Ni Resist Cast Iron Parts. *Hebei Province Jing County Jinli Casting Co., Ltd.* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.iron-casting.org/Foundry-Ni-Resist-Cast-Iron-Parts-277.htm>
12. Flake Graphite Ni-resist GGL-NiCuCr 15 6 2 Investment Casting/Lost Wax Casting. *Alibaba.com* [online]. 2019 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Flake-Graphite-Ni-resist-GGL-NiCuCr_60425950581.html?spm=a2700.7724857.normalList.158.42a27e3dLdDBMv
13. SUCHÁNEK, Jan, Vladimír KUKLÍK a Eva ZDRAVECKÁ. *Abrazivní opotřebení materiálů*. Praha: [České vysoké učení technické], 2007. ISBN 978-80-01-03659-4.
14. STODOLA, Jiří, Františka PEŠLOVÁ a Jan KRMELA. *Opotřebení strojních součástí: monografie*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-552-9.
15. BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01621-8.

16. HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-04-18]. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: <http://interdiag.o.vsb.cz/kom/upload/12-Provoz,%20diagnostika%20a%20C3%BA%20C5%BEba%20stroj%C5%AF%2004.pdf>
17. LIŠKA, Jaromír a Josef FILÍPEK. 3D modely laboratorních zkoušek opotřebení. In: *Trendy ve vzdělávání 2012*. Olomouc: Gevak, 2012, s. 477–480. ISBN 978-80-86768-34-2.
18. VOTAVA, Jiří, Michal ČERNÝ a Josef FILÍPEK. Influence of heat treatments on the abrasive wear. In: *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.* [online]. 2005, LIII, No. 5, pp. 175–186 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun_2005053050175.pdf
19. CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. Effect of heat treatment on the microstructure, hardness and abrasive wear resistance of high chromium hardfacing. In: *Res. Agr. Eng.* [online]. 2013, vol. 59, no. 1, p. 23–28 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/86560.pdf>
20. BŘEZINA, Roman, Josef FILÍPEK a Jaroslav ŠENBERGER. The abrasion of austempered cast iron in laboratory and work. In: *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.* [online]. 2005, LIII, No. 4, pp. 15–22 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/media/pdf/actaun_2005053040015.pdf
21. SUCHÁNEK, Jan. Trendy vývoje bílých ořezávacích litin. *Slévárství*. 2017, LXV(1–2), s. 16–20. ISSN 0037-6825.
22. Super Abrasion Resistant White Iron High Cr Casting. *Wuxi Orient Anti-wear Co., Ltd* [online]. China [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.wuxiorient.com/wear-castings/high-chrome-castings/super-abrasion-resistant-white-iron-high-cr.html>
23. Hlavní skupiny nerezových ocelí. *TERAPOL spol. s r.o.* [online]. Chomutov [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
24. *Třídy ocelí dle ČSN* [online]. Praha [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.pdms.cz/news/tridy-oceli-dle-csn/>
25. Ořezávací plechy. *IT Bohemia* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.itbohemia.cz/hutni-material/oteruvzdorne-plechy/>
26. Ořezávací oceli. *VIADRUS* [online]. 2013 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.viadrus.cz/sonk/oteruvzdorne-oceli.html>
27. PRECISION BALANCE PCB SERIE. *Vincent Leermiddelen Scientific* [online]. 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.leermiddelen.be/en/precision-balance-pcb-serie--10000g--01g>
28. MK 2200 LC Váha pro vyhodnocení indexu hustoty. *ŠEBESTA služby slévárnám s.r.o.* [online]. 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.sebestasro.cz/cz/zarizeni/mereni-kvality-taveniny/mk-2200-lc>
29. ČSN 01 5084. *Stanovení odolnosti kovových materiálů proti abrazivnímu opotřebení na brusném plátně*. 1974.

30. SUCHÁNEK, Jan. Abrazivní opotřebení bílých chromových litin. *Slévárství*. 2017, **LXV**(1–2), 21–25. ISSN 0037-6825.
31. CYPIN, I. I.: Belyje iznosostojkije čuguny. *Struktura i svojstva*. Moskva: Metallurgija, 1983.

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Chunky grafit ve struktuře austenitické litiny [3]	13
Obr. 2 Odlitek oběžného kola čerpadla z litiny Ni-resist [10]	21
Obr. 3 Odlitek řemenice z austenitické LKG [11]	21
Obr. 4 Odlitek z austenitické LLG odlévaný metodou přesného lití [12].....	22
Obr. 5 Adhezivní opotřebení [16]	24
Obr. 6 Abrazivní opotřebení [16]	24
Obr. 7 Erozivní opotřebení [16]	25
Obr. 8 Kavitační opotřebení [16]	25
Obr. 9 Únavové opotřebení [16].....	26
Obr. 10 Vibrační opotřebení [16]	26
Obr. 11 Zkouška opotřebení na brusném plátně [18].....	28
Obr. 12 Zkouška opotřebení na pryžovém kotouči [19]	29
Obr. 13 Bubnový přístroj podle Bonda [20]	30
Obr. 14 Zkouška opotřebení v brusné nádobě [17].....	30
Obr. 15 Odlitek do zařízení pro jemné mletí cementu z bílé chromové litiny [22]	32
Obr. 16 Odlitek rozdělovače tryskacího média z ořezuvzdorné oceli [26].....	34
Obr. 17 Surový odlitek z litiny Ni-resist (vlevo spodní část odlitku, vpravo horní část)	35
Obr. 18 Metalografická rozbrušovací pila Struers Labotom-3.....	36
Obr. 19 Vzorky na měření abrazivního opotřebení – 1. měření.....	37
Obr. 20 Vzorky na měření abrazivního opotřebení – 2. měření.....	37
Obr. 21 Přístroj na měření opotřebení na brusném plátně na Mendelově univerzitě v Brně ...	38
Obr. 22 Schéma přístroje s brusným plátnem [9].....	38
Obr. 23 Váha KERN KB 500-2 [27].....	39
Obr. 24 Graf hmotnostních úbytků podle jednotlivých vzorků – zkouška č. 1.....	40
Obr. 25 Graf celkových hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků – zkouška č. 1	41
Obr. 26 Graf hmotnostních úbytků podle jednotlivých vzorků – zkouška č. 2.....	42
Obr. 27 Graf celkových hmotnostních úbytků jednotlivých vzorků – zkouška č. 2	43
Obr. 28 Váha MK 220 [28]	43
Obr. 29 Tvrdoměr – Brinell LECO LCB	45
Obr. 30 Lisovací přístroj ECOPRESS 100.....	46
Obr. 31 Automatický přístroj Struers LaboPol-5	47
Obr. 32 Metalografické vzorky – leštěné	47
Obr. 33 Mikrostruktura vzorku z litiny Ni-resist (zvětšení 100x).....	49
Obr. 34 Mikrostruktura vzorku z litiny Ni-resist (zvětšení 400x).....	49
Obr. 35 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v kolmém směru (zvětšení 100x).....	50
Obr. 36 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v kolmém směru (zvětšení 400x).....	50
Obr. 37 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v rovnob. směru (zvětšení 100x).....	51

Obr. 38 Mikrostruktura vzorku z bílé chromové litiny – karbidy v rovnob. směru (zvětšení 400x).....	51
Obr. 39 Mikrostruktura vzorku z uhlíkové oceli (zvětšení 100x).....	52
Obr. 40 Mikrostruktura vzorku z uhlíkové oceli (zvětšení 400x).....	52
Obr. 41 Mikrostruktura vzorku z duplexní oceli (zvětšení 100x).....	53
Obr. 42 Mikrostruktura vzorku z duplexní oceli (zvětšení 400x).....	53
Obr. 43 Mikrostruktura vzorku z Cr-Ni oceli (zvětšení 100x).....	54
Obr. 44 Mikrostruktura vzorku z Cr-Ni oceli (zvětšení 400x).....	54
Obr. 45 Povrch vzorku 1 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	55
Obr. 46 Povrch vzorku 2a po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	56
Obr. 47 Povrch vzorku 2b po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	56
Obr. 48 Povrch vzorku 3 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	57
Obr. 49 Povrch vzorku 4 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	57
Obr. 50 Povrch vzorku 5 po měření otěruvzdornosti – el. mikroskop (zvětšení 500x).....	58

Tab. 1 Chemické složení austenitické litiny v [hmot. %] dle normy ČSN EN 13835 [3].....	11
Tab. 2 Chemické složení austenitické LLG v [hmot. %] dle normy ASTM A 439 [7].....	11
Tab. 3 Chemické složení austenitické LKG v [hmot. %] dle normy ASTM A 439 [7].....	12
Tab. 4 Mechanické vlastnosti austenitických litin dle normy EN 13835 [3].....	18
Tab. 5 Mechanické vlastnosti austenitických LKG dle ASTM A 439 [7].....	18
Tab. 6 Mechanické vlastnosti austenitických LLG dle ASTM A 439 [7].....	19
Tab. 7 Chemické složení a tvrdost vysocechromových bílých litin podle EN 12513 [21].....	33
Tab. 8 Chemické složení použitých materiálů v [hmot. %].....	36
Tab. 9 Hmotnost vzorků po každém měření v [g] – zkouška č. 1.....	40
Tab. 10 Hmotnostní úbytek po každém měření v [g] – zkouška č. 1.....	40
Tab. 11 Hmotnost vzorků po každém měření v [g] – zkouška č. 2.....	41
Tab. 12 Hmotnostní úbytek po každém měření v [g] – zkouška č. 2.....	42
Tab. 13 Měření měrné hmotnosti v [g/cm ³].....	44
Tab. 14 Poměrná odolnost proti abrazivnímu opotřebení.....	45
Tab. 15 Naměřené průměry vtisků v [mm] a výsledná tvrdost HBW5/750.....	46
Tab. 16 Stanovení hmotnosti jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu.....	59
Tab. 17 Stanovení nákladů vsázkových surovin na 100 kg kovu.....	59
Tab. 18 Stanovení hmotnosti jednotlivých vsázkových surovin na 100 kg materiálu.....	60
Tab. 19 Stanovení nákladů vsázkových surovin na 100 kg kovu.....	60