

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hodnocení kritické velikosti vměstků ve vysokopevných ocelích z
hlediska iniciace únavových trhlin

Autor: **Bc. Petra Bergmanová**

Vedoucí práce: **doc. RNDr. Josef Kasl, CSc., FENg.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Akad. rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Bc. Petra Bergmanová - S17N0037K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Téma diplomové práce:

Hodnocení kritické velikosti vměstků ve vysokopevných ocelích z hlediska iniciace únavových trhlin.

Základní požadavky:

Cílem DP je vypracování postupu hodnocení mikročistoty ocelí se zvýšenou únavou pevností dosaženou snížením množství vměstků metodou: Na základě naměřených hodnot velikostí nekovových vměstků metodou obrazové analýzy bude provedeno hodnocení mikročistoty klasickým postupem a metodami statistik extrémních hodnot. Z nich bude vybrána nejvhodnější metodika a zpracován pracovní postup.

Základní technické údaje:

Světelný mikroskop Nikon Ephilhot 300, zařízení pro přípravu metalografických výbrusů Struers.

Osnova diplomové práce:

1. Literární rešerše hodnocení mikročistoty klasickými postupy a metodami statistik extrémních hodnot.
2. Zhotovení metalografických výbrusů vzorků ocelí Böhler T552 a Böhler T671 různých výrobních šarží.
3. Hodnocení obsahu vměstků metodami obrazové analýzy s ohledem především na získání informací o maximálních částicích.
4. Zpracování výsledků klasickými metodami a metodami statistik extrémních hodnot.
5. Porovnání jednotlivých metod a výběr nejvhodnější metody pro podmínky a možnosti dané laboratoře.

Rozsah diplomové práce:

a) textová část: 50 stran

b) grafická část: podle potřeby

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Doporučená literatura:

1. Luděk Ptáček a kol.: Nauka o materiálu, CERM, s.r.o., Brno, 2002.
2. F. Jandoš, R. Říman, A. Gemperle: Využití moderních laboratorních metod v metalografii, SNTL, Praha, 1985.
3. Hekkanen Mikko: Inclusion Rating of clean steels, Bachelor thesis, Orebro universitet, Sweden, June 2009
4. Murakami, Y.: Metal fatigue: Effect of small defects and non-metallic inclusions. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2002.
5. Yates, J.R., Shi, G., Atkinson, H.V., Sellars, C.M., Anderson, C.V.: Fatigue tolerant design of steel components based on the size of large inclusions“. 2002 Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract. Engr. Mater. Struct. 25, pp. 667-676.
6. Monnot, J., Heritier, B., Cogne, J.Y.: Relationship of melting practise, inclusion type, and size with fatigue resistabce of bearing steels. In: Effect of Steel Manufacturing Processes on the Quality of Bearing Steels, Phoenix, Arizona, USA, 4-6 Nov. 1986, ASTM, pp. 149-165.
7. Murakami, Y., Endo, M.: Effect of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. International Journal of fatigue, 16 (3), 1994, pp. 163-182.
8. Duckworth, W.E., Ineson, E.: The effect of extremally introduced alumina particles on the fatigue life of En24 steel. Clean Steel, Iron Steel Inst. Sp. Rep. 77 (1963), pp. 87–103.
9. Harry Chandler at al.: Heat Treater's Guide – Practises and Procedures for Irons and Steels, ASM International, Materials Park, OH, USA 1995.
10. Příslušné manuály přístrojů.

Vedoucí diplomové práce:

**Doc. RNDr. Josef Kasl, CSc., FENg.
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Miroslava Matějová
VZÚ Plzeň**

Datum zadání diplomové práce: **25.9.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.5.2018**

V Plzni dne: 25.9.2017

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bergmanová	Jméno Petra
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. RNDr. Kasl, CSc., FENg.	Jméno Josef
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ
		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Hodnocení kritické velikosti vměstků ve vysokopevných ocelích z hlediska iniciace únavových trhlin	

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	99	TEXTOVÁ ČÁST	65	GRAFICKÁ ČÁST	34
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Cílem DP je vypracování postupu hodnocení mikročistoty ocelí se zvýšenou únavou pevností dosaženou snížením množství vměstků metodou: Na základě naměřených hodnot velikostí nekovových vměstků metodou obrazové analýzy bude provedeno hodnocení mikročistoty klasickým postupem a metodami statistik extrémních hodnot. Z nich bude vybrána nejvhodnější metodika a zpracován pracovní postup.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Böhler T552, Böhler T671, ocel X12CrNiMoV12-3, ASTM E2283 – 08, statistiky extrémních hodnot, IRMSE, $\sqrt{AREA_{max}}$</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bergmanová	Name Petra	
FIELD OF STUDY	3911T016 “Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. RNDr. Kasl, CSc., FENg.	Name Josef	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The comparison of classical and statistical methods of determining the inclusion content of steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	99	TEXT PART	65	GRAPHICAL PART	34
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the DP is to develop a procedure for the evaluation of the micro-cleanness of steels with increased fatigue strength achieved by reducing the number of inclusions by the method: Based on the measured values of the non-metal inclusions sizes by means of the image analysis method, micro-purity evaluation will be carried out using the classic procedure and the methods of extreme value statistics. Of these, the most appropriate methodology and workflow will be selected.
KEY WORDS	Böhler T552, Böhler T671, steel X12CrNiMoV12-3, ASTM E2283 – 08, statistics of extreme values, IRMSE, $\sqrt{\text{AREA}}_{\max}$

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala všem, kteří mi věnovali svůj čas a pomohli mi s vytvořením této diplomové práce.

Poděkování patří zejména vedoucímu práce doc. RNDr. Josefu Kaslovi, CSc., FENg., za cenné rady v oblastech statistických metod, únavových zkoušek a stanovení meze únavy, dále pak konzultantce Ing. Miroslavě Matějové za rady a konzultace v oblasti klasických metod.

Obsah

1.	Úvod – cíl diplomové práce	12
2.	Experimentální metody a postupy hodnocení	12
2.1	Charakteristika vysoce čistých ocelí	12
2.2	Experimentální metody určení velikosti vměstků v materiálu	13
2.3	Mikroskopické stanovení mikročistoty.....	13
2.3.1	Příprava vzorku a experimentální metody při hodnocení mikročistoty.....	13
2.3.2	Klasické způsoby hodnocení mikročistoty u ocelí a její význam	14
2.3.2.1	Popis hodnocení mikročistoty	14
2.3.2.1.1	Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602.....	15
2.3.2.1.2	Hodnocení mikročistoty podle normy ČSN ISO 4967	16
2.3.2.1.3	Hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E 45.....	16
2.3.3	Hodnocení čistoty u ocelí se zvýšenou únavovou pevností	17
2.3.3.1	Účinky vměstků na únavovou pevnost.....	17
2.3.3.2	Vliv vměstků na únavové vlastnosti ocelí na únavové vlastnosti ocelí	19
2.3.3.2.1	Vliv umístění vměstků na únavovou pevnost.....	21
2.3.3.2.2	Vliv tvrdosti HV na únavové limity materiálů.....	21
2.3.3.3	Vybrané přístupy k hodnocení nekovových vměstků ve vysokopevných ocelích metodami statistik extrémních hodnot.....	23
2.3.3.3.1	Inclusion Rating Method by Statistics of Extreme values – IRMSE	24
2.3.3.3.2	Hodnocení podle normy ASTM E2283-08/STM E2283 – 08	26
2.3.3.3.3	Metoda obecné extrémní hodnoty (GEV)	26
2.3.3.3.4	Smíšený model a model konstrukčního rizika	27
2.3.3.3.5	Odhad distribuce vměstků z extrémních hodnot	28
3.	Experimentální materiál	29
3.1	Charakteristika materiálu Böhler T552	29
3.1.1	Chemické složení	29
3.1.2	Tepelné zpracování.....	29
3.1.3	Velikost zrna	29
3.1.4	Mikrostruktura	30
3.1.5	Mechanické a křehkolomové vlastnosti	30
3.2	Charakteristika materiálu Böhler T671	32
3.2.1	Chemické složení	32

3.2.2	Tepelné zpracování.....	32
3.2.3	Velikost zrna	33
3.2.4	Mikrostruktura	33
3.2.5	Mechanické a křehkolomové vlastnosti.....	33
3.3	Porovnání výsledků zkoušek s technickými předpisy.....	34
4.	Výsledky.....	36
4.1	Hodnocení mikročistoty standardními metodami	38
4.1.1	Hodnocení podle normy DIN 50602 - metoda K0	38
4.1.2	Hodnocení podle normy DIN 50602 - metoda K4	38
4.1.3	Hodnocení podle normy ASTM E 45- metoda A.....	39
4.2	Zpracování výsledků metodami statistik extrémních hodnot.....	39
4.2.1	Vyhodnocení podle Murakamiho.....	40
4.2.2	Vyhodnocení podle normy ASTM E2283-08.....	44
4.3	Výsledky únavových zkoušek.....	48
4.3.1	Výsledky únavových zkoušek pro ocel T 552.....	48
4.3.2	Výsledky únavových zkoušek pro ocel T 671.....	51
4.4	Odhad spodní meze únavy	52
5.	Diskuse	54
5.1	Hodnocení mikročistoty podle standardních norem	54
5.1.1	Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 metodou K0	54
5.1.2	Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 metodou K4	54
5.1.3	Hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E45 metodou A	55
5.1.4	Srovnání mikročistoty jednotlivých materiálů a taveb.....	55
5.2	Hodnocení největších vměstků statistickými metodami extrémních hodnot.....	56
5.2.1	Hodnocení největších vměstků Murakamiho metodou.....	56
5.2.2	Hodnocení největších vměstků podle normy ASTM E2283-08	57
5.3	Srovnání klasických metod hodnocení mikročistoty s přístupy statistik extrémních hodnot.....	58
5.4	Odhady meze únavy z hodnot maximálních velikostí vměstků	59
6.	Závěry	60
	Použitá literatura.....	62
	Přílohy.....	64

Použité zkratky a symboly

Fyzikální veličiny

A	tažnost
A_f	plocha zorného pole
A_0	celková hodnocená plocha na řezu
C_{ME}	konstanta
D	objem
E	Youngův modul pružnosti
F	odchylka od regresní křivky
F_j	distribuční funkce
G_i	distribuční Gumbelova funkce
$G(z_i)$	kumulativní pravděpodobnost i-té největší naměřené velikosti inkluze
h	tloušťka měřeného objemu
i	sumační index
j	sumační index
KV	vrubová houževnatost
$L_{max,i}$	maximální velikost vměstku při i-tém měření
L_{max}	maximální velikost vměstku
\bar{L}	průměrná hodnota měření velikosti vměstku
L_{dev}	střední kvadratická odchylka
m	střední hodnota velikosti vměstků
n	počet vzorků
N	celkový počet analýz na tavbu
\mathcal{N}	celkový počet vzorků při zkoušce únavy materiálu
N_p	počet hodnocených řezů na jednom vzorku
N_s	počet vzorků hodnocených pro jednu tavbu
p	relativní podíl jednoho druhu vměstků
$P(x)$	kumulativní pravděpodobnost
R	součinitel asymetrie cyklu R
\mathcal{R}	modifikovaný součinitel asymetrie cyklu
R_m	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	mez kluzu
S	zájmová plocha
S_0	měřená plochy
T	zpětná perioda (return period)
V	zájmový objem
V_0	měřený objem
y_j	redukovaná náhodná proměnná
Y	geometrický faktor
Z	kontrakce
α	koeficient teplotní roztažnosti
α	parametry měřítka
δ	parametr regresní funkce
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí
ΔK_I	rozkmit součinitele intenzity napětí
ΔK_{th}	prahová hodnota součinitele rozkmitu intenzity napětí
λ	parametr umístění
λ	parametr regresní funkce
v	Poissonovo číslo
ξ	index ukončení
σ	napětí
σ_A	amplituda napětí
σ_{fl}	dolní hodnota únavové pevnosti
σ_{max}	maximální napětí
σ_{min}	minimální napětí
σ_w	mez únavy
σ_{wl}	mezí hodnota napětí, při kterém se v tělese nešíří žádná únavová trhлина
σ_{w0}	mez únavy

$\Phi(D)$	distribuční funkce velikosti vměstků
\sqrt{AREA}	geometrický parametr defektu/vměstku (popisující vliv vměstku/defektu na hodnotu meze únavy)
$\sqrt{AREA_{max}}$	mezní hodnota parametru popisující vliv nejnepříznivějšího vměstku/defektu na hodnotu meze únavy pevností (tj. vměstku s největším průmětem do směru působení hlavního napětí)

Zkratky

EDX	elektronová energiově disperzní mikroanalýza
IRMSE	Inclusion Rating Method by Statistics of Extreme values
ODA	Optically Dark Area
SM	světelná mikroskopie
ŘEM	řádovací elektronová mikroskopie

1. Úvod – cíl diplomové práce

Ocele hrají v současné technické praxi stále významnou úlohu prakticky ve všech průmyslových oblastech. Vývoj nových technologií pro jejich výrobu vede k výrobkům se stále lepšími užitnými i technologickými vlastnostmi, které mohou být používány pro náročné aplikace. Jedním z klíčových parametrů ocelí je jejich čistota – obsah částic nekovové povahy. Čistota (mikročistota) ocelí může výrazně ovlivnit tvařitelnost, mechanické a křehkolomové vlastnosti, svařitelnost, obrobiteľnost, odolnost proti únavovému porušování a korozi, možnost jejich povrchové úpravy a další vlastnosti.

Cílem této diplomové práce je srovnání různých metod hodnocení mikročistoty zejména s ohledem na odolnost proti únavovému porušování. Jako experimentální materiál byly vybrány vzorky vysoce legované chromové oceli BÖHLER T552 a vysoce legované, precipitačně vytvrditelné oceli BÖHLER T671. Tyto oceli jsou určeny pro výrobu oběžných lopatek parních turbín. Tyto lopatky kromě vysokých mechanických parametrů musí vykazovat výbornou odolnost proti únavovému porušování a i proti korozi. Hodnocené vzorky byly odebrány z kovaných tyčí. Mikročistota vzorků byla posouzena klasickými způsoby vyhodnocení mikročistoty a zároveň i nestandardními metodami statistik extrémních hodnot.

Výstupem diplomové práce je porovnání výsledků z jednotlivých metod hodnocení mikročistoty a na základě těchto údajů i zhodnocení jejich předpokládané mezi únavy, resp. její spodní hladiny.

Srovnání jednotlivých metod hodnocení slouží jako podklad pro výběr nejvhodnější metody vyhodnocení mikročistoty, které by bylo možné aplikovat i na další materiály používané v náročných zatěžovacích podmínkách.

2. Experimentální metody a postupy hodnocení

2.1 Charakteristika vysoce čistých ocelí

Všechny typy ocelí obsahují nekovové vměstky v menším či větším rozsahu. Typ vměstků, jejich množství a rozmístění závisí na mnoha výrobních faktorech oceli – její složení, stupeň čistoty oceli, proces tavení, sekundární metalurgie a lití oceli. Přítomnost nadměrného množství nekovových vměstků v materiálu může být příčinou nevyhovující klasifikace materiálu při posuzování předepsané mikročistoty. Tyto vměstky totiž nepříznivě ovlivňují mechanické vlastnosti ocelí a iniciují vady a trhliny. Některé typy a velikosti vměstku jsou naopak žádoucí a mají příznivý vliv [19].

Pro aplikace ocelí při vysokých napěťových úrovních používáme tzv. vysoce čisté oceli. Jednoznačné určení, kde je hranice mezi vysoce čistou a čistou ocelí, v současné době není přesně a jednotně specifikováno. Ocele, u kterých se dosáhlo vyšší únavové pevnosti tím, že se snížilo množství nekovových vměstků, se nazývají cleansteels - čisté oceli. Definice čistých ocelí se mění podle literárních zdrojů. Za jednu z možných definic lze považovat popis, že čistá ocel je taková ocel, kde se nevyskytují vměstky, které by iniciovaly únavové porušení. Toto tvrzení je však bezpodmínečně nutné rozšířit o údaje o podmínkách zatěžování. Hraniční hodnota, kdy je ocel považována za čistou podle únavové pevnosti, není pevně stanovena a liší se použitými předpisy- jako příklad lze představit DET NORSKE VERITAS, které předepisují tuto hranici na hodnotě 1,1 obvyklé kované oceli. Proti této hodnotě lze najít předpisy výrobců, kde je označována super čistá ocel faktorem 1,15.

Vysoce čisté oceli jsou charakterizovány nízkou hladinou rozpuštěných prvků síry, fosforu, dusíku, kyslíku a vodíku a regulovanou úrovní zbytkových prvků, jako je měď, olovo, zinek, vizmut, cín, antimon a hořčík, spolu s nízkou hladinou nekovových a oxidických vměstků.

Cílem při výrobě vysoce čistých ocelí je co nejvíce eliminovat nežádoucí vměstky a řídit povahu a rozložení výskytu inkluzí pro optimalizaci vlastností konečného produktu z oceli. Únavovou pevnost ovlivňuje zejména přítomnost sulfidických a oxidických vměstků. Proto je potřeba kontrolovat jejich rozložení, zastoupení velikosti, morfologii a chemické složení.

Čistota oceli je omezena současnými výrobními postupy a úplnou eliminací vměstků zatím nelze dosáhnout. Pro charakterizaci čistoty je nezbytností využívat takové chemické a strukturální analýzy vysoce čistých ocelí, aby nebyla potřeba provést náročnou zkoušku únavy (jejímž výsledkem je tento typ ocelí určen).

2.2 Experimentální metody určení velikosti vměstků v materiálu

Pro hodnocení mikročistoty ocelí z hlediska náchylnosti k únavovému porušování je potřebné nalézt velikostní rozložení vměstků v daném objemu materiálu. K tomu je možné použít několik metod:

- metoda skenování plochy. Vyleštěná plocha vzorku je prohledávána pomocí světelné mikroskopie (SM) nebo řádkovací elektronové mikroskopie (ŘEM) a nalezené vměstky jsou analyzovány. Použití ŘEM umožňuje stanovit i chemickou podstatu vměstků. Tento přístup je vhodný pro určení vměstků malých a středních velikostí. Pokud chceme snížit nejistotu určení především velkých vměstků, je nutné analyzovat velké plochy. Je možné využívat i světlo emitované z vměstků při jiskrových výbojích.

- nedestruktivní metody využívající ultrazvukové zkoušky. Malé vměstky mohou být stanovovány na řezech při použití vyšších frekvencí. Objemové sledování je vhodné pro nalezení velkých vměstků, problematické je však stanovování přesných velikostí inkluzí.

- izolace vměstků chemickým rozpouštěním kovové matrice nebo jejím odtavením (za teplot nižších než je teplota rozpouštění vměstků). Teoreticky tak můžeme získat všechny vměstky obsažené ve sledovaném objemu materiál a provést jejich velikostní a tvarové vyhodnocení včetně stanovení chemického a fázového složení.

- únavové zkoušky mohou být efektivní způsob, jak nalézt velké vměstky. Únavové trhliny jsou iniciovány z místních defektů, což mohou být i vměstky. Jednou zkouškou však můžeme stanovit většinou jen jeden velký vměstek v oblasti působení napětí.

2.3 Mikroskopické stanovení mikročistoty

2.3.1 Příprava vzorku a experimentální metody při hodnocení mikročistoty

Pro přesné vyhodnocení přítomnosti a následné určení velikosti nekovových vměstků v materiálu je nutné, aby byl zkoumaný povrch vzorku připraven do požadované kvality. Odpovídající kvalita povrchu vzorku je dosažena následujícími, po sobě jdoucími operacemi přípravy[1]:

- Dělení materiálu
- Zalítí vzorku, popřípadě zalisování
- Broušení
- Leštění

Při přípravě metalografického výbrusu se musí postupovat tak, aby jednotlivé vměstky nebyly vytrhávány ze struktury materiálu.

Po leštění je povrch vyrovnaný a vzniká zde tzv. Beilbyho vrstva neboli B-vrstva. Je to nežádoucí, deformačně zpevněná vrstva o tloušťce v řádu desetin milimetru a překrývá původní vyleštěný povrch, proto by leštění nemělo trvat déle, než je nutné, a požadovaného povrchu by se mělo docílit kvalitním výbrusem. Vrstvu lze odstranit elektrolytickým leštěním [1].

Při pozorování plochy metalograficky připraveného vzorku se nejčastěji používá světelný mikroskop (SM). Základní optická soustava se skládá z okuláru, objektivu a zdroje světla. Okulár a objektiv tvoří základní soustavu čoček. Pozorovaný předmět leží ve vzdálenosti od f do $2f$ před objektivem, kde f představuje ohniskovou vzdálenost. Objektiv vytvoří skutečný převrácený obraz předmětu. Skutečný převrácený obraz se nachází mezi ohniskem okuláru a jeho hlavní rovinou. V okamžiku vizuálního pozorování je tedy vidět obraz zvětšený, zdánlivý a převrácený, vzhledem k samotnému skutečnému objektu [1].

Celkové zvětšení se skládá ze zvětšení objektivu a ze zvětšení okuláru a je dáno vztahem: $\text{Celkovézvětšení} = z_{obj} * z_{ok}$, kde Z_{obj} je zvětšení objektivu a Z_{ok} představuje zvětšení okuláru [1].

Užitečné zvětšení je na úrovni 0,1 μm , tj. užitečné zvětšení řádu 1000x.

Méně často se používá i řádkovací elektronová mikroskopie (ŘEM). To má výhodu, že je možné vedle získání obrazové informace rovněž analyzovat i prvkové případně fázové složení vměstků.

Pro rychlé zpracování velkého množství obrazových informací se používají metody obrazové analýzy. Obrazová analýza je určena ke sledování, snímání, archivaci a ručnímu nebo automatizovanému měření objektů na sledovaném obraze – sledovaných strukturních útvarů. Používaný snímací systém nejčastěji tvoří optický přístroj (mikroskop, steromikroskop resp. makrooptika nebo skener), dále kamera nebo digitální fotoaparát, nezbytný počítač a softwarové vybavení. Jedním z nejpoužívanějších software v ČR je program NIS-Elements, do srpna 2006 jako program Lucia.

2.3.2 Klasické způsoby hodnocení mikročistoty u ocelí a její význam

2.3.2.1 Popis hodnocení mikročistoty

Vměstky v kovových materiálech vznikají při vlastním výrobním procesu a jsou jeho neoddelitelnou součástí. Rozlišujeme vměstky endogenní, které vznikají oxidací a chemickými reakcemi mezi jednotlivými prvky v samotné tavenině, a vměstky exogenní, které vznikají během tavení a odlévání při reakci s vyzdívkou pece či materiálem formovací směsi. Způsob rozložení, chemická podstata, tvar a velikost vměstků tedy záleží na druhu oceli, způsobu zpracování- tavení a odlévání, dále pak na velikosti odlévacích cest, velikosti ingotu, způsobu desoxidace a na způsobu a stupni tváření.

Pro hodnocení mikročistoty se vzorky odebírají v podélném směru výrobku a to tak, aby vyhodnocované broušené plochy ležely v rovině osy výrobku. Velikost plochy výbrusu a počet vzorků závisí na druhu a velikosti průřezu výrobků a na způsobu hodnocení.

Při hodnocení mikročistoty se povrch vzorku, o zaznamenané ploše, vybrousí a vyleští na požadovanou kvalitu. Vzorek se zkoumá na světelném mikroskopu a porovnává s etalony. Způsob zaznamenávání jednotlivých vměstků se liší podle způsobu zvolené metody. Ve všech případech se provádí kvantitativní hodnocení vměstků- sulfidů, silikátů, oxidů a globulitických

vměstků a dalších např. karbonitridu titanu nebo karbonitridu niobu. Příklady jednotlivých vměstků jsou uvedeny na obr. 2.1-4. Pro dobré rozlišení jednotlivých částic, jsou tyto vměstky zachyceny v pětiset násobném zvětšení. Ve většině předpisů jsou srovnávací etalony ve stonásobném zvětšení.

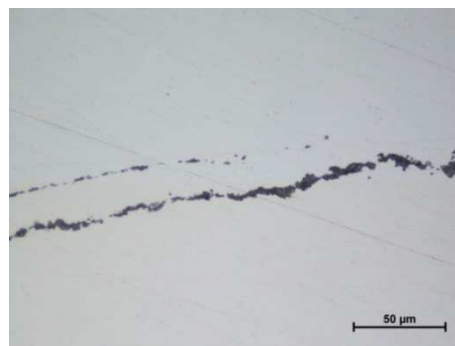
Při klasických způsobech hodnocení mikročistoty se využívají kvantitativní srovnávací etalony obsažené v jednotlivých využívaných normách. Nejčastěji se používají normy:

- DIN 50602
- ČSN ISO 4967
- ASTM E 45
- GOST 1778

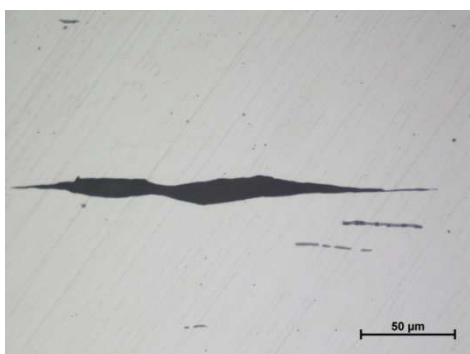
Jednotlivé normy mají své specifické požadavky, způsob hodnocení a liší se i typem hodnocených nekovových vměstků. Díky těmto rozdílům nemohou být výsledky mikročistoty podle jednotlivých norem srovnávány.



Obr. 2.1
Globulitický, oxidický typ vměstku



Obr. 2.2
Hlinitanový typ vměstku



Obr. 2.3
Silikátový typ vměstku



Obr. 2.4
Sulfidický typ vměstku

2.3.2.1.1 Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602

Norma se zabývá hodnocením nekovových sulfidických a oxidických vměstků, které se do zkoumaného materiálu mohou dostat při tavení- styk materiálu s nekovovou vyzdívkou peci, dále pak při oxidaci vzduchem nebo struskou nebo jsou následkem záměrného přidání síry, příčinou může být i desoxidace.

Měření mikročistoty se provádí ve většině případů na sérii šesti vzorků, které jsou odebrány z přesně vymezených míst, která jsou dána normou [2].

Metoda M - Postup vyhodnocení

Při této metodě se na zkoumané ploše vzorku vyhledávají a vyhodnocují největší vměstky všech výše uvedených typů, neohlíží se na počet jednotlivých velikostí vměstků, vyhodnocuje se maximální hodnota velikosti každého typu vmětku. Prohlížená plocha vzorku by měla mít pokud možno 200 mm². Metody M se využívá např. u ušlechtilých konstrukčních ocelí [2].

Metoda K - Postup vyhodnocení

Na rozdíl od metody M, metoda K zaznamenává všechny velikosti všech typů vměstků. Stupeň čistoty je pak vyjádřen souhrnným číslem K. Tato hodnota reprezentuje plošný obsah vměstků od stanovené velikosti vmětku ve zkoumané ploše, vztažený na plochu 1000 mm². Při zadávání zkoušky mikročistoty touto metodou je důležité stanovit, od jakého nejnižšího velikostního stupně jsou vměstky vyhodnoceny a zaznamenávají se. Pro ušlechtilé oceli tavené na vzduchu je obecnou praxí hodnocení podle normy DIN 50602 metodou K4, pro ušlechtilé oceli tavené ve vakuu nebo přetavované ve vakuu či elektrostruskově, je doporučeno používat předpis K1. Číslo za písmenem K (zde použito pro příklad K4 a K1) udává nejmenší stanovenou hodnotu ukazatele velikosti podle obrazové tabulky, kterou norma DIN 50602 obsahuje. Čistota dle metody K se stanovuje na nejméně 6 vzorcích, každý o ploše výbrusu min. 100 mm² [2].

2.3.2.1.2 Hodnocení mikročistoty podle normy ČSN ISO 4967

Tato norma se používá pro stanovení mikročistoty u válcovaných nebo kovaných ocelových výrobcích, u kterých je stupeň protváření alespoň 3. K vyhodnocování se používají vyobrazené etalony, přiložené v normě, odpovídající ploše 0,50 mm², které se získají broušením a leštěním podélných výbrusů vzorku, pozorovaných při 100 násobném zvětšení.

Norma ČSN ISO 4967 rozděluje vzorky podle tvaru do pěti základních skupin:

- Skupina vměstků A, sulfidický typ-nekovové tvárné vměstky, šedé barvy, typické svým protažením v jednom směru, vyskytují se obvykle se zaoblenými konci
- Skupina vměstků B, hlinitanový typ-nedeformovatelné vměstky, černé nebo namodralé barvy, vyskytující se ve shluku nejméně tří částic blízko sebe, seřazené ve směru deformace, obvykle s ostrými konci
- Skupina vměstků C, silikátový typ-velmi tvárné vměstky, tmavě šedé nebo černé barvy, protáhlé v jednom směru, obvykle s ostrým zakončením
- Skupina vměstků D, globulární typ oxidů-nedeformovatelné, černé nebo namodralé ostrohranné nebo kulaté částice, vyskytují se náhodně v ploše vzorku, s nízkým poměrem protažení
- Skupina vměstků DS, typ jednotlivých globulí-černé nebo namodralé kruhové nebo téměř kruhové částice, jejichž velikost je větší než 13 mikrometrů [3].

2.3.2.1.3 Hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E 45

Americká norma ASTM E 45 popisuje postup hodnocení nekovových vměstků pro tvárné ocele. Nekovové vměstky jsou zde hodnoceny z hlediska typu vmětku, distribuce na povrchu vzorku, velikosti a tvaru při sto násobném zvětšení. Vyleštěný povrch vzorku, který je podélně rovnoběžný s osou výrobku, je prohlížen pomocí světelného mikroskopu. Minimální plocha povrchu zkoumaného vzorku je určena normou na 160 mm².

Z hlediska hodnocení mikročistoty je zde rozdělena pět metod [4]:

- A - Metoda nejhoršího pole

- B - Metoda délky
- C - Pro silikáty a oxidy
- D - Nízká míra vměstků
- E - SAM hodnocení

Norma rozlišuje typy vměstků označených A, B, C, D. Toto označení a popis je shodný s normou ČSN ISO 4967, který je popsán výše. Velikosti vměstků v jednotlivých stupních etalonů pro metodu A, D a E jsou uvedeny na obrázku 7 v normě [4].

Metoda A

Metoda A je klasifikována jako metoda nejhoršího pole. Hodnotí se obvykle 6 vzorků, každý o ploše min. 160 mm². U každého vzorku se vyhodnotí nejhorší pole pro každý typ vměstku, jak pro tenké, tak pro tlusté řady. Z těchto šesti výsledků se vypočte průměr pro každý typ a to je výsledek, jak je zřejmé z tab. 2.1 [4].

Vzorek číslo	Typ A		Typ B		Typ C		Typ D		Max velikost D (mm)
	Sulfidy		hlinitany		Křemičitany		Glob. oxidy		
8415 PD (BL)	Tenké	Tlusté	Tenké	Tlusté	Tenké	Tlusté	Tenké	Tlusté	
11	0.5	1.5	0.5	0	0	0	1	1	-
1	0.5	1	0	0	0	0	0.5	0.5	-
22	0.5	1	0	0	0	0	0	0.5	-
2	1	0.5	0	0	0	0	0.5	0	-
33	0.5	1	0	0	0	0	0.5	0.5	-
3	0.5	1	0	0	0	0	0.5	0	-
Průměr	0.6	1	0.1	0	0	0	0.5	0.4	

Tab. 2.1
Výsledné hodnocení mikročistoty podle ASTM E 45, metoda A

2.3.3 Hodnocení čistoty u ocelí se zvýšenou únavovou pevností

2.3.3.1 Účinky vměstků na únavovou pevnost

Při vyhodnocování vměstků ve vztahu k únavové pevnosti je třeba vzít v úvahu tyto faktory [7]:

- Velikost vměstku
- Chemické složení vměstku
- Tvar vměstků
- Přilnavost vměstků k matici
- Elastické konstanty vměstků a základní matrice

Velikost vměstku

Hlavním faktorem je velikost vměstku. Předpokládá se, že v rozložení velikosti vměstků v oceli je téměř exponencionální. Řadu let byla hledána kritická velikost částic vměstků, pod kterou nedochází v materiálu k iniciaci únavové trhliny. Tato kritická velikost závisí na pevnosti a tvrdosti oceli. Ostatní parametry ovlivňují napěťový koncentrační faktor z hlediska kritického napětí pro iniciaci únavové trhliny, a tím i únavovou životnost, zůstávají však z hlediska meze únavy druhotné [7].

Tvar vměstků

Z hlediska iniciace únavových trhlin mají nepříznivější vliv částice s ostrými hranami, které vyvolávají vyšší koncentraci napětí, ve srovnání se stejně velkými částicemi globulitického tvaru. Typicky se jedná o primární (karbo)nitridy titanu kubického tvaru, nebo formy Al_2O_3 ve tvaru rovnoběžnostěnů.

Byly provedeny rozsáhlé experimenty založené na kvantitativním hodnocení faktoru koncentrace napětí pro vměstky sférického nebo elipsoidního tvaru. Tyto experimenty vedly k nepřesným, hrubým odhadům. Jakákoliv odchylka od ideální geometrie může zásadně ovlivnit koncentraci napětí okolo vměstku. Pro vysokopevné oceli je tato metoda, založená na faktorech koncentrace napětí, pro stanovení meze pevnosti nevhodná, jelikož se v těchto ocelích nacházejí vměstky různých tvarů, v některých případech velmi vzdálené k uvedeným sférickým a elipsoidním tvarům [7].

Předpokladem je, že rozložení velikosti vměstků v oceli je téměř exponenciální. Dosavadním experimentálním zkoumáním byla vyhledávána kritická velikost částic vměstků, pod kterou nedocházelo k iniciaci únavové trhliny v materiálu. Tato kritická velikost částic vměstků je závislá na pevnosti a tvrdosti oceli. Pro příklad, pro uměle zanesené částice oxidu hliníku, umístěním těsně pod povrchem (vyobrazení umístění na obr. 2.6 uprostřed), byla stanovena kritická velikost částic vměstků 10 μm [9]. Pro standardizovanou popuštěnou martenzitickou ocel, se stanovenou mezí pevnosti (700-1300) MPa, byla vyhodnocena kritická velikost částic vměstků 45 μm [11].

Přilnavost vměstků k matici

Adheze vměstku vůči matici nikdy není stoprocentní, vždy zde bude hrát roli mezifázové rozhraní vměstek- matrice. I toho rozhraní může být místem iniciace únavové trhliny. Dalším místem iniciace může být i prasknutí uvnitř vměstku, což bývá pravděpodobnější. Méně pravděpodobné bývá, že dojde k dekohezi mezi různými fázemi téhož vměstku a ve své podstatě tak nebývá častou příčinou iniciace trhliny. Matematické simulace pomocí metody konečných prvků prokázaly, že síla iniciace malých trhlin na oxidech hliníku s vnitřními trhlínami byla vyšší v porovnání se silou pro trhliny, které se začaly vytvářet na částicích bez trhlin.

V případě, kdy trhlina iniciovala na mezifázovém rozhraní, rostoucí koeficient tření mezi materiálem matrice a materiálem vměstku způsobil snížení síly pro růst trhliny, a to v případě, kdy došlo k porušování vazeb a skluzu v místě mezifázového rozhraní.

Bez ohledu na další faktory-rozdíl Youngových modulů mezi vměstkem a základním materiálem a adheze vměstku k matici, vychází napětí v bodě blízko vměstku vyšší, než napětí, které se nachází v bodě více vzdáleném od vměstku.

Elastické konstanty vměstků a základní matrice

Nastane-li případ, že Youngův modul E vměstku je vyšší než Youngův modul matrice (např. TiC, Al_2O_3 a hlinitany vápníku), vytvoří se v blízkém okolí vměstku napětí, způsobené tahem.

Přítomnost tvrdých vměstků, které mají malou schopnost deformace, má v některých případech za následek vznik mikrotrhlin v místě mezifázového rozhraní během procesu tváření. Tyto mikrotrhliny mohou způsobit rozvoj únavové trhliny.

Sulfidy vykazují obvykle nižší Youngův modul než má základní matrice, proto nejsou v tomto ohledu relativně nebezpečné.

Hodnoty Youngova modulu, pro různé typy vměstků, jsou uvedené v tab. 2.2 [12].

Typ vměstku	Vměstek	α [10 ⁶ /°C] (0 – 800 °C)	E [GPa]	ν [1]
Sulfidy (sulphides)	MnS	18,1	(69 – 138)	(0,3)
	CaS	14,7	-	-
Vápenné hlinítany (calciumaluminates)	CaS.6Al ₂ O ₃	8,8	-	-
	CaS.2Al ₂ O ₃	5,0	(113)	(0,234)
	CaO.Al ₂ O ₃	6,5	-	-
	12CaO.7Al ₂ O ₃	7,6	-	-
	3CaO.Al ₂ O ₃	10,0	-	-
Spinely (spinels)	MgO.Al ₂ O ₃	8,4	271	0,260
	MnO.Al ₂ O ₃	8,0	-	-
	FeO.Al ₂ O ₃	8,6	-	-
Hlinítany (alumina)	Al ₂ O ₃	8,0	389	0,250
Oxidy (oxides)	Cr ₂ O ₃	7,9	-	-
	MnO	14,1	(178)	(0,306)
	MgO	13,5	306	0,178
	CaO	13,5	183	0,21
	FeO	14,2	-	-
Nitridy (nitrides)	TiN	9,4	(317)	(0,192)

Tab. 2.2

Hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, Youngova modulu a Poissonova čísla pro různé typy vměstků [12]

Teplotní vlastnosti

Rozdíl mezi koeficientem teplotní roztažnosti α materiálu vměstku a základní matrice může v blízkém okolí vměstku vytvářet zbytkové napětí. Při procesu tváření za tepla jsou napětí většinou odstraněna. Při následném ochlazování se mohou v okolí vměstku vytvořit trvalá napětí, jejich charakter je dán poměrem teplotních roztažností. Má-li koeficient teplotní roztažnosti vměstku vyšší hodnotu než je hodnota teplotní roztažnosti základní matrice, jsou napětí tahová. Při opačném poměru teplotních roztažností napětí nevznikne. Tahové napětí je charakteristické pro oxidy; v blízkém okolí vměstků typu MnS nebo CaS se napětí nevytvoří. Komplexní oxidy vápníku a hliníku vytvářejí ve svém okolí tahová napětí, proto jsou tyto vměstky nebezpečné z hlediska kontaktní únavy. V případě duplexních vměstků, tvořených sulfidickou obálkou a vnitřním oxidem, je možné sulfidickou část eliminovat tahová napětí, vyvolaná oxidickou složkou [8]. Oxidy obecně mají tendenci vytvářet dilatační napětí.

Často dochází k tvorbě dutin na mezifázovém rozhraní vměstek – matrice. Výskyt těchto dutin je častý zejména u sulfidů. Tato napětí se mohou lokálně výrazně měnit podle vlastností matrice ovlivněné pouštěním[12].

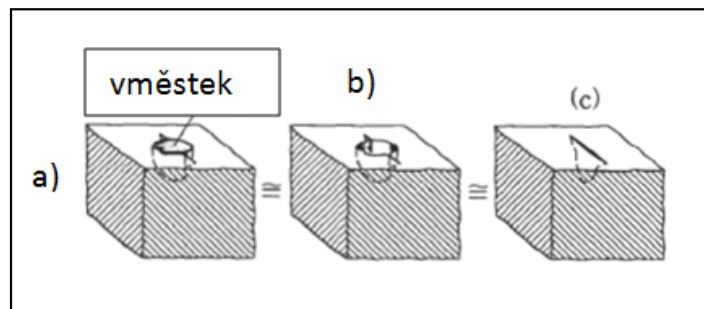
2.3.3.2 Vliv vměstků na únavové vlastnosti ocelí na únavové vlastnosti ocelí

Dřívější běžné teorie v oblasti únavové pevnosti ocelí poukazyvaly na fakt, že velikost, tvar a chemické složení vměstků nejsou v této oblasti důležitým parametrem. Podle Y. Murakamiho nebyly závěry experimentů týkajících se vlivu malých vad a vměstků v na únavovou pevnost nebyly správné. Počet experimentů byl vždy početně omezen a závěry byly rozporuplné na to, aby se z nich daly vyvodit spolehlivé údaje. Y. Murakami se rozhodl ve

svém přístupu dokázat, že jsou tyto teorie chybné. Svě závěry podložil velmi podrobnými experimenty.

Přínosnou oblastí v této problematice je přístup lomové mechaniky k trhlinám a malým vadám, který zde slouží jako předloha pro řešení vztahu mezi malými vadami a malými trhlinami. Tento směr vede k využívání kvantitativních metod hodnocení k získání vypovídajících výsledků, kterých nelze dosáhnout tradičními metodami hodnocení.

Tento přístup pohlíží na vměstky jako na jiné defekty v materiálu jako jsou např. póry a trhliny. V tomto přístupu se předpokládá, že při konstantním napětí působícím na všechny vměstky iniciaci únavové trhliny vyvolá pouze největší vměstek nacházející se v objemu materiálu. Rozhodující pro stanovení únavové pevnosti je tedy velikost největšího přítomného vměstku. Plocha vměstku v rovině hlavního napětí je pak určujícím parametrem; kvantitativní popis je prováděn pomocí druhé odmocniny z této hodnoty, což můžeme symbolicky vyjádřit jako parametr \sqrt{area} (obr. 2.5). Nelze však ani zanedbat vliv prostorového rozmístění vměstků, jejich tvar a typ z hlediska fázového a prvkové složení a určitý vliv hraje i adheze ke kovové matici, dále se zohledňuje tvrdost okolního materiálu. Není rozhodující, zda je trhlina trojrozměrného nebo dvourozměrného tvarového charakteru, průmět obou bude vždy shodný, proto se uvažuje i stejný možný rozvoj únavového porušení [7].



Obr. 2.5
Ekvivalence trhlin [7]

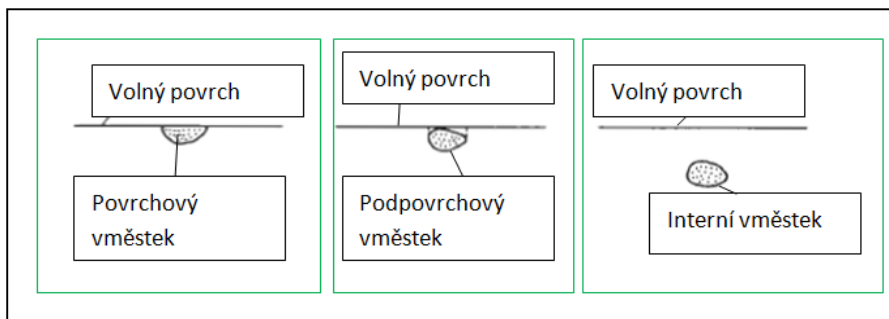
Pro potvrzení svého hypotézy, že se na nekovové vměstky dá pohlížet jako na malé vady, připravil Murakami a Endo experiment, kdy na zkušební vzorku provedli rotační zkoušky únavy při ohybové zkoušce uklidněné oceli (s hodnotou tvrdosti HV650) a tvrzené oceli 0,46 % C, (s hodnotou tvrdosti HV520). Používali vzorky, které obsahovaly malý umělý otvor s průměrem od 40 do 200 μm . Závěr experimentu byl následující [7]:

- I velmi malý defekt- uměle vytvořený otvor o velikosti 40 μm , způsobuje značný pokles únavy u ocelí s tvrdostí $HV > 500$,
- pokud se skluzové pásy stanou původcem únavové trhliny, platí lineární empirická rovnice: $\sigma_w = 1,6 HV$, kde σ_w je mez pevnosti [MPa] a HV je tvrdost [kgf/mm^2], i pro tvrdé ocele,
- i při zřejmém porušení je obtížné stanovit kritickou velikost vměstku, která by vedla k iniciaci trhliny.

Skutečnost, že nekovový vměstek ovlivňuje vytvoření trhliny, znamená, že únavová trhlina se šíří na rozhraní mezi vměstkem a maticí, nebo jsou samotné vměstky popraskané a trhlina pak proniká do mikrostruktury, což vede ke vzniku konečného porušení. Mezní únosnost pro ocel je dána napětím, při kterém se trhlina nešíří, bez ohledu na existenci vad. Mez únavy materiálu by měla být teda taková hodnota, při níž se trhlina začne šířit od nekovového vměstku do blízkého okolí vměstku, nepostupuje hlouběji do mikrostruktury a nakonec se šířit přestane [7].

2.3.3.2.1 Vliv umístění vměstků na únavovou pevnost

Umístění velikostně kritického vměstku, který může vyvolat iniciaci k trhlině v materiálu, je možno rozdělit do tří základních oblastí. Jednotlivá umístění v materiálu jsou naznačena na obr. 2.6. Podle tohoto hodnocení je následně vybrána jedna ze tří rovnic pro předpoklad meze únavy [7].



Obr. 2.6
Rozdělení vměstků podle polohy vůči povrchu[7]

Pokud se nekovový vměstek nachází některou svou částí na volném povrchu vzorku, jedná se o povrchový vměstek, na obr. 6 je zaznačen úplně vlevo. Pro hodnocení únavy σ_w se v tomto případě použije výraz:

$$1,43(HV + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \quad (2.1)$$

Vměstek naznačen na obr. 6 uprostřed je vměstek, který se dotýká povrchu. Zde se ke stanovení meze únavy σ_w využije následující výraz:

$$1,41(HV + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \quad (2.2)$$

U vnitřního vměstku, naznačeného vpravo na obr. č. 6 se k výpočtu meze únavy σ_w aplikuje následující výraz:

$$1,56(HV + 120)/(\sqrt{area})^{1/6} \quad (2.3)$$

kde jednotlivé použité výrazy představují:

σ_w : mez únavy [MPa]

HV: hodnota tvrdosti dle Vickerse [Kgf/mm²]

\sqrt{area} : druhá odmocnina z plochy měřeného vměstku v hlavní rovině napětí [μm]

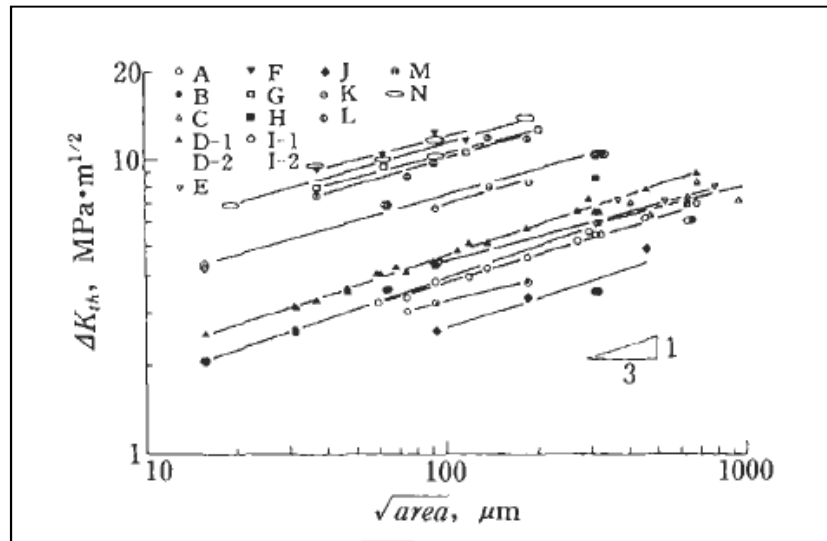
Maximální hodnota faktoru intenzity napětí $K_{I_{\max}}$ podél trhliny přední části povrchové trhliny je dán vztahem $K_{I_{\max}} \cong 0,5\sigma_o\sqrt{\pi\sqrt{area}}$ [7], (2.4)

kde σ_o je v [MPa] a \sqrt{area} je v [m].

2.3.3.2.2 Vliv tvrdosti HV na únavové limity materiálů

V předchozím odstavci jsou použity limitní rovnice, v kterých hraje roli tvrdost podle Vickerse - HV. Pro ucelení souvislostí je nutné uvést širší souvislosti mezi tvrdostí a únavovou pevností. Obr. 2.7 ukazuje údaje pro různé ocele a pro slitinu hliníku. Faktor intenzity napětí $K_{I_{\max}}$ je zde označen jako ΔK_{th} . Tvrdost jednotlivých materiálů je pak uvedena v následující tab. 2.3. Z obr. 7 je zřejmé, že materiály s vyššími hodnotami Vickersovi tvrdosti vykazují i vyšší hodnoty ΔK_{th} , současně roste únavová pevnost. Tento vztah nelze definovat přímou úměrou. Bylo empiricky zjištěno, že mez únavy vzorku, který obsahuje trhlínu nebo vadu, není přímo úměrný tvrdosti podle Vickerse. Trhliny v měkkých

materiálech vykazují nepopiratelné chování, u ocelí s vyšší tvrdostí je obtížné nalézt trhliny, které se neprojevují na mezi únavy. S rostoucí tvrdostí dochází k neproliferačním trhlinám pouze v úzkém rozsahu amplitudy stresu a v tomto případě jsou obvykle velmi krátké, proto lze říci, že ΔK_{th} sleduje širokou škálu HV.



Obr. 2.7

Závislost faktoru intenzity napětí a \sqrt{area} [7]

Table 5.1 Vickers hardness, H_V , for various materials, and the type of defects evaluated using \sqrt{area}					
Materials	H_V	Defects	Materials	H_V	Defects
A S10C (A)	120	Notch	H S50C (T)	319	Notch
		Hole	I-1 S50C (T)	378	Notch
B S30C (A)	153	Notch	I-2 S50C (T)	375	Notch
C S35C (A)	160	Notch	J: 7/3 Brass	70	Notch
		Hole			Hole
D-1 S45C (A)	180	Notch	K: Al alloy (2017-T4)	114	Hole
D-2 S45C (A)	170	Hole	L: Stainless Steel (SUS603)	355	Hole
E S50C (A)	177	Notch	M: Stainless Steel (VUS170)	244	Hole
		Crack	N Maraging Steel	720	Vickers
F S45C (Q)	650	Hole			Indentation, Hole, Notch
G S45C (T)	520	Hole			

Tab. 2.3

Tabulka hodnot HV [7]

Rozdíl v prahovém chování mezi měkkými a tvrdými materiály je pak vyjádřen vztahem:

$$\Delta K_{th} \propto (HV + C) \quad (2.5)$$

Kde C je konstanta nezávislá na materiálu.

Pro různé druhy materiálů je využíván následující, upravený vztah:

$$\Delta K_{th} = C_1(HV + C_2)(\sqrt{area})^{1/3} \quad (2.6)$$

kde C_1 a C_2 jsou hmotně nezávislé konstanty, které lze stanovit metodou nejmenších čtverců k hodnotám viditelných na obr. 7, což vede na vztah:

$$\Delta K_{th} = 3,3 * 10^{-3}(HV + 120)(\sqrt{area})^{1/3} \quad (2.7)$$

Kombinací vzorců (2.4) a (2.6) vznikne rovnice pro výpočet meze únavy σ_w pro vměstek, nacházející se na volném povrchu vzorku, tedy vzorec (2.1).

2.3.3.3 Vybrané přístupy k hodnocení nekovových vměstků ve vysokopevných ocelích metodami statistik extrémních hodnot

Výše uvedený přístup k hodnocení vlivu vměstků na iniciaci a růst únavové trhliny je tedy založený na dvou základních předpokladech:

- známe relevantní vztah mezi nějakým parametrem vměstku ($\sqrt{\text{area}}$) a mezí únavy,
- jsme schopni zjistit tento parametr v zatěžovaném objemu vzorku (dílu).

Při mikroskopickém pozorování relativně malých ploch metalografických výbrusů nalzáme většinou jen menší vměstky, a ne ty největší, které jsou v díle přítomné a které mohou hlavně ovlivnit únavovou pevnost. Se zvyšující se čistotou vyráběných ocelí nejsou konvenční metody určování vměstku tak vypovídající, jako u běžných typů ocelí. Při klasických metodách hodnocení mikročistoty jsou totiž výsledky omezeny na relativně malou zkoumanou plochu metalografického výbrusu. V této ploše většinou nalzáme více menších vměstků, a ne ty největší, které mohou být faktorem ovlivňujícím únavovou pevnost a jsou možným zdrojem iniciace trhlín.

Metody statistik extrémních hodnot tuto nevyváženost eliminují využitím statistických postupů, které z měření distribuce velikosti změřených (menších) vměstků velikost a přítomnost (řídce se vyskytujících) největších vměstků v daném dílu resp. ve stanoveném objemu materiálu. Výsledkem je odhad velikosti největšího vměstku, následně je možné z jeho velikosti predikovat únavové chování[7,14,16].

Nutno podotknout, že tento přístup nebyl/není přijímán všeobecně. Jsou i názory, že čistá ocel neobsahuje velké nekovové vměstky, které by mohly vystupovat v materiálu jako vady a způsobovat iniciaci únavového poškození při definovaných podmínkách zatěžování[8]. Tento přístup předpokládá, že lze u čistých ocelí pro jejich posouzení provést hodnocení:

- Normou ČSN EN ISO 4967 metodou A,
- Normou DIN 50602 metodou K,
- Obsahu kyslíku a síry.

Panuje rovněž názor, že únavová trhlina zdaleka ne vždy musí být vyvolána tím největším vměstkem přítomným v materiálu. Největší vměstky se vyskytují v materiálu velice řídce, tudíž je více pravděpodobné, že iniciaci vyvolávají menší vměstky, které se vyskytují ve větší míře, a jejich příspěvek k iniciaci trhlíně je dostačující na to, aby vznikl defekt[13].

Při hodnocení vměstků musíme uvážit i to, že náhodně vybraný řez nevede přes maximální rozměry všech zjištěných vměstků (Wicksell's corpuscle problem – WCP), jak je naznačeno na obr. 2.8. WCP popisuje problematiku rovinných řezů koule v prostoru.

Uvažuje-li se Poissonův proces s funkcí $\{[x_n, y_n, z_n; s_{v_n}]\}$ v prostoru x, y, z . x_n, y_n a z_n jsou souřadnice středu koule s odpovídající intenzitou λv . S_{v_n} pak představuje velikost koule v prostoru (x_n, y_n, z_n) s funkcí hustoty pravděpodobnosti F_v , která je nezávislá na systému (x_n, y_n, z_n) . Podle předpokladu je střední hodnota F_v konečná a o proti λv je podstatně menší. Koule jsou v prostoru oddělené. Rovinou xy je koulemi veden řez. Bodový proces $\{[x_n, y_n, z_n; s_{a_n}]\}$ popisuje průřezové kružnice. Střed kruhů s maximální velikostí planárních oddílů je pak (x_n, y_n) . Odpovídající intenzita bodu je λa a s_{a_n} je velikost kruhu v (x_n, y_n) rovině. I zde je F_a nezávislá na systému (x_n, y_n, z_n) . S_{v_n} je považováno za oblast velké kružnice koulí a S_{a_n} oblast průřezových kružnic. S_v a S_a jsou pak označení náhodně proměnné oblasti. Pro praxi je potřeba zvážit plochu S_c velkého kruhu koulí, která překročí průřezovou rovinu [7], [14].

Existují tedy tři náhodné proměnné - $S_\omega, w = V, C$ a A s funkcí hustoty pravděpodobnosti $f(s)$, distribuční funkce F_ω a přirozenou funkcí $\bar{F}_\omega(s) = 1 - F_\omega(s)$. Je známo, že:

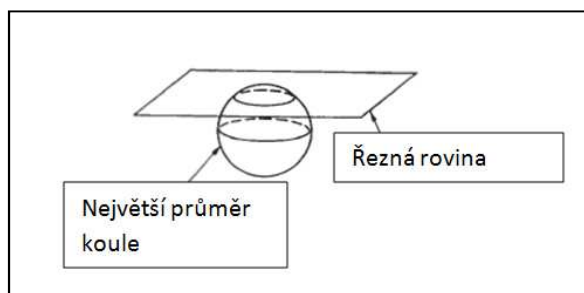
$$\frac{\lambda_V = \sqrt{\pi} \lambda_A}{2\mu_0}, \mu_0 = E(\sqrt{S_V}), fc(s) = \frac{\sqrt{s}}{\mu_0} fV(s), 0 < s < \infty, \quad (2.8)$$

$$S_A = S_C(1 - U^2), \bar{F}_A(s) = \frac{1}{2\mu_0} \int_s^\infty \frac{1}{\sqrt{v-s}} \bar{F}_V(v) dv, \quad (2.9)$$

$$f_A(s) = \frac{1}{2\mu_0} \int_s^\infty \frac{1}{\sqrt{v-s}} fV(v) dv. \quad (2.10)$$

U je jednotná náhodná proměnná na intervalu (0, 1) a nezávislá na Sc.

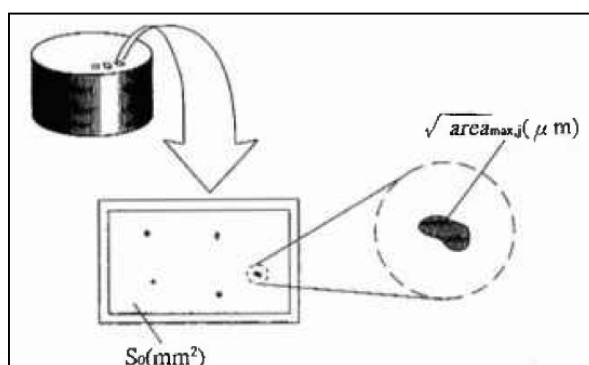
Přednost je dána oblastem S_ω , $w = V, C$ a A vztažené k průměru, protože počtem odpovídají v některých případech počtu pixelů digitálních mikroskopických obrazů s úrovní šedé barvy. Dalším důvodem je, že tyto rovnice jsou jednodušší oproti běžně užívaným transformacím pro distribuci průměrů[7,14].



Obr. 2.8 WCP [7]

2.3.3.3.1 Inclusion Rating Method by Statistics of Extreme values – IRMSE

Metoda hodnocení zařazení podle statistik extrémní hodnoty – IRMSE pomocí \sqrt{area} vměstků jako parametru velikosti umožňuje rozlišit současné vysoce čisté oceli. Navíc, dokáže metoda IRMSE předpovědět maximální velikost vměstků tzv. $\sqrt{area_{max}}$, v oblasti větší, než je kontrovaná oblast. Statické údaje, získané pomocí vzorce $\sqrt{area_{max}}$, lze využít k predikci a stanovení rozložení hodnot únavové pevnosti v materiálu, neboť nekovové vměstky přítomné ve vysoce pevných ocelích jsou v mnoha případech důvodem snížení únavové pevnosti materiálů.



Obr. 2.9 Praktický postup hodnocení vměstků podle statistik [16]

Na obr. 2.9 je schematicky zobrazen praktický postup implementace hodnocení nekovových vměstků statistikami extrémních hodnot. Postup je následující [16]:

- ze vzorku oceli jsou připraveny řezy ve směru kolmém na hlavní napětí,
- povrch řezů je vyleštěn brusným papírem č. 2000,
- hodnotí se pevná standardní kontrolní oblast o velikosti S_0 (mm^2),
- pořídí se záznam ze světelného mikroskopu této oblasti,
- v oblasti S_0 je pak vybrán vměstek o maximální plošné velikosti,
- vypočítá se druhá odmocnina průmětu plochy tohoto vybraného vměstku v dané oblasti $\sqrt{\text{area}}_{max}$
- tato operace se opakuje n krát na různých místech,
- jednotlivé zjištěné hodnoty $\sqrt{\text{area}}_{maxj}$ jsou seřazeny od nejmenší do největší hodnoty a oindexují se: $\sqrt{\text{area}}_{max,1} \leq \sqrt{\text{area}}_{max,2} \leq \dots \leq \sqrt{\text{area}}_{max,n}$,
- vypočtou se kumulativní distribuční funkce F_j a redukovaná náhodné proměnné y_j pomocí vzorců:

$$F_j = j * 100 / (n + 1) \quad (2.11)$$

$$y_j = -\ln[-\ln(j / (n + 1))] \quad (2.12)$$

- Data jsou zaznamenána na pravděpodobnostní papír, bod j má x -ovou souřadnici $\sqrt{\text{area}}_{maxj}$, na y -ové ose se vynášší F_j nebo y_j .
- stanoví se tzv. zpětná perioda T :

$$T = S / S_0 \quad (2.13)$$

kde S je predikovaná plocha (plocha zkušební tyče, na které při daném způsobu namáhání a tvaru vzorku může dojít k iniciaci trhliny). Tato metoda je, striktně vzato, aplikovatelná jen na 2D-problém, neboť objemový charakter není vzat v úvahu. Prakticky je velmi obtížné provádět třírozměrná měření parametrů vměstků. Uvážíme-li, že neměříme parametr vměstků na ploše ale v objemu daným plochou S_0 a průměrnou velikostí vměstku, můžeme tloušťku objemu h spočítat ze vztahu:

$$h = (\sum \sqrt{\text{AREA}}_{max,j}) / n \quad (2.14).$$

Měřený objem je pak:

$$V_0 = S_0 * h \quad (2.15),$$

Můžeme tedy zpětnou periodu definovat ve 3D:

$$T = V / V_0 \quad (2.16),$$

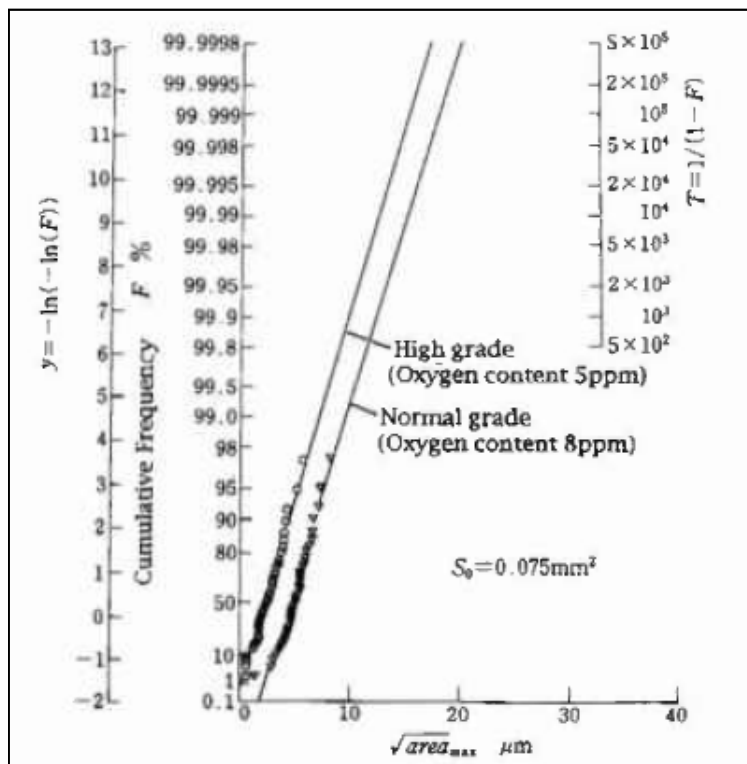
kde V je celkový objem vzorku ohraničený plochou S . Rozdíl mezi 2D a 3D měřením prakticky zmizí s větším počtem kontrolních oblastí [16].

- Pro takto určenou zpětnou periodu T stanovíme hodnotu y :

$$y = -\ln(-\ln((T-1)/T)) \quad (2.17)$$

a z grafu pro ni určíme hodnotu parametru $\sqrt{\text{area}}_{max}$ pro predikovaný největší vměstek na ploše zájmu S nebo v objemu zájmu V .

Příklad grafického záznamu je ukázán na obr. 2.10 pro dva druhy vysoce čistých ložisek SUJ2 (N) a SUJ2 (H). Celkový kyslík obsažený v těchto ocelích je 8 ppm pro SUJ2 a 5 ppm pro SUJ2 (H). Tyto informace umožňují rozlišovat čisté oceli mezi stejnými druhy materiálů od různých výrobců. Jsou důležitou součástí informací pro kontrolu kvality materiálu a pro optimalizaci výroby oceli [16].



Obr. 2.10 Kumulativní četnost extrémních hodnot inkluzí ocelí SUJ2(N) a SUJ2(H) [16]

2.3.3.3.2 Hodnocení podle normy ASTM E2283-08/STM E2283 – 08

Norma ASTM E2283-08 Standard practise for Extreme value Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel and Other Microstructural Features [20] vychází z výše popsaného Murakamiho přístupu. Měření jsou však prováděna pro lineární rozměry namísto pro parametr $\sqrt{AREAMax}$. Norma předpisuje počet vzorků, měřené plochy a způsob vyhodnocení.

2.3.3.3.3 Metoda obecné extrémní hodnoty (GEV)

U distribucí veličin, které exponenciálně klesají v oblastech horních hodnot, lze rozdělit největší hodnoty pomocí Gumbelovy distribuce. Pokud se distribuce snižuje mocninnou zákonitostí, rozdělení největších hodnot se pak řídí buď Fréchetovou nebo Weibullovou distribucí.

Distribuční skupiny GEV rozlišují tři typy, vycházející z následujícího vztahu[18]:

$$P(x) = \exp \left\{ - \left(1 + \xi \left(\frac{x-\lambda}{\alpha} \right) \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2.18)$$

kde:

- $P(x)$ je kumulativní pravděpodobnost,
- λ a α jsou parametry umístění a měřítko,
- ξ je index ukončení.

Index koeficientu ξ určuje typ distribuce[18]:

- $\xi > 0 \rightarrow$ distribuce Fréchetova,
- $\xi < 0 \rightarrow$ distribuce Weibullova,
- $\xi \rightarrow 0 \rightarrow$ distribuci Gumbelova.

Standardní kontrolní oblast je definována jako S_0 . Tato plocha S_0 se proměří v N oblastech. Poté se stanoví hodnota z , $z = \sqrt{\overline{area}_{max}}$, každé měřené inkluze. Kumulativní pravděpodobnost $G(z_i)$ i -té největší naměřené velikosti inkluze může být vypočítána pomocí vztahu:

$$G(z_i) = \frac{z_i}{N+1} = \exp \left\{ -\exp \left(\frac{-z_i - \lambda}{\alpha} \right) \right\} \quad (2.19)$$

kde:

- z_i je i -tá hodnota v sérii $\sqrt{\overline{area}_{max,i}}$, seřazené postupně podle velikosti.

Křivka pravděpodobnosti $-\ln(-\ln(G(z_i)))$ *verzus* z_i pak může být použita pro základní diagnostiku.

Pro odhad velikosti extrémních inkluzí ve velké zkoumané oblasti oceli S je zpětná perioda definována jako: $T = \frac{S}{S_0}$. Charakteristická velikost maximální veličiny jako z_s , u níž se očekává překročení přesně jednou v oblasti S , může být stanoveno řešením rovnice $G(z_s) = 1 - \frac{1}{T}$, za vzniku z_s :

$$z_s = \lambda - \frac{\alpha}{\xi} \left(1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} \right) \quad (2.20)$$

2.3.3.3.4 Smíšený model a model konstrukčního rizika

Smíšený model předpokládá výskyt více typů inkluzí a distribuci Gumbelova typu pro maximální velikost každého typu vměstku. Pokud se v materiálu vyskytují dva typy vměstků, jsou oblasti takéž dvou druhů: obsahující vměstky I. a II. typu, přičemž podíl druhého druhu je p . Druh měřeného prostoru zůstává neznámý a distribuční funkce má podobu:

$$F_{mix}(x) = (1 - p)G_1(x) + pG_2(x), \quad (2.21)$$

kde:

G_i jsou Gumbelovy distribuční funkce pro hodnoty $i = 1, 2$ a pro hodnoty p v rozsahu $0 < p < 1$.

Přirozenějším předpokladem je, že v celém materiálu jsou přítomny vměstky obou typů a měřící proces detekuje zařazení, které se nejvíce vyskytuje v daném objemu.

Model konkurenčních rizik předpokládá, že velikosti největších vměstků různých typů popisují nezávislé Gumbelovy distribuce G_1 a G_2 . Distribuční funkce má pak předpis:

$$F_{risk}(x) = G_1(x)G_2(x) \quad (2.22)$$

2.3.3.3.5 Odhad distribuce vměstků z extrémních hodnot

Vychází se z předpokladu, že porušení je iniciováno na největší inkluzi v namáhaném objemu. Pokud k porušení nedojde, lze předpokládat, že v daném objemu se nevyskytuje žádný vměstek, který by byl svou velikostí větší, než je kritická velikost pro iniciaci.

Kritická velikost může být stanovena z úrovně napětí, při níž byly neporušené vzorky testovány, a tato informace může sloužit jako podklad k vyhodnocení maximální velikosti vměstků přítomných v těchto vzorcích. Kombinací velikostí vměstků nalezených v ohniscích na lomových plochách a největších vměstků, které se očekávají v neporušených, kontrolovaných vzorcích, lze provést další odhadu celkového rozdělení vměstků.

Statistické údaje o extrémní hodnotě mohou být využity pro odhad největšího vměstku v oblasti, který bude pozorován pomocí světelného mikroskopu. Tato velikost pak může být použita pro výpočet rizika porušení při zkouškách únavy nebo pro stanovení rizik ve výrobcích, které jsou určeny pro reálné použití.

Pokud byla stanovena hustota velkých vměstků pomocí dvourozměrného měření, lze tento výsledek převést na přibližně odpovídající hodnotu objemové distribuce, za předpokladu, že hloubka měření je srovnatelná s lineární velikostí vměstků, tj. pomocí vztahu:

$$V_{scan} = A_{scan} * h, \quad (2.23)$$

kde h je průměrná velikost vměstku.

Výsledky povrchových měření vykazují Gumbelovu distribuci s parametry:

$$\mu = \mu_0 + \alpha \log(A * \lambda(\mu_0)), \quad (2.24)$$

kde $\lambda(\mu_0)$ je hustota inkluzí větší než μ_0 , α je parametr exponenciální distribuce, pokud platí [17]:

- jsou přítomny vměstky větší, než je stanovená prahová hodnota μ_0 ,
- jsou náhodně rozloženy na sadu měřících ploch, z nichž každá je oblast A
- rozložení velikostí nad prahovou hodnotou exponenciálně klesá.

3. Experimentální materiál

K rozboru byly použity čtyři bloky kované tyčoviny, z toho tři bloky z různých taveb z oceli Böhler T552 a jeden blok z oceli Böhler T671. Z bloků se zhotovily vzorky na vyhodnocení mikročistoty oceli (a mikrostruktury), tělesa pro zkoušky únavy a tělesa pro mechanické zkoušky.

3.1 Charakteristika materiálu Böhler T552

Jedná se o vysoce legovanou chromovou ocel známou též pod označením X12CrNiMoV12-3, 1.4938 nebo 1.4939. Je dována výrobcem ve formě válcovaných nebo kovaných polotovarů. V energetickém průmyslu se používá pro výrobu oběžných lopatek parních turbín.

3.1.1 Chemické složení

K rozborům byly použity tři tavby této oceli označené T95803, K13589 a Y10514. Jejich chemické složení je uvedeno v následující tab. 3.1. Označení ¹⁾ je označení pro ocel Böhler T552 a ²⁾ označuje modifikaci Böhler T552 EXTRA.

Tavba	Označení materiálu	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	N
T95803	1.4938 ¹⁾	0,12	0,21	0,75	0,016	0,002	11,70	1,70	2,71	0,30	0,038
K13589	1.4939 ²⁾	0,12	0,15	0,80	0,019	<0,0003	11,66	1,62	2,71	0,34	0,037
Y10514	1.4939 ²⁾	0,12	0,15	0,79	0,017	0,0006	11,49	1,61	2,73	0,34	0,038

Tab. 3.1
Chemické složení ocelí Böhler T552 (hmot. %)

3.1.2 Tepelné zpracování

Použité tepelné zpracování jednotlivých bloků taveb z ocele Böhler T552 je uvedeno v tab. 3.2.

Tavba	Polotovar [mm]	Kalení	Popouštění	Žihání na odstranění pnutí
T95803	PLO 110x80	1040°C/1h/olej	620°C/5h/vzduch	580°C/4h/vzduch
K13589	PLO 90x75	1050°C/30min/ventilátor	680°C/2h/vzduch	620°C/2h/vzduch
Y10514	PLO 90x75	1050°C/2h/voda a ventilátor	660°C/4h/vzduch	620°C/4h/vzduch

Tab. 3.2
Tepelné zpracování

3.1.3 Velikost zrna

Vyhodnocení velikosti původního austenitického zrna bylo provedeno srovnávací metodou, při zvětšení 100x, dle ČSN EN ISO 643. Před zkouškou velikosti zrna byly bloky žihány při 1030°C po dobu 1,5 hodiny a zakaleny ve vodě. Výsledné velikosti zrna jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tavba	Vzorek č.	Velikost zrna G
T95803	5	4
K13589	K2	4
Y10514	Y2	5

Tab. 3.3
Velikost původního austenitického zrna

3.1.4 Mikrostruktura

Mikrostruktura byla hodnocena pomocí světelné mikroskopie u všech tří taveb. Ve všech případech byla mikrostruktura tvořena vysoce popuštěným martenzitem bez přítomnosti δ -feritu a volného feritu. Místy se ve struktuře nachází zvýrazněné hranice zrn drobnými karbidy. Ukázka typické mikrostruktury je uvedena na obr. 3.1a, b.

3.1.5 Mechanické a křehkolomové vlastnosti

U materiálů byly stanoveny základní mechanické vlastnosti ze zkoušky tahem, změřena tvrdost HB a provedeny rázové zkoušky. Všechny mechanické zkoušky byly prováděny při teplotě 20°C. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v tab. 3.4. Zkouška tvrdosti HB byla provedena dle znění normy ČSN RN ISO 6506-1, HBW 2,5/187,5 a její výsledky jsou uvedeny v tab. 3.5. Výsledky rázových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.6. U taveb K13589 a Y10514 byla zkouška provedena jak v příčném, tak v podélném směru.

Tavba	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
T95803	917	1010	17,4	56
K13589	912	1017	20,7	66
K13589	905	1014	19,0	64
Y10514	940	1030	21,7	66
Y10514	930	1028	18,0	58

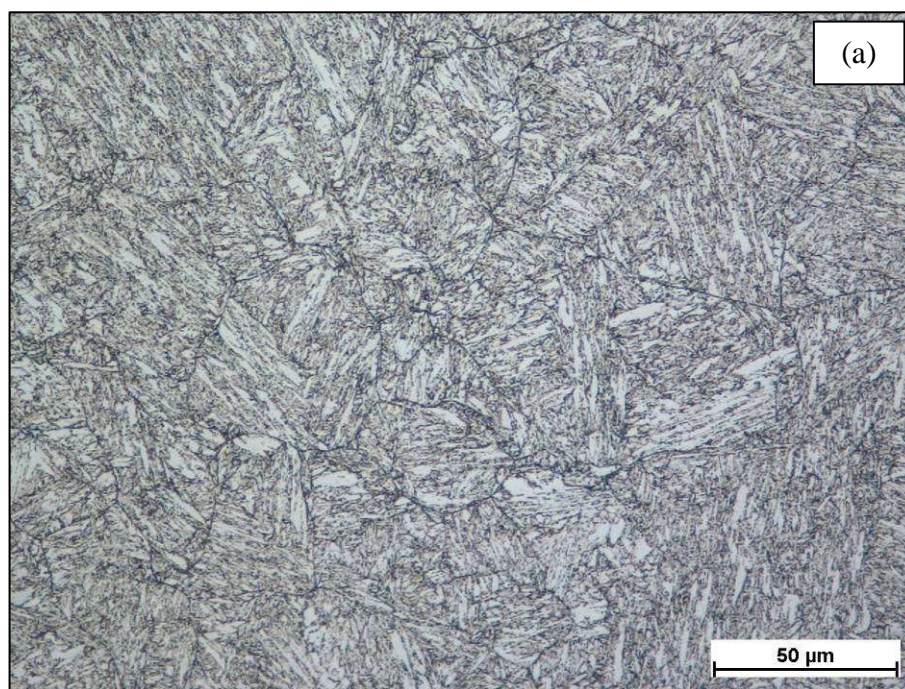
Tab. 3.4
Základní mechanické parametry

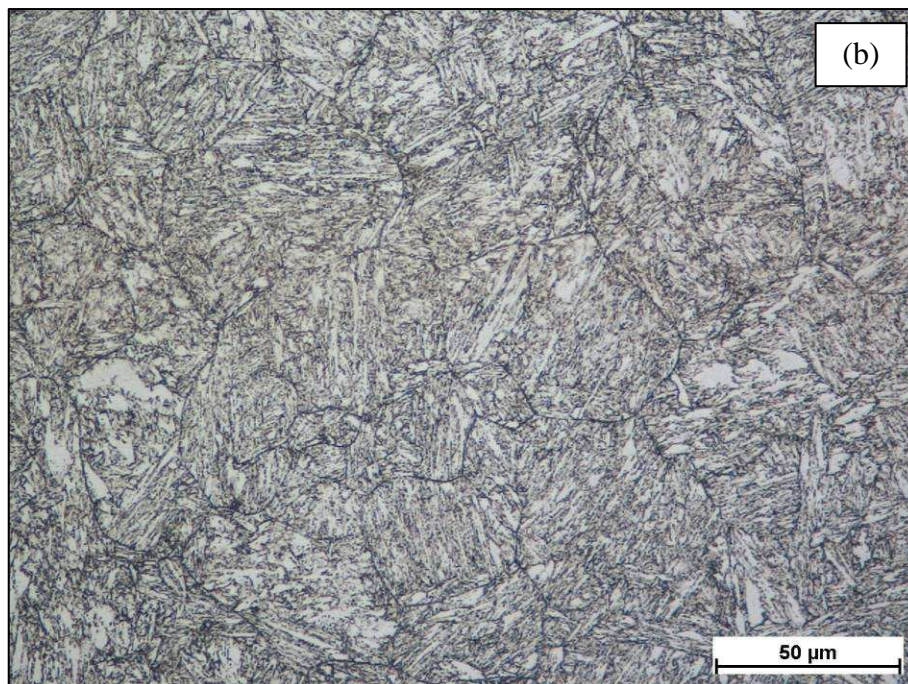
Tavba	HBW	HV10
T95803	315	314
T95803	321	304
T95803	328	306

Tab. 3.5
Výsledky měření tvrdosti HB a HV

Tavba	Vzorek č.	KV[J]
T95803	1	114
T95803	2	106
T95803	3	114
K13589	K1-podélný směr	117
K13589	K1-příčný směr	122
K13589	K2-podélný směr	126
K13589	K2-příčný směr	92
K13589	K3-podélný směr	72
K13589	K3-příčný směr	89
Y10514	Y1-podélný směr	129
Y10514	Y1-příčný směr	127
Y10514	Y2-podélný směr	122
Y10514	Y2-příčný směr	92
Y10514	Y3-podélný směr	84
Y10514	Y3-příčný směr	91

Tab. 3.6
Vrubová houževnatost





Obr. 3.1a,b
Mikrostruktura vstupního materiálu T552 pro výrobu vzorků, leptáno Vilella-Bain, zvětšení 500x, (a) příčný řez, (b) podélný řez

3.2 Charakteristika materiálu Böhler T671

Ocel Böhler T671 je vysoce legovaná chromová precipitačně vytvrditelná ocel, která je určena pro výkovky oběžných lopatek parních turbín. Vyrábí se v elektrické peci, kyslíkovém konvektoru nebo popřípadě v jiném, ekvivalentním zařízení, s následnou rafinací.

3.2.1 Chemické složení

Chemické složení oceli Böhler T671 je uvedeno v tab. 3.7 (Jedná se o chemické složení, které přísluší materiálu CUSTOM 450 ESR, provedení E-VOD/ESU.)

Tavba	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	
360104	0,041	0,20	0,29	0,017	0,010	15,37	0,59	6,15	
	Cu	Nb	V	Al	N	Sn	Pb	Ag	Nb/C
	1,67	0,570	0,020	0,036	0,0167	0,004	0,0020	<0,005	13,902

Tab. 3.7
Chemické složení oceli Böhler T671(hmot. %)

3.2.2 Tepelné zpracování

U bloku z oceli Böhler T671 se mechanické zkoušky prováděly ve stavu po tepelném zpracování, které je uvedeno v tab. 3.8.

Tavba	Polotovar [mm]	Tepelné zpracování (precipitační vytvrzení + žíhání ke snížení pnutí)
360104	PLO 100x40	1040°C/1h/voda +575°C/4h/vzduch

Tab. 3.8

Tepelné zpracování

3.2.3 Velikost zrna

Vyhodnocení velikosti původního austenitického zrna bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 643, srovnávací metodou, při zvětšení 100x. Před zkouškou velikosti zrna byl vzorek vyžhán při teplotě 1030°C po dobu 1 hodiny a zakalen ve vodě. Velikost zrna je uvedena v tab. 3.9.

Tavba	Velikost zrna G
360104	7

Tab. 3.9

Velikost původního austenitického zrna

3.2.4 Mikrostruktura

Mikrostruktura byla sledována v příčném i podélném směru, jak z okraje bloku, tak z jeho středu. Po celém bloku se nachází struktura, která je tvořena vysoce popuštěným martenzitem s jemně vyloučenými disperzními částicemi karbidů legujících prvků. Ve struktuře se nenachází d-ferit ani volný ferit. V podélném směru je patrná řádkovitost a drobné precipitáty jsou místy vyloučeny do řádků. Ukázka typické mikrostruktury je uvedena na obr. 3.2a,b.

3.2.5 Mechanické a křehkolomové vlastnosti

U materiálu byly stanoveny základní mechanické vlastnosti ze zkoušky tahem, změřena tvrdost HB a provedeny rázové zkoušky. Všechny mechanické zkoušky byly prováděny při teplotě 20°C. Výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v tab. 3.10. Zkouška tvrdosti HB byla provedena dle znění normy ČSN RN ISO 6506-1, HBW 2,5/187,5 a její výsledky jsou uvedeny v tab. 3.11. Výsledky rázových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3.12. U taveb K13589 a Y10514 byla zkouška provedena jak v příčném, tak v podélném směru.

Tavba	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]
360104	1190	1217	14,6	64

Tab. 3.10

Základní mechanické parametry

Tavba	HBW	HV10
360104	395	373
360104	380	370
360104	386	376

Tab. 3.11

Tvrdost HB a HV

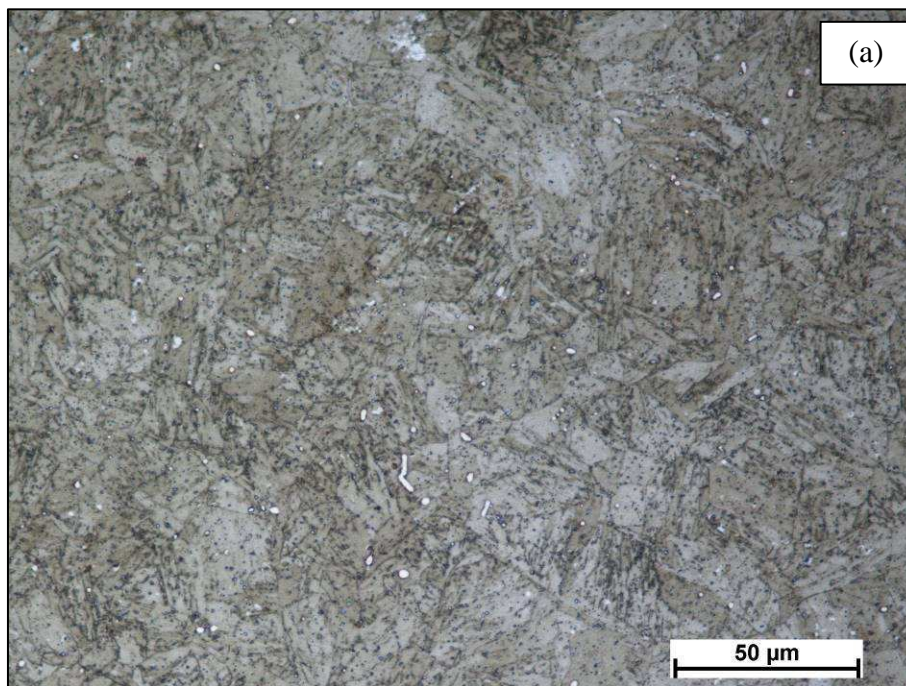
Tavba	KV[J]
360104	96
360104	125
360104	130

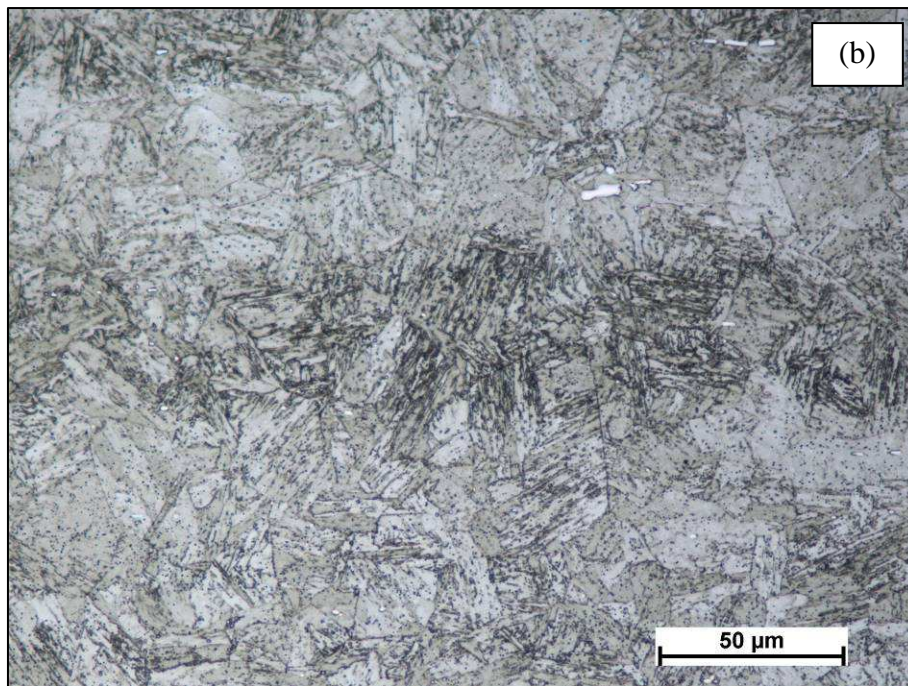
Tab. 3.12
Vrubová houževnatost

3.3 Porovnání výsledků zkoušek s technickými předpisy

Výsledky zkoušek byly porovnány s technickými podmínkami pro jednotlivé ocele. Ve všech případech vyhověl zkoušený materiál požadavkům, kromě vzorků z bloku T95803 a K13589, které nevyhověly velikostí zrna-vzorky obsahovaly hrubozrnnější strukturu, než dovoluje předpis.

Jednotlivé předepsané hodnoty jsou vypsány v příloze č. 1.





Obr. 3.2a, b
Mikrostruktura vstupního materiálu T671 pro výrobu vzorků, leptáno Vilella-Bain, zvětšení 500x, (a) příčný řez, (b) podélný řez

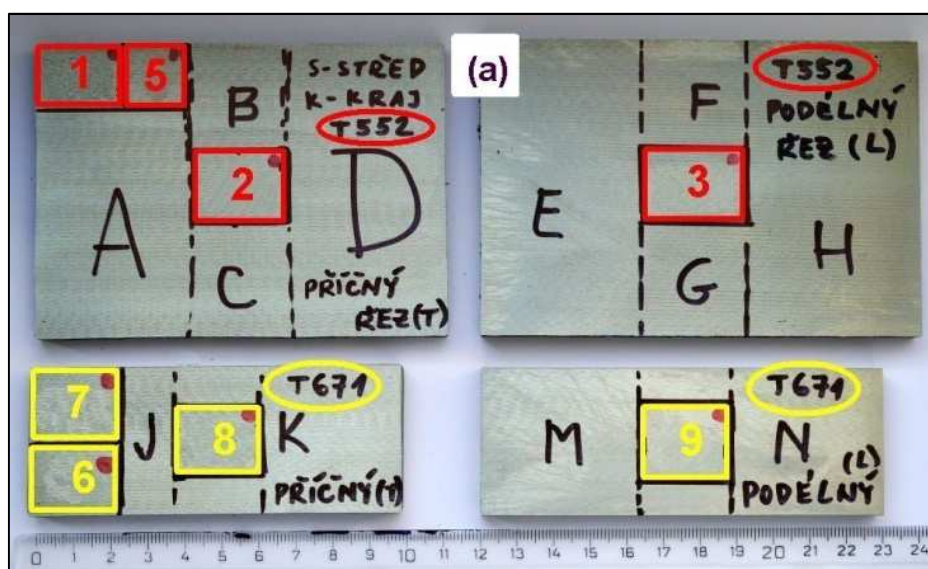
4. Výsledky

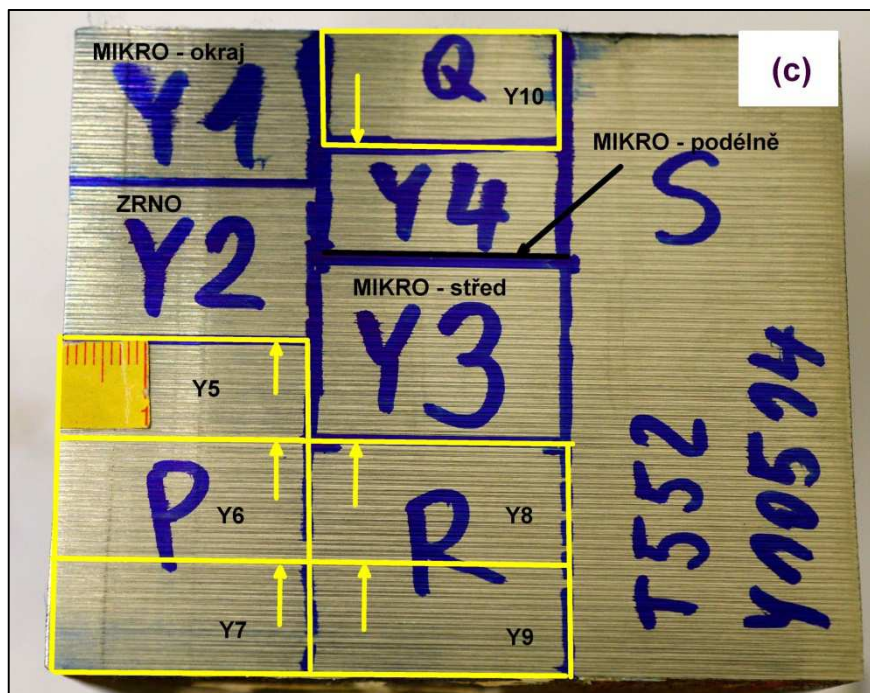
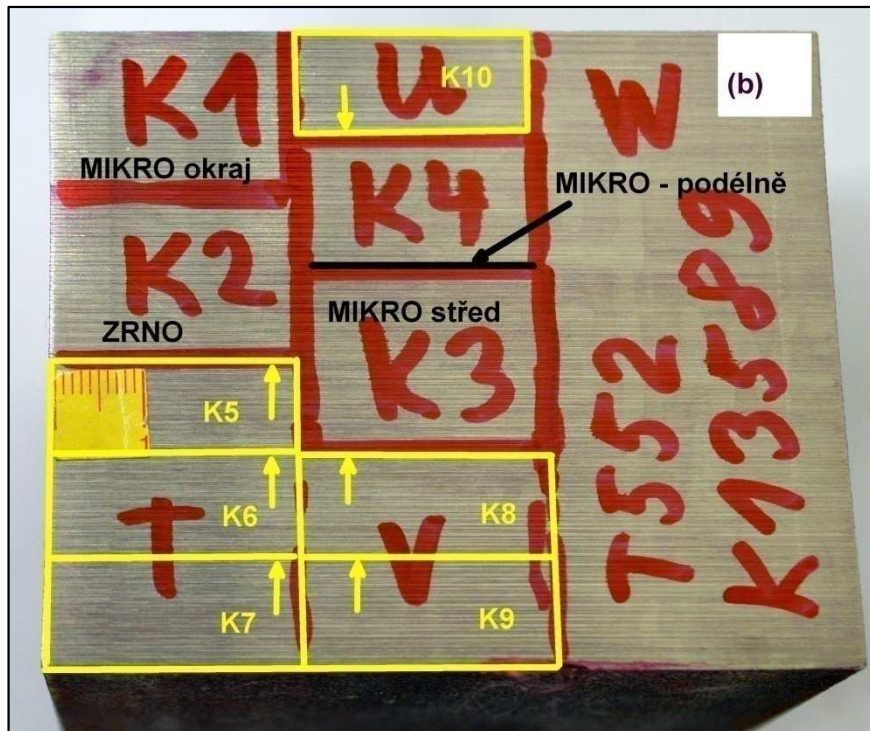
Pro provedení jednotlivých zkoušek byly z bloků vyříznuty jednotlivé vzorky, vždy sada šesti vzorků pro hodnocení mikročistoty z jednoho typu oceli resp. jedné tavby. Přesná místa, ze kterých jsou vzorky z bloků odebrány, jsou patrné z obr. 4.1, a, b, c.

Vzorky byly vybroušeny na brusných papírech o zrnitosti 200, 280, 600 a 1500, a vyleštěny na pastě na přístroji Struers Tegamin 30. Následně byly zkoumány na světelném mikroskopu NIKON Epiphot 300 při zvětšení stonásobném a porovnávány s etalony. Porovnávání jednotlivých velikostí nalezených vměstků bylo prováděno přímo v okuláru s následnou kontrolou měření obrazu sledovaném na monitoru v programu NIS-Elements verze AR 4.13.05.

Tento program byl použit pro vyhodnocování maximálních velikostí vměstků a jejich ploch. Byl zvolen standardní postup sejmutí obrazu a následného prahování. V každém zvoleném poli s nalezeným maximálním vměstkem bylo provedeno vyhodnocení plochy vměstku a pozorované plochy.

Tato metoda se pro účel této diplomové práce projevila jako problematická. Globulární oxidické vměstky na vzorcích ocele Böhler T552, tavby K13589 a Y10514 dosahovaly na určitých vzorcích v sérii, konkrétně na vzorku Y10 a K7, tak malých maximálních ploch, že prahování nebylo možné provést bez zachycení okolních nečistot. Tyto nečistoty jsou při použití klasických metod hodnocení rozpoznatelné pouhým okem a osoba provádějící měření je dokáže jednoznačně rozlišit a vyloučit. Dohledání největších vměstků a jejich proměření proto muselo být prováděno manuálně.





Obr. 4.1, a, b, c
Odběr vzorků z polotovaru

4.1 Hodnocení mikročistoty standardními metodami

Pro hodnocení velikosti vměstků byly vybrány tyto normy:

- DIN 50602 – metoda K0
- DIN 50602 – metoda K4
- ASTM E 45 – metoda A

4.1.1 Hodnocení podle normy DIN 50602 - metoda K0

U všech tří taveb ocele Böhler T552 a u jedné tavby ocele Böhler T671 bylo provedeno hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K0.

Pomocí této metody K0 byly zachyceny všechny globulární oxidické vměstky od velikosti 9 µm a všechny hlinitanové vměstky větší než 27 µm. Vyhodnocení celkové sumární charakteristické hodnoty K0 bylo provedeno podle stanoveného vzorce:

$$\frac{2 \cdot \text{mezisoučet} \times 1000}{\text{celková plocha [mm}^2\text{]}}$$

Souhrnné výsledky jsou zaznamenány v tab. 4.1. Kompletní tabulka pro hodnocení velikosti vměstků, včetně velikosti ploch vzorků, je vložena v přílohové části v příloze č. 2.

T552 – T95803	K0 = 14	(S: 0	O: 14)
T552 – K13589	K0 = 9	(S: 0	O: 9)
T552 – Y10514	K0 = 8	(S: 0	O: 8)
T671–360104	K0 = 2	(S: 0	O: 2)

Tab. 4.1
Výsledky mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K0

4.1.2 Hodnocení podle normy DIN 50602 - metoda K4

U všech tří taveb ocele Böhler T552 a u jedné tavby ocele Böhler T671 bylo provedeno hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K4.

Při tomto hodnocení se zaznamenávají všechny globulární oxidické vměstky velikosti větší než 38 µm a všechny hlinitanové vměstky velikosti větší než 140 µm.

Výsledky hodnocení podle DIN50602 – metodou K4 jsou uvedeny v tab. 4.2 a souhrnně v příloze 3.

T552 – T95803	K4 = 3	(S: 0	O: 3)
T552 – K13589	K4 = 0	(S: 0	O: 0)
T552 – Y10514	K4 = 1	(S: 0	O: 1)
T671–360104	K4 = 0	(S: 0	O: 0)

Tab. 4.2
Výsledky mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K4

4.1.3 Hodnocení podle normy ASTM E 45- metoda A

U všech vzorků bylo provedeno hodnocení podle normy ASTM E 45 – metodou A. Vzorky byly prohlíženy při zvětšení sto krát na světelném mikroskopu. Hodnocena jsou nejhorší pole pro každý typ vměstku a pro každou sérii tlouštěk.

Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 4.3, kompletní záznam zkoušky pro jednotlivé tavby je v příloze 4.

Tavba	Typ A		Typ B		Typ C		Typ D		Max D Velikost (mm)
	Sulfidy		Hlinítky		Křemičitany		Glob. oxidy		
	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	
Nejhorší pole									
T552 – T95803	0	0	0,2	0	0	0	1,5	0,8	0,06
T552 – K13589	0	0	0,5	0,1	0	0	1,3	0,6	0,03
T552 – Y10514	0	0	0,8	0,3	0	0	1,2	0,8	0,04
T671–360104	0	0	0	0	0	0	0,7	0,6	0,02

Tab. 4.3
Výsledky mikročistoty podle normy ASTM E 45- metoda A

4.2 Zpracování výsledků metodami statistik extrémních hodnot

Odhad velikostí největších vměstků v požadovaném objemu materiálu na základě hodnocení omezené plochy řezů vzorků byl proveden metodou IRMSE podle Murakamiho a metodou podle normy ASTM E2283 – 08.

Obě metody jsou založeny na podobném principu. Metoda hodnocení podle normy ovšem je daleko preciznější v požadavcích na podmínky měření (minimální pozorovaná plocha, přesný postup, formu zápisu výsledků a výstupů atd.). Zásadní rozdíl je v tom, že v Murakamiho postupu se vyhodnocuje plocha řezu „největšího“ vměstku resp. vměstku, jehož plošný řez je na hodnocené ploše největší (potom se ovšem výsledek převede na lineární rozměr odmocněním), zatímco v postupu podle normy ASTM E2283 – 08 se vyhodnocuje největší nalezený délkový rozměr (feret), „největšího“ vměstku (z hlediska jeho délky). Nutně tedy nemusí být v jednotlivých postupech hodnocen na pozorované ploše tentýž vměstek.

Při hodnocení byly využity vzorky pro hodnocení klasické mikročistoty, při které je požadováno hodnocení na šesti vzorcích. Aby se pro dostatečnou statistiku výsledků získal požadovaný počet hodnot, byl použit postup specifikovaný v normě ASTM E2283 – 08. Na hodnocené ploše výbrusu byla změřena plocha, kterou zaujímal řez vměstku rovinou výbrusu a délkový rozměr největšího vměstku (podle postupu v dané normě, která vyžaduje proměření osmi různých délek feret parametrů. Při prohlížení jednoho výbrusu byla postupně hodnocena zorná pole o velikosti $A_f = 1,15 \text{ mm}^2$. Počet zorných polí na jednom vzorku byl N_f . Celková plocha hodnocená na jednom řezu tedy byly $A_0 = N_f * A_f [\text{mm}^2]$ (v přístupu podle Murakamiho je značeno jako S_0). Hodnoty hodnocených ploch jsou uvedeny v tab. 4.5. Po vyhodnocení plochy jednoho vzorku byly vzorky ubroušeny o 0,3 mm, znovu vybroušeny a vyleštěny. Pak proběhlo další měření. Tento postup se postupně opakoval a na každém vzorku byly dohromady provedeny čtyři měření (počet hodnocených ploch na vzorek tedy byl $N_s = 4$). Pro každou tavbu bylo připraveno $N_f = 6$ vzorků. Celkový počet výsledků (ploch největších vměstků, délek největších vměstků) na jednu tavbu je $N = N_s * N_f$, v daném případě tedy 24.

Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 4.4.

Tavba	Ocel	Vz. č.	Největší velikost vmětku 1. měření		Největší velikost vmětku 2. měření		Největší velikost vmětku 3. měření		Největší velikost vmětku 4. měření	
			Délka [μm]	Plocha [μm^2]	Délka [μm]	Plocha [μm^2]	Délka [μm]	Plocha [μm^2]	Délka [μm]	Plocha [μm^2]
T95803	T552	1	56,04	2430	58,82	1796,75	54,88	2087	53,82	2039
		2	39,92	980,63	57,86	2553,72	46,74	1431,15	55,46	1905
		3	57,43	2048,01	41,20	1359,49	53,47	1578,17	52,37	2068
		4	43,85	1457,33	31,74	684,21	38,14	1334,03	49,66	1441,56
		5	44,09	1276,37	27,05	422,32	33,11	805,71	36,84	853,05
		6	55,41	2355,71	54,59	1898,56	46,00	1771,91	44,55	860,97
K13589	T552	K5	34,06	602,52	44,02	1495,68	27,71	654,48	36,14	1011
		K6	28,43	636,38	11,11	78,66	12,64	127,95	19,85	333,51
		K7	18,55	223,47	21,71	263,25	35,36	935,45	22,52	329,82
		K8	30,5	487,24	35,81	1061,81	15,80	194,06	17,34	249,75
		K9	27,18	533,93	15,06	217,20	8,84	60,71	20,81	202,41
		K10	20,09	209,81	13,51	189,83	13,54	130,99	15,85	200,42
Y10514	T552	Y5	27,02	280,1	26,74	475,69	18,24	185,18	43,47	1164,11
		Y6	25,61	248,1	39,18	1268,59	18,63	326,48	50,67	1704
		Y7	25,46	322,97	26,41	575,10	12,62	122,68	24,79	587,20
		Y8	38,15	653,74	25,12	439,47	30,42	760,25	18,81	322,55
		Y9	19,2	250,3	13,17	126,82	14,70	164,65	18,55	152,92
		Y10	13,65	160,65	24,41	391,87	39,69	1125,31	15,69	202,37
360104	T671	1	9,19	87,03	10,89	87,11	11,65	93,82	11,68	83,04
		2	20,47	246,44	13,85	147,84	13,63	97,12	10,62	87,18
		3	13,79	160,34	13,18	110,51	12,66	167,34	13,85	161,41
		4	16,91	180,85	11,98	108,65	12,67	181,39	10,23	69,48
		5	15,79	108,06	17,06	190,64	16,98	208,09	8,15	54,81
		6	18,00	145,89	16,67	194,55	16,87	151,19	14,49	167,92

Tab. 4.4
Výsledky hodnocení největších vměšků

4.2.1 Vyhodnocení podle Murakamiho

Výsledky měření byly zpracovány ve formě excelovské tabulky podle postupu uvedeného v části 2.3.3.3.1. Naměřené hodnoty ploch největších vměšků jsou převedeny na parametr $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$ seřazeny podle velikosti a oindexována parametrem j. Byly vypočteny příslušné hodnoty kumulativní distribuční funkce F_j (vzorec 2.11) a redukované náhodné proměnné y_j (vzorec 2.12). Tato data jsou pak vynesena do pravděpodobnostního grafu jako závislost y_j na $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$. Z hodnot analyzované plochy S_0 a plochy zájmu S je určena zpětná perioda T (vzorec 2.13) pro ni pak příslušná hodnota y (vzorec 2.17). Pro tuto hodnotu je pak vypočtena hodnota parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ největší velikosti vmětku z regresní rovnice grafu resp. z „inverzní“ regresní rovnice. Tato hodnota parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ kritické velikosti vmětku je pak vypočtena hodnota i pro objem zájmu V . Měřená tloušťka h byla určena pomocí vzorce 2.14, měřený objem V_0 byl určen podle vzorce (2.15). Zpětná perioda byla spočítána podle

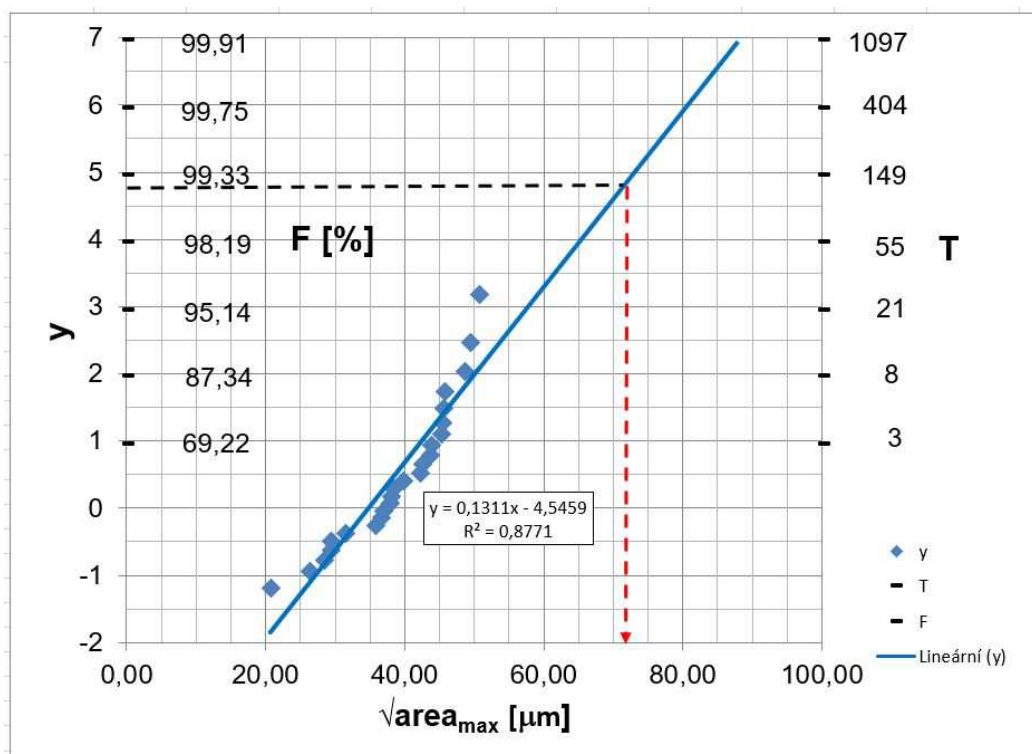
vzorce 2.16 (analogický vzorci 2.13) parametr \sqrt{AREA}_{max} pro objem zájmu V pomocí vzorce 2.17.

Plochy zájmu S a objemu V byly stanoveny z geometrie aktivních částí zkušebních tyčí použitých pro únavové zkoušky. Týkají se plochy resp. objemu jednoho vzorku. Pro každou ocel byl použit vzorek jiné velikosti a jiného tvaru. Proto jsou tyto hodnoty pro každou ocel odlišné. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 4.5.

V tabulce tab. 4.5 jsou rovněž uvedeny hodnoty výsledky T, y a parametru \sqrt{AREA}_{max} jak pro výpočet pro plochu zájmu, tak pro výpočet pro objem zájmu. Grafy závislostí y_j na $\sqrt{AREA}_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami parametru \sqrt{AREA}_{max} kritické velikosti vměstku (určovánu pro objemy zájmu V) pro jednotlivé tavby jsou zobrazeny na obr. 4.2 až 4.5. Pro srovnání průběhů závislostí jsou ponechány ve všech případech stejné proporce os. Tabulky výpočtů jsou uvedeny v přílohách 5 až 8.

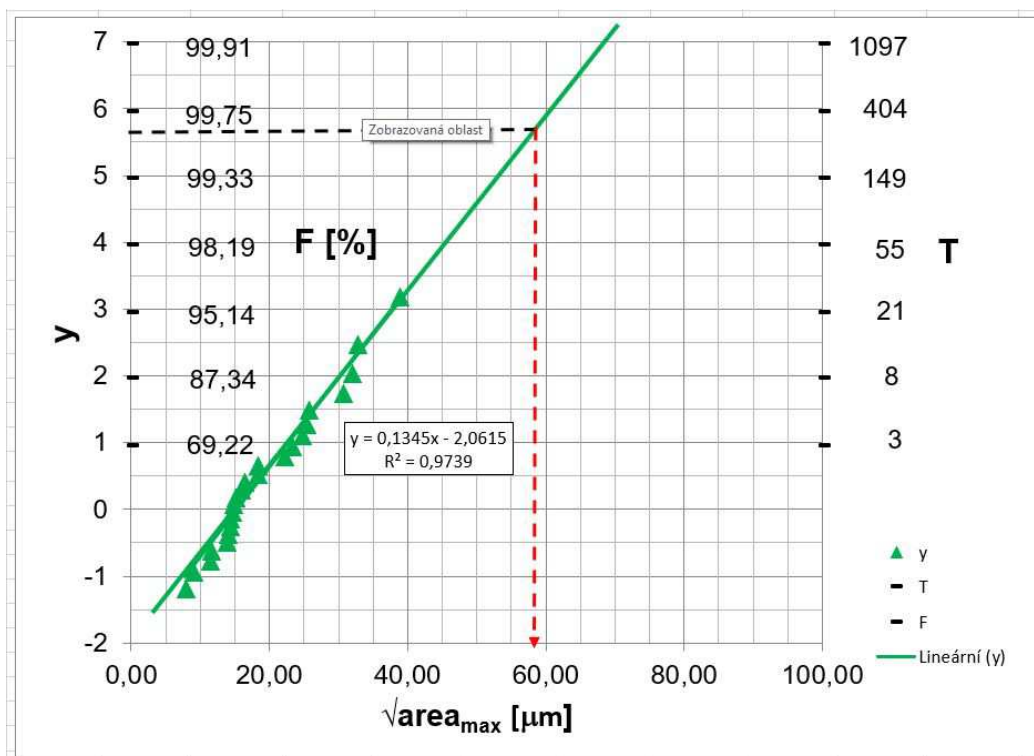
	Materiál	T552			T671
	Tavba	T95803	K13589	Y10514	369104
	S ₀ [mm ²]	513	374	399	285
	Hloubka h [μm]	38.7	20.8	19.3	11.5
	S [mm ²]	1321	1321	1321	803
	V ₀ [mm ³]	19,87	8.29	9.88	3.28
	V [mm ³]	2562	2562	2562	1741
Výpočet pro plochu	Zpětná perioda T	2.6	3.3	3.5	2.8
	Příslušná hodnota y	0.71	1.02	0.71	0.82
	\sqrt{area}_{max} [μm]	40.1	23.5	24.6	12.1
Výpočet pro objem	Zpětná perioda T	129	308.9	259	530.6
	Příslušná hodnota y	4.86	5.73	5.56	6.27
	\sqrt{area}_{max} [μm]	71.7	59.0	60.9	23.2

Tab. 4.5
Vstupní a výstupní hodnoty výpočtů parametrů \sqrt{AREA}_{max}



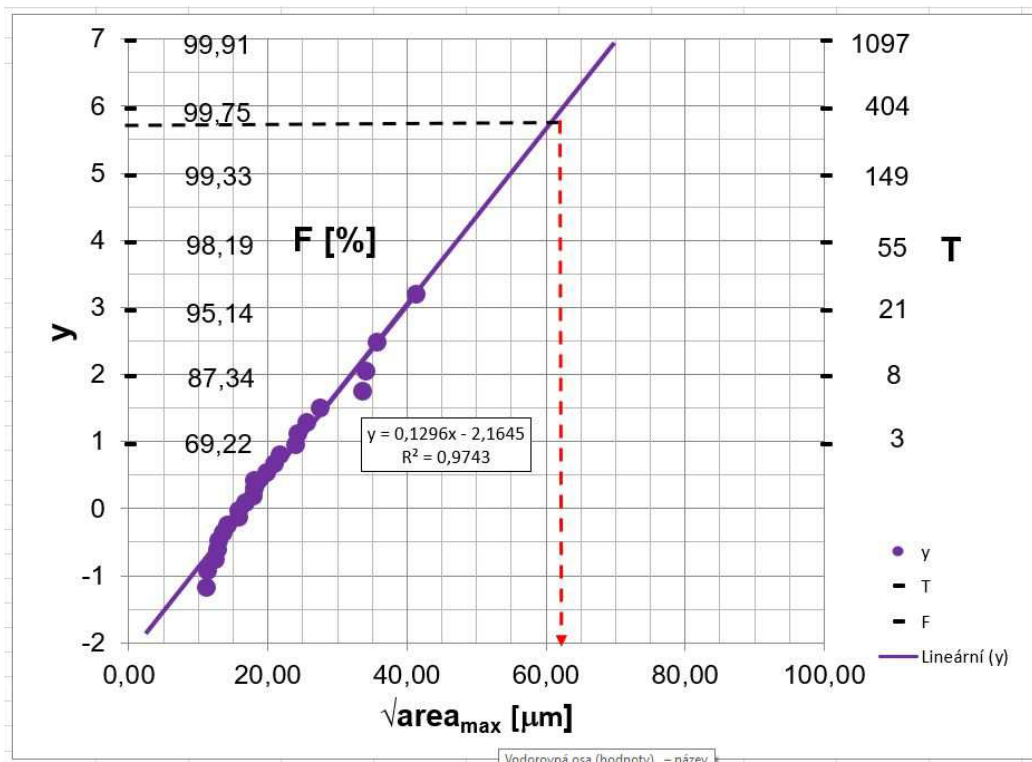
Obr. 4.2

Závislost y_j na $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu T95803



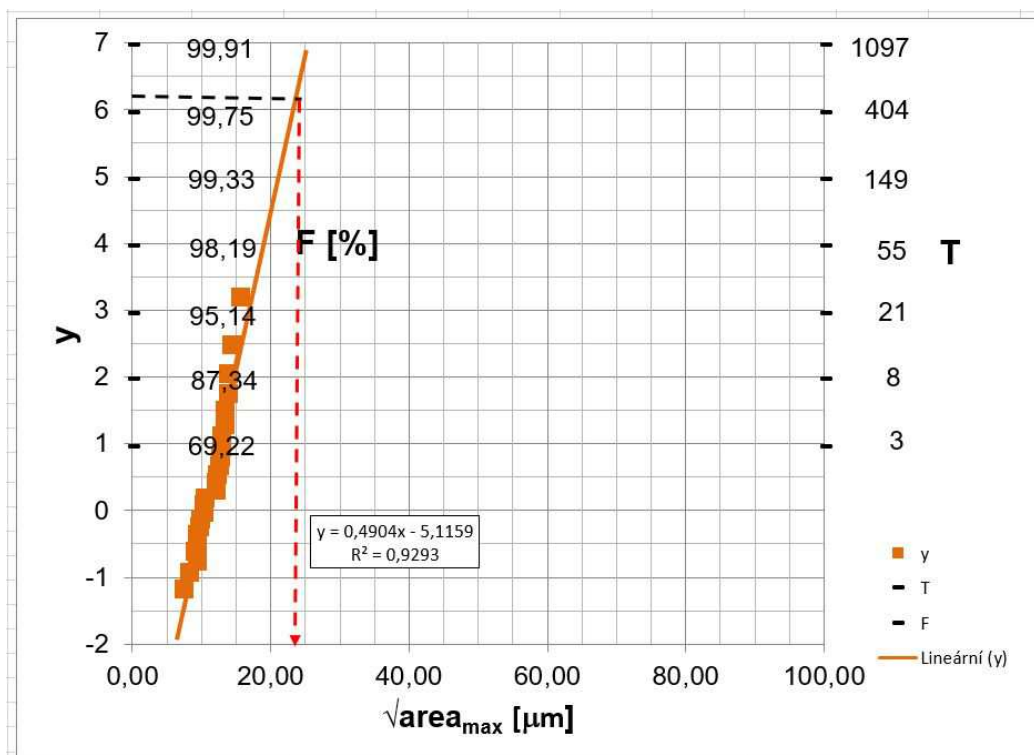
Obr. 4.3

Závislost y_j na $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu K13589



Obr. 4.4

Závislost y_j na $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tabvu Y10514



Obr. 4.5

Závislost y_j na $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max},j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T671, tabvu 369104

4.2.2 Vyhodnocení podle normy ASTM E2283-08

Při hodnocení bylo postupováno v souladu s normou ASTM E2283-08. Jak již bylo uvedeno výše, bylo pro každou tavbu změřeno 24 hodnot největších vměstků $L_{\max,j}$ nacházejících se na sledovaném řezu rozměry. Norma stanoví měřenou plochu na jeden řez 150 mm^2 . V této práci byly pro každý řez proměřeny plochy zhruba 2x až 3x větší (viz tab. 4.6). Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 4.4. Výsledky byly poté zpracovány v excelovské tabulce postupem podobným jako v části týkající se metody podle Murakamiho. Rozdíl je v tom že se nehodnotí parametr $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ (tedy v podstatě odmocnina z plochy vměstku), ale lineární rozměr L_{\max} . Pro stanovené hodnoty se vypočte průměrná hodnota \underline{L} a příslušná střední kvadratická odchylka L_{dev} . V této normě se hodnotí jen výskyt na ploše, není tedy žádný postup přepočtu na objem. Zatímco v metodice podle Murakamiho závisí volba zájmové plochy S resp. zájmového objemu V na rozhodnutí operátora, norma striktně předepisuje tzv. referenční plochu A_{ref} jako tisícinásobek kontrolní plochy A_0 . Tím je tedy určeno, že zpětná perioda $T = 1000$ a pravděpodobnost $F = 99,99 \%$ (příslušná hodnota $y = 6,91$).

Pro výpočet nejpravděpodobnější maximální hodnoty na ploše zájmu nabízí norma tři alternativní postup:

a) nejjednodušší ale nejméně přesný je přístup, jaký byl použit v případě Murakamiho metody. Závislostí $y_j = y_j(L_{\max,j})$ se proloží přímkou a z parametrů regresní funkce se vypočtou parametry δ a λ „inverzní“ regresní funkce

$$L_{\max,j} = \delta y_j + \lambda \quad (4.1).$$

Pro zvolenou hodnotu j (v normě je pevně stanoveno $y = 6,91$) se vypočte maximální velikost vměstku L_{\max} .

b) druhý možný postup v normě nazývaný „method of moments“ (mom) jsou parametry regresní rovnice δ a λ stanoveny ze vzorců:

$$\delta = (L_{\text{dev}} * \sqrt{6}) / P \quad (4.2),$$

$$\lambda = \underline{L} - 0,5772 * \delta \quad (4.3).$$

Maximální hodnota velikosti vměstku se pak spočte vzorcem (4.1).

c) třetím, nejpracnějším ale zároveň podle normy nejpřesnějším, způsobem je tzv. „Maximum like hood method“ (ML). Protože distribuce extrémních hodnot je založena na dvojnásobně exponenciální funkci, je maximalizační proces udělat nejsnadněji logaritmováním distribuční funkce. Parametry δ a λ výpočetní rovnice (4.1) se vypočtou maximalizací funkce:

$$LL = \sum_{j=0}^n \left(\ln \left(\frac{1}{\delta} \right) - \left(- \frac{\lambda - L_j}{\delta} \right) - \exp \left(\frac{\lambda - L_j}{\delta} \right) \right) \quad (4.4).$$

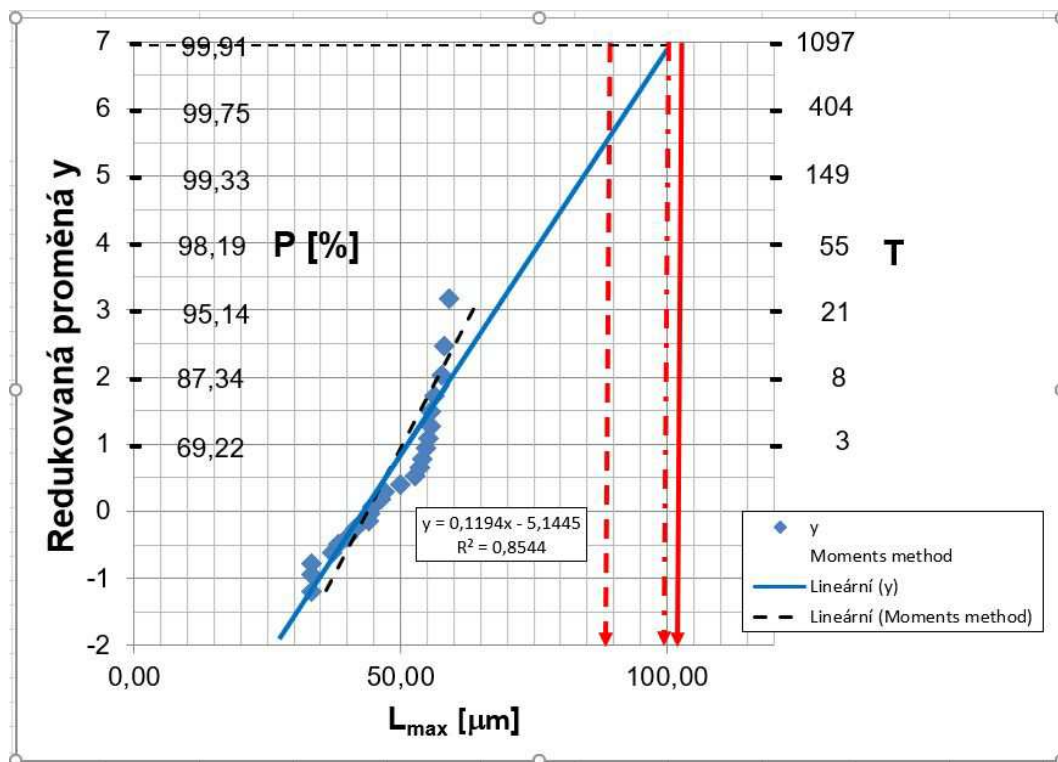
Tuto maximalizaci je potřeba provést vhodným výpočetním nástrojem. V této práci byl použit doplněk Řešitel, který je součástí tabulkového kalkulátoru Excel. Maximální hodnota velikosti vměstku se pak spočte vzorcem (4.1).

Výsledky výpočtů maximálních velikostí vměstků všemi třemi způsoby jsou shrnuty v tab. 4.6. V ní jsou uvedeny i příslušné vstupní údaje. Grafy závislostí $y_j = y_j(L_{\max,j})$ pro všechny tavby jsou uvedeny na obr. 4.6 až 4.9. Polohy všech vypočtených hodnot maximálních vměstků jsou v nich vyznačeny – pro metodu a) „lineární regrese“ formou plně

šipky, pro metodu b) „mom“ čárkovanou šipkou a pro metodu „ML“ čerchovanou šipkou. Listy programu Excel s příslušnými hodnotami a výpočty jsou v přílohách 9 až 12.

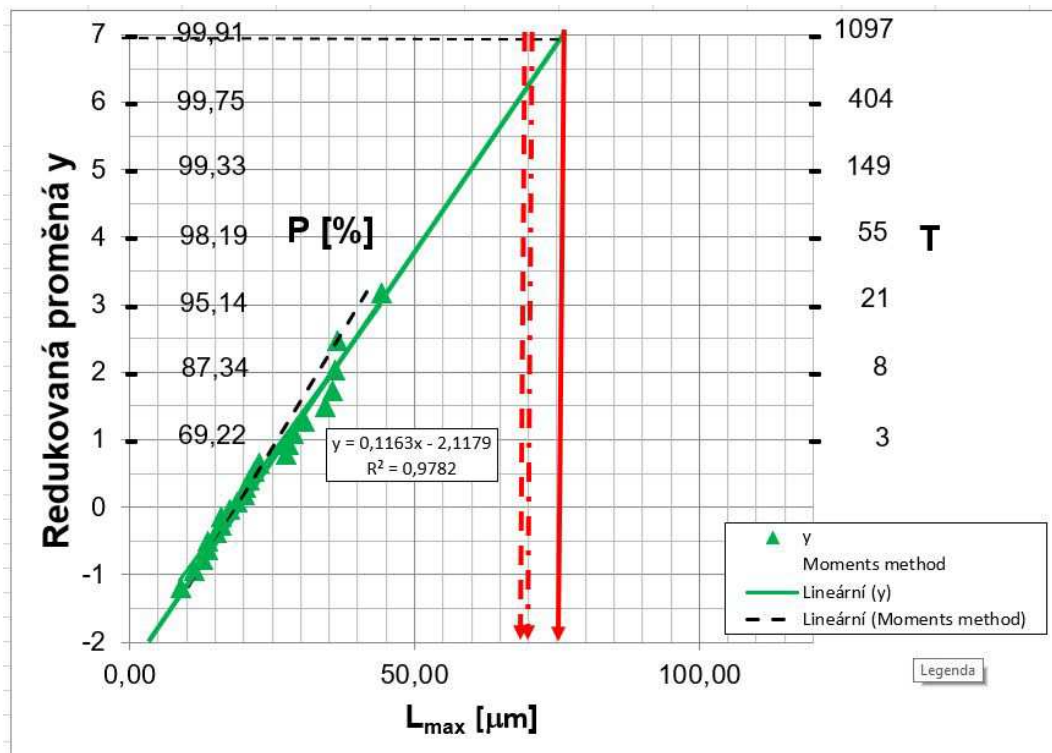
	Materiál	T552			T671
	Tavba	T95803	K13589	Y10514	369104
	Plocha zorného pole A_f [mm ²]	1.15	1.15	1.15	1.15
	Počet polí na řez N_f	446	325	347	248
	Celková plocha na řez A_0 [mm ²]	513	374	399	285
	Počet vzorků N_s	6	6	6	6
	Počet rovin N_p	4	4	4	4
	Celkový počet vzorků	24	24	24	24
	A_{ref} [mm ²]	512500	374000	399000	285000
Lineární regrese	Zpětná perioda T	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
	Příslušná hodnota y	6.91	6.91	6.91	6.91
	L_{max} [μm]	105.0	77.6	85.5	31.7
Moments method	Zpětná perioda T	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
	Příslušná hodnota y	6.91	6.91	6.91	6.91
	L_{max} [μm]	89.0	68.4	75.2	28.6
Like hood method	Zpětná perioda T	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
	Příslušná hodnota y	6.91	6.91	6.91	6.91
	L_{max} [μm]	100.0	69.6	73.4	31.1

Tab. 4.6
Vstupní a výstupní hodnoty výpočtů hodnot velikostí maximálních vměstků L_{max}



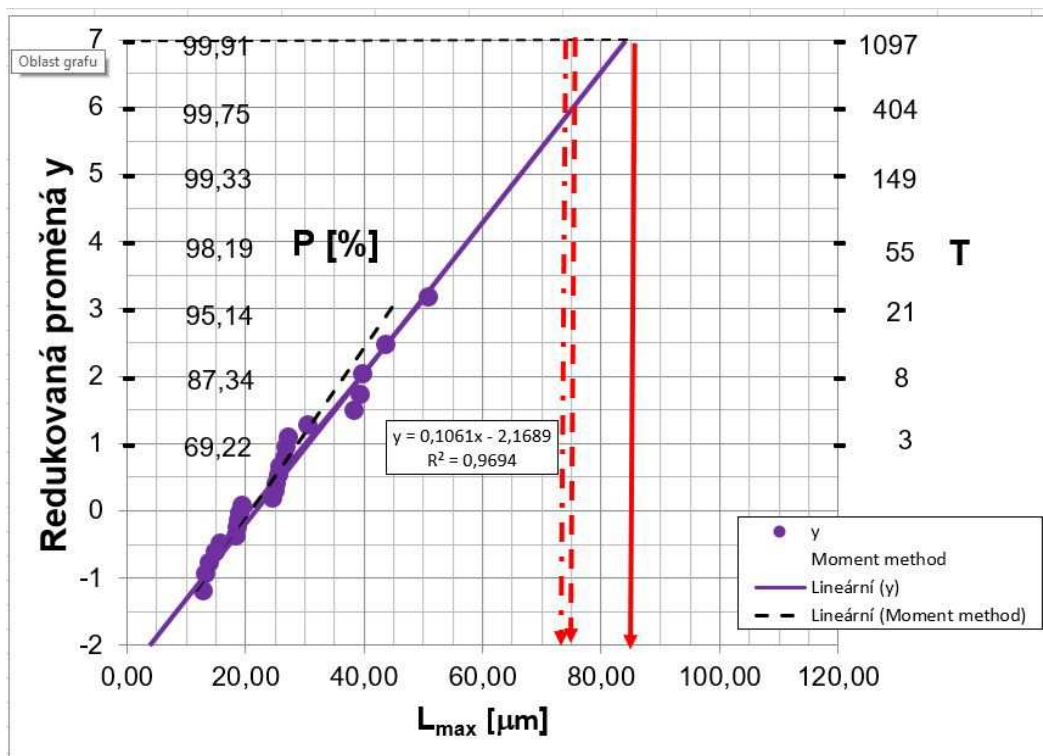
Obr. 4.6

Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu T95803



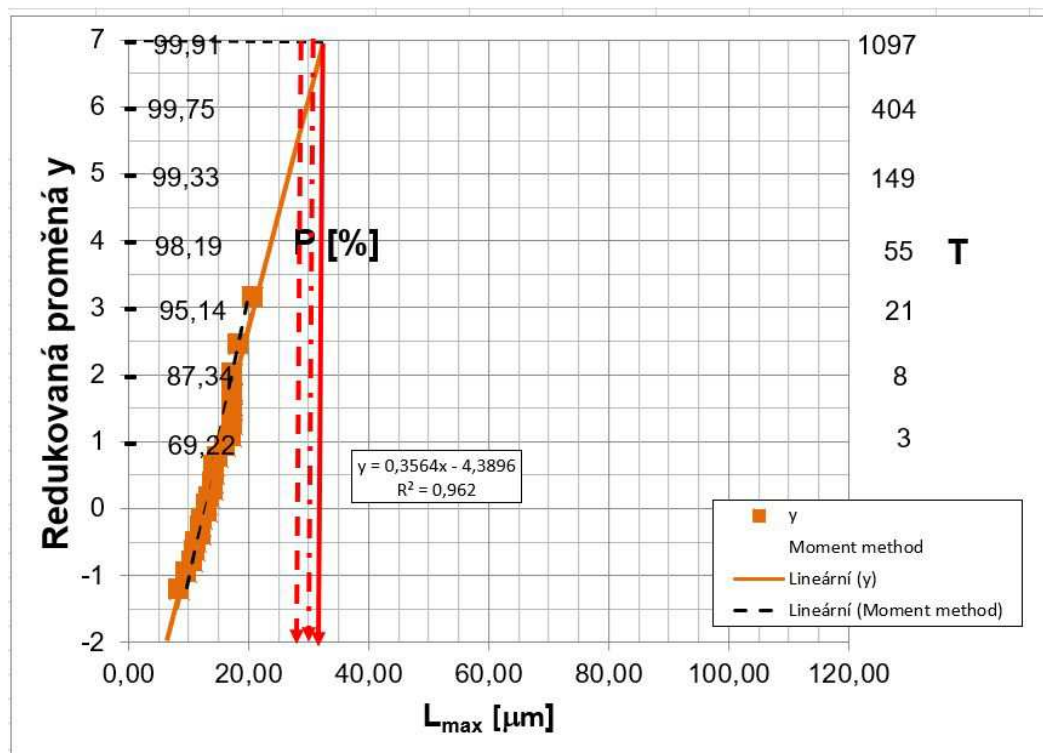
Obr. 4.7

Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T552, tavbu K13589



Obr. 4.8

Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T552, tavbu Y10514



Obr. 4.9

Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T671, tavbu 369104

4.3 Výsledky únavových zkoušek

Pro srovnání hodnocení únavových vlastností materiálu na základě odhadů ze stanovování vměstků byly použity výsledky získané při reálných únavových zkouškách na obou testovaných ocelích provedených na vzduchu [21]. Dále byly provedeny únavové zkoušky i v prostředí v parního kondenzátu s koncentrací 35 ppm NaCl o teplotě 80 °C, které by mělo simulovat podmínky v NT části turbíny za korozně nepříznivého stavu, a v prostředí 3% vodního roztoku NaCl. Výsledky těchto testů však nebyly v této práci využity.

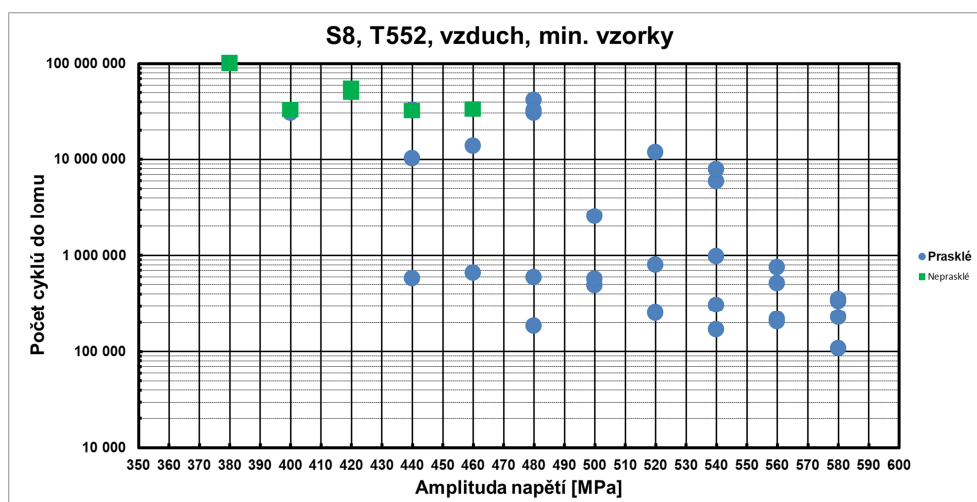
Iniciace únavových trhlin může probíhat třemi způsoby:

- Povrchová iniciace – únavové trhliny na vzorcích iniciují „standardním“ mechanismem v „náhodném“ místě na povrchu vzorku. Těmito místy mohou být místa geometrických, technologických, strukturních vrubů, defektů atd. ovlivňujících povrch.
- Iniciace z korozních důlků.
- Podpovrchová iniciace z vměstků.

K povrchové resp. podpovrchové iniciaci trhliny dochází, pokud jsou významně eliminovány povrchové defekty. K iniciátorům vzniku trhliny pod povrchem patří heterogenity v základní matici oceli, kterými jsou nejčastěji nekovové vměstky, hrubší primární karbidy (v oceli T671 se běžně vyskytují primární karbidy NbC a jejich řádky) a případně další defekty, které vznikly v průběhu výroby a zpracování konkrétního dílu. Obecně lze říci, že k podpovrchovým iniciacím trhlin dochází častěji na nižších hladinách amplitud napětí. K více náchylným materiálům na tato porušení jsou ocelis vyšší pevností, v daném případě je to ocel T552 ve srovnání s ocelí T671.

4.3.1 Výsledky únavových zkoušek pro ocel T 552

K výrobě zkušebních tyčí byla použita tavba 95803. Únavové zkoušky byly provedeny při statickém napětí 300 MPa, dynamická složka se pohybovala od 350 do 470 MPa, frekvence zatěžování od 66 do 111 Hz. Únavové zkoušky byly provedeny při pokojové teplotě (21 ± 2) °C. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v grafu na obr. 4.10. Mez únavy byla stanovena 380 MPa.



Obr. 4.10
Výsledky únavových zkoušek ocel T552, vzduch, PT

Charakter lomových ploch zkušebních těles vykazoval odlišný vzhled, který byl zapříčiněn zejména místem iniciace trhliny. Místo iniciace bylo dominantně vyvoláno přítomností komplexních vměstků (oxidů hliníku a vápníku případně komplexních oxisulfidů). Ty byly celkem rovnoměrně rozptýleny v celém objemu materiálu resp. na lomových plochách na celé ploše a působily v daném zkušebním tělese jako nejkritičtější iniciátor napětí. Ohnisko šíření únavové trhliny bylo mnohdy i pod povrchem zkušebního tělesa. Na vyšších hladinách amplitudy napětí docházelo především k povrchové iniciaci trhliny, na nižších pak k podpovrchové iniciaci. Poloha ohniska šíření únavové trhliny měla zásadní vliv nejen polohu a rozsah trhliny, ale i na výsledek zkoušky. Trhliny se šířily i z vměstků, které ležely až v hloubce 2 mm pod povrchem. Iniciace únavové trhliny pod povrchem měla za následek zvýšený počet nakmitaných cyklů, který přesáhl hodnotu 10^6 cyklů. Okolo vměstků jsou často pozorována tzv. „rybí oka“. Pokud vměstky ležely hluboko pod povrchem, tvar únavových trhlin je kruhovitý. Pokud ležely na povrchu, nebo těsně pod ním, čelo trhliny postupuje v zaoblené frontě, jejíž vyklenutí v radiálním směru není tak výrazné, jako v případě čistě povrchové iniciace. Plošky u stěn zkušební tyče jsou sešikmené a mají drsnější reliéf, takže na lomové ploše je patrná kruhovitá struktura ve směru zhruba kolmém na podélnou osu zkušební tyče.

Charakter porušování zkušebních těles na horní a dolní hladině dynamického zatěžování daného vzorku se v zásadě nelišil. Únavové trhliny se prakticky výhradně šířily transkrystalicky a odrážely charakter mikrostruktury. Fasety interkrystalické štěpení se vyskytovaly zcela ojediněle a izolovaně, a to jen v těsné blízkosti ohniska v případě povrchové iniciace, nebo pokud vměstek v ohnisku ležel na povrchu. Lomové plochy se tvořily kombinací transkrystalického pseudoštěpení a tvárného pásování s přítomností tvárných únavových striací. Tvárný charakter porušování se začal výrazněji uplatňovat ve vzdálenostech asi 0,5 mm od ohniska. Výrazný nárůst velikosti roztečí striačních linií byl pozorována těsně před hranicí dolomení (asi 0,5 mm).

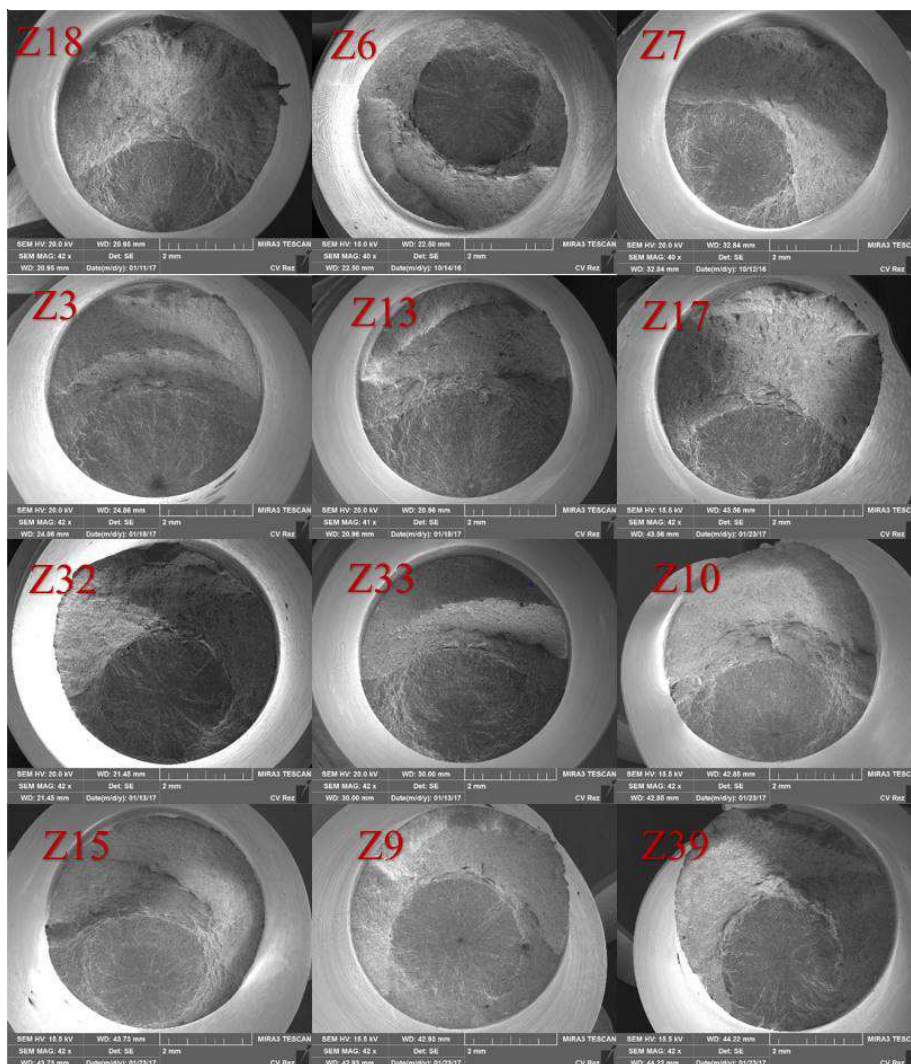
Iniciace z povrchových i podpovrchových vměstků byly hojně nalézány v případě zkoušek na vzduchu, a to pro velké i pro (později rovněž zkoušené) miniaturní vzorky). I v prostředí 35 ppm NaCl byly zjištěny u velkých i miniaturních vzorků iniciace z povrchových vměstků. Mechanismus podpovrchové iniciace trhliny se ovšem nejvíce projevil u zkoušek vysokocyklové únavy u oceli T552 při zkouškách za pokojové teploty na vzduchu. K podpovrchové iniciaci docházelo zejména na nízkých hladinách amplitudy napětí pod asi 500 MPa. Efekt podpovrchové iniciace měl často za následek zvýšení únavové pevnosti materiálu, neboť rychlost šíření trhliny byla pomalejší oproti iniciaci z povrchu. Trhlina se nejčastěji iniciovala na rozhraní vměstek - matrice jak z povrchu, tak pod povrchem zkušebního tělesa. Vměstky, na nichž docházelo k iniciacím, byly endogenního původu a byly tvořeny oxidy hliníku, vápníku a sulfidy manganu. Tvar dominantních vměstků byl převážně globulární a jejich velikost byla od 30 μm do 50 μm , v extrémním případě 80 μm .

V tab 4.7 jsou shrnuty parametry vměstků (velikost a poloha pod povrchem), ze kterých došlo k iniciaci trhlin. Z uvedených parametrů vyplývá, že průměrná velikost defektu, ze kterého se iniciovala trhlina pod povrchem činí $(43 \pm 13) \mu\text{m}$. Výjimku tvořily vzorky Z17 a Z18, u kterých nebyla nalezena žádná heterogenita ve formě vměstků, ale pouze rovinná ploška s jemným žebrováním uprostřed tmavé oblasti ODA (Optically Dark Area). Tyto dva vzorky praskly na nejvyšší hladině amplitudy napětí z uvedených vzorků. Největší průměr vměstku 80 μm ve vzdálenosti 0,26 mm od povrchu byl pozorován u vzorku Z13. Nejmenší průměr vměstku 30 μm byl dokumentován u vzorku Z7 na hladině 480 MPa. Průměrná

vzdálenost ohniska od povrchu byla $1,1 \pm 0,6$ mm, přičemž minimální činila 0,26 mm a maximální 1,96 mm. Ze snímků lomových ploch zkušebních těles Z6, Z7, Z9 a Z10, které byly zatěžovány na stejné amplitudě 480 MPa, nelze spolehlivě vyvodit společné znaky, jelikož jediný znak, které tyto vzorky spojuje je podpovrchová iniciace. Rozptyl hodnotících parametrů (vzdálenost a velikost) je do značné míry shodný s rozptylem únavové životnosti na této hladině zatěžování. Z pozorování jednotlivých lomových ploch lze říci, že největší vliv na vznik podpovrchové trhliny má poloha dominantního defektu, který se nachází v místě s vysokými hodnotami napětí. Přehled lomových ploch je dokumentován na obr. 4.11.

	Z17	Z18	Z39	Z6	Z7	Z9	Z10	Z3	Z13	Z15	Z32	Z33
Amplituda [$\text{Pa} \cdot 10^5$]	54	54	52	48	48	48	48	46	44	44	42	40
Počet cyklů do lomu v [mil]	6,E+00	8,E+00	1,E+01	2,E-01	4,E+01	3,E+01	3,E+01	1,E+01	1,E+01	3,E+01	5,E+01	3,E+01
Vzdálenost ohniska od povrchu [mm]	0,27	0,28	1,59	1,88	1,05	1,96	0,62	0,28	0,26	0,96	1,47	0,83
Průměr iniciátoru trhliny [μm]	-	-	33	40	30	43	44	44	80	38	36	46

Tab. 4.7
Poloha a tvar vměstků, z nichž byly iniciovány trhliny

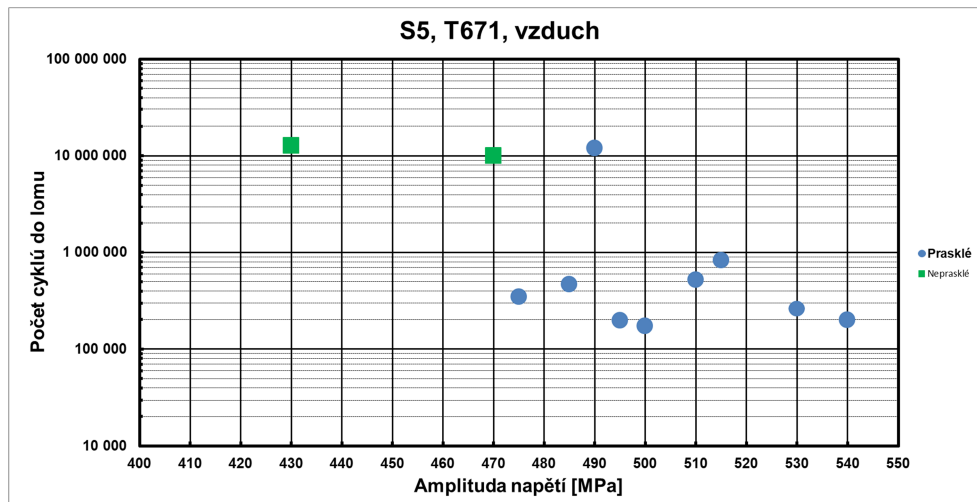


Obr. 4.11
Lomové plochy s podpovrchovou iniciací; ocel T552, zkouška na vzduchu

Aktivní objem vzorku, ve kterém může dojít k iniciaci únavové trhliny pro použitý typ vzorku je 2562 mm^3 . Plocha povrchu vzorku odpovídající tomuto objemu je 1321 mm^2 . Tyto hodnoty jsou závislé na tvaru a rozměrech zkušební tyče a na způsobu namáhání.

4.3.2 Výsledky únavových zkoušek pro ocel T 671

Únavové zkoušky byly provedeny při statickém napětí 300 MPa, dynamická složka se měnila od 430 do 530 MPa, frekvence zatěžování byla 74 Hz. Zkoušky probíhaly na vzduchu za pokojové teploty $21 \pm 2^\circ\text{C}$. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v grafu na obr. 4.12. Mez únavy byla stanovena 445 MPa.

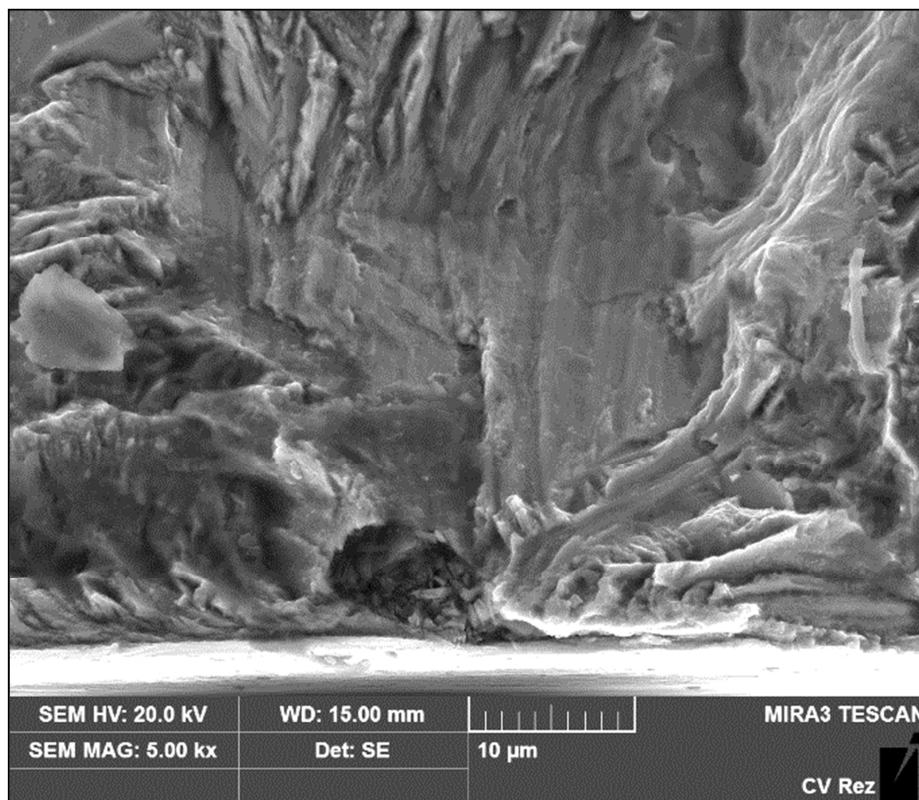


Obr. 4.12 Výsledky únavových zkoušek ocel T671, vzduch, PT

Výsledky počtů cyklů do lomu ukazují velký rozptyl hodnot počtu cyklů do lomu. Tyto rozdíly byly způsobeny jednak přítomností vměstků v materiálu, jednak mohly být ovlivněny i jakostí povrchu zkušební části vzorku.

Trhliny rostly v plochách zhruba kolmých na podélnou osu zkušební tyče. Iniciace trhlin probíhala většinou na vměstku protínajícím povrch zkušební tyče; iniciaci trhliny mohl někdy ovlivnit i výskyt hrubší částice karbidu niobu. Tvar trhliny měl většinou kruhový obrys - trhlina se šířila podél kruhového obvodu vzorku až do hloubky asi 1 mm, pak k šíření docházelo ponejvíce v radiálním směru. Reliéf lomové plochy je většinou rovinný až k místu přechodu trhliny do zrychlené fáze šíření. Ten tvoří pás většinou o šířce asi 1 mm a jeho povrch je členitější. Charakter porušování zkušebních těles na horní a dolní hladině dynamického zatěžování zkušební tyče se mírně lišil. Obecně platí, že v místě za ohniskem se trhlina šířila transkrystalicky i interkrystalicky (v poměru asi 5:1), ve vzdálenosti větší než 0,5 mm od ohniska se trhlina šířila především transkrystalicky. V oblastech u ohniska je transkrystalické šíření tvořeno pseudoštěpným porušením s vějířovitě uspořádanými stupni. Ve větších vzdálenostech od ohniska se zvyšuje výskyt porušení tvárného charakteru. To je tvořeno zpočátku hrubými bloky s tangenciálním rýhováním, postupně přibývá výskyt jemnějších striačních linií o rozteči asi $0,1 \mu\text{m}$. S rostoucí hloubkou trhliny hrubnou striační linie a zvětšuje se jejich rozteč. K výrazné změně velikosti rozteče striačních linií dochází těsně před hranicí dolomení. V závěrečné fázi stabilního růstu přechází šíření trhliny na mikromechanismus únavové tvárné separace s náznaky jamek na lomové ploše. U vzorků byly patrné rozdíly ve velikosti plochy dolomení.

Iniciace na povrchových vměstcích byla zjištěna u oceli T671 při zkouškách na vzduchu (příklad je na obr. 4.12) i v prostředí 35 ppm NaCl. V tomto případě je jejich vliv spíše zprostředkující, neboť vměstky slouží jako iniciátory rozvoje korozních důlků. K tomu dochází asi i v případě prostředí 22 % NaCl. Vměstky jsou však zřejmě během tvorby důlku zcela destruovány. U žádného vzorku nebyly zbytky zjištěny.



Obr. 4.13
Iniciace trhliny na povrchovém vměstku; ocel T671, zkouška na vzduchu

Aktivní objem vzorku, ve kterém může dojít k iniciaci únavové trhliny pro použitý typ vzorku je 1741mm^3 . Plocha povrchu vzorku odpovídající tomuto objemu je 803mm^2 .

4.4 Odhad spodní meze únavy

Pro vysokopevné ocele byly publikovány fenomenologické vztahy pro závislost meze únavy na parametrech vměstků resp. jejich odhadnutých maximálních parametrů typu $\sqrt{\text{AREA}_{\text{max}}}$. Parametry materiálu resp. jeho stavu jsou reprezentovány Vickersovou tvrdostí HV. V kapitole 2 byl uveden vzorec (2.1) pro nejhorší možnost výskytu vměstku na povrchu:

$$\sigma_w = 1,43 \cdot (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \quad (2.1).$$

Ten ovšem platí pro souměrné namáhání, při němž je koeficient asymetrie cyklu $R = -1$. Obecně pro jinou hodnotu R je možné použít vzorec

$$\sigma_w = 1,43 \cdot (HV + 120) / (\sqrt{\text{area}})^{1/6} \cdot ((1-R)/2)^\alpha \quad (4.5),$$

kde $\alpha = 0,226 \cdot HV \cdot 10^{-4}$ (kde $\sqrt{\text{area}}$ je v μm).

V této práci byly využity výsledky zkoušek únavy (viz část 4.3) pro ocele Böhler T552 a T671 (vždy u jedné tavby z hodnocených v této práci). Tyto zkoušky byly prováděny ovšem dělány při pulsujícím zatěžování tah-tlak na různých tvarech vzorků. Pro jednotlivé vzorky není tedy zatěžování děláno při konstantním R. Pro potřeby výpočtu byla uvažována hodnota R pro zatěžování na mezi únavy. Pro hodnocení byl použit jak vzorec (2.1), dále označeno jako vztah (A), tak vzorec (4.5), dále označeno jako vztah (B). Pro výpočet byly použita jednak maximální hodnota parametru ($\sqrt{\text{area}}$) stanovená Murakamiho postupem pro objem zájmu V reprezentující jeden vzorek, jednak maximální hodnota parametru $\sqrt{\text{area}}$ pro celkový počet únavových zkoušek. Těch bylo 40 pro ocel Böhler T552 a 12 pro ocel Böhler T671. V tomto případě je zpětná perioda T pro jeden vzorek vynásobena počtem vzorků při únavové zkoušce, a pro tuto hodnotu je vypočten parametr $\sqrt{\text{area}}$. Pro výpočet byla použita i hodnota maximální velikosti vměstku L_{max} určená podle normy ASTM E2283-08. Tato hodnota byla však korigována tak, jako by vměstek s maximální hodnotou L_{max} byl globulitický a z jeho kruhového řezu o průměru L_{max} byl vypočítán parametr $\sqrt{\text{area}}$. Korigovaná hodnota byla proto uvažována podle vzorce:

$$L_{\text{max,kor}} = L_{\text{max}} \cdot (\sqrt{\pi}/2) \quad (4.6).$$

Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tab. 4.8.

Materiál	Tavba	Počet použitých vzorků		Tvrdost HV	Předpětí σ_m [MPa]	Rozsah napětí [MPa]	Amplituda napětí pro mez únavy σ_a [MPa]	Součinitel asymetrie cyklu R pro mez únavy	Stanovená mez únavy [MPa]	Parametr alfa	$\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ [μm]	σ_w vztah (A)	σ_w vztah (B)	Postup
T552	T95803	40	1	314										
			2	304										
			3	306										
		K výpočtu	Průměr	308	300	350 - 470	80	0.6	380	0.00696	71.7	300	297	
		40		308	300	350 - 470	80	0.6	380	0.00696	98.8	285	282	Murakami
				308	300	351 - 470	80	0.6	380	0.00696	88.6	290	287	Noma
T671	369104	12	1	373										
			2	370										
			3	376										
		K výpočtu	Průměr	373	300	430 - 530	145	0.3	445	0.00843	23.2	417	413	
		12		373	300	431 - 530	145	0.3	445	0.00843	28.3	404	400	Murakami
				373	300	431 - 530	145	0.3	445	0.00843	27.6	406	402	Noma

Tab. 4.8
Výpočet dolních hranic meze únavy z hodnot maximálních velikostí únavy

5. Diskuse

5.1 Hodnocení mikročistoty podle standardních norem

Mikročistota byla vyhodnocována pro tři tavby materiálu Böhler T552 (T95803, K13589, Y10514) a jednu tavbu materiálu Böhler T552 (360104).

5.1.1 Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 metodou K0

Při srovnání výsledků získaných podle normy DIN 50602 metodou K0 (globulární vměstky od velikosti 9 μm) bylo pro ocel T552 zjištěno, že tavba T95803 obsahovala nejvíce vměstků největší velikosti (až 59 μm) a celková sumární charakteristická hodnota K0 byla spočítána na 14. Vysoká hodnota je zapříčiněna jednak velkým množstvím globulárních oxidických vměstků v kategorii K0, dále pak obsahem těchto vměstků s indexem 4 a vyšším, které se vyskytovaly na každém vzorku v této tavbě. U tavby K13589 byla celková sumární charakteristická hodnota K0 stanovena na 9. Jednotlivé vzorky této tavby se počtem a velikostním rozložením globulárních oxidických i hlinitanových vměstků, značně lišily. Tavba Y10514 se ukázala jako tavba s nejmenším výskytem nekovových vměstků a celková sumární charakteristická hodnota K0 vyšla 8. I v této tavbě bylo rozložení globulárních oxidických vměstků na jednotlivých vzorcích v sérii nerovnoměrné, jak velikostně, tak početně. Při porovnání všech tří taveb ocele Böhler T552 vychází tavba Y10514 jako nejméně znečištěná nekovovými vměstky, s nejnižším $K0 = 8$, po ní následuje tavba K13589 s výsledkem $K0 = 9$; jako nejvíce znečištěná se podle metody K0 jeví tavba T95803 s $K0 = 14$. U tavby 360104 ocele Böhler T671 byla celková sumární charakteristická hodnota K0 stanovena 2. Globulárních oxidických vměstků bylo na jednotlivých vzorcích v sérii velmi málo a zastoupeny byly vměstky velikostně do kategorie s indexem 2 (tj. do velikosti 27 μm). V této tavbě se nevyskytoval žádný vměstek hlinitanového typu.

Podle výše uvedených výsledků je zřejmé, že v oceli Böhler T671 je daleko menší výskyt globulárních oxidických vměstků, než v jakékoliv ze tří taveb ocele Böhler T552. Tentýž závěr platí pro obsah hlinitanových vměstků, které se na vzorcích ocele Böhler T671 nevyskytovaly vůbec.

5.1.2 Hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 metodou K4

Při vyhodnocení mikročistoty ocele Böhler T552 s použitím metody K4 byla celková sumární charakteristická hodnota K4 u vzorků tavby T95803 stanovena na hodnotu 3. Zásadní pro tuto hodnotu byly globulární oxidické vměstky s indexem 4 (38 až 53 μm), a 5 (53 až 76 μm), které se vyskytovaly na všech vzorcích této tavby. Vměstky hlinitanového typu se zde nevyskytovaly. U tavby K13589 nebyly nalezeny žádné vměstky, které by velikostně spadaly do kategorie K4 a výše, celková sumární charakteristická hodnota K4 je tudíž 0. U tavby Y10514 bylo $K4=1$, protože byly nalezeny dva vměstky s délkou nad 38 μm. Je patrné, že posunutím velikostí zahrnutí se výsledky mohou lišit. Na vzorcích tavby Y10514 se vyskytovalo více globulárních oxidických vměstků větší velikosti, spadající do hodnocení podle metody K4, u tavby K13589 se tyto vměstky nevyskytovaly a proto je výsledek u těchto dvou taveb opačný, než při hodnocení K0. Analýzou vzorků tavby 360104 ocele Böhler T671 bylo zjištěno, že se v této tavbě nevyskytují žádné vměstky, které by metoda K4 zahrnovala do hodnocení, výsledek celkové sumární charakteristické hodnoty je v tomto případě 0.

Posunutím indexu zahrnutí velikosti vměstků z K0 na K4 je tavba K13589 ocele Böhler T552 z hlediska hodnocení mikročistoty srovnatelná s ocelí Böhler T671. U obou zmíněných taveb byla stanovena celková sumární charakteristická hodnota $K4 = 0$. Tavba Y10514 ocele

Böhler T552 vykazuje hodnotu $K4 = 1$. Tavba T95803 ocele Böhler T552 zůstává nejvíce znečištěna nekovovými vměstky s nejvyšším $K4 = 3$. Celkové hodnoty $K4$ jednotlivých taveb nejsou tak rozdílné, jako v případě hodnocení $K0$. Z toho je patrné, že všechny tavby obsahují více globulárních oxidických vměstků menších velikostí a jen velmi málo vměstků velikosti nad $38 \mu\text{m}$. Hlinitanové vměstky se vyskytly ojedinelé na dvou vzorcích tavby K13589, na jednom vzorku tavby T95803 a na jednom vzorku u tavby Y10514. Podle normy DIN 50602 se tento typ sčítá s globulárními oxidickými vměstky, se kterými tvoří jednu celkovou sumární charakteristiku. Vzhledem k ojedinelému výskytu nemají v tomto případě zásadní vliv na výslednou hodnotu $K0$ ani $K4$.

5.1.3 Hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E45 metodou A

Metodou A-nejhoršího pole na zkoumaném vzorku, bylo zjištěno, že tavba T95803 vykazuje nejhorší pole globulárních oxidických vměstků jak v jemných (1,5), tak v hrubých typech (0,8). Velikost D_{max} , tedy vměstku s nadměrnou tloušťkou, je také ze všech tří taveb nejvyšší (0,06). U taveb Y10514 a K13589 nelze jednoznačně říci, která z nich obsahuje horší pole, podle metody A. Tím, že jsou, podle použité normy ASTM E45, globulární vměstky rozděleny na jemný a hrubý typ a je zde souhrnné D_{max} pro vměstky překračující svojí tloušťkou hrubý typ vměstku, je potřeba porovnat tři výsledné hodnoty. Jemný typ globulárních vměstků v tavbě K13589 má výsledný index 1,3. Tavba Y10514 byla vyhodnocena indexem 1,2. V hrubých typech jsou však tavby v opačném pořadí- Y10514 má index jen 0,8, kdežto tavba K13589 byla vyhodnocena na index 0,6. V případě D_{max} vychází index pro tavbu K13589-0,03 a pro tavbu Y10514-0,04. Tavba Y10514 má vyšší index, než tavba K13589, ve dvou uvedených hodnotách. Všechny tři tavby obsahovaly i vměstky hlinitanového typu. Ocel Böhler T671 obsahovala jemné globulární oxidické vměstky odpovídající indexu 0,07, hrubé odpovídající indexu 0,06. I v tomto případě bylo nutno zahrnout do hodnocení vměstky větší tloušťky, než hrubé. Hodnota D_{max} byla stanovena na 0,02.

Série taveb T95803, K13589, Y10514 ocele Böhler T552 byly vyhodnoceny jako vzorky obsahující více nekovových globulárních oxidických a hlinitanových vměstků, než tavba 360104 ocele Böhler T671. Indexy jemných a hrubých globulárních oxidických vměstků byly u ocele Böhler T671 vyhodnoceny nižší, než stejné hodnoty taveb ocele Böhler T552, pouze v případě tavby K13589 byla hodnocena hrubých globulárních oxidických vměstků shodná s hodnotou u ocele Böhler T671-hodnotou indexu 0,6. V oblasti vyhodnocení D_{max} byla Böhler T671 vyhodnocena jako tavba s nejmenšími nekovovými globulárními oxidickými vměstky, tedy s nejmenší hodnotou D_{max} ze všech čtyř taveb.

5.1.4 Srovnání mikročistoty jednotlivých materiálů a taveb

Norma DIN50602-metoda $K0$ zaznamenává všechny vměstky od velikosti $9 \mu\text{m}$, $K4$ pak od velikosti $38 \mu\text{m}$. Jejich počet a rozložení jsou viditelné v prvotních záznamech provedené zkoušky. Výsledná celková charakteristická suma K ovšem zahrnuje globulární oxidické a oxidy hliníku (oxidické vměstky v rozloženém stavu).

U normy ASTM E45- metodou A jsou všechny typy vměstků posuzovány samostatně a výsledek měření je pak nejhorší pole pro každý typ vměstku zvlášť. Norma ovšem nadměrné globulární oxidické vměstky od velikosti $13 \mu\text{m}$ zahrnuje do kategorie D_{max} a tato oblast nebývá v požadavcích a v předpisech obvykle stanovena. Tak tomu bylo i v případě studovaných materiálů používaných pro výrobu lopatek.

Obě normy využívají jinou metodiku určování výsledného hodnocení a jejich výsledky nelze mezi sebou porovnávat z hodnotového hlediska, tj. celková charakteristická suma v normě DIN 50602 např. $K_0=1$ neodpovídá hodnotě indexu 1 v normě ASTM E45.

U metody ASTM E45 lze z hodnot D_{max} přímo vyčíst rozměry největších globulárních vměstků. V normě DIN50602 lze z prvotních záznamů vyčíst počet vměstků určitého rozpětí velikosti, dle zařazení v indexech.

V případě určení stupně čistoty jednotlivých taveb a jejich vzájemného srovnání, jsou tyto normy dostačující a lze říci, že oběma normami bylo dosaženo stejného výsledku: Tavba 360104 ocele Böhler T671 vykazovala nejnižší hodnoty ve všech měřeních, u metody K4 s celkovou charakteristikou hodnotou $K_4=0$ spolu s tavnou K13589 ocele Böhler T552, tudíž byla vyhodnocena jako ocel obsahující nejméně nekovových globulárních vměstků.

5.2 Hodnocení největších vměstků statistickými metodami extrémních hodnot

V této práci byl ústředním tématem odhad pravděpodobné metody největších vměstků v ocelích. Možnou metodou, kterou je možné využít, je statistika extrémních hodnot. Je to obecná metoda, kterou je možné hodnotit výskyt objektů s pravděpodobnými největšími hodnotami (např. plošnými nebo objemovými rozměry) v nějakém souboru dat, u kterých máme k dispozici znalosti pouze o jejich omezené části. Předpokladem je, že distribuce těchto objektů v celém souboru je dvojnásobně exponenciální.

Tato metoda je aplikovatelná i v materiálografii na měření rozličných strukturních útvarů jako jsou např. velikosti (objemy) pórů, velikosti karbidů, velikosti vměstků atd., tedy na strukturní parametry materiálu, které nás mohou zajímat z toho důvodu, že mohou mít zásadní vliv na jejich funkční vlastnosti. V práci byla použita tato metoda ve dvou variacích – v postupu použitým původně Murakami a pomocí normy ASTM E2283-08, která využívá stejného principu i když s jistými odlišnostmi ve vyhodnocení. Oběma metodami byly vyhodnoceny celkem čtyři tavby ocelí (tři z oceli Böhler T552 a Böhler T552), které se používají na výrobu lopatek NT dílů parních turbín a u kterých může mít přítomnost vměstků významný vliv na odolnost proti únavovému porušení.

5.2.1 Hodnocení největších vměstků Murakamiho metodou

Metodou podle Murakamiho byly získány čtyři datové soubory výskytu největších vměstků na pozorovacích plochách, které jsou jako závislosti redukované proměnné y na parametru $\sqrt{\text{area}}$ jednotlivých vměstků dokumentovány na obr. 4.2 až 4.5. Z nich je patrné, že závislosti lze ve všech případech velmi dobře proložit přímkou, že tedy splňují podmínku dvojitě exponenciální distribuce. Z grafů je zároveň vidět, že existují mezi jednotlivými tavnami výrazné rozdíly ve velikostním rozložení vměstků. Z tohoto hlediska je nejhorší tavba T95803 (ocel Böhler T552). Lepšími a zhruba na stejné velikosti jsou obě další tavby z této oceli K13589 a Y10514. Z hlediska obsahu vměstků se jako nejlepší ze všech zkoumaných taveb jednoznačně jeví tavba 369104 (ocel Böhler T671). Tedy již jen toto zpracování nám umožňuje kvantitativní posouzení jednotlivých materiálů z hlediska mikročistoty.

Samotné hodnocení pravděpodobně největšího vměstku je možné provést nejen pro plošné měření, ale i pro „objemové“. V obou případech se však vychází z výsledků plošného měření. K objemovému měření se dostaneme tak, že za hodnocený objem vezmeme součin hodnocené plochy a průměrné velikosti („hloubky“) vměstku. Je samozřejmě otázkou, zda je vhodné brát právě průměr nebo jiný parametr (např. medián, největší rozměr, nejmenší

rozměr). V každém případě, pokud velikosti největších vměstků jsou malé, je menší, při stejné hodnocené ploše, i hodnocený objem. Pro stanovení největší pravděpodobné velikosti jsou klíčové dvě veličiny, a to hodnocená plocha/objem a plocha/objem zájmu (tedy plocha/objem na/ve které/m chceme největší vměstek stanovit. Jejich poměr určuje zpětnou periodu, pro jejíž hodnotu je maximální velikost vměstku ze závislosti redukované proměnné y na velikosti jednotlivých maximálních vměstků. Pokud chceme využít tento parametr pro hodnocení únavy, můžeme za plochu zájmu stanovit část plochy/objemu zkušební tyče pro zkoušku únavy. Tato plocha a objem je dán velikostí a tvarem zkušební tyče a způsobem zatěžování (pravděpodobnost iniciace únavové trhliny může být podle rozložení působícího napětí nerovnoměrná). Pokud provádíme zkoušku únavy na n zkušebních tyčích, je třeba tuto plochu/objem vynásobit n -krát. V dané práci byly spočteny plochy/objemy zájmu stanoveny (pro jednu zkušební tyč) podle skutečných tvarů použitých při únavových zkouškách obou ocelí. Při měření v této práci byly proměřeny pro každé měření relativně velké plochy (stovky mm^2), počet měření byl 24. To bylo dáno zejména tím, aby měření šla zároveň hodnotit způsobem podle normy ASTM E2283-08. V pracích publikovaných k Murakamiho metodě je většinou sledována podstatně menší plocha (typicky 1 mm^2), je však děláno více měření (40).

Oblasti zájmu jsou tak jen několiknásobkem proměřovaných hodnot. To vede k tomu, že zpětná perioda T je okolo 3 a výsledky parametru $\sqrt{\text{area}}$ maximálních vměstků stanovované pro plochu jsou relativně nízké - $40 \mu\text{m}$ pro nejhorší tavbu T95803 a $12 \mu\text{m}$ pro nejlepší tavbu 369104 (řádek 1 v tab. 5.1). Výsledky spočítané pro objemové měření vycházejí vesměs vyšší $71 \mu\text{m}$ pro nejhorší tavbu T95803 a $23 \mu\text{m}$ pro nejlepší tavbu 369104 (řádek 2 v tab. 5.1). Pokud vezmeme zpětnou periodu $T = 1000$, dostaneme (pro hodnocení podle plochy, které je prováděno podle normy ASTM E2283-08) dostaneme hodnoty pochopitelně vyšší - $87 \mu\text{m}$ pro nejhorší tavbu T95803 a $24 \mu\text{m}$ pro nejlepší tavbu 369104 (řádek 3 v tab. 5.1). Kompletní výsledky jsou přehledně shrnuty v tab. 5.1.

5.2.2 Hodnocení největších vměstků podle normy ASTM E2283-08

Při této metodě je definován počet měření (24), (minimální) plocha jednoho měření (150 mm^2) a zpětná perioda T (1000). Postup nabízí tři možnosti vyhodnocení největšího vměstku. Výsledky všech hodnocení jsou opět uvedeny v tab. 5.1; pro jednotlivé postupy (regresní přímka, mom a ML) postupně řádky 4, 6 a 8. Velikosti největších vměstků jsou v relaci s velikostní distribucí naměřených hodnot. V metodě hodnocení ML, která by podle normy měla být nejpřesnější, vychází velikosti pro jednotlivé tavby (řádek 8): T95803 – $100 \mu\text{m}$; K13589 – $70 \mu\text{m}$; Y10514 - $73 \mu\text{m}$ a 369104 - $31 \mu\text{m}$. Pro metodu regresní křivky (řádek 4) vycházejí hodnoty o 20 až 30 % vyšší. Pro metodu mom (řádek 6) pro tavbu T95803 je hodnota asi o 10 % vyšší, pro tavby K13589 a Y10514 hodnoty podobné a pro tavbu 369104 hodnota asi o 8 % nižší ve srovnání s hodnotami stanovenými pro metodu ML.

V řádcích 5, 7 a 9 jsou hodnoty z řádků 4, 6 a 8 přepočteny podle vztahu 4.6, aby byly srovnatelné s parametrem $\sqrt{\text{area}}$. Srovnáme-li tyto hodnoty s hodnotami na řádku 3, všechny hodnoty byly spočítány pro zpětnou periodu $T = 1000$, vidíme, že pro různé tavby si nejlépe odpovídají hodnoty z postupu mom a ML. U obou postupů je relativní odchylka asi 7 %. O něco větší rozdíl (7,5 %) je pro regresní metodu, která je stejná jako v Murakamiho postupu.

Postup podle normy předpokládá hodnocení za použití metod obrazové analýzy, Automatizace výběru plochy pomocí obrazové analýzy by měla, vedle usnadnění a urychlení procesu hodnocení velikosti vměstků, poskytovat přesné a jednoznačné údaje, což se v tomto případě, u některých zkoušených vzorků v jednotlivých tavnách, nepodařilo a měření bylo třeba doplňovat manuálním zpracováním.

		Materiál	T552			T671	Řádek
		Tavba	T95803	K13589	Y10514	369104	
Měření		Celková plocha na řez S_0 [mm ²]	513	374	399	285	
		Hloubka h [μm]	38.7	20.8	19.3	11.5	
		Sledovaný objem na řez V_0 [mm ³]	19,87	8,29	9,88	3,28	
Murakamiho metoda	Volba	S [mm ²]	1321	1321	1321	803	
		V [mm ³]	2562	2562	2562	1741	
	Výpočet pro plochu	Zpětná perioda T	2.6	3.3	3.5	2.8	
		Příslušná hodnota y	0.71	1.02	0.71	0.82	
		$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ [μm]	40.1	23.5	24.6	12.1	(1)
	Výpočet pro objem	Zpětná perioda T	129	308.9	259	530.6	
		Příslušná hodnota y	4.86	5.73	5.56	6.27	
		$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ [μm]	71.7	59.0	60.9	23.2	(2)
	Volba	S [mm ²]	513000	374000	399000	285000	
	Výpočet pro plochu	Zpětná perioda T	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	
		Příslušná hodnota y	6.91	6.91	6.91	6.91	
$\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ [μm]		87.4	66.7	70.0	24.2	(3)	
Norma E2283-08	Měření	Celková plocha na řez A_0 [mm ²]	513	374	399	285	
	Volba	A_{ref} [mm ²]	512500	374000	399000	285000	
		Zpětná perioda T	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	
		Příslušná hodnota y	6.91	6.91	6.91	6.91	
	Lineární regrese	L_{max} [μm]	105.0	77.6	85.5	31.7	(4)
		L_{max} [μm] přepočít	93.0	68.8	75.8	28.1	(5)
	Moments method	L_{max} [μm]	89.0	68.4	75.2	28.6	(6)
		L_{max} [μm] přepočít	78.9	60.6	66.6	25.3	(7)
	Like hood method	L_{max} [μm]	100.0	69.6	73.4	31.1	(8)
		L_{max} [μm] přepočít	88.6	61.6	65.0	27.6	(9)

Mikročistota		T552			T671
		T95803	K13589	Y10514	369104
	Norma DIN 50602 metoda K4	14	9	8	2
	Norma DIN 50602 metoda K0	3	0	1	0
	Norma ASTM E45 metoda A jemné D	1.5	1.3	1.2	0.7
	Norma ASTM E45 metoda A hrubé D	0.8	0.6	0.8	0.6
	Norma ASTM E45 metoda A D_{max}	0.06	0.03	0.04	0.02

Tab. 5.1
Srovnání hodnot velikostí maximálních vměstků různými postupy a hodnot mikročistoty

5.3 Srovnání klasických metod hodnocení mikročistoty s přístupy statistik extrémních hodnot

Hodnocení mikročistoty klasickými metodami má výhodu v tom, že se hodnotí odděleně vměstky různých typů a v různých velikostních třídách. To samozřejmě umožňuje získat komplexnější obraz o mikročistotě materiálu. V metodách statistik extrémních hodnot

získáváme pro hodnocení mikročistoty v zásadě pouze jediný parametr. Na druhou stranu je hodnocení klasické mikročistoty co se týká výstupu poměrně složité a pro jeho úplné vyhodnocení je potřeba příslušné normě dobře rozumět.

Všechna tři hodnocení (norma DIN 50602 metoda K4 a K0 a norma ASTM E45 metoda A vměstky typu D) poskytují v zásadě stejné výsledky jako všechny přístup statistik extrémních hodnot s tím, že poměrně blízké stavy taveb K13589 a Y10514 jsou hodnoceny „obráceně“ (viz tab. 5.1). Klasické hodnocení mikročistoty však poskytuje poměrně hrubé škálování výsledků. Z tohoto hlediska se nejlépe jeví postup podle normy DIN 50602 metoda K0 a pak podle normy ASTM E45 metoda A vměstky typu D, hodnocení D_{max} .

5.4 Odhady meze únavy z hodnot maximálních velikostí vměstků

Pro vysokopevné materiály ($HV > 500$) byla stanovena fenomenologické vzorce pro odhad dolní hladiny meze únavy daného materiálu na základě znalosti Vickersovy tvrdosti (jako parametru charakterizujícího vlastnosti zkoušené oceli) a parametru $\sqrt{area_{max}}$ (charakterizujícího (statisticky) největší vměstek v materiálu, který by inicioval únavovou trhlinu). Pro výpočet byl použit nejnevýhodnější případ, že vměstek, ze kterého se rozvine únavová trhlina, leží na povrchu. K dispozici byly výsledky únavových zkoušek vykonaných na dvou v práci hodnocených tavných obou ocelí. K výpočtu byly použity vzorce pro souměrné namáhání ($R = -1$) a namáhání pro obecnou hodnotu součinitele asymetrie cyklu R . Jako charakterizace vměstku byly použity parametry $\sqrt{area_{max}}$ a maximální rozměr vměstku L_{max} spočtené pro jeden vzorek nebo použitý počet vzorků při zkoušce únavy. Únavové zkoušky únavy však nebyly dělány s úmyslem testovat příslušné vztahy. Nebyly proto vykonány při konstantním R . Je proto problematické pro výpočet určit hodnotu R . Iniciace trhlín je ovšem ovlivněna nejen přítomností vměstků, ale i stavem povrchu. Čím je povrch kvalitnější, tím spíše dojde k iniciaci na vměstku. Vickersovy tvrdosti ocele Böhler T552 a Böhler T671 byly HV 308 resp. HV 373. U hodnocené ocele Böhler T552 docházelo k iniciaci trhlín na vměstcích o velikosti 30 μm až 80 μm , které ležely nejen na povrchu, ale i pod povrchem (tab. 4.7). Vzhledem k výraznému rozptylu hodnot počtů cyklů do lomu při dané amplitudě napětí je vyhodnocení meze únavy dosti problematické.

U ocele Böhler T552 (tavba T95803) byla stanovena mez únavy z únavových zkoušek 380 MPa. Při předpětí 300 MPa je tedy amplituda napětí na mezi únavy 80 MPa. Výpočtem ze vztahů (2.1) a (4.5) byly zjištěny meze (resp. jejich spodní hranice) pro oba parametry okolo 280 MPa. Amplituda napětí by tedy vycházela záporná. U ocele T671 (tavba T95803) byla stanovena mez únavy z únavových zkoušek 445 MPa. Při předpětí 300 MPa je tedy amplituda napětí na mezi únavy 145 MPa. Výpočtem ze vztahů (2.1) a (4.5) byly zjištěny meze (resp. jejich spodní hranice) pro oba parametry okolo 405 MPa, tj. příslušná amplituda je 105 MPa. Pro více pevnou ocel tedy dostáváme realističtější odhad.

K tomu, abychom dosáhli vyhovujících odhadů dolní hranice únavové pevnosti, bylo by zapotřebí, aby byly koeficienty ve fenomenologických rovnicích pro výpočet meze únavy přizpůsobeny daným typům ocelí.

6. Závěry

Práce byla zaměřena na hodnocení mikročistoty ocelí klasickými metodami (podle norem DIN 50602 metoda K4 a K0 a ASTM E45 metoda A) a přístupy statistik extrémních hodnot (postup podle Murakamiho a postup daný normou ASTM E2238-08 (2014)). K hodnocení byly využity vzorky ze tří různých taveb oceli Böhler T552 a Böhler T671, které se používají na výrobu lopatek parních turbín.

Metoda statistik extrémních hodnot je vhodný nástroj, pokud potřebujeme kvantitativně charakterizovat nějaký parametr mikrostruktury, který může zásadně ovlivnit nějakou důležitou vlastnost studovaného materiálu. Ve sledovaném případě šlo o to charakterizovat velikost největšího vměstku v nějaké zájmové ploše/objemu materiálu, který může ovlivnit únavové charakteristiky materiálu. K dispozici pro určení velikosti vměstku jsou však výsledky získané analýzou plochy/objemu podstatně menší/ho, než je plocha/objem zájmová/vý.

Charakteristika materiálu z hlediska mikročistoty klasickými postupy může poskytnout výsledek, který kvalitativně dobře vypovídá o stavu materiálu a může být použit pro relativní srovnání různých materiálů resp. různých stavů materiálu. Je však třeba zvolit vhodnou normu a zejména v příslušných technických podmínkách pečlivě stanovit kritéria akceptovatelnosti dodávaného materiálu, což se v technické praxi často nestává. Z hlediska informace o velikosti největšího vměstku v daném materiálu se jako nejvhodnější jeví normy DIN 50602 metoda K4 a ASTM E45 metoda A.

Výsledky získané metodami statistik extrémních hodnot mohou charakterizaci parametru největšího vměstku v daném objemu materiálu poskytnout daleko jemněji. Pokud jsou si materiály poměrně blízké obsahem vměstků, nemusí hodnocení oběma přístupy sledovat stejné pořadí.

Pro komplexní charakterizaci materiálu je optimální použít oba postupy – klasickými metodami hodnocení mikročistoty a zvolenou metodou statistik extrémních hodnot.

Různé postupy hodnocení metodami statistik extrémních hodnot přinášejí v zásadě kvalitativně stejné výsledky. Nicméně různé postupy hodnocení neposkytují kvantitativně stejné hodnoty parametrů ($\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ v postupu podle Murakamiho, L_{max} při hodnocení podle normy ASTM E2283-08) charakterizující velikost (statisticky) největšího vměstku v zájmové ploše/objemu. Hodnocení podle normy ASTM E2283-08 je díky svému striktnímu přístupu k provedení testu vhodné pro relativní srovnání různých materiálů resp. různých taveb stejného typu materiálu. Pokud chceme využít hodnocení největšího vměstku pro odhad odolnosti materiálu proti únavovému porušení, je vhodné zvolit postup podle Murakamiho, neboť v odborné literatuře existují fenomenologické vzorce pro odhad dolní meze únavy materiálu na základě snadno stanovitelné hodnoty Vickersovy tvrdosti a parametru $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$.

U obou sledovaných ocelí bylo ověřeno, že distribuce velikostí vměstků odpovídá dvojnásobně exponenciální závislosti, a tudíž lze pro jejich hodnocení použít statistik extrémních hodnot.

Zjištěné hodnoty parametru $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ a L_{max} byly použity pro odhad dolní meze únavy studovaných materiálů Böhler T552 a Böhler T671. Přestože oba materiály nespádají do kategorie ocelí, pro které byly fenomenologické vztahy odvozeny, byly vypočtené hodnoty v relativně dobrém souladu s hodnotami mezí únavy stanovenými únavovými zkouškami pro obě ocele. Pro dané materiály by však bylo potřeba, na základě rozsáhlejšího souboru experimentálních dat, stanovit v příslušných fenomenologických rovnicích upřesněné koeficienty.

Zpracované postupy statistik maximálních hodnot je možné využít i pro stanovování jiných materiálo-grafických parametrů.

Použitá literatura

- [1] Doc. RNDr. Dagmar Jandová Ph.D.: Prezentace přednášek z předmětu EMI [online]. ZČU FST. Poslední změna 07. 09. 2017 [cit. 20. 11. 2017]. Dostupné z: <https://moje.zcu.cz/portal/studium/courseware/kmm/emi/prednasky.html>
- [2] DIN 50602. Metallographic examination; microscopic examination of special steels using standard diagrams to assess the content of non-metallic inclusions, 1985, p. 10.
- [3] ČSN ISO 4967. Ocel - Stanovení obsahu nekovových vměstků - Mikrografická metoda využívající normovaná zobrazení, Český normalizační institut, 2015. Str. 40.
- [4] ASTM E 45 – 05. Standard test methods for determining the inclusion content of steel, ASTM International, 2005, p. 19.
- [5] Luděk Ptáček a kol.: Nauka o materiálu, CERM, s.r.o., Brno, 2002.
- [6] F. Jandoš, R. Říman, A. Gemperle: Využití moderních laboratorních metod v metalografii, SNTL, Praha, 1985.
- [7] Murakami, Y.: Metal fatigue: Effect of small defects and non-metallic inclusions. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2002.
- [8] Kissling, R.: „Cleansteel – a debatable concept“, Swedish symposium on Non-metallic inclusions in steel, held on 17-29 April 1981, Uddeholms AB, Hagfors, Sweden, pp.7-18.
- [9] Duckworth, W.E., Ineson, E.: The effect of extremely introduced alumina particles on the fatigue life of En 24 steel. Clean Steel, Iron Steel Inst. Sp. Rep. 77 (1963), pp. 87–103.
- [10] Harry Chandler et al.: Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels, ASM International, Materials Park, OH, USA 1995.
- [11] Nishijima, S., Tanaka, K., Sumiyoshi, H.: The effect size determining the fatigue limits of steels. In: Advances in Fracture Research (Fracture 84), vol. 3, New Delhi, India, 4-10 Dec. 1984, Pergamon Press Ltd., Oxford, pp. 1719-1726.
- [12] Brooksbank, D., Andrews, K., W.: Stress fields around inclusions and the relation to mechanical properties. Journal of the Iron and Steel Institute, 210 (4) 1972, pp. 246-255.
- [13] Yates, J.R., Shi, G., Atkinson, H.V., Sellars, C.M., Anderson, C.V.: Fatigue tolerant design of steel components based on the size of large inclusions“. 2002 Blackwell Science Ltd. Fatigue Fract. Engn. Mater. Struct. 25, pp. 667-676.
- [14] Rinya Takahashi and Masaaki Sibuya, The maximum size of the planar sections of random spheres and its application to metallurgy, Ann. Inst. Statist. Math, Vol. 48, No. 1, 127-144 (1996).
- [15] VSCHT: Mikroskopická obrazová analýza [online]. VSCHT. Poslední změna 07. 08. 2017 [cit. 20.11.2017] Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/ucebnice/LO/download/navodO1_mikroskop.pdf, 20. 11. 2017.
- [16] Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology: Inclusion Rating by Statistics of Extreme Values and Its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials. 1994.
- [17] Jens Ekengren: Estimating inclusion content in high performance steels. Faculty of Technology and Science Materials Engineering. Karlstad University Studies, 2008:50.
- [18] Nuša Pukšič, Monika Jenko: Estimating the size of the maximum inclusion in a large sample area of steel. Institute of Metals and Technology, Ljubljana, Slovenia. 2012.

[19] CLEAN STEELS[online]. Ispatguru. Poslední změna: 20. 08. 2017[cit. 20. 11. 2017]
Dostupné z: <http://ispatguru.com/clean-steels-2/>.

[20] ASTM E2283-08 Standard practise for Extreme value Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel and Other Microstructural Features.

[21] Kasl, J., Špirit, Z., Strejcius, J., Svoboda, J.: Fraktografický rozbor lomových ploch únavových zkoušek lopatkových materiálů v korozním prostředí – katalog lomových ploch. Výzkumná zpráva VYZ-VZ-52/17/070, VZÚ Plzeň, Plzeň, prosinec 2017.

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Globulitický, oxidický typ vměstku	15
Obr. 2.2 Hlinitanový typ vměstku	15
Obr. 2.3 Silikátový typ vměstku	15
Obr. 2.4 Sulfidický typ vměstku	15
Obr. 2.5 Ekvivalence trhlin [7]	20
Obr. 2.6 Rozdělení vměstků podle polohy vůči povrchu[7]	21
Obr. 2.7 Závislost faktoru intenzity napětí $a\sqrt{area}$ [7]	22
Obr. 2.8 WCP [7]	24
Obr. 2.9 Praktický postup hodnocení vměstků podle statistik [16]	24
Obr. 2.10 Kumulativní četnost extrémních hodnot inkluzí ocelí SUJ2(N) a SUJ2(H) [16]	26
Obr. 3.1a,b Mikrostruktura vstupního materiálu T552 pro výrobu vzorků, leptáno Vilella-Bain, zvětšení 500x, (a) příčný řez, (b) podélný řez	31,32
Obr. 3.2a, b Mikrostruktura vstupního materiálu T671 pro výrobu vzorků, leptáno Vilella-Bain, zvětšení 500x, (a) příčný řez, (b) podélný řez	34,35
Obr. 4.1, a, b, c Odběr vzorků z polotovarů	36,37
Obr. 4.2 Závislost y_j na $\sqrt{AREA_{max,j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{AREA_{max}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu T95803	42
Obr. 4.3 Závislost y_j na $\sqrt{AREA_{max,j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{AREA_{max}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu K13589	42
Obr. 4.4 Závislost y_j na $\sqrt{AREA_{max,j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{AREA_{max}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu Y10514	43
Obr. 4.5 Závislost y_j na $\sqrt{AREA_{max,j}}$ s vyznačenými hodnotami parametru $\sqrt{AREA_{max}}$ kritické velikosti vměstku pro ocel T671, tavbu 369104	43
Obr. 4.6 Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel T552, tavbu T95803	46
Obr. 4.7 Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T552, tavbu K13589	46
Obr. 4.8 Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T552, tavbu Y10514	47
Obr. 4.9 Závislost y_j na $L_{max,j}$ s vyznačenými hodnotami hodnot L_{max} kritické velikosti vměstku pro ocel pro ocel T671, tavbu 369104	47
Obr. 4.10 Výsledky únavových zkoušek ocel T552, vzduch, PT	48
Obr. 4.11 Lomové plochy s podpovrchovou iniciací; ocel T552, zkouška na vzduchu	50
Obr. 4.12 Výsledky únavových zkoušek ocel T671, vzduch, PT	51
Obr. 4.13 Iniciační trhliny na povrchovém vměstku; ocel T671, zkouška na vzduchu	52

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Výsledné hodnocení mikročistoty podle ASTM E 45, metoda A	17
Tab. 2.2 Hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti, Youngova modulu a Poissonova čísla pro různé typy vměstků [12]	19
Tab. 2.3 Tabulka hodnot HV [7]	22
Tab. 3.1 Chemické složení ocelí Böhler T552 (hmot. %)	29
Tab. 3.2 Tepelné zpracování	29
Tab. 3.3 Velikost původního austenitického zrna	30
Tab. 3.4 Základní mechanické parametry	30
Tab. 3.5 Výsledky měření tvrdosti HB a HV	30
Tab. 3.6 Vrubová houževnatost	31
Tab. 3.7 Chemické složení oceli Böhler T671 (hmot. %)	32
Tab. 3.8 Tepelné zpracování	33
Tab. 3.9 Velikost původního austenitického zrna	33
Tab. 3.10 Základní mechanické parametry	33
Tab. 3.11 Tvrdost HB a HV	33
Tab. 3.12 Vrubová houževnatost	34
Tab. 4.1 Výsledky mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K0	38
Tab. 4.2 Výsledky mikročistoty podle normy DIN 50602 – metoda K4	38
Tab. 4.3 Výsledky mikročistoty podle normy ASTM E 45- metoda A	39
Tab. 4.4 Výsledky hodnocení největších vměstků	40
Tab. 4.5 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtů parametrů \sqrt{AREA}_{max}	41
Tab. 4.6 Vstupní a výstupní hodnoty výpočtů hodnot velikostí maximálních vměstků L_{max}	45
Tab. 4.7 Poloha a tvar vměstků, z nichž byly iniciovány trhliny	50
Tab. 4.8 Výpočet dolních hranic meze únavy z hodnot maximálních velikostí únavy	53
Tab. 5.1 Srovnání hodnot velikostí maximálních vměstků různými postupy a hodnot mikročistoty	58

Přílohy

1. Předepsané hodnoty pro ocele Böhler T552 a Böhler 671
2. Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 - metoda K0
3. Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 - metoda K4
4. Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E 45 - metoda A
5. Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu T95803, ocel Böhler T552
6. Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu K13589, ocel Böhler T552
7. Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu Y10514, ocel Böhler T552
8. Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu 360104, ocel Böhler T671
9. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu T95803, ocel Böhler T552
10. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu K13589, ocel Böhler T552
11. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu Y10514, ocel Böhler T552
12. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu 360104, ocel Böhler T671

PŘÍLOHA č. 1

Předeepsané hodnoty pro ocele Böhler T552 a Böhler 671

Předepsané hodnoty pro ocele Böhler T552 a Böhler 671

Böhler T552 dle technického předpisu Tp0010 M/1/s:

- Mikročistota dle DIN50602-metoda K4:

Požadavek max. 20

- Mikročistota dle ASTM E 45-metoda A:

Typ A		Typ B		Typ C		Typ D	
Sulfidy		Hlinítky		Křemičitany		Glob. oxidy	
Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé
2	1	2	1,5	2	1	2	1,5

- Zkouška rázem v ohybu:

KV min. 55 J

- Zkouška tahem:

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
Min. 800	950-1070	Min. 14	-

Böhler T671 dle technického předpisu Tp0018 M/2/s:

- Mikročistota dle DIN50602-metoda K4:

Požadavek max. 20

- Mikročistota dle ASTM E 45-metoda A:

Typ A		Typ B		Typ C		Typ D	
Sulfidy		Hlinítky		Křemičitany		Glob. oxidy	
Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé
2	1	2	1,5	2	1	2	1,5

- Zkouška rázem v ohybu:

KV min.90 J

- Zkouška tahem:

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
1034	1103	12	45

PŘÍLOHA č. 2

Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 - metoda K0

Výpočet výsledku K0 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby T95803 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků [μm]										
			9- 13	13- 19	19- 27	27- 38	38- 53	53- 76	76- 110	110- 150			150- 210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
1	475	SS											
		OA	2										
		OS											
		OG	31	8	3	3		1				6,55	
2	526	SS											
		OA											
		OS											
		OG	38	13	11	7	1					9,9	
3	486	SS											
		OA											
		OS											
		OG	23	4	8	2		1				6,15	
4	536	SS											
		OA											
		OS											
		OG	39	7	3	5	1					6,75	
5	515	SS											
		OA											
		OS											
		OG	35	7	5	5	1					6,95	
6	537	SS											
		OA											
		OS											
		OG	39	4	2		1	1				5,75	
součet	3075												
										2. mezisoučet	S: 0	O: 42,05	
										Sumární charakteristická hodnota K0	S: 0	O: 13,67	
										Celková sumární charakteristická hodnota K0	14		

Výpočet výsledku K0 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby K13589 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků [μm]										
			9-13	13-19	19-27	27-38	38-53	53-76	76-110	110-150			150-210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
K5	364	SS											
		OA											
		OS											
		OG	20	7	6	2							
K6	364	SS											
		OA		1									
		OS											
		OG	32	4	1	3							
K7	388	SS											
		OA											
		OS											
		OG	8	2									
K8	391	SS											
		OA			1								
		OS											
		OG	91	18	6	2							
K9	369	SS											
		OA											
		OS											
		OG	17	7	2								
K10	368	SS											
		OA											
		OS											
		OG	26	5	2								
součet	2244												
											2.mezisoučet	S: 0	O: 21,2
											Sumární charakteristická hodnota K0	S: 0	O: 9,44
											Celková sumární charakteristická hodnota K0	9	

Výpočet výsledku K0 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby Y10514 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků [μm]										
			9-13	13-19	19-27	27-38	38-53	53-76	76-110	110-150			150-210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
Y5	378	SS											
		OA											
		OS											
		OG	37	6	1	1						3,15	
Y6	406	SS											
		OA											
		OS											
		OG	43	8	2							3,35	
Y7	406	SS											
		OA					1						
		OS											
		OG	14	3	3	2						3,6	
Y8	406	SS											
		OA											
		OS											
		OG	36	14	6	3	1					6,9	
Y9	406	SS											
		OA											
		OS											
		OG	19	3	1							1,45	
Y10	392	SS											
		OA											
		OS											
		OG	16	2								1	
součet	2394												
									2.mezisoučet	S:	O:		
										0	19,45		
									Sumární charakteristická hodnota K0	S:	O:		
										0	8,12		
									Celková sumární charakteristická hodnota K0	8			

Výpočet výsledku K0 u šesti vzorků z oceli T671 z tavby 360104 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků (μm)										
			9- 13	13- 19	19- 27	27- 38	38- 53	53- 76	76- 110	110- 150			150- 210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
1	306	SS											
		OA											
		OS											
		OG	3										
2	324	SS											
		OA											
		OS											
		OG	2	1	3								
3	306	SS											
		OA											
		OS											
		OG	1	1									
4	360	SS											
		OA											
		OS											
		OG		3									
5	360	SS											
		OA											
		OS											
		OG	3	2									
6	360	SS											
		OA											
		OS											
		OG	2	8									
součet	1710										2.mezisoučet	S: 0	O: 2,65
											Sumární charakteristická hodnota K0	S: 0	O: 1,55
											Celková sumární charakteristická hodnota K0	2	

PŘÍLOHA č. 3

Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy DIN 50602 - metoda K4

Výpočet výsledku K4 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby T95803 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků [μm]										
			9-13	13-19	19-27	27-38	38-53	53-76	76-110	110-150			150-210
Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků													
			0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O
1	475	SS											
		OA											
		OS											
		OG							1				
2	526	SS											
		OA											
		OS											
		OG						1					
3	486	SS											
		OA											
		OS											
		OG							1				
4	536	SS											
		OA											
		OS											
		OG						1					
5	515	SS											
		OA											
		OS											
		OG						1					
6	537	SS											
		OA											
		OS											
		OG						1	1				
součet	3075										2.mezisoučet	S: 0	O: 10
											Sumární charakteristická hodnota K4	S: 0	O: 3,25
											Celková sumární charakteristická hodnota K4	3	

Výpočet výsledku K4 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby K13589 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet			
			0	1	2	3	4	5	6	7			8	
			Rozpětí velikosti vměstků (μm)											
			9-13	13-19	19-27	27-38	38-53	53-76	76-110	110-150			150-210	
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků											
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O				
K5	364	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
K6	364	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
K7	388	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
K8	391	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
K9	369	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
K10	368	SS												
		OA												
		OS												
		OG												
součet	2244											2.mezisoučet	S: 0	O: 0
												Sumární charakteristická hodnota K4	S: 0	O: 0
												Celková sumární charakteristická hodnota K4	0	

Výpočet výsledku K4 u šesti vzorků z oceli T552 z tavby Y10514 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu [mm ²]	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků (μm)										
			9- 13	13- 19	19- 27	27- 38	38- 53	53- 76	76- 110	110- 150			150- 210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
Y5	378	SS											
		OA											
		OS											
		OG											
Y6	406	SS											
		OA											
		OS											
		OG											
Y7	406	SS											
		OA					1						
		OS										1	
		OG											
Y8	406	SS											
		OA											
		OS										1	
		OG					1						
Y9	406	SS											
		OA											
		OS										0	
		OG											
Y10	392	SS											
		OA											
		OS										0	
		OG											
součet	2394										2. mezisoučet	S: 0	O: 2
											Sumární charakteristická hodnota K4	S: 0	O: 0,83
											Celková sumární charakteristická hodnota K4	1	

Výpočet výsledku K4 u šesti vzorků z oceli T671 z tavby 360104 (mikročistota dle DIN 506092)

Číslo Vzorku	Plocha výbrusu mm ²	Typ vměstku podle etalonové stupnice	Počet vměstků podle indexu velikosti								Výsledek násobení a 1. mezisoučet		
			0	1	2	3	4	5	6	7			8
			Rozpětí velikosti vměstků (μm)										
			9-13	13-19	19-27	27-38	38-53	53-76	76-110	110-150			150-210
			Koeficienty násobení, pod nimi tučně počty nalezených vměstků										
0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	S	O			
1	306	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
2	324	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
3	306	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
4	360	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
5	360	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
6	360	SS											
		OA										0	
		OS											
		OG											
součet	1710										2.mezisoučet	S: 0	O: 0
											Sumární charakteristická hodnota K4	S: 0	O: 0
											Celková sumární charakteristická hodnota K4	0	

PŘÍLOHA č. 4

Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E 45 - metoda A

Výsledky hodnocení mikročistoty podle normy ASTM E 45 - metoda A

Prvotní záznam o zkoušce – Zkušebna metalografie

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00, Plzeň

Datum přijetí zkoušky:	Objednávka č: DP
Datum provedení zkoušky: 23. 3. 2018	Zakázkové /běžné č.:
Zkoušku vykonal: Bc. Petra Bergmanová	Místo provedení zkoušky: Zkušebna metalografie
Název zkoušky: Metalografické Stanovení nekovových vměstků	
Zkušební postupy, metody: ASTM E 45 – metoda A	
Použité přístroje a zařízení: Metalografický mikroskop Olympus PMG-3	
Předmět zkoušení: zkušební vzorky z oceli T552	
Vzorek č.: 1 až 6	

Laboratorní teplota [°C]:	24				
Kalibrace: ANO	Vyhovuje:	ANO	Nevyhovuje:		Opatření:
Další údaje ke zkoušce:	T95803				

Metalografická příprava vzorků v podélném směru, neleptáno, prohlíženo při zvětšení 100x. Mikročistota byla hodnocena dle metody A. Plocha kontrolované oblasti cca 3075 mm². Výsledky odpovídají nejhoršímu poli pro každý typ vměstku a pro každou sérii tloušťek.

Plocha mm ²	Vzorek č.	Typ A Sulfidy		Typ B Hlinitany		Typ C Křemičitany		Typ D Glob. oxidy		Max D Velikost (mm)
		Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	
475	1	0	0	0,5	0	0	0	1,5	0,5	0,06
526	2	0	0	0,5	0	0	0	1,5	1	0,04
486	3	0	0	0	0	0	0	1,5	0,5	0,06
536	4	0	0	0	0	0	0	1,5	1	0,04
515	5	0	0	0	0	0	0	1,5	0,5	0,04
537	6	0	0	0	0	0	0	1,5	1	0,06
3075	Nejhorší pole	0	0	0,2	0	0	0	1,5	0,8	

Index s – určuje délku, převyšující maximální délku, uvedenou v etalonové řadě

Index e – určuje šířku či průměr převyšující maximální tloušťku, uvedenou v etalonové řadě

Prvotní záznam o zkoušce – Zkušebna metalografie

Datum přijetí zkoušky:	Objednávka č: DP
Datum provedení zkoušky: 23. 3. 2018	Zakázkové /běžné č.:
Zkoušku vykonal: Bc. Petra Bergmanová	Místo provedení zkoušky: Zkušebna metalografie
Název zkoušky: Metalografické Stanovení nekovových vměstků	
Zkušební postupy, metody: ASTM E 45 – metoda A	
Použité přístroje a zařízení: Metalografický mikroskop Olympus PMG-3	
Předmět zkoušení: zkušební vzorky z oceli T552	
Vzorek č.: K5 až K10	

Laboratorní teplota [°C]:	24				
Kalibrace: ANO	Vyhovuje:	ANO	Nevyhovuje:		Opatření:
Další údaje ke zkoušce:	K13589				

Metalografická příprava vzorků v podélném směru, neleptáno, prohlíženo při zvětšení 100x. Mikročistota byla hodnocena dle metody A. Plocha kontrolované oblasti cca 2394 mm². Výsledky odpovídají nejhoršímu poli pro každý typ vměstku a pro každou sérii tloušťek.

Plocha mm ²	Vzorek č.	Typ A		Typ B		Typ C		Typ D		Max D Velikost (mm)
		Sulfidy		Hlinitany		Křemičitany		Glob. oxidy		
		Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	
364	k5	0	0	0,5	0	0	0	1,5	1	0,02
364	K6	0	0	0,5	0	0	0	1	0,5	0,03
388	K7	0	0	0	0	0	0	1,5	0,5	0,03
391	K8	0	0	0,5	0,5	0	0	1,5	0,5	0,02
369	K9	0	0	1	0	0	0	1	0,5	0,03
368	K10	0	0	0,5	0	0	0	1,5	0,5	0,03
2244	Nejhorší pole	0	0	0,5	0,1	0	0	1,3	0,6	

Index s – určuje délku, převyšující maximální délku, uvedenou v etalonové řadě

Index e – určuje šířku či průměr převyšující maximální tloušťku, uvedenou v etalonové řadě

Prvotní záznam o zkoušce – Zkušebna metalografie
 Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00, Plzeň

Datum přijetí zkoušky:	Objednávka č: DP
Datum provedení zkoušky: 23. 3. 2018	Zakázkové /běžné č.:
Zkoušku vykonal: Bc. Petra Bergmanová	Místo provedení zkoušky: Zkušebna metalografie
Název zkoušky: Metalografické Stanovení nekovových vměstků	
Zkušební postupy, metody: ASTM E 45 – metoda A	
Použité přístroje a zařízení: Metalografický mikroskop Olympus PMG-3	
Předmět zkoušení: zkušební vzorky z oceli T552	
Vzorek č.: Y5 až Y10	

Laboratorní teplota [°C]:	24				
Kalibrace: ANO	Vyhovuje:	ANO	Nevyhovuje:		Opatření:
Další údaje ke zkoušce:	Y10514				

Metalografická příprava vzorků v podélném směru, neleptáno, prohlíženo při zvětšení 100x. Mikročistota byla hodnocena dle metody A. Plocha kontrolované oblasti cca 2394mm². Výsledky odpovídají nejhoršímu poli pro každý typ vměstku a pro každou sérii tloušťek.

Plocha mm ²	Vzorek č.	Typ A Sulfidy		Typ B Hlinitany		Typ C Křemičitany		Typ D Glob. oxidy		Max D Velikost (mm)
		Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	
378	Y5	0	0	1	1	0	0	1,5	1	0,03
406	Y6	0	0	0,5	0,5	0	0	1	1	0,02
406	Y7	0	0	1	0	0	0	1	0,5	0,03
406	Y8	0	0	1	0,5	0	0	1	1	0,04
406	Y9	0	0	0,5	0	0	0	1,5	0,5	0,02
392	Y10	0	0	0,5	0	0	0	1	0,5	0,01
2394	Nejhorší pole	0	0	0,8	0,3	0	0	1,2	0,8	

Index s – určuje délku, převyšující maximální délku, uvedenou v etalonové řadě

Index e – určuje šířku či průměr převyšující maximální tloušťku, uvedenou v etalonové řadě

Prvotní záznam o zkoušce – Zkušebna metalografie

Datum přijetí zkoušky:	Objednávka č: DP
Datum provedení zkoušky: 26.3 2018	Zakázkové /běžné č.:
Zkoušku vykonal: Bc. Petra Bergmanová	Místo provedení zkoušky: Zkušebna metalografie
Název zkoušky: Metalografické Stanovení nekovových vměstků	
Zkušební postupy, metody: ASTM E 45 – metoda A	
Použité přístroje a zařízení: Metalografický mikroskop Olympus PMG-3	
Předmět zkoušení: zkušební vzorky z oceli T671	
Vzorek č.: 1 až 6	

Laboratorní teplota [°C]:	24				
Kalibrace: ANO	Vyhovuje:	ANO	Nevyhovuje:		Opatření:
Další údaje ke zkoušce:	360104				

Metalografická příprava vzorků v podélném směru, neleptáno, prohlíženo při zvětšení 100x. Mikročistota byla hodnocena dle metody A. Plocha kontrolované oblasti cca 1710mm². Výsledky odpovídají nejhoršímu poli pro každý typ vměstku a pro každou sérii tloušťek.

Plocha mm ²	Vzorek č.	Typ A Sulfidy		Typ B Hlinitany		Typ C Křemičitany		Typ D Glob. oxidy		Max D Velikost (mm)
		Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé	
306	1	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	
324	2	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,02
306	3	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	
360	4	0	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0,016
360	5	0	0	0	0	0	0	1	0,5	0,016
360	6	0	0	0	0	0	0	1	1	0,018
1710	Nejhorší pole	0	0	0	0	0	0	0,7	0,6	

Index s – určuje délku, převyšující maximální délku, uvedenou v etalonové řadě

Index e – určuje šířku či průměr převyšující maximální tloušťku, uvedenou v etalonové řadě

PŘÍLOHA č. 5

**Výpočet největších parametrů \sqrt{AREA}_{max} vměstků pro tavbu
T95803, ocel Böhler T552**

5. Výpočet největších parametrů $\sqrt{\text{AREA}}_{\text{max}}$ vměstků pro tavbu T95803, ocel Böhler T552

Záhlaví		Materiál	ocel Böhler T552	Aktivní plocha S [mm ²]	1321	Nutné vyplnit									
		Vzorek	tavba T95803	Aktivní objem V [mm ³]	2562	Vyplnit									
		Řez	podélný			Výpočet									
		Standardní plocha S ₀ [mm ²]	513												
		Počet měření n	24												
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Plocha max. vměstků j v poli [μm ²]	$\sqrt{\text{area}}_{\text{max},j}$ v poli [μm]	F _j	y _j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	Osa T						
	y _j	x	T	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	y _j	T	x	F					
	1	422.32	20.55	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17	1	100	3	0.3679	0.6922	3	
	2	684.21	26.16	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93	2	100	8	0.1353	0.8734	8	
	3	805.71	28.39	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75	3	100	21	0.0498	0.9514	21	
	4	853.05	29.21	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61	4	100	55	0.0183	0.9819	55	
	5	860.97	29.34	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48	5	100	149	0.0067	0.9933	149	
	6	980.63	31.32	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36	6	100	404	0.0025	0.9975	404	
	7	1276.37	35.73	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24	7	100	1097	0.0009	0.9991	1097	
	8	1334.03	36.52	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13	8	100	2981	0.0003	0.9997	2981	
	9	1359.49	36.87	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02	9	100	8104	0.0001	0.9999	8104	
	10	1431.15	37.83	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09	10	100	22027	0.0000	1.0000	22027	
	11	1441.56	37.97	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20							
	12	1457.33	38.17	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31							
	13	1578.17	39.73	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42							
	14	1771.91	42.09	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55							
	15	1796.75	42.39	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67							
	16	1898.56	43.57	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81							
	17	1905.00	43.65	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95							
	18	2039.00	45.16	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11							
	19	2048.01	45.25	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29							
	20	2068.00	45.48	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50							
	21	2087.00	45.68	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75							
	22	2355.71	48.54	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06							
	23	2430.00	49.30	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48							
24	2553.72	50.53	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20								
Výpočty		Koefficienty regresní rovnice $y = a\sqrt{\text{area}}_{\text{max}} + b$			Koefficienty regresní rovnice $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}} = A'y + B$										
a =		0.1311			A =		7.62776506								
b =		-4.5459			B =		34.6750572								
Výpočet hloubky h [μm]		38.73									Objem				
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]		19.87													
Výpočet zpětné periody T		129.0													
Výpočet y		4.86			0.99	0.01	4.86								
Výpočet $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ [μm]		71.71													
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]		19.87									Únava				
Výpočet zpětné periody T pro N vzorků		2579.3			N =		20								
Výpočet y		7.86			1.00	0.00	7.86								
Výpočet $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ [μm]		94.59									Plocha				
Výpočet zpětné periody		2.6													
Výpočet y		0.71			0.61	0.49	0.71								
Výpočet $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ [μm]		40.09													

PŘÍLOHA č. 6

**Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu
K13589, ocel Böhler T552**

6. Výpočet největších parametrů \sqrt{AREA}_{max} vměstků pro tavbu K13589, ocel Böhler T552

Záhlaví		Materiál	ocel Böhler T552	Aktivní plocha S [mm ²]	1321	Nutné vyplnit									
		Vzorek	tavba K13589	Aktivní objem V [mm ³]	2562	Vyplnit									
		Rez	podélný			Výpočet									
		Standardní plocha S ₀ [mm ²]	374												
		Počet měření n	24												
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Plocha max. vměstku j v poli [μm ²]	√area _{max,j} v poli [μm]	F _j	y _j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	Osa T						
									y _j	x	T	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	
1	60.71	7.79	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17	1	100	3	0.3679	0.6922	3		
2	78.66	8.87	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93	2	100	8	0.1353	0.8734	8		
3	127.95	11.31	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75	3	100	21	0.0498	0.9514	21		
4	130.99	11.45	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61	4	100	55	0.0183	0.9819	55		
5	189.83	13.78	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48	5	100	149	0.0067	0.9933	149		
6	194.06	13.93	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36	6	100	404	0.0025	0.9975	404		
7	200.42	14.16	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24	7	100	1097	0.0009	0.9991	1097		
8	202.41	14.23	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13	8	100	2981	0.0003	0.9997	2981		
9	209.81	14.48	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02	9	100	8104	0.0001	0.9999	8104		
10	217.20	14.74	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09	10	100	22027	0.0000	1.0000	22027		
11	223.47	14.95	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20								
12	249.75	15.80	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31								
13	263.25	16.22	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42								
14	329.82	18.16	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55								
15	333.51	18.26	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67								
16	487.24	22.07	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81								
17	533.93	23.11	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95								
18	602.52	24.55	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11								
19	636.38	25.23	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29								
20	654.48	25.58	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50								
21	935.45	30.59	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75								
22	1011.00	31.80	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06								
23	1061.81	32.59	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48								
24	1495.68	38.67	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20								
Výpočty		Koefficienty regresní rovnice $y = a \cdot \sqrt{area}_{max} + b$			Koefficienty regresní rovnice $\sqrt{area}_{max} = A \cdot y + B$										
a =		0.1345			A =		7.43494424								
b =		-2.0615			B =		15.3271375								
Výpočet hloubky h [μm]		19.26								Objem					
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]		7.20													
Výpočet zpětné periody T		355.6													
Výpočet y		5.87			1.00	0.00	5.87								
Výpočet √area _{max} [μm]		58.99								Únava					
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]		7.20													
Výpočet zpětné periody T pro N vzorků		7112.4			N =		20								
Výpočet y		8.87			1.00	0.00	8.87								
Výpočet √area _{max} [μm]		81.27								Plocha					
Výpočet zpětné periody		3.5													
Výpočet y		1.10			0.72	0.33	1.10								
Výpočet √area _{max} [μm]		23.51													

PŘÍLOHA č. 7

**Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu
Y10514, ocel Böhler T552**

7. Výpočet největších parametrů $\sqrt{\text{AREA}}_{\text{max}}$ vměstků pro tavbu Y10514, ocel Böhler T552

Záhlaví	Materiál	ocel Böhler T552	Aktivní plocha S [mm ²]	1321	Nutné vyplnit	
	Vzorek	tavba K13589	Aktivní objem V [mm ³]	2562	Vyplnit	
	Řez	podélný			Výpočet	
	Standardní plocha S ₀ [mm ²]	374				
	Počet měření n	24				

Tabulka hodnot	Číslo měření j	Plocha max. vměstku j v poli [μm ²]	√area _{max,j} v poli [μm]	F _j	y _j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	Osa T					
									y _j	x	T	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
1	60.71	7.79	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17	1	100	3	0.3679	0.6922	3	
2	78.66	8.87	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93	2	100	8	0.1353	0.8734	8	
3	127.95	11.31	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75	3	100	21	0.0498	0.9514	21	
4	130.99	11.48	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61	4	100	55	0.0183	0.9819	55	
5	189.83	13.78	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48	5	100	149	0.0067	0.9933	149	
6	194.06	13.93	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36	6	100	404	0.0025	0.9975	404	
7	200.42	14.16	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24	7	100	1097	0.0009	0.9991	1097	
8	202.41	14.23	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13	8	100	2981	0.0003	0.9997	2981	
9	209.81	14.48	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02	9	100	8104	0.0001	0.9999	8104	
10	217.20	14.74	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09	10	100	22027	0.0000	1.0000	22027	
11	223.47	14.95	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20							
12	249.75	15.80	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31							
13	263.25	16.22	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42							
14	329.82	18.16	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55							
15	333.51	18.26	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67							
16	487.24	22.07	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81							
17	533.93	23.11	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95							
18	602.52	24.55	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11							
19	636.38	25.23	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29							
20	654.48	25.58	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50							
21	935.45	30.59	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75							
22	1011.00	31.80	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06							
23	1061.81	32.59	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48							
24	1495.68	38.67	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20							

Osa F			
y _j	T	x	F
1	3	0	69.22
2	8	0	87.34
3	21	0	95.14
4	55	0	98.19
5	149	0	99.33
6	404	0	99.75
7	1097	0	99.91
8	2981	0	99.97
9	8104	0	99.99
10	22027	0	100.00

Výpočty	Koefficienty regresní rovnice $y = a \cdot \sqrt{\text{area}}_{\text{max}} + b$		Koefficienty regresní rovnice $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}} = A \cdot y + B$		
a =	0.1345		A =	7.43494424	
b =	-2.0615		B =	15.3271375	
Výpočet hloubky h [μm]	19.26				Objem
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]	7.20				
Výpočet zpětné periody T	355.6				
Výpočet y	5.87	1.00	0.00	5.87	
Výpočet √area _{max} [μm]	58.99				Únava
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]	7.20				
Výpočet zpětné periody T pro N vzorků	7112.4		N =	20	
Výpočet y	8.87	1.00	0.00	8.87	
Výpočet √area _{max} [μm]	81.27				Plocha
Výpočet zpětné periody	3.5				
Výpočet y	1.10	0.72	0.33	1.10	
Výpočet √area _{max} [μm]	23.51				

PŘÍLOHA č. 8

**Výpočet největších parametrů $\sqrt{AREA_{max}}$ vměstků pro tavbu
360104, ocel Böhler T671**

8. Výpočet největších parametrů \sqrt{AREA}_{max} vměstků pro tavbu 360104, ocel Böehler T671

Záhlaví		Materiál	ocel Böehler T671	Aktivní plocha S [mm ²]	803	Nutné vyplnit								
		Vzorek	tavba 360104	Aktivní objem V [mm ³]	1741	Vyplnit								
		Řez	podélný			Vypočet								
		Standardní plocha S ₀ [mm ²]	285											
		Počet měření n	24											
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Plocha max. vměstku j v poli [μm ²]	√area _{max,j} v poli [μm]	F _j	y _j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3	Osa T					
									y _j	x	T	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
1	54.81	7.40	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17	1	100	3	0.3679	0.6922	3	
2	69.48	8.34	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93	2	100	8	0.1353	0.8734	8	
3	87.03	9.33	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75	3	100	21	0.0498	0.9514	21	
4	83.04	9.11	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61	4	100	55	0.0183	0.9819	55	
5	87.11	9.33	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48	5	100	149	0.0067	0.9933	149	
6	87.18	9.34	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36	6	100	404	0.0025	0.9975	404	
7	93.82	9.69	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24	7	100	1097	0.0009	0.9991	1097	
8	97.12	9.85	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13	8	100	2981	0.0003	0.9997	2981	
9	108.06	10.40	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02	9	100	8104	0.0001	0.9999	8104	
10	108.65	10.42	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09	10	100	22027	0.0000	1.0000	22027	
11	110.51	10.51	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20							
12	145.89	12.08	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31							
13	147.84	12.16	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42							
14	151.19	12.30	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55							
15	160.34	12.66	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67							
16	161.41	12.70	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81							
17	167.34	12.94	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95							
18	167.92	12.96	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11							
19	180.85	13.45	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29							
20	181.39	13.47	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50							
21	190.64	13.81	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75							
22	194.55	13.95	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06							
23	208.09	14.43	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48							
24	246.44	15.70	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20							

Osa F			
y _j	T	x	F
1	3	0	69.22
2	8	0	87.34
3	21	0	95.14
4	55	0	98.19
5	149	0	99.33
6	404	0	99.75
7	1097	0	99.91
8	2981	0	99.97
9	8104	0	99.99
10	22027	0	100.00

Výpočty		Koefficienty regresní rovnice $y = a \cdot \sqrt{area}_{max} + b$		Koefficienty regresní rovnice $\sqrt{area}_{max} = A \cdot y + B$	
a =	0.4904	A =	2.03915171		
b =	-5.1159	B =	10.4320962		
Výpočet hloubky h [μm]	11.51				
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]	3.28				
Výpočet zpětné periody T	530.6				
Výpočet y	6.27	1.00	0.00	6.27	
Výpočet √area _{max} [μm]	23.22				
Výpočet inspekčního objemu V ₀ [mm ³]	3.28				
Výpočet zpětné periody T pro N vzorků	10611.9	N =	20		
Výpočet y	9.27	1.00	0.00	9.27	
Výpočet √area _{max} [μm]	29.33				
Výpočet zpětné periody	2.8				
Výpočet y	0.82	0.65	0.44	0.82	
Výpočet √area _{max} [μm]	12.11				

PŘÍLOHA č. 9

**Výpočet největších parametrů L_{\max} vměstků pro tavbu T95803,
ocel Böhler T552**

9. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu T95803, ocel Böhler T552

Záhlaví		Materiál	ocel Böhler T552	Aktivní plocha A_{ref} [mm ²]	513000	Nutné vypl		
		Vzorek	tavba T95803				Vyplnit	
		Řez	podélný				Výpočet	
		Standardní plocha A_0 [mm ²]	513					
		Počet měření n	24					
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Moments method $L_{max,j}$ [μm]	Délka max. vměstku j v poli $L_{max,j}$ [μm]	Pravděpodobnost P_j	Redukovaná proměnná y_j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
	1	36.07	33.11	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17
	2	37.66	33.11	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93
	3	38.81	33.11	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75
	4	39.76	36.84	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61
	5	40.61	38.14	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48
	6	41.40	39.92	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36
	7	42.15	41.20	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24
	8	42.88	43.85	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13
	9	43.59	44.09	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02
	10	44.31	44.55	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09
	11	45.03	46.00	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20
	12	45.76	46.74	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31
	13	46.52	49.66	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42
	14	47.31	52.37	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55
	15	48.14	53.47	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67
	16	49.03	53.82	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81
	17	49.98	54.59	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95
	18	51.03	54.88	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11
	19	52.21	55.41	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29
	20	53.57	55.46	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50
	21	55.19	56.04	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75
	22	57.22	57.43	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06
	23	60.03	57.86	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48
	24	64.71	58.82	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20
Výpočty	Koeficienty regresní rovnice $y = a \cdot l_{max} + b$			Koeficienty regresní rovnice $L_{max} = d \cdot y + \lambda$				
	a =	0.1104		δ =	9.0580			
	b =	-4.6807		λ =	42.3976			
	Výpočet průměrné vel. vměstlu L [μm]	47.52		Sm. odchylka [μm]	8.41			
	Výpočet zpětné periody	1000.0						
	Výpočet y	6.91	1.00	0.00	6.91			
	Výpočet L_{max} [μm]	104.96						
	Koeficienty regresní rovnice			δ =	6.5577			
				λ =	43.7345			
	Výpočet L_{max} [μm]	89.03						
	Koeficienty regresní rovnice			δ =	8.22589726			
				λ =	43.1870524			
	Výpočet L_{max} [μm]	100.01						

PŘÍLOHA č. 10

**Výpočet největších parametrů L_{\max} vměstků pro tavbu K13589,
ocel Böhler T552**

10. Výpočet nnejvětší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu K13589, ocel Böehler T552

Záhlaví		Materiál	ocel Böehler T552	Aktivní plocha A_{ref} [mm ²]	374000	Nutné vypl		
		Vzorek	tavba K13589			Vyplnit		
		Rez	podélný			Vypočet		
		Standardní plocha A_0 [mm ²]	374					
		Počet měření n	24					
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Moments method $L_{max,j}$ [μm]	Délka max. vměstku j v poli $L_{max,j}$ [μm]	Pravděpodobnost P_j	Redukovaná proměnná y_j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
	1	10.19	8.84	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17
	2	11.93	11.11	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93
	3	13.19	12.64	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75
	4	14.24	13.51	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61
	5	15.18	13.54	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48
	6	16.05	15.06	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36
	7	16.87	15.80	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24
	8	17.67	15.85	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13
	9	18.45	17.34	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02
	10	19.24	18.55	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09
	11	20.03	19.85	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20
	12	20.84	20.09	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31
	13	21.67	20.81	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42
	14	22.54	21.71	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55
	15	23.45	22.52	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67
	16	24.42	27.18	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81
	17	25.47	27.71	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95
	18	26.63	28.43	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11
	19	27.93	30.50	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29
	20	29.42	34.06	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50
	21	31.19	35.36	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75
	22	33.43	35.81	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06
	23	36.51	36.14	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48
	24	41.65	44.02	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20
Výpočty	Koefficienty regresní rovnice $y = a \cdot L_{max} + b$		Koefficienty regresní rovnice $L_{max} = d \cdot y + \lambda$		Lineární regresní rovnice			
	a =	0.1163	δ =	8.5985				
	b =	-2.1179	λ =	18.2107				
	Výpočet průměrné vel. vměstlu L [μm]	22.77	Sm. odchylka [μm]	9.24				
	Výpočet zpětné periody	1000.0						
	Výpočet y	6.91	1.00	0.00	6.91			
	Výpočet L_{max} [μm]	77.60						
	Koefficienty regresní rovnice		δ =	7.2051	Moments method			
			λ =	18.6091				
	Výpočet L_{max} [μm]	68.38						
	Koefficienty regresní rovnice		δ =	7.4016	Like hood method			
			λ =	18.4220				
	Výpočet L_{max} [μm]	69.55						

PŘÍLOHA č. 11

**Výpočet největších parametrů L_{\max} vměstků pro tavbu Y10514,
ocel Böhler T552**

11. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu Y10514, ocel Böehler T552

Záhlaví		Materiál	ocel Böehler T552	Aktivní plocha A_{ref} [mm ²]	399000	Nutné vypl		
		Vzorek	tavba Y10514			Vyplnit		
		Rez	podélný			Výpočet		
		Standardní plocha A_0 [mm ²]	399					
		Počet měření n	24					
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Moments method $L_{max,j}$ [μm]	Délka max. vměstku j v poli $L_{max,j}$ [μm]	Pravděpodobnost P_j	Redukovaná proměnná y_j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
	1	11.71	12.62	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17
	2	13.61	13.17	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93
	3	14.99	13.65	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75
	4	16.13	14.70	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61
	5	17.16	15.69	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48
	6	18.10	18.24	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36
	7	19.00	18.55	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24
	8	19.87	18.63	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13
	9	20.73	18.81	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02
	10	21.58	19.20	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09
	11	22.45	24.41	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20
	12	23.33	24.79	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31
	13	24.24	25.12	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42
	14	25.18	25.46	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55
	15	26.18	25.61	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67
	16	27.24	26.41	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81
	17	28.39	26.74	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95
	18	29.65	27.02	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11
	19	31.06	30.42	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29
	20	32.69	38.15	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50
	21	34.63	39.18	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75
	22	37.07	39.69	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06
	23	40.42	43.47	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48
	24	46.04	50.67	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20
Výpočty	Koeficienty regresní rovnice $y = a \cdot L_{max} + b$			Koeficienty regresní rovnice $L_{max} = d \cdot y + \lambda$			Lineární regresní rovnice	
	a =	0.1061		δ =	9.4251			
	b =	-2.1689		λ =	20.4420			
	Výpočet průměrné vel. vměstku L [μm]	25.43		Sm. odchylka [μm]	10.08			
	Výpočet zpětné periody	1000.0						
	Výpočet y	6.91	1.00	0.00	6.91			
	Výpočet L_{max} [μm]	85.54						
	Koeficienty regresní rovnice			δ =	7.8608			
				λ =	20.8961			
	Výpočet L_{max} [μm]	75.19						
	Koeficienty regresní rovnice			δ =	7.6076			
				λ =	20.8410			
	Výpočet L_{max} [μm]	73.39						

PŘÍLOHA č. 12

**Výpočet největších parametrů L_{\max} vměstků pro tavbu 360104,
ocel Böhler T671**

12. Výpočet největší velikosti vměstků L_{max} pro tavbu 360104, ocel Böhler T671

Záhlaví		Materiál	ocel Böhler T671	Aktivní plocha A_{ref} [mm ²]	285000	Nutné vypl		
		Vzorek	tavba 360104			Vyplnit		
		Řez	podélný			Výpočet		
		Standardní plocha A_0 [mm ²]	285					
		Počet měření n	24					
Tabulka hodnot	Číslo měření j	Moments method $L_{max,j}$ [μm]	Délka max. vměstku j v poli $L_{max,j}$ [μm]	Pravděpodobnost P_j	Redukovaná proměnná y_j	Pomocný 1	Pomocný 2	Pomocný 3
	1	9.73	8.15	4.00	-1.17	0.04	3.22	-1.17
	2	10.30	9.19	8.00	-0.93	0.08	2.53	-0.93
	3	10.70	10.23	12.00	-0.75	0.12	2.12	-0.75
	4	11.04	10.62	16.00	-0.61	0.16	1.83	-0.61
	5	11.35	10.89	20.00	-0.48	0.20	1.61	-0.48
	6	11.63	11.65	24.00	-0.36	0.24	1.43	-0.36
	7	11.89	11.68	28.00	-0.24	0.28	1.27	-0.24
	8	12.15	11.98	32.00	-0.13	0.32	1.14	-0.13
	9	12.41	12.66	36.00	-0.02	0.36	1.02	-0.02
	10	12.66	12.67	40.00	0.09	0.40	0.92	0.09
	11	12.92	13.18	44.00	0.20	0.44	0.82	0.20
	12	13.18	13.63	48.00	0.31	0.48	0.73	0.31
	13	13.45	13.79	52.00	0.42	0.52	0.65	0.42
	14	13.73	13.85	56.00	0.55	0.56	0.58	0.55
	15	14.02	13.85	60.00	0.67	0.60	0.51	0.67
	16	14.34	14.49	64.00	0.81	0.64	0.45	0.81
	17	14.68	15.79	68.00	0.95	0.68	0.39	0.95
	18	15.05	16.67	72.00	1.11	0.72	0.33	1.11
	19	15.47	16.87	76.00	1.29	0.76	0.27	1.29
	20	15.95	16.91	80.00	1.50	0.80	0.22	1.50
	21	16.53	16.98	84.00	1.75	0.84	0.17	1.75
	22	17.25	17.06	88.00	2.06	0.88	0.13	2.06
	23	18.25	18.00	92.00	2.48	0.92	0.08	2.48
	24	19.91	20.47	96.00	3.20	0.96	0.04	3.20
Výpočty	Koefficienty regresní rovnice $y = a \cdot L_{max} + b$			Koefficienty regresní rovnice $L_{max} = d \cdot y + \lambda$				
	a =	0.3564		δ =	2.8058			
	b =	-4.3896		λ =	12.3165			
	Výpočet průměrné vel. vměstku L [μm]	13.80		Sm. odchylka [μm]	2.99			
	Výpočet zpětné periody	1000.0						
	Výpočet y	6.91	1.00	0.00	6.91			
	Výpočet L_{max} [μm]	31.70						
	Koefficienty regresní rovnice			δ =	2.3313			
				λ =	12.4569			
	Výpočet L_{max} [μm]	28.56						
	Koefficienty regresní rovnice			δ =	2.7175			
				λ =	12.3358			
	Výpočet L_{max} [μm]	31.11						