



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE LITÍ A TUHNUTÍ AXIÁLNÍCH TURBÍNOVÝCH KOL PRO DOSAŽENÍ JEMNOZRNNÉ STRUKTURY V ODLITKU

OPTIMALISATION OF CASTING AND SOLIDIFICATION BEHAVIOUR AXIAL TURBO
WHEELS TO ACHIEVE FINE-GRAINED STRUCTURE IN THE CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Matoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Roman Matoušek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

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

Optimalizace lití a tuhnutí axiálních turbínových kol pro dosažení jemnozrné struktury v odlitku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na ovlivňování struktury axiálních turbínových kol litých technologií vytavitelného modelu. Kola jsou odlévána ve vakuu z niklové superslitiny Inconel 713LC na Divizi přesného lití v První brněnské strojírně Velká Bíteš, a.s.. Cílem je optimalizovat proces lití a tuhnutí pro dosažení jemnozrné struktury a co nejlepších mechanických vlastností.

Cíle diplomové práce:

Optimalizovat režim tuhnutí a chladnutí odlitků rotorů turbin ze slitiny Inconel 713LC s využitím režimu rotace a cyklování liciho stolu. Cílem je dosažení rovnoměrné, jemnozrné struktury kovu.

Seznam literatury:

Wei, C.N., Bor, H.Y. (2003): A study of In-713LC superalloy grain refinement effects on microstructure and tensile properties. Material chemistry and Physics., č. 80

Howmet Turbine Components Corporation. Grainex. USA Trade Mark, Serial Number US73318107. Sept. 28,1982

Chang, E., Chouj, J.C. (1995): Microporosity in an investment-cast turbine blade of IN-713LC superalloy, AFS Transactions, s. 87-168

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na ovlivňování struktury odlitků z niklové superslitiny Inconel 713 LC s využitím rotace a cyklování liciho stolu. Cílem práce je změnou parametrů oscilace při krystalizaci odlitku dosáhnout jemnozrné struktury a co nejlepších mechanických vlastností. Pro účely diplomové práce bylo odlito nejprve šest odlitků turbínových axiálních kol. Po vyhodnocení makrostruktury, mikrostruktury a mechanických vlastností byla odlita čtyři další axiální turbínová kola pro ověření výsledků.

Klíčová slova

Niklové superslitiny, IN 713LC, technologie vytavitelného modelu, struktura odlitku, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the influence of the structure of castings from the nickel superalloy Inconel 713 LC using rotation and cycling by casting table. The aim is to achieve a fine-grained structure and the best mechanical properties through varying the oscillation parameters during casting crystallization. Six castings of axial turbine wheel were initially casted for the purpose of this thesis. After evaluating their macrostructure, microstructure and mechanical properties, four additional axial turbine wheels were casted in order to validate the results.

Key words

Nickel superalloy, IN 713LC, investment casting technology, structure of casting, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATOUŠEK, Roman. *Optimalizace lití a tuhnutí axiálních turbínových kol pro dosažení jemnozrné struktury v odlitku*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 74 s. Doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace lití a tuhnutí axiálních turbínových kol pro dosažení jemnozrné struktury v odlitku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Roman Matoušek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále pak Ing. Petru Šabackému za pomoc při vyhodnocení experimentu a pracovníkům Divize přesného lití PBS Velká Bíteš. Nakonec děkuji rodičům a přítelkyni za podporu studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 NIKL A JEHO SLITINY	10
1.1 Nikl	10
1.2 Slitiny niklu	10
1.2.1 Konstrukční slitiny	10
1.2.2 Slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi	11
1.2.3 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu	11
2 NIKLOVÉ SUPERSLITINY	12
2.1 Struktura niklových superslitin	12
2.1.1 Tuhý roztok γ	12
2.1.2 Zpevňující fáze γ'	12
2.1.3 Zpevňující fáze γ''	14
2.1.4 Topologicky uspořádané TCP fáze	15
2.1.5 Karbidy	15
2.2 Charakteristika vybraných slitin	15
2.3 Zpracování niklových superslitin	17
2.3.1 Technologie vytavitelného modelu	18
2.3.2 Odlévání niklových superslitin	20
3 ŘÍZENÍ KRYSTALIZACE NIKLOVÝCH SUPERSLITIN.....	21
3.1 Odlévání odlitků s jemnými rovnoosými zrny	22
3.1.1 Metody zjemňování zrn.....	22
3.1.2 Metoda zjemňování zrna používaná v DPL PBS.....	23
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
4.1 Představení Divize přesného lití	26
4.2 Postup výroby součástí.....	28
4.3 Popis experimentu.....	31
4.3 Příprava vzorků	32
4.4 Vyhodnocení makrostruktury	35
4.5 Vyhodnocení pórovitosti	42
4.6 Vyhodnocení mechanických zkoušek	47
4.6.1 Zkouška pevnosti v tahu	47
4.6.2 Zkouška tečení materiálu	51
4.6.3 Tvrdost	52

4.7 Ověřovací série	55
4.7.1 Vyhodnocení makrostruktury ověřující série	56
4.7.2 Tahové zkoušky	60
4.8 Vyhodnocení lomových ploch	61
ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	69
SEZNAM OBRÁZKŮ	71
SEZNAM TABULEK	73
SEZNAM GRAFŮ	74

ÚVOD

Turbínová kola, převážně do turbodmychadel, jsou hlavním výrobním programem Divize přesného lití První brněnské strojírny Velká Bíteš, a. s. (DPL-PBS). Vlivem stále se zvyšujících požadavků zákazníků na užité vlastnosti odlitků se konvenční technologie odlévání dostává na hranici svých možností. Požadavky zákazníků na rozměrovou velikost a tím na značnou hmotnost odlitku, rozdílnou sílu stěn a s tím spojenou požadovanou makrostrukturu odlitků a současně jejich vnitřní jakost, to vše spojeno s technologicky náročnými superslitinami na bázi niklu, ze kterých jsou tyto odlitky vyráběny, jsou stále blíže hranici, kdy nebude klasické equiaxiální stacionární lití dostávat náročným požadavkům na výrobu těchto speciálních odlitků. [1]

Jednou z možností ovlivňování struktury odlitků a tím i jejich užitečných vlastností je využití rotace a oscilace skořepinové formy při lití a následném tunutí odlitku. Proces je založen na teorii multiplikace dendritů, tedy na ulamování špiček a sekundárních os dendritů, které jsou následně zanášeny do taveniny, kde slouží jako další zárodky. Výsledná makrostruktura je tedy jemnější a více homogenní.

Předložená diplomová práce se zabývá ovlivňováním struktury a výsledných vlastností odlitků pomocí mechanických oscilací skořepiny při jejich tunutí. Cílem je změnou různých parametrů procesu cyklování najít jejich nejvhodnější kombinaci pro dosažení požadovaných vlastností.

1 NIKL A JEHO SLITINY

1.1 Nikl

Nikl je těžký feromagnetický kov (do teploty 357°C). Vyznačuje se velmi dobrou korozní odolností (kromě prostředí obsahujících síru) a dobrými mechanickými vlastnostmi za normálních i zvýšených teplot. Uchovává si také vysokou houževnatost při nízkých teplotách.

Nikl je nepolymorfní kov krystalizující v kubické plošně středěné mřížce. Díky tomu nelze žádným tepelným zpracováním makrostrukturu ani velikost zrn nijak ovlivňovat jako je tomu např. u ocelí. Vzhledem k tomu je makrostruktura při lití odlitků z niklových slitin věnována velká pozornost.

Nikl se asi z 60% využívá jako legující prvek do slitin železa, kde působí austenitotvorně, zvyšuje žáruvzdornost, žárupevnost, korozní odolnost a vrubovou houževnatost za snížených teplot. Dalších 25% spotřeby tvoří niklové slitiny a zbylých 15% polotovary z čistého niklu. [2,3]

1.2 Slitiny niklu

Slitiny niklu jsou velmi důležité a vzhledem k jejich vlastnostem často nenahraditelné jinými materiály. Vyznačují se vysokým elektrickým odporem, vysokou pevností a houževnatostí, odolností proti korozi v širokém rozsahu teplot a žárupevností. Dle použití se obvykle dělí na konstrukční slitiny, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a na slitiny žáruvzdorné a žárupevné. [2,3]

1.2.1 Konstrukční slitiny

Slitiny Ni-Cu neboli monely mají vysokou odolnost proti korozi. Využití nacházejí v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu. Typicky jako součásti čerpadel, ventilů (Obr. 1) nebo lopatky turbín pro velké tlaky. Komplexně legované monely (Si, Mn, Fe) dosahují pevnosti v rozmezí 500 až 1200 MPa. S přísadou hliníku jsou monely vytvrditelné a pevnost dosahuje až 1400 MPa. [2,3]



Obr. 1 Kulová uzavěr (monel) [4]

Slitiny Ni-Be dosahují po vytvrzení pevnosti až 1800MPa při dobré houževnatosti. Jsou vhodné pro použití do 500°C např. na pružiny, membrány a trysky. Obsah berylia nepřesahuje 2%.

Slitiny Ni-Mn případně s dalšími přísadami (Si, Cr) se vyznačují vysokou odolností proti korozi a to i za vyšších teplot v prostředí obsahující sírné sloučeniny. Používají se na elektrody zapalovacích svíček.

Slitiny Ni-Mo se používají pro odlitky odolávající koroznímu působení kyseliny solné a chloridů. [2,4]

1.2.2 Slitiny niklu se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Odporové slitiny Ni-Cr (Cr asi 20%) se vyznačují vysokým měrným elektrickým odporem. Používají se jako topné články až do teplot 1150°C. Přísadou železa se zlepší odolnost proti působení síry, naproti tomu je tento materiál vhodný pouze do 1000°C.

Termočlávkové slitiny na niklové bázi chromel (Ni Cr 9-12%) a aludel (Ni Al 2,2 Mn 2 Si 1,5%) spolu tvoří termočlánek s teplotním rozsahem 300 až 1000°C.

Magneticky měkké slitiny obsahují krom niklu také železo (22-64%) a v menší míře molybden, měď, chrom a křemík. Vysokých magnetických vlastností lze dosáhnout pouze při užití velmi čistých komponent a náročné výrobní technologie. Tyto slitiny se používají pro jádra transformátorů, měřicích zařízení a přístrojů. [2,3]

1.2.3 Žáruvzdorné a žárupevné slitiny niklu

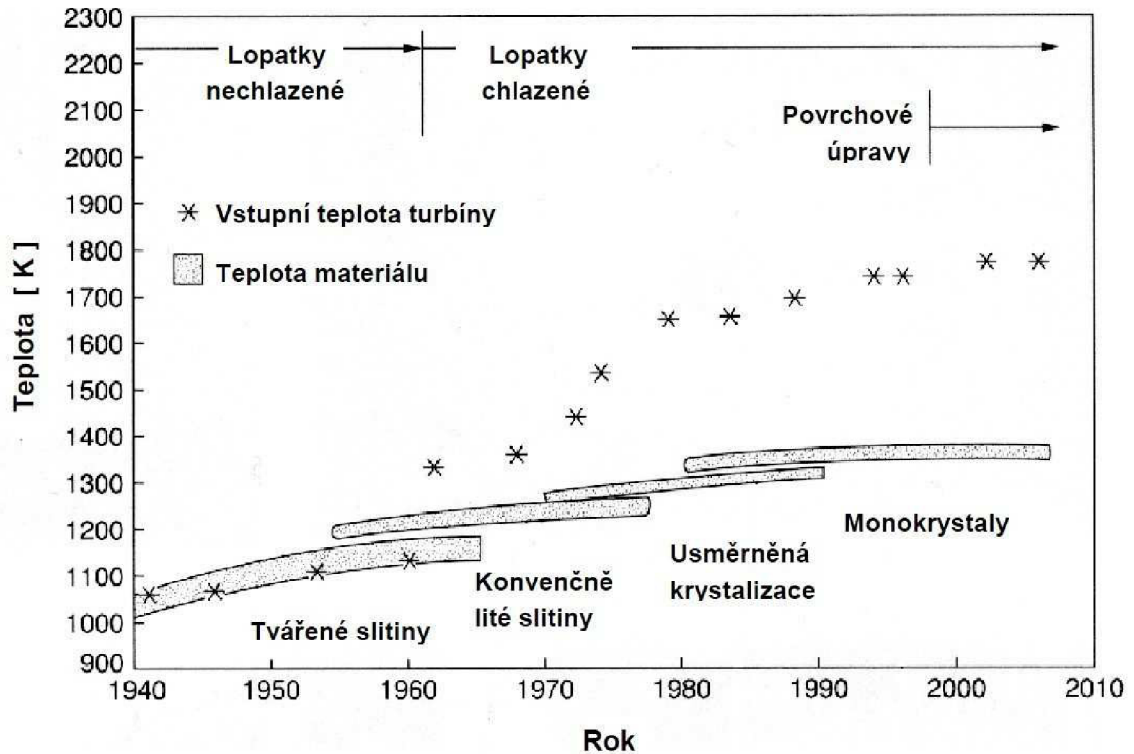
Tyto slitiny jsou určeny pro součásti vystavené vysokým teplotám. Jejich tváření a obrábění je velice obtížné a nákladné. Pro jejich tavení a odlévání je nutná vakuová technologie.

Žárupevné slitiny – jejich základ tvoří Ni-Cr nebo Ni-Cr-Fe. Nikl s chromem tvoří soustavu s úplnou rozpustností. Obsah chromu bývá od 15 do 30% a je základním prvkem podmiňující žáruvzdornost. V úsporné ternární fázi bývá obsah železa až 20%. Struktura těchto slitin je tvořena tuhým roztokem krystalizujícím v krychlové plošně středěné mřížce, který je zpevněn pouze substitučně. Slitina tedy není odolná proti creepu, proto nemůže přenášet mechanické zatížení za zvýšených teplot.

Žárupevné slitiny – základní bázi je opět tuhý roztok Ni-Cr. Slitiny jsou však navíc legovány hliníkem a titanem, které spolu s niklem tvoří hlavní vytvrzující fázi γ' a karbidotvornými prvky, které substitučně zpevňují niklovou matici a vytvářejí vlastní karbidy. Fáze γ' je tvořena hliníkem Ni_3Al nebo titanem Ni_3Ti . Pokud jsou ve slitině přítomny oba prvky, vzniká fáze $Ni_3(Ti,Al)$, kterou lze považovat za tuhý roztok titanu ve sloučenině Ni_3Al . S rostoucím podílem fáze γ' roste i žárupevnost. Současně se však zhoršuje tvárnost, proto lze tyto materiály zpracovávat pouze přesným litím. Žárupevnost zvyšují i karbidy typu $M_{23}C_6$, M_7C_3 nebo M_6C na hranicích zrn. Vytvoření těchto karbidů lze dosáhnout vhodným tepelným zpracováním. [2]

2 NIKLOVÉ SUPERSLITINY

Pojem superslitina označuje materiály pracující za zvýšených teplot, kde již nelze použít žárupevných ocelí, jejichž hranici pro použití je 650°C. Postupným vývojem bylo dosaženo slitin s velmi vysokou odolností proti tepelné, nízkocyklové i vysokocyklové únavě, oxidaci a vysokoteplotní korozi, vysoké meze pevnosti při tečení a plastičnosti. Niklové superslitiny jsou proto použitelné až do teplot 1100°C. (Obr. 2) [5,6]



Obr. 2 Vývoj niklových superslitin [7]

2.1 Struktura niklových superslitin

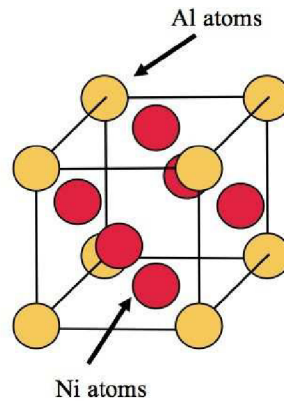
2.1.1 Tuhý roztok γ

Fáze γ je základní strukturní složkou niklových superslitin. Jde o substituční tuhý roztok přísadových prvků v niklu. Krystalizuje v kubické plošně středěné mřížce (FCC). Zpevnění této fáze se dosahuje legováním vysokotavitelnými kovy jako W a Mo, popřípadě Co, který zvyšuje stabilitu slitiny a hranici rozpustnosti přísad. [6]

2.1.2 Zpevňující fáze γ'

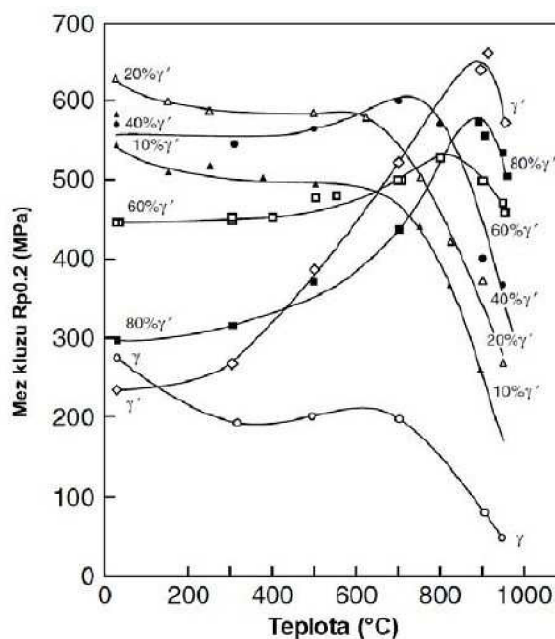
Fáze γ' je hlavní vytvrzující složkou ve většině niklových superslitin. Jedná se o intermetalickou fázi Ni_3Al nebo $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$, kterou lze považovat za tuhý roztok titanu ve sloučenině Ni_3Al . Uzlové body krystalické mřížky jsou obsazeny atomy Al nebo Ti, zatímco Ni zaujímá plošně středěné pozice (Obr. 3). Část Ti a Al však může být nahrazena a to zejména

Ta a Nb a část Ni kobaltem. Fáze γ' má, stejně jako tuhý roztok γ , kubickou plošně středěnou mřížku. Vzhledem k velmi malým rozdílům jejich parametrů jsou obě fáze vzájemně koherentně spojeny. Díky tomu tvoří značnou překážku pro pohyb dislokací, což posiluje slitinu. Na mezifázovém rozhraní je navíc nízká povrchová energie a struktura je proto stabilní, což je vlastnost vhodná pro aplikace za zvýšených teplot. [6,8]



Obr. 3 Uspořádání atomů v mřížce Ni_3Al fáze [9]

Postupným vývojem niklových superslitin se procentuální podíl precipitátů γ' zvyšoval. V současnosti u moderních slitin dosahuje podíl této fáze až 80%. Díky tomu vykazují zajímavou vlastnost typickou pro čistou vytvrzující fáze γ' a to pozitivní teplotní závislost meze kluzu (Obr. 4). [10]



Obr. 4 Vliv teploty a obsahu fáze γ' na mez kluzu niklových superslitin [10]

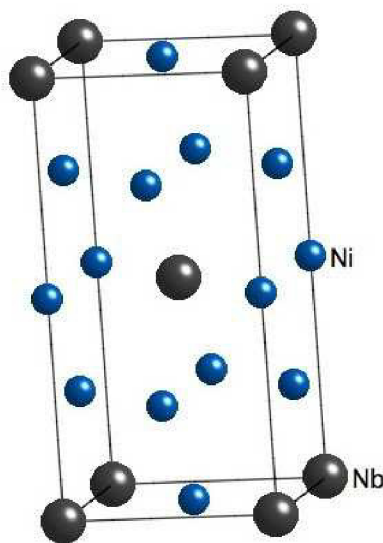
Vysokoteplotní vlastnosti byly zlepšovány také zvětšováním jednotlivých částic γ' , dále pak změnou tvaru částic na kvádrový. Dalším vývojem, u slitin s větším obsahem Al a Ti, bylo docíleno sekundární precipitace fáze γ' ve formě malých kulových částic. Spolu s velkými kvádrovými precipitáty tvoří tzv. bimodální mikrostrukturu, která má vyšší obsah fáze γ' (Obr. 5).[10,11]



Obr. 5 Bimodální struktura s vyšším obsahem fáze γ' [11]

2.1.3 Zpevňující fáze γ''

Zpevňující fáze γ'' se vyskytuje u slitin s vyšším obsahem Nb (In 718) nebo V. Jedná se o metastabilní fázi Ni_3Nb nebo Ni_3V krystalizující v tetragonální prostorově středěné mřížce (Obr. 6). Slitiny vytvrzované fází γ'' se používají v případě, kdy je požadována vyšší pevnost při nižších teplotách. [8]



Obr. 6 Uspořádání atomů v mřížce Ni_3Nb fáze [8]

2.1.4 Topologicky uspořádané TCP fáze

Při dlouhodobém provozu za vysokých teplot hrozí u komplexně legovaných superslitin precipitace intermetalických topologicky těsně uspořádaných fází (TCP) jako fáze σ , μ , Lavesovy fáze apod. Vyznačují se nevhodnou morfologií (dlouhé, tenké, protáhlé částice), obvykle se vylučují na hranicích zrn, jsou tvrdé a křehké. Dále jsou z velké části tvořeny žáruvzdornými prvky, o které ochuzují matici. Jejich vlivem tedy dochází ke zhoršení mechanických i creepových vlastností a zvyšuje se riziko iniciace trhlin či mikrotrhlin. [7, 12]

Nebezpečí vzniku těchto fází lze eliminovat změnou chemického složení. Prvotní vývoj se ubíral směrem ke snižování obsahu chromu z výchozího cca 20 hm. % na 11-13 hm. %. To ovšem vedlo ke zhoršení odolnosti proti korozi. Možnost opětovného zvýšení obsahu Cr přineslo až hodnocení fázové stability pomocí programu PHACOMP. Výpočet je založen na předpokladu, že TCP fáze jsou elektronovými sloučeninami a jejich výskyt je podmíněn určitým počtem neobsazených míst v elektronových obalech prvků obsažených v tuhém roztoku. [7]

2.1.5 Karbidy

V niklových superslitinách se obsah uhlíku pohybuje v rozmezí 0,02 – 0,3%. Ten spolu s W, Mo, Ta, Ti, Hf, a Nb tvoří primární karbidy typu MC. Tyto karbidy vznikají během krystalizace taveniny a v matici jsou rozmístěny náhodně jak uvnitř zrn, tak i po jejich hranicích. Obvykle se vyskytují v podobě větších nepravidelných částic s kubickou morfologií. V případě, že slitina obsahuje dostatečné množství Mo, Cr a W, mají tyto karbidy tendenci se v provozních podmínkách nebo při tepelném zpracování měnit na karbidy sekundárního typu $M_{23}C_6$ nebo M_6C . Tomuto procesu lze zabránit zvýšením obsahu Nb ve slitině, díky kterému se primární karbidy stabilizují do teplot 1200 – 1260°C.

Ve většině niklových superslitin jsou primární karbidy spíše nežádoucí. Při dlouhodobém mechanickém nebo tepelném zatěžování mohou iniciovat únavovou trhlinu. Důležitá je proto velikost a množství karbidů, což lze ovlivňovat především chemickým složením slitiny a řízenou rychlostí ochlazování.

Sekundární karbidy mohou mít jak kladný, tak i záporný vliv na strukturu. Pokud jsou vyloučeny na hranicích zrn ve formě samostatných globulí, mohou mírně zlepšovat odolnost proti creepu tím, že brání prokluzu na hranicích zrn. V případě, že se karbidy vyloučí na hranicích zrn v podobě souvislého filmu, dochází k degradaci vlastností materiálu a to ke snížení tažnosti a výraznému zvýšení náchylnosti k tvoření trhlin po hranicích zrn. Karbidy $M_{23}C_6$ jsou tvořeny převážně Cr zatím co karbidy M_6C , které jsou při vyšších teplotách stabilnější, hlavně Mo a W. [11,12]

2.2 Charakteristika vybraných slitin

Slitina IN 713 LC (LC – low carbon) je nízkouhlíkovou modifikací slitiny IN 713C. Řadí se mezi první lité slitiny tzv. I. generace, kde byla při výrobě využita vakuová technologie. Snížení obsahu C vedlo ke snížení podílu karbidů ve struktuře, zlepšení některých materiálových charakteristik (především plasticity) a zvýšení teploty likvidu

a solidu (IN 713C $T_L - 1288^\circ\text{C}$, $T_S - 1260^\circ\text{C}$, IN 713LC $T_L - 1321^\circ\text{C}$, $T_S - 1288^\circ\text{C}$). Po odlití není třeba odlitky tepelně zpracovávat. [13]

Tab. 1 Nominální chemické složení slitin IN 713C a IN 713LC (hm. %, Ni - základ) [13]

Slitina	C	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	Zr	B
IN 713C	0,12	12,5	-	4,2	-	2,0	-	0,8	6,1	0,10	0,012
IN 713LC	0,05	10,0	-	4,5	-	2,0	-	0,6	5,6	0,10	0,010

Slitina IN 738 LC je nízkouhlíkovou modifikací slitiny IN 738C. Obě se řadí ve srovnání s IN 713 LC k vývojově vyšším slitinám II. generace. Nižší obsah uhlíku vede ke snížení podílu karbidů ve struktuře. Žárupevnost slitiny je srovnatelná se slitinou IN 713 LC, ale je odolnější vůči vysokoteplotní korozi a to díky vyššímu obsahu chromu a dalším legujícím prvkům. Vyšší obsah chromu však snižuje žárupevnost, proto je nutné tepelné zpracování, aby se zvýšil podíl fáze γ' . Nejčastěji se používá následující postup: $1120^\circ\text{C}/2$ hod./vzduch + $845^\circ\text{C}/24$ hod./vzduch. Slitina je technologicky náročnější vzhledem ke komplexnějšímu legování, kde při nevhodné kombinaci legur existuje nebezpečí vzniku fáze σ . Precipitaci této fáze lze zamezit optimalizací chemického složení použitím metody PHACOMP. [13]

Tab. 2 Nominální chemické složení slitin IN 738C a IN 738LC (hm. %, Ni - základ) [13]

Slitina	C	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	Zr	B
IN 738C	0,17	16,0	8,5	1,7	2,6	0,9	1,7	3,4	3,4	0,10	0,010
IN 738 LC	0,10	16,0	8,5	1,75	2,6	0,85	1,75	3,4	3,4	0,05	0,010

Slitina IN 792 se také řadí mezi materiály II. generace a oproti slitině IN 738LC je vývojově mladší a má vyšší žárupevnost při srovnatelné žáruvzdornosti. Vyrábí se v několika provedeních, které se navzájem mírně liší v chemickém složení. Z modifikace IN 792 5A jsou odvozeny IN 792 5B a IN 792 5C, které navíc obsahují 0,5 resp. 0,9% hafnia a jsou také dražší. Podobně jako u slitiny IN 738 LC se optimálních vlastností dosahuje tepelným zpracováním. To může být dvoustupňové, které je totožné s předchozím postupem pro slitinu IN 738 LC nebo třístupňové $1120^\circ\text{C}/2$ hod./vzduch + $845^\circ\text{C}/4$ hod./vzduch + $760^\circ\text{C}/16$ hod./vzduch. Slitina je taktéž náchylná na vznik fáze σ , je tedy nutné chemické složení optimalizovat metodou PHACOMP. [13]

Tab. 3 Nominální chemické složení slitin IN 792 a IN 792 5A (hm. %, Ni - základ) [13]

Slitina	C	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ta	Ti	Al	Zr	B
IN 792	0,12	12,4	9,0	1,9	3,8	-	3,9	4,5	3,1	0,10	0,020
IN 792 5A	0,08	12,5	9,0	1,9	4,17	-	4,17	3,97	3,37	0,03	0,015

Slitina MAR-M 247 patří mezi pokročilé superslitiny. Je určena pro klasické odlévání, kde je výsledná struktura tvořena rovnoosými zrny. Po drobné úpravě chemického složení lze tuto slitinu použít i pro technologii usměrněného tuhnutí a získání sloupcových zrn orientovaných ve směru zatěžování. Slitina se vyznačuje vysokým obsahem Co a W, což přispívá ke zpevnění matrice a zvýšení tepelné stability. Vzhledem k výjimečným mechanickým vlastnostem za vysokých teplot a odolnosti vůči oxidaci a korozi se slitina používá především na extrémně vysokoteplotně namáhané součásti leteckých motorů. Pro zvýšení podílu vytvrzující fáze γ' je nutné tepelné zpracování, obvykle dle postupu 1080°C/4 hod./vzduch + 870°C/20 hod./vzduch. [14, 15]

Tab. 4 Chemické složení slitiny MAR-M 247 (hm. %, Ni - základ) [14]

Slitina	C	Cr	Co	Mo	W	Ta	Al	Ti	B	Zr	Hf
MAR-M 247	0,15	8	10	0,6	10	3	5,5	1,0	0,015	0,03	1,5

Slitina ŽS6K patří mezi slitiny I. generace. Její žárupevnost a žáruvzdornost je srovnatelná se slitinou IN 738LC. Pro zvýšení podílu fáze γ' a dosažení požadovaných vlastností je nutné slitinu tepelně zpracovávat. Tepelné zpracování je v podobě: 1225 °C po dobu 4 hod. s následným ochlazením v proudu Ar na teplotu 900 °C za 10 min a dochlazením na vzduchu. Dále jsou odlitky žíhány za teploty 950 °C po dobu 2 hod. Při nevhodné kombinaci přísadových prvků hrozí nebezpečí vzniku nežádoucí fáze σ . Je proto nutné optimalizovat chemické složení metodou PHACOMP. [14,16]

Tab. 5 Chemické složení slitiny ŽS6K (hm. %, Ni - základ) [14]

Slitina	C	Cr	Co	Fe	Mo	W	Al	Ti	B	Si
ŽS6K	0,14	10,21	4,58	0,39	4,26	5,34	5,61	2,91	0,014	0,14

2.3 Zpracování niklových superslitin

Vzhledem k tomu, že moderní niklové superslitiny není možné tvářet a jsou obtížně obrobitelné, je lití metodou vytavitelného modelu prakticky jedinou technologií pro výrobu součástí z těchto materiálů. Tato technologie umožňuje vyrábět tvarově velice složité odlitky

v úzkých rozměrových tolerancích a s velmi dobrou jakostí povrchu. Výsledné odlitky tedy mají minimální přídatky na opracování a některé jejich části není třeba opracovávat vůbec.

Dále je nutné zpracovávat tyto slitiny ve vakuu vzhledem k přítomnosti prvků s vysokou afinitou ke kyslíku jako jsou Al nebo Ti. [6]

2.3.1 Technologie vytavitelného modelu

První krokem v celém procesu technologie je výroba matečné formy respektive matečného modelu. Dle způsobu výroby se matečné formy dělí na obráběné a zhotovené dle matečného modelu. Obráběné formy jsou nejnákladnější na výrobu. Výhodou je však dlouhá životnost a vysoká přesnost. Tyto formy se proto používají ve velkosériové výrobě. Obvykle se vyrábí z oceli nebo slitin hliníku. Formy vyráběné dle matečného modelu mají nižší životnost i přesnost. Využívají se při menších sériích a pro méně náročné odlitky.

Dalším krokem je výroba voskového modelu. Ta spočívá v odlití nebo vstříknutí vosku do matečné formy. Gravitační lití modelů se používá pouze zřídka zpravidla na výrobu pomocných modelů, jako jsou vtoky. Vstřikování voskových modelů se provádí na speciálních vstřikovacích lisech. Ty umožňují regulovat vstřikovací tlak, rychlost plnění, velikost dotlaku a jeho trvání. Teplota vstřikovaného vosku se pohybuje v rozmezí 55 – 90°C. Hotové voskové modely se poté skládají do modelových sestav. V případě větších odlitek obsahuje modelová sestava pouze jeden model. Pokud jsou odlitky menší, lepí se na vtokovou soustavu ve větším počtu a tvoří tzv. stromeček. Po dokončení je nutné celou modelovou sestavu odmastit od separačního prostředku používaného proti nalepování vosku na matečnou formu.

Následuje výroba keramické skořepiny. Princip spočívá v namáčení modelové sestavy do keramické suspenze, následným posypáním žáruvzdorným materiálem a sušením. Tento postup se opakuje dokud nemá skořepinová forma dostatečný počet vrstev, který se obvykle pohybuje mezi 5 - 15. Celý proces probíhá v klimatizovaných prostorech, kde je hlídána jak teplota tak i relativní vlhkost vzduchu.

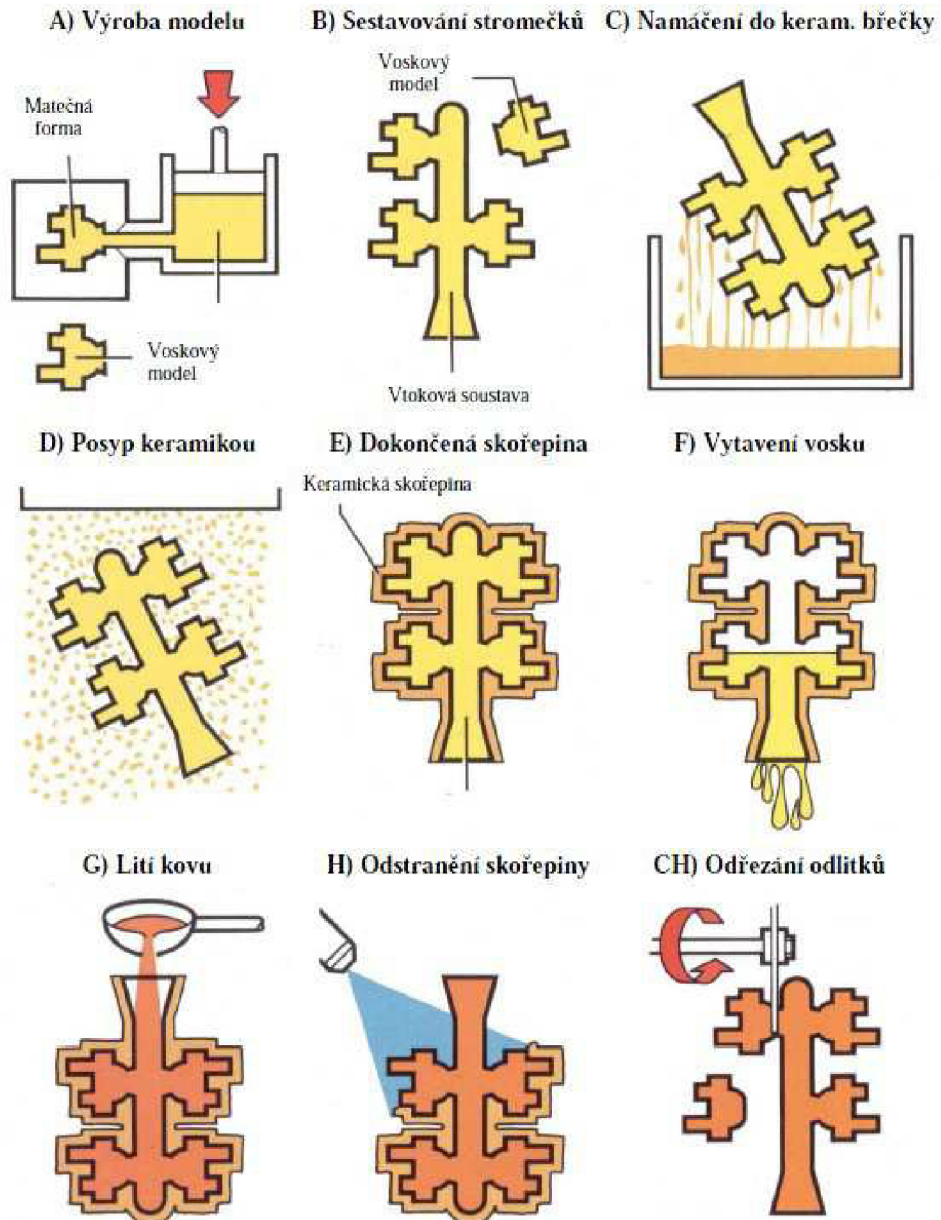
Po vysušení posledního obalu skořepiny je nutné odstranit voskový model. Problémem je rozdílná tepelná roztažnost voskových směsí a keramické skořepiny. Ohřev proto musí být dostatečně rychlý. Díky tomu je skořepina vystavena tepelnému šoku, kvůli kterému se nataví tenká vrstva vosku přiléhající na skořepinu. Tato tzv. dilatační spára zachytí následné rozměrové změny vosku. Vytavování vosku probíhá nejčastěji v bojlerklávech, kde je ohřev skořepiny zajištěn vodní párou. V některých případech se vosk vytavuje v žihacích pecích.

Po vytavení vosku v bojlerklávu je nutné keramickou skořepinu vyžít. Důvodem je dosažení požadovaných mechanických vlastností formy, dále odstranění zbytků vosku a vody ze skořepiny a její předeřev před samotným litím. Žihací teploty se obvykle pohybují v rozmezí 900 až 1100 °C.

Samotné odlévání probíhá za atmosférického tlaku (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Právě vakuum je nutné při odlévání niklových superslitin. Důvodem je přítomnost prvků jako je Al, Ti nebo Cr, které mají vysokou afinitu ke kyslíku a jsou v těchto

slutinách přítomny. Jak již bylo uvedeno, s výhodou se odlévá do právě vyžíhaných přehřátých skořepin. Eliminuje se tepelný šok na formu a omezuje se riziko nezaběhnutí kovu.

Po zchlazení kovu se oklepe převážná část skořepinové formy. Ze špatně přístupných míst je nutné keramiku mechanicky otryskat nebo ji odstranit chemicky louhováním. Následuje odstranění vtoků, apretura, případně tepelné zpracování a kontrola (Obr. 7). [17, 18]



Obr. 7 Schéma technologie vytavitelného modelu [17]

2.3.2 Odlévání niklových superslitin

Na jakost přesně litých odlitků z niklových superslitin, jako jsou žárové části turbodmychadel a spalovacích turbín, jsou kladeny velmi vysoké nároky. Limitovány jsou především velikostí s množstvím vměstků. V tenkých listech lopatek se pak jejich výskyt většinou nepřipouští vůbec. Jedním z jejich zdrojů mohou být reakce mezi taveninou a atmosférou. Proto je nutné tyto slitiny odlévat ve vakuu. [7]

Tavení ve vakuu přináší řadu výhod. Kov je při tavení podroben hlubokému odplynění, dokonalé dezoxidaci a snížení množství nekovových vměstků. Aby nedocházelo ke vzniku těchto vměstků i u slitin obsahujících silná dezoxidovadla jako je Al, je nutné snížit parciální tlak kyslíku nad taveninou pod velmi nízkou úroveň. Za předpokladu, že se vlivem natékání pece udržuje v tavící komoře atmosférické složení vzduchu, bylo by nutné např. pro slitinu niklu legovanou 6% Al a při teplotě 1600°C udržovat celkový tlak $p < 2 \cdot 10^{-11}$ Pa. Dosažení těchto nízkých tlaků je v průmyslových vakuových pecích prakticky nemožné. [6,7]

Pro dosažení natavené slitiny bez oxidických filmů na její hladině je nutná přítomnost uhlíku. Ten má v niklových superslitinách při teplotě 1500 – 1600 °C a tlaku dosahovaném v běžných vakuových pecích nejvyšší afinitu ke kyslíku a tím chrání ostatní prvky před oxidací. Vzhledem k tomu, že CO je plyn, je hladina natavené slitiny kovově čistá. [7]

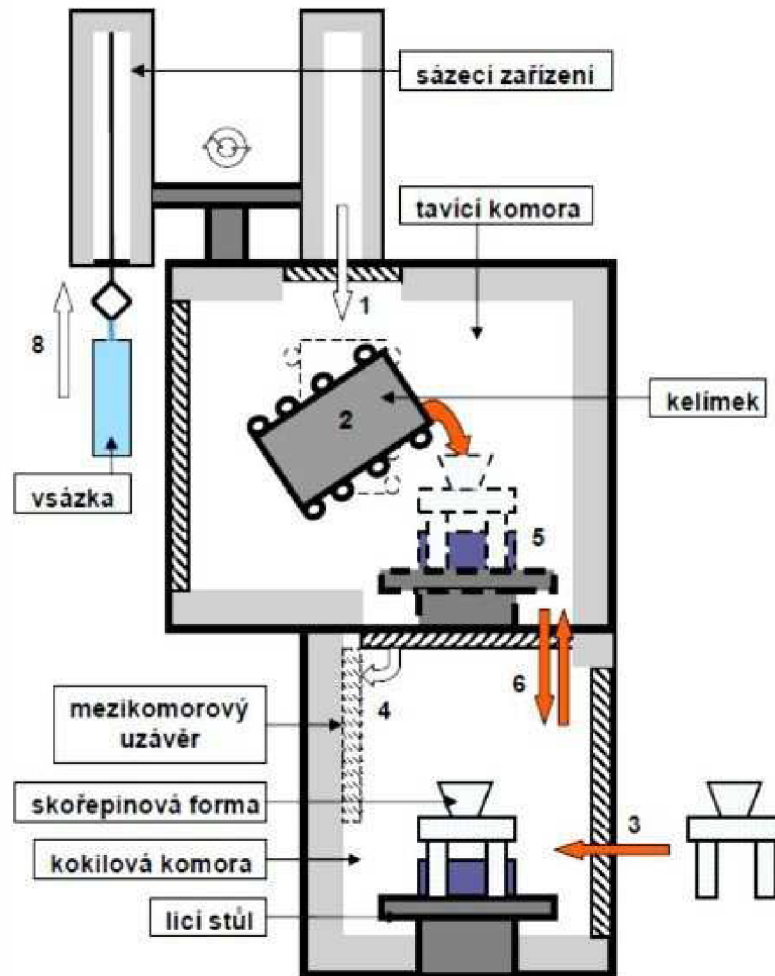
Niklové superslitiny se tedy zpracovávají ve vakuových indukčních pecích. Ty se dělí na pece hutní a slévárenské. Hutní vakuové indukční pece slouží k výrobě ingotů o přesně stanoveném chemickém složení. V těchto pecích se uskutečňují různé technologické operace, aby byly splněny podmínky kladené na produkovaný materiál. Ve slévárenských pecích dochází už jen k natavení vsázky v podobě ingotů předepsaného složení a odlití samotného odlitku. Během tavy tedy neprobíhají žádné rafinační pochody.

Z technologického hlediska se dle způsobu práce dělí na:

- Vakuové pece pracující periodicky (jednokomorové)
- Vakuové pece pracující nepřetržitě (dvoukomorové)

U pecí jednokomorových dochází po každé tavně k zavzdušnění vakuové komory. Komora je následně otevřena a je z ní vyjmuta kokila či forma. Následně se vloží forma nová, do kelímku je vložena vsázka, komora se zavře odsaje a probíhá nová tavně. Tyto pece se dnes již používají pouze zřídka a to jako pece laboratorní nebo hutní.

U dvoukomorových pecí nedochází k zavzdušňování tavící komory po každé tavně, ale pouze při výměně kelímku. Přísun forem či kokil je prováděn přes vakuový (mezikomorový) uzávěr z kokilové komory. Také vsázka je zavážena přes vakuový uzávěr sázecím zařízením. Díky tomu může probíhat příprava vsázky a výměna formy či kokily, zatímco se materiál taví ve vakuu. Toto konstrukční řešení vede ke zvýšení produktivity pece (Obr. 8). [6]



Obr. 8 Schéma dvoukomorové indukční vakuové pece [5]

3 ŘÍZENÍ KRYSTALIZACE NIKLOVÝCH SUPERSLITIN

Primární neboli licí struktura do značné míry ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti odlitků z žárupevných slitin. Pro dosažení co nejlepších vlastností je tedy nezbytné licí strukturu ovlivňovat. Řízení krystalizace bylo zaměřeno dvěma odlišnými směry:

- Odlévání odlitků s jemnými rovnoosými zrny
- Odlévání odlitků s orientovanými sloupcovými zrny a monokrystaly

Důvodem pro zjemňování zrna u odlitků ze superslitin niklu je zvýšení odolnosti materiálu proti nízkocyklové, vysokocyklové a tepelné únavě. Také se zlepšují technologické vlastnosti, neboť jemnější zrno snižuje sklon k tvorbě trhlin za tepla. Odlitky s rovnoosou strukturou však mají sníženou žárupevnost. Slabými místy struktury jsou hranice zrn kolmé na směr aplikovaného napětí. Důsledkem jsou horší creepové vlastnosti. [6]

K odstranění příčných hranic zrn byla vyvinuta technologie usměrněné krystalizace, která umožňuje získat odlitek turbínové lopatky tvořený pouze sloupcovými zrny. Tato zrna mají dendritickou strukturu s primárními osami rovnoběžnými se směrem namáhání.

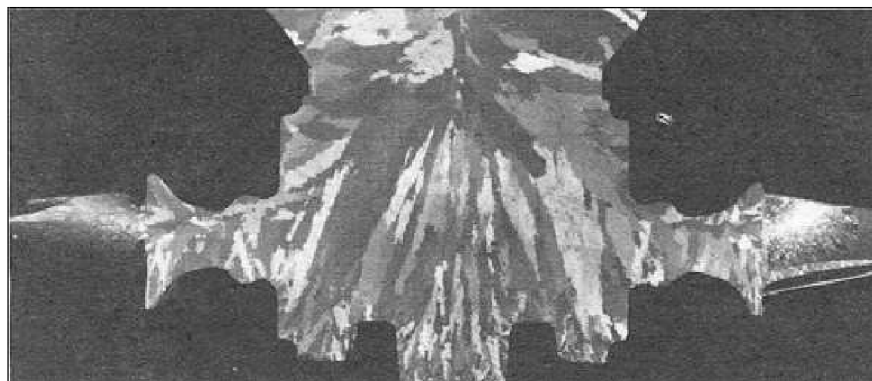
Dalším krokem ve vývoji usměrněné krystalizace superslitin niklu představuje výroba monokrystalů. Pro tuto technologii se používají specifické slitiny vyvinuté s ohledem na specifika této technologie. Vzhledem k absenci hranic zrn tyto slitiny neobsahují prvky, které tyto hranice zpevňují (C, B Zr, Hf). To vede zejména ke zvýšení teploty počátku tavení. Zlepšení žárupevnosti je dosahováno zvyšováním objemového podílu vytvrzující fáze γ' a zpevňujících prvků Re, W, Mo, Ta a Ru pod hranicí vzniku TPC. Další úpravy chemického složení mají za cíl minimalizovat rozdíl v parametrech mřížek γ a γ' . Tyto úpravy vedly ke zvýšení pracovní teploty monokrystalů až na 1200°C. [19]

3.1 Odlévání odlitků s jemnými rovnoosými zrny

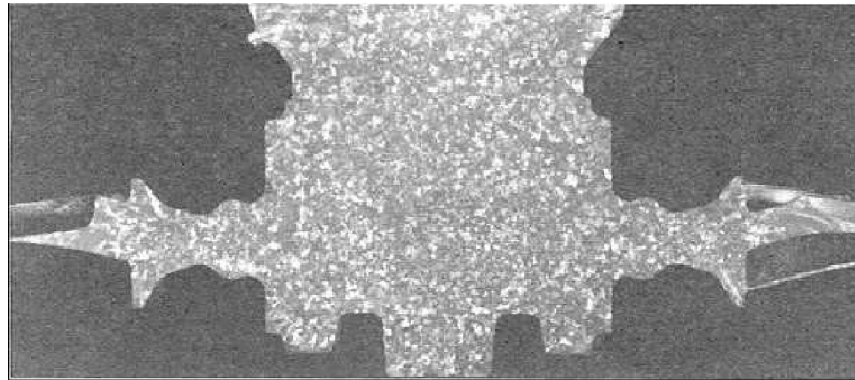
Při odlévání odlitků z niklových superslitin metodou vytavitelného modelu je používáno zjemňování zrna pomocí nukleačních činidel obsažených v licí vrstvě keramické skořepinové formy. Používány jsou především sloučeniny kobaltu jako CoO a CoAl_2O_4 . Tato činidla se přidávají jako část plniva do keramické suspenze užívané pro zhotovení prvního neboli licího obalu formy. Touto technologií však není možné zjemňovat zrno v discích odlitků axiálních turbínových kol a v nábojích axiálně radiálních turbínových kol. Pro zjemňování zrna v těchto objemných partiích byly vyvinuty, popřípadě jsou vyvíjeny jiné metody. [6, 18]

3.1.1 Metody zjemňování zrn

Proces Grainex byl roce 1982 vyvinutý firmou Howmet. Tato technologie je založena na ulamování os rostoucích dendritů během tuhnutí odlitku. Tyto ulomené části jsou rozplavovány do středu odlitku, kde rostou a tak působí jako krystalizační zárodky. Pomocí této metody je možné dosáhnout výrazně jemnější struktury, což vede k lepší homogenitě celého odlitku (Obr. 9 a 10). [20, 21]



Obr. 9 Konvenčně lité turbínové kolo ze slitiny MAR-M 247 [21]



Obr. 10 Turbinové kolo ze slitiny MAR-M 247 lité metodou Grainex [21]

Proces Microcast-X byl představen v roce 1983 rovněž firmou Howmet. Princip metody spočívá v odlévání slitiny s teplotou 10°C nad teplotou likvidu. Turbulentní proudění taveniny během lití a její nízké přehřátí vede k rychlému vzniku velmi jemných zrn s buněčnou strukturou. Tato struktura dosahuje zrnitosti v rozsahu ASTM 3 až 5, ve srovnání s metodou Grainex, která vykazuje dendritickou strukturu s velikostí zrn v kategorii ASTM 0. [21]

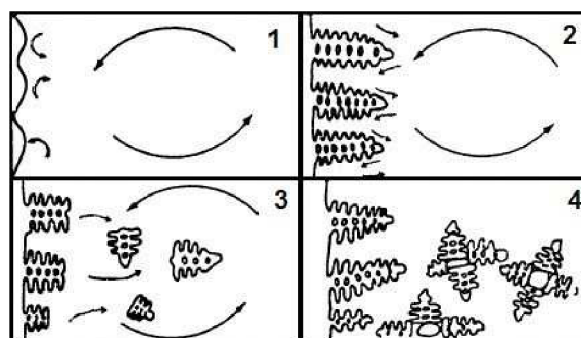
Proces FGP (fine grain casting proces) vyvinutý firmou Ai Research Casting Company je principiálně podobný procesu Microcast-X. Metoda spočívá ve zjemňování struktury odstředivým litím s malým přehřátím taveniny nad teplotu likvidu.

Další vyvíjená metoda funguje na principu zjemňování zrna zvýšením rychlosti heterogenní nukleace v celém objemu odlitku za pomoci intermetalických inokulantů.

Poslední zmíněná metoda spočívá naopak v odstranění nežádoucích nekovových vměstků přehřátím taveniny na vysoké teploty. Nukleace pak probíhá na jiných početnějších částicích a vzniká tak jemnozrná struktura. [19]

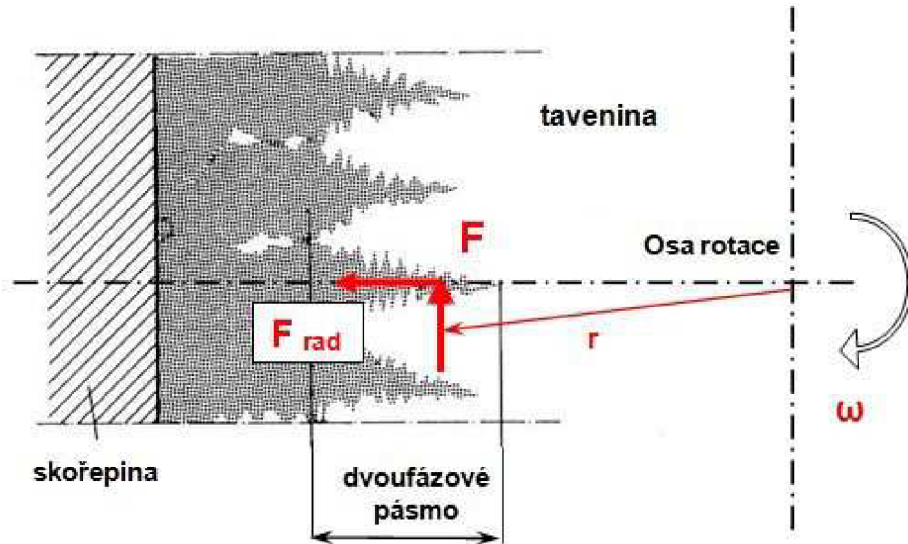
3.1.2 Metoda zjemňování zrna používaná v DPL PBS

Na DPL PBS se pro zjemnění zrna v odlitku využívá rotace skořepiny při lití a její následné oscilace při tuhnutí odlitku. To vede k ulamování rostoucích dendritů, které jsou rozplavovány do taveniny ve středu odlitku, kde působí jako krystalizační zárodky. Stejně jako v případě metody Grainex je proces založen na teorii multiplikace dendritů (Obr. 11).



Obr. 11 Princip multiplikace dendritů [6]

K destrukci dendritů dochází vlivem setrvačných sil při zrychlení tj. při změně rychlosti rotace keramické skořepinové formy. Při rotaci konstantní rychlostí k tomuto jevu nedochází, tedy pouhá rotace skořepiny nevede ke zjemnění zrna. Síly, které na dendrity působí jsou vyvolány jak setrvačnými silami samotných dendritů tak i tlakovým působením tekutého kovu v mezidendritických prostorech (Obr. 12). [19]



Obr. 12 Síly působící na dendrit při změně rychlosti otáček [19]

Velikost setrvačných sil se dá přibližně vyjádřit vztahem:

$$F = m \times \frac{dv}{dt} = m \times r \times \frac{d\omega}{dt} = \rho \times V \times r \times 2\pi \times \frac{dn}{dt}$$

Kde: m – hmotnost jednotky objemu r – poloměr rotace
 ρ – hustota kovu V – objem jednotky kovu
 $\frac{dn}{dt}$ – změna rychlosti rotace

Velikost sil se tedy mění s okamžitým poloměrem rotace a s rychlostí změn otáček, tedy s rychlostí roztáčení či brzdění rotačního stolu.

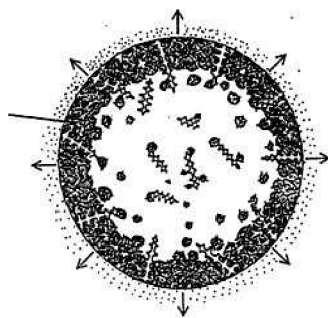
Krom setrvačné síly na kov působí i síla odstředivá $F_{rad} = m \times r \times \omega^2$, která se mění se změnou otáček od nuly do maxima. [19]

Jak bylo uvedeno výše, samotná rotace skořepiny nevede ke zjemnění struktury. Odstředivá síla, která při rotaci vzniká však zlepšuje zabíhavost kovu do tenkých lopatek po obvodu turbínových kol. Tato skutečnost umožňuje snížit teplotu lití a tedy i teplotní gradient odvodu tepla při tuhnutí, což vede ke vzniku menších zrn. [1]

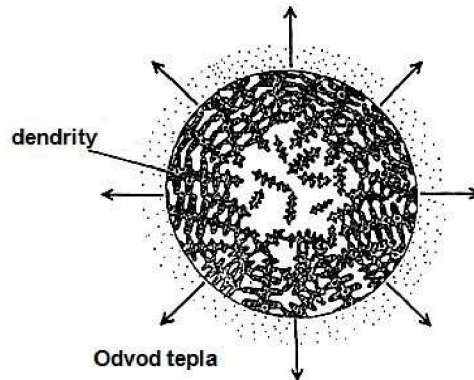
Dalším krokem bylo zavedení řízeného brzdění skořepiny ihned po nalití kovu. Setrvačné síly tekutého kovu dotlačují kov do tenkých odtokových hran lopatek. Tento proces vede ke zlepšení zabíhavosti a zároveň je dosaženo zjemnění struktury na lopatkách turbinového kola.

Všechny výše uvedené metody zjemňující zrna v odlitku vedou ke změně vrstveného (exogenního) tuhnutí na objemové (endogenní) (Obr. 13). V odlitku se tak dá očekávat větší výskyt mikrostaženin. [19]

Exogenní (vrstvené) tuhnutí

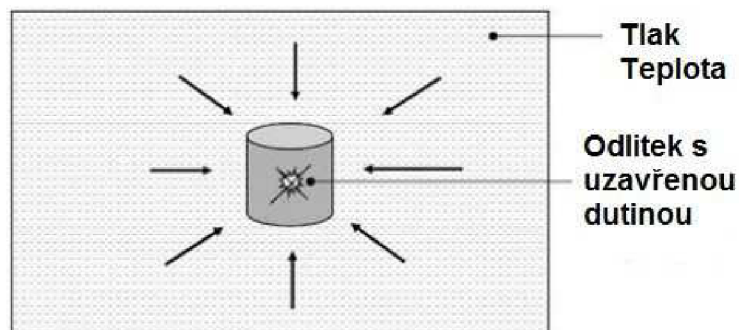


Endogenní (objemové) tuhnutí



Obr. 13 Exogenní a endogenní tuhnutí [18]

Tyto mikrostaženiny je třeba odstraňovat pomocí technologie HIP (Hot Isostatic Pressing) neboli izostatického lisování za vysokých teplot. V zásadě se jedná o lisování při vysoké teplotě, kde na odlitek působí tlak stlačeného plynu, nejčastěji Ar. Plyn působí na těleso ve všech směrech, tím dochází k zacelování mikrostaženin, aniž by se měnil tvar odlitku v jakémkoliv směru (Obr. 14). Tento proces má pozitivní vliv především na únavové vlastnosti materiálu. [6, 22]



Obr. 14 Proces HIP [22]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem optimálních podmínek tuhnutí turbínových axiálních kol vyráběných na Divizi přesného lití v První brněnské strojírně Velká Bíteš, a.s..

Kola jsou vyráběna metodou vytavitelného modelu ze slitiny Inconel 713LC. Jsou odlévána ve vakuu za rotace a následné oscilace skořepinové formy.

Cílem práce je vyhodnotit vliv parametrů oscilace na odlitek. Sledována byla makrostruktura odlitků, tedy vliv oscilace na zjemnění zrna, dále mechanické vlastnosti a to mez pevnosti a mez kluzu za pokojové teploty, creepové vlastnosti a mikrostruktura vyhodnocená v axiálním řezu odlitku. Na základě těchto poznatků poté navrhnout optimální podmínky oscilace pro dosažení jemnozrnné struktury a co nejlepších mechanických vlastností.

4.1 Představení Divize přesného lití

Divize přesného lití První brněnské strojírně ve Velké Bíteši je největší slévárnou přesného lití (využívající technologii vytavitelného modelu) v České Republice a řadí se mezi nejmodernější ve střední a východní Evropě. [23]

Výrobní program slévárny tvoří turbínová a rozváděcí kola turbodmychadel, turbínové lopatky axiálních turbodmychadel, oběžné a rozváděcí lopatky stacionárních plynových turbín, oběžná a rozváděcí kola energetických jednotek, proudových motorů a komponentů klimatizačních systémů pro letecký průmysl. Dále pak rozvlákňovací hlavy pro sklářský průmysl, kolení náhrady pro zdravotnictví a další odlitky. Část produkce se odlévá za atmosférického tlaku, většina se však odlévá ve vakuu. Mezi používané vakuově lité materiály se řadí především niklové a kobaltové superslitiny jako IN 100, IN 713C, IN 713LC, IN 738LC, IN 792-5A, IN 939, Mar M247, B1914, Stellite 6, Stellite 12 nebo CoCrMo. Příkladem odlévaných atmosférických slitin mohou být např.: 141 I, FSX 414, Stelite 31 a další. [23, 24]

Pro výrobu voskových modelů má slévárna k dispozici deset vstřikovacích lisů (Obr. 15).



Obr. 15 Vstřikovací lis [25]

Následná výroba skořepinových forem probíhá v obalovnách. Slévárna disponuje keramickým systémem jak na lihové, tak i vodní bázi pojiva. Primární obaly se vyrábí ručně. Pro výrobu zpevňujících obalů jsou obě obalovny vybaveny robotickými linkami. Linka na lihové pojivo je opatřena manipulátorem s pěti stupni volnosti, linka na vodní pojivo pak robotem se šesti stupni volnosti (Obr. 16). Primární obaly se dělají ručně. Voskové modely se vytavují pomocí přehřáté páry ve dvou bojlerklávech (Obr. 17).

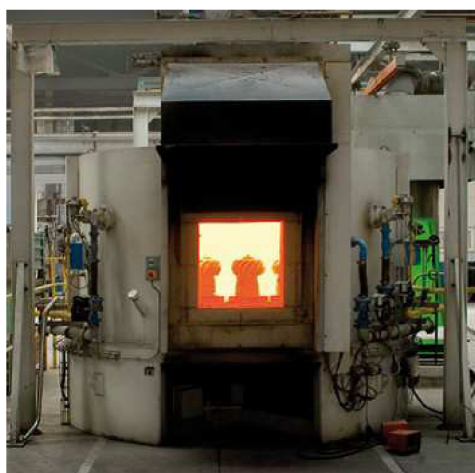


Obr. 16 Robot vodní obalovací linky [23]



Obr. 17 Bojlerkláv [25]

K předžhání a žhání keramických skořepinových forem slouží dvě elektrické a čtyři plynové karuselové pece (Obr. 18). K tavení slitin odlévaných za atmosférického tlaku jsou určeny dvě indukční pece I stol o objemu 120 resp. 150 kilogramů kovu. K odlévání ve vakuu je k dispozici šest vakuových dvoukomorových indukčních pecí (Obr. 19). U novějších typů je možné natavit materiál o hmotnosti až 65 kilogramů a díky instalované rotační jednotce odlévat za rotace či oscilace forem.



Obr. 18 Karuselová žhací pec [23]



Obr. 19 Vakuová dvoukomorová indukční pec [23]

Vytloukání odlitků se provádí pomocí dvou pneumatických kladiv (Obr. 20). Slévárna je vybavena jak tryskači s metacimí koly s abrazivem v podobě nerezových broků (Obr. 21), tak tlakovými tryskači s korundovým abrazivem.



Obr. 20 Pneumatické kladivo [26]



Obr. 21 Dvoukomorový závěsný tryskač [23]

4.2 Postup výroby součásti

Vyráběná součást je turbínové axiální kolo o průměru 297 mm a výšce 150 mm. Délka lopatek je 44 mm. Hmotnost čistého odlitku činí 9 kg, přičemž hmotnost odlévaného kovu je 20 kg (Obr. 22).



Obr. 22 Turbinové axiální kolo [26]

Voskové modely jsou vyráběny na vstřikolisu od firmy Shell-O-Matic v kovové dělené matečné formě (Obr. 23). Forma je ošetřena separačním prostředkem pro snadnější

vyjímání modelů. Používá se silikonový olej Lukosiol M 50 nebo Silkal 93-sprej. Matečný vosk od firmy Remet je vstřikován při teplotě 61°C tlakem 58,6 baru. Svírací tlak formy je 75,8 baru. Dotlačovací tlak je totožný s tlakem vstřikovacím a je udržován až do vyjmutí voskového modelu z formy. Celkový čas od vstříknutí vosku po vyjmutí hotového modelu činí 4 min 30s. Voskové modely se poté nechají stabilizovat po dobu minimálně 24 hodin v klimatizovaných prostorách. Následně se k voskovým modelům připojí vtokové kůly fungující také jako nálitky (Obr. 24).



Obr. 23 Voskový model v matečné formě [26]



Obr. 24 Modelová sestava [25]

Před samotným obalováním je nutné modelové sestavy odmastit od separačního prostředku. K tomu se používá vodou ředitelná odmašťovací kapalina IMPASOL HCA Rapid.

Skořepinová forma je tvořena 10 obaly. Poslední obal je poté ještě přemočen v keramické suspenzi. Postup obalování je popsán v Tab. 6.

Tab. 6 Postup obalování

Číslo obalu	Druh břechky	Viskozita břechky	Posyp	Doba sušení	Výroba
1.	Zirkonová břechka s 5,5% hlinitanu kobaltnatého	25 ± 1 sec	Molochit 50/80	12 hod.	Ručně
2.	molochitová břechka (vodní pojivo)	17 ± 1 sec.	Molochit 30/80	5 hod.	Ručně
3. – 4.	molochitová břechka (lihové pojivo)	12 ± 1 sec.	Molochit 16/30	5 hod.	Robot
5. až 10.	molochitová břechka (lihové pojivo)	12 ± 1 sec.	Molochit 16/30	3 hod.	
11.	přemočení v molochitové břechce	12 ± 1 sec		1 hod.	

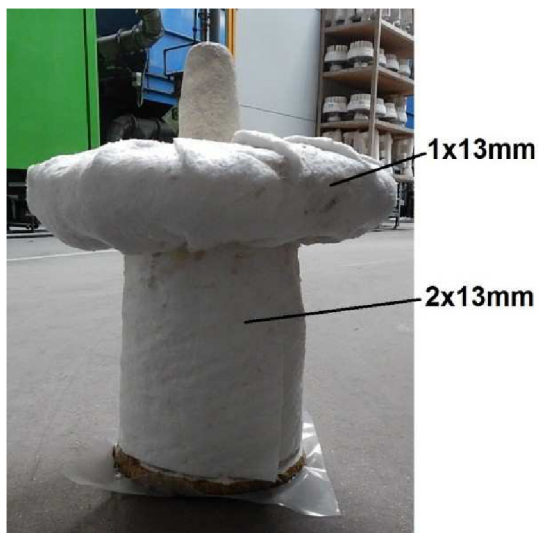
První dva obaly se vyrábí ručně s použitím vodního pojiva. Sušení těchto obalů probíhá přímo v obalovně, kde je udržovaná teplota 24±2°C a relativní vlhkost v rozmezí 30

– 40%. Formy nejsou při sušení vystaveny proudu vzduchu. Další obaly jsou zhotoveny na robotické obalovací lince na lihové pojivo. Při sušení keramických obalů na bázi lihového pojiva jsou formy vystaveny proudu vzduchu okolo 2m/s při teplotě $24\pm 2^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 60- 70%. Poslední přemočení v keramické břečce zabraňuje vydrolování posypového materiálu z předchozího obalu.

Po vysušení obalů je vosk vytaven pomocí přehřáté páry v bojlerklávu při teplotě 180°C a tlaku 9 barů. Skořepina se poté z důvodu vysušení a relaxace pnutí nechá bez pohybu odležet po dobu min. 24 hodin. Následuje předžihání trvajícím minimálně tři hodiny na teplotě min. 930°C (běžně 950°C). Předžihání slouží k odstranění zbytků vosku ve skořepině a zajištění sintrace skořepinové formy. Dosahuje se tím zlepšení mechanických vlastností skořepinové formy. Poté vyžihání a přirozeném vychlazení na pokojovou teplotu se forma vypláchne, čímž se odstraní případné nečistoty a zbytky popelovin. Po vyschnutí se vtok přelepí igelitem, aby se do skořepiny nedostaly další nečistoty.

Forma se následně tepelně izoluje pomocí izolačního materiálu Fiberfrax Durablanket od firmy Unifrax. Jedná se o rohože vyrobené ze žáruvzdorných keramických vláken (53-58% SiO_2 , 42-47% Al_2O_3). Materiál se vyznačuje stabilitou za vysokých teplot, nízkou tepelnou vodivostí, tepelnou akumulací a odolností vůči teplotním šokům. Izolace snižuje odvod tepla a tím prodlužuje dobu tuhnutí resp. dosazování nálitku. Touto technikou lze dosáhnout vyššího využití kovu a tím snížení nezbytné vsázky (objemu nálitku).

Lopatky jsou izolovány jednou vrstvou tkaniny o tloušťce 13 mm, nálietek pak dvěma vrstvami. Způsob zabalení skořepiny je zřejmý z (Obr. č. 25 a 26).



Obr. 25 Způsob izolace skořepiny [26]



Obr. 26 Způsob izolace skořepiny (horní pohled) [26]

Zaizolovaná skořepina je před litím vložena do plynové žíhací pece, kde je žihána na teplotu 1130°C po dobu minimálně čtyř hodin.

Po vyžihání se skořepina umístí na pracovní stůl v otevřené kokilové komoře vakuové dvoukomorové pece VIM IC 5E. Při zahájení pracovního cyklu se zavřou dveře

a odčerpá se vzduch z kokilové komory na stejnou hladinu vakua, jaká je v tavicí komoře. Po vyrovnání tlaků v kokilové a tavicí komoře se otevře mezikomorový uzávěr a skořepina, unášena elektricky ovládaným licím stolem, vyjede nahoru do tavicí komory, kde je následně provedeno odlití. Po odlití sjede pracovní stůl se skořepinou zpět dolů do kokilové komory. Zavře se mezikomorový uzávěr, kokilová komora se zavzdušní a otevře. Následně se aplikuje exotermický zásyp (Obr. 27). Skořepina se odkládá na licí pole až těsně před odléváním následujícího odlitku (Obr. 28).



Obr. 27 Skořepinová forma po aplikaci exotermického zásypu [26]



Obr. 28 Skořepinové formy na licím poli [26]

Oklepání skořepinové formy se provádí po vychladnutí odlitku minimálně 8 hodin po odlití. Následuje otryskání zbytků formy, odříznutí vtokového kůlu, apretace a kontrola.

4.3 Popis experimentu

V první části experimentu bylo odlito sedm turbínových kol. Odlévání bylo provedeno na dvoukomorové vakuové peci VIM IC 5E/II od firmy ALD. Hodnota vakua při lití byla $5 \cdot 10^{-3}$ mbar a licí teplota byla předepsána na $1460 \pm 10^\circ\text{C}$. Všechna kola, včetně sériově vyráběného, měla při vlastním lití stejné podmínky. Lišil se až režim následné oscilace. Skořepina se před odlitím roztočila na 130 ot/min. Samotné odlití trvá přibližně dvě sekundy s aplikací kontinuálního brzdění licího stolu, aby na kov působila brzdná síla, což zajistí dokonalou zabíhavost slitiny v dutině formy a zároveň dosáhneme zjemnění struktury na lopatkách turbínového kola. Toto se děje v následujících třech sekundách než dojde k úplnému zastavení rotace a je zahájena reverzace otáček, čímž začíná režim oscilace. Kromě kola odlévaného podle sériových podmínek byla celková doba oscilace 60 sekund. Lišila se doba, po které došlo k reverzaci otáček a také rychlost rotace. Sériově vyráběné kolo osciluje po dobu 30 sekund. Přehled podmínek při lití je znázorněn v Tab. 7.

Tab. 7 Podmínky lití a tuhnutí jednotlivých kol

Označení kola	Pohyb při lití		Pohyb po odlití		Teplota lití
	Otáčky/min	Čas [s]	Otáčky/min	Čas [s]	
Kolo č. 0	130	5	30	3x10	1460°C
Kolo č. 1	130	5	30	6x10	1461°C
Kolo č. 2	130	5	30	3x20	1464°C
Kolo č. 3	130	5	30	2x30	1465°C
Kolo č. 4	130	5	20	6x10	1465°C
Kolo č. 5	130	5	50	6x10	1460°C
Kolo č. 6	130	5	30	60x1	1460°C

4.3 Příprava vzorků

Příprava vzorků na vyhodnocení makrostruktury

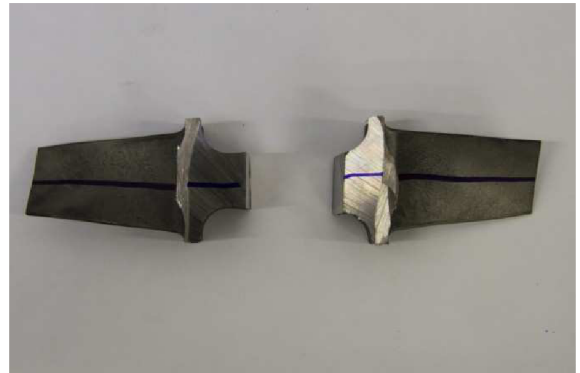
Makrostruktura se vyhodnocovala v osovém řezu kola a dále na povrchu lopatek. Po otryskání a odstranění vtoku skořepiny bylo kolo rozříznuto pomocí kotoučové rozbrušovací pily. Vzorky byly naleptány v roztoku HCL + H₂O + H₂O₂ v poměru 1 : 1 : 0,2. Při leptání se uvolňuje chlór, proto je nutné důkladné odvětrávání v laboratorní digestoři. Čas leptání byl cca 20 minut.

Příprava vzorků pro vyhodnocení mikrostruktury

Mikrostruktura byla zkoumána po celé ploše řezu odlitkem a také v řezu lopatkou. Zkoumané vzorky byly vyříznuty ze stejné poloviny odlitku jako vzorky pro tahové a creepové zkoušky. Nejdříve se oddělily lopatky, aby bylo možné na odlitek navařit válcový úchyt pro strojové řezání. Ten se následně upnul do sklíčidla kotoučové rozbrušovací pily, s jejíž pomocí byl z odlitku odříznut vzorek o tloušťce asi 10 mm. Ten byl následně rozřezán na 13 částí (Obr. 29). Z každého kola byly vyhodnoceny dvě lopatky v podélném řezu (Obr.30). Celkem tedy 15 metalografických vzorků na jedno odlité kolo.



Obr. 29 Rozdělení metalografických vzorků



Obr. 30 Místo řezu lopatkou

Vzorky byly zality průhlednou akrylátovou pryskyřicí ClaroCit od firmy Struers do formiček o průměru 50 mm (Obr. 31). Po vytvrzení byli vzorky vyleštěny na metalografické brusce/leštičky Tegramin 30 od firmy Struers (Obr. 32). Vzorky byly nejdříve zarovnaný pomocí SiC fólie o zrnitosti 80. Poté byly vzorky broušeny diamantovými kotouči o zrnitosti 80 a 120. Pro konečné leštění byly použity suspenze s brusnými zrní o velikosti 9, 3 a 1 μm



Obr. 31 Zalité vzorky



Obr. 32 Bruska/leštička Tegramin 30

Příprava vzorků pro mechanické zkoušky

Pro vyhodnocení mechanických vlastností byly provedeny tahové zkoušky za pokojové teploty, creepové zkoušky a zkoušky tvrdosti. Tvrdost se měřila na přímo polovině kola určené k leptání, nebyla tedy nutná žádná zvláštní příprava vzorku krom zabroušení povrchu v místě měření.

Zkušební tělesa na tahové a creepové zkoušky byla zhotovena přímo z odlitku. Z každého kola byly vyříznuty 3 vzorky (Obr. 33). Vzorky č. 1 a 2 byly určeny na výrobu zkušebních tyčí o průměru 6 mm pro tahovou zkoušku za pokojové teploty. Vzorek č. 3 pak pro výrobu zkušební tyčky o průměru 4 mm pro creepovou zkoušku. Vzorky byly řezány na kotoučové pile Discotom 100 od firmy Struers (Obr. 34).



Obr. 33 Umístění vzorků



Obr. 34 Kotoučová pila Discotom 100

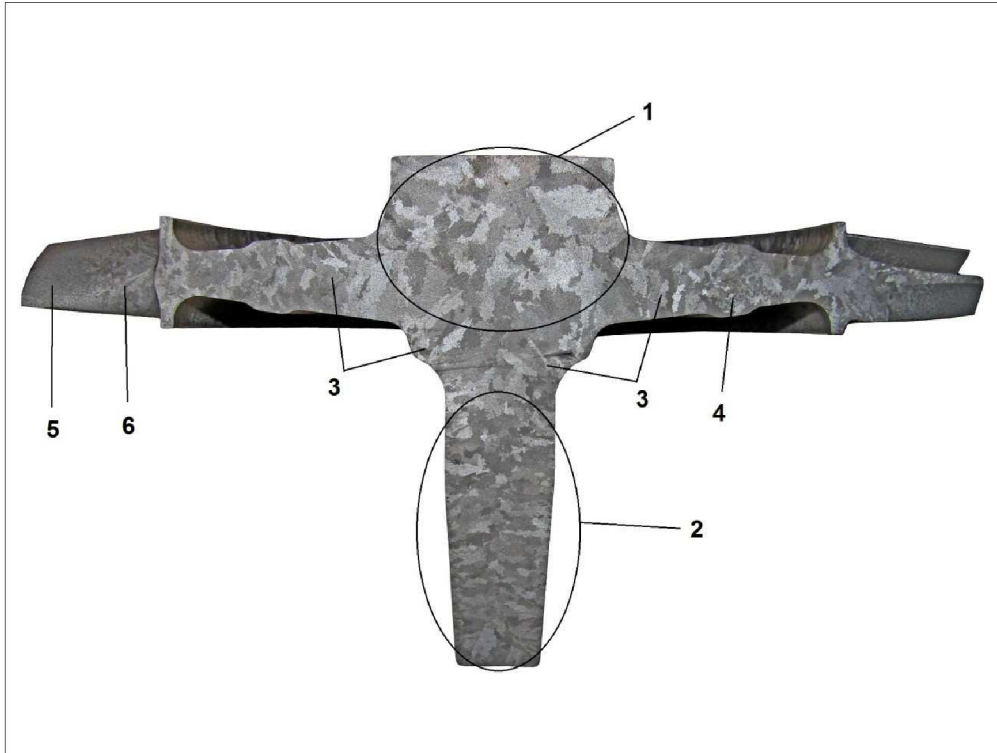
Zkušební vzorky byly zhotoveny dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Výroba vzorků č. 3 probíhala na klasickém soustruhu. Při výrobě vzorků č. 1 a 2 se na tomto stroji pouze upravil tvar do válcové podoby, dokončení proběhlo na CNC soustruhu ROMI C420 s operačním programem Siemens sinumerik 828D (Obr. 35).



Obr. 35 CNC soustruh ROMI C420

4.4 Vyhodnocení makrostruktury

Kolo č. 0 (sériově lité 30 ot, 3 x 10 sec)



Obr. 36 Makrostruktura kola č. 0



Obr. 37 Lopatka kola č. 0

1) Oblast hrubých rovnoosých zrn. Průměrná velikost zrn je 15 mm, největší zrna dosahují až 22 mm.

2) Převážně sloupcová zrna o délce okolo 11 mm. Vyskytují se zde i menší rovnoosá zrna 7 mm.

3) Převážně sloupcová zrna v rozmezí od 10 do 18 mm.

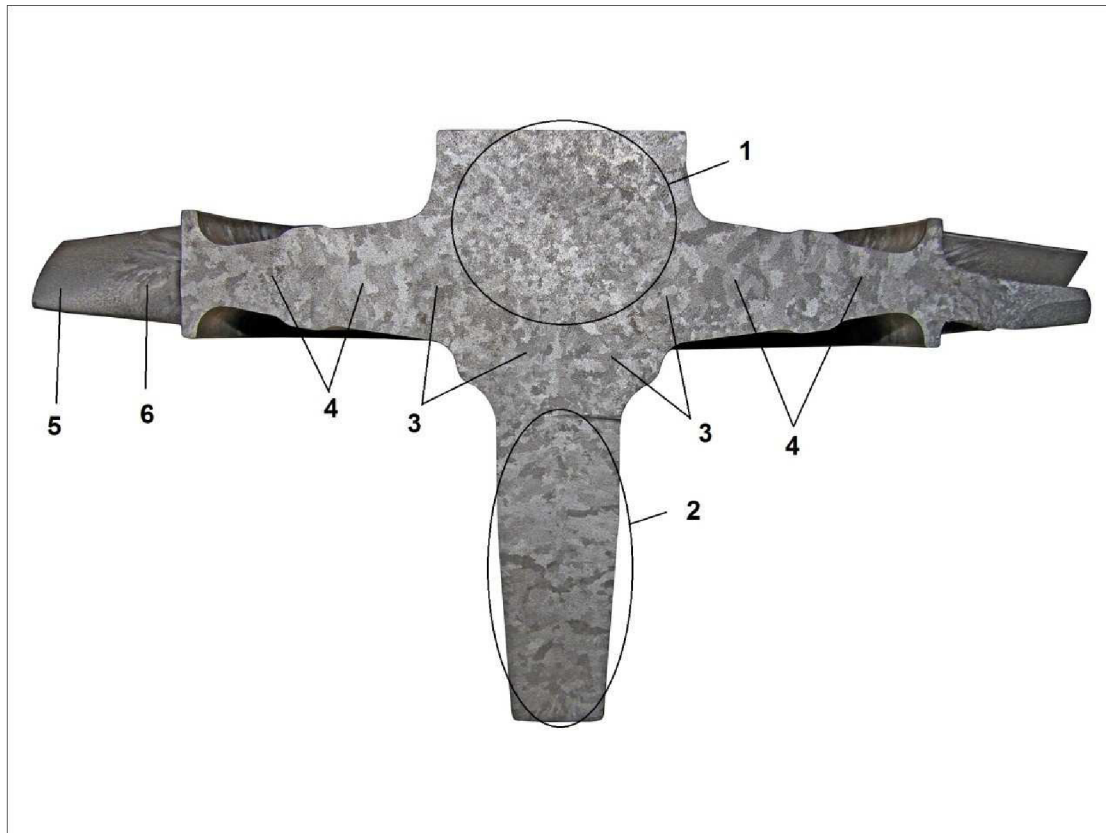
4) Oblast jemných rovnoosých zrn do 2 mm. Tato zrna se však nevyskytují na protější straně odlitku.

5) Velice jemná rovnoosá zrna na konci lopatky. Velikost zrn je menší než 0,5 mm.

6) Rovnoosá zrna s velikostí 2 – 3 mm přechází do sloupcových zrn 7 mm.

Struktura sériově litého kola je převážně hrubozrnná a to především v podnálitkové části odlitku. Tato část odlitku tuhne jako poslední a vlivem malých odstředivých resp. brzdících sil se zde již vliv oscilace příliš neprojevuje. Vznik jemnozrnné struktury v oblasti 4 se jeví jako náhodný jev, jelikož se tato struktura neobjevuje na protější straně odlitku ani u žádných jiných vzorků.

Kolo č.1 (30 ot, 6 x 10 sec)



Obr. 38 Makrostruktura kola č. 1

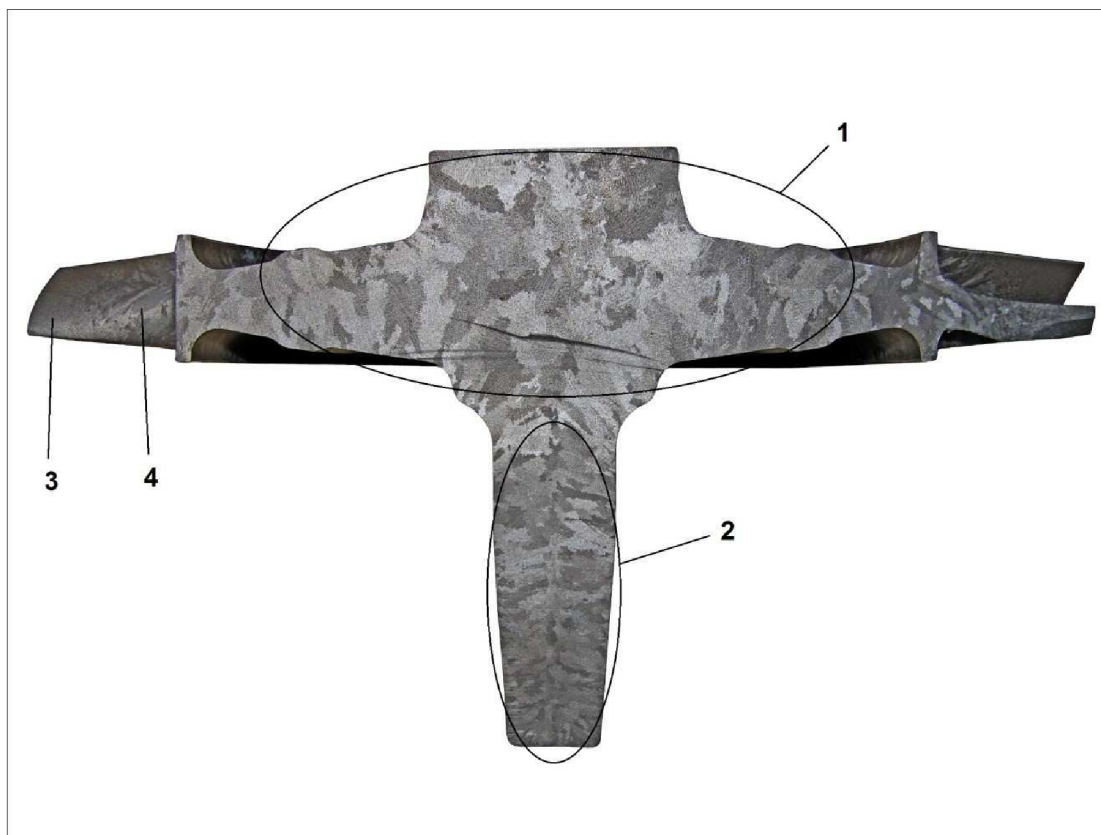


Obr. 39 Lopatka kola č. 1

- 1) Jemná rovnoosá zrna 1 – 5 mm.
- 2) V oblasti se vyskytují jak sloupcová zrna 9 - 14 mm, tak i rovnoosá zrna 7 – 11 mm.
- 3) Hrubší rovnoosá zrna ve středové oblasti 6 – 10 mm.
- 4) Dále od středu odlitku struktura hrubne. Je tvořena převážně rovnoosými zrny 7 – 14 mm.
- 5) Na konci lopatky velice jemná rovnoosá zrna do 0,5 mm.
- 6) Sloupcová zrna o délce až 13 mm.

Kolo č. 1 má o poznání jemnější strukturu než kolo sériově lité. Především ve středové části odlitku, kde se vyskytují velmi jemná rovnoosá zrna. Směrem k lopatkám struktura hrubne, přesto je však stále jemnější než u sériově litého kola. V oblasti 2 nejsou patrné větší rozdíly.

Kolo č. 2 (30 ot, 3 x 20 sec)



Obr. 40 Makrostruktura kola č. 2



Obr. 41 Lopatka kola č. 2

1) Oblast velice hrubých převážně rovnoosých zrn. Velikost zrn se pohybuje v rozmezí 15 – 23 mm. Ojedinelé se vyskytují i zrna menší okolo 10 mm.

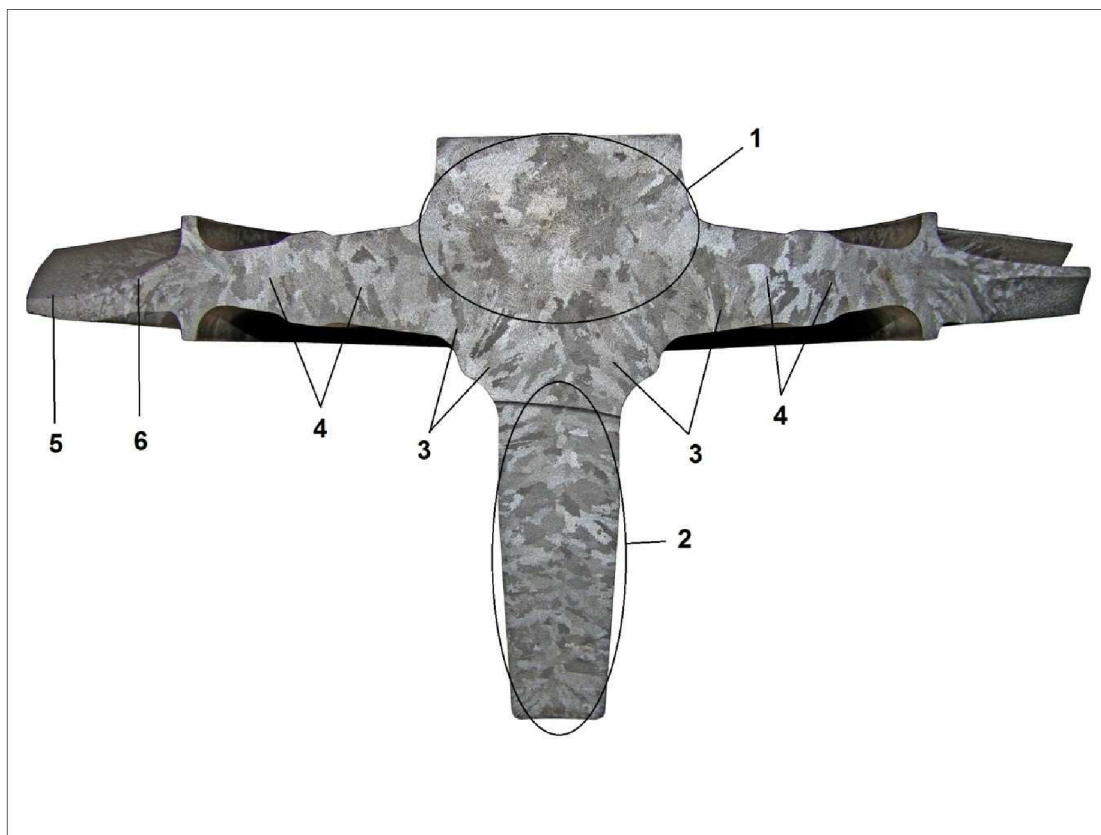
2) Struktura je tvořena převážně sloupcovými zrny s délkou 10 – 15 mm. V oblasti osy odlitku jsou zrna jemnější rovnoosá 4 – 8 mm.

3) Velmi jemná rovnoosá zrna s velikostí menší než 0,5 mm.

4) Rovnoosá zrna o velikosti 2 mm přechází do sloupcových 12 mm.

Struktura tohoto vzorku je velmi hrubozrnná téměř po celé ploše kola. Výjimku tvoří oblast 2.

Kolo č. 3 (30 ot, 2 x 30 sec)



Obr. 42 Makrostruktura kola č. 3

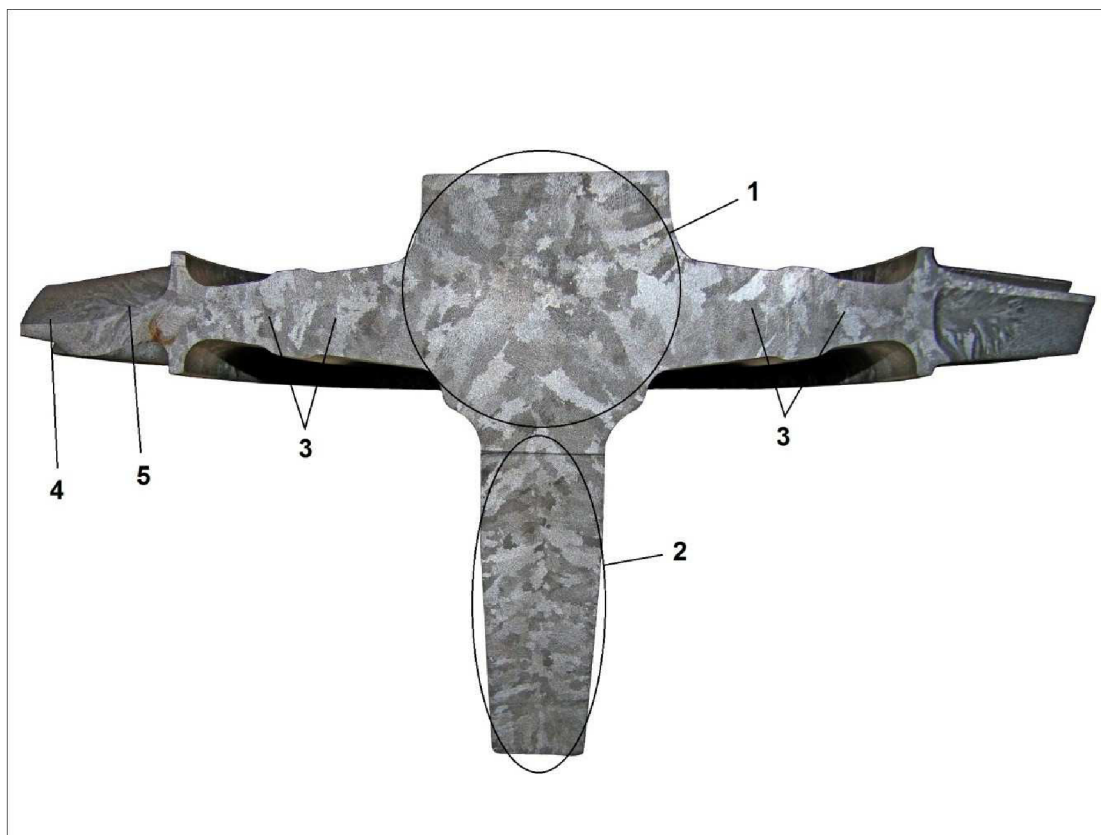


Obr. 43 Lopátka kola č. 3

- 1) Středová oblast hrubých rovnoosých zrn s rozmezí 13 – 22 mm.
- 2) V oblasti se vyskytují spíše rovnoosá zrna o velikosti 5 – 14 mm.
- 3) Oblast je tvořena sloupcovými zrny s délkou od 16 až po 24 mm.
- 4) Převážně rovnoosá zrna o velikosti 7 – 16 mm.
- 5) Oblast jemných rovnoosých zrn menších než 0,5 mm.
- 6) Přejít jemných rovnoosých zrn 2 mm do sloupcových o délce 13 mm.

Struktura kola č. 3 je rovněž hrubozrnná jako v předchozím případě. Liší se výskytem sloupcových zrn (oblast 3). Oblast 2 je naopak tvořena zrny rovnoosými.

Kolo č. 4 (20 ot, 6 x 10 sec)



Obr. 44 Makrostruktura odlitku č. 4

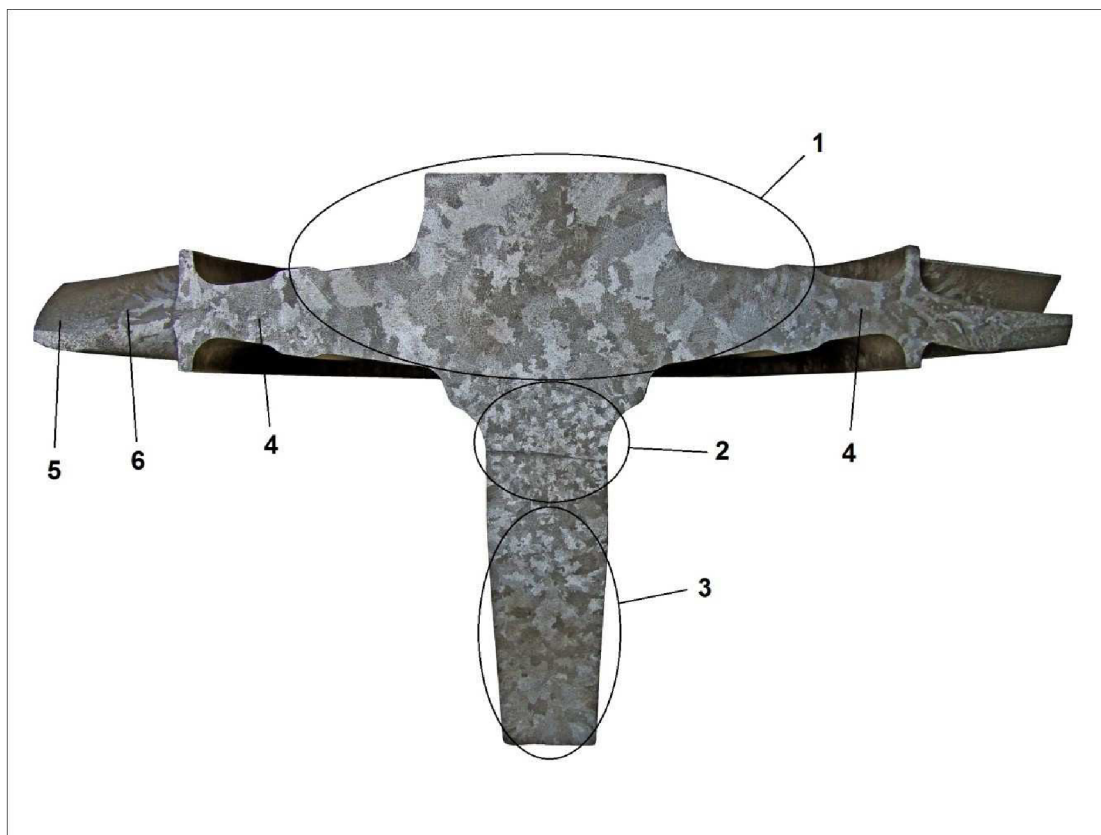


Obr. 45 Lopatka kola č. 4

- 1) V oblasti se nachází hrubší sloupcová i rovnoosá zrna 15 – 25 mm. Ve středové části jsou pak rovnoosá zrna jemnější 5 – 9 mm.
- 2) Převážně rovnoosá zrna o velikosti 6 – 15 mm.
- 3) Rovnoosá zrna s velikostí 9 – 13 mm.
- 4) Jemná rovnoosá zrna menší než 0,5 mm.
- 5) Jemná rovnoosá zrna 2 mm přechází ve sloupcová s délkou 14 mm.

U kola č. 4 se opět vyskytuje hrubozrnná struktura. Ve středové části kola ale můžeme pozorovat malou oblast jemných zrn.

Kolo č. 5 (50 ot, 6 x 10 sec)



Obr. 46 Makrostruktura odlitku č. 5

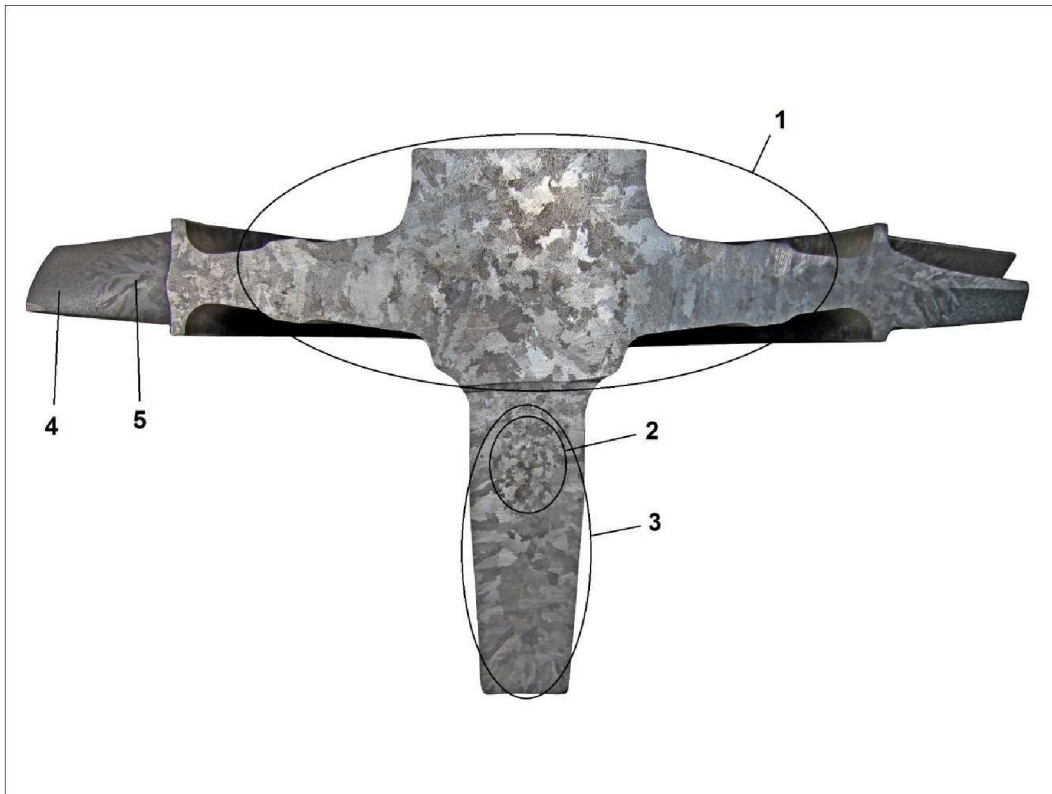


- 1) Rovnoosá zrna 8 – 18 mm.
- 2) Oblast jemných rovnoosých zrn 2 – 5 mm.
- 3) Rovnoosá zrna 5 – 10 mm.
- 4) Rovnoosá zrna 5 – 10 mm.
- 5) Velice jemná rovnoosá zrna menší než 0,5 mm.
- 6) Sloupcová zrna o délce 12 mm.

Obr. 47 Lopatka kola č. 5

Makrostruktura kola č. 5 se vyznačuje jemnějšími zrny oproti struktuře kol 2, 3 a 4. V oblasti 2 se vyskytují velmi jemná zrna.

Kolo č. 6 (30 ot, 60 x 1 sec)



Obr. 48 Makrostruktura odlitku č. 6



- 1) Oblast převážně rovnoosých zrn o velikosti 7 – 15 mm.
- 2) Malá oblast jemných rovnoosých zrn o velikosti do 2,5 mm.
- 3) Oblast převážně rovnoosých zrn o velikosti 6 – 10 mm.
- 4) Velmi jemná rovnoosá zrna do 0,5 mm.
- 5) Sloupcová zrna o délce až 14 mm.

Obr. 49 Lopatka kola č. 6

Struktura kola č. 6 je podobně jako struktura předchozího kola tvořena jemnějšími zrnny. Charakter struktury je velmi podobný po celé oblasti 1. Opět je ve struktuře vidět oblast jemných zrn, která se ale oproti předchozímu případu posunula níž.

Z výsledků makrostruktury odlitých kol je zřejmé, že prodloužení režimu oscilace při zachování ostatních parametrů mělo pozitivní vliv na výslednou strukturu odlitku (kolo č. 1). Snižování počtu reverzací otáček stejně jako rychlosti rotace mělo na makrostrukturu nepříznivý vliv. Výsledkem byla hrubší struktura než u sériově litého kola (kolo č. 2, 3, 4). Naopak zvýšení otáček (kolo č. 5) a počtu reverzací (kolo č. 6) vedlo k požadovanému zjemnění struktury. Na strukturu lopatek má vliv cílené brzdění rotace skořepiny při lití.

Důležité je sladění odlévání se začátkem řízeného zpomalování licího stolu pro dosažení reprodukovatelnosti. Následné cyklování už nemá na strukturu lopatek vliv.

4.5 Vyhodnocení pórovitosti

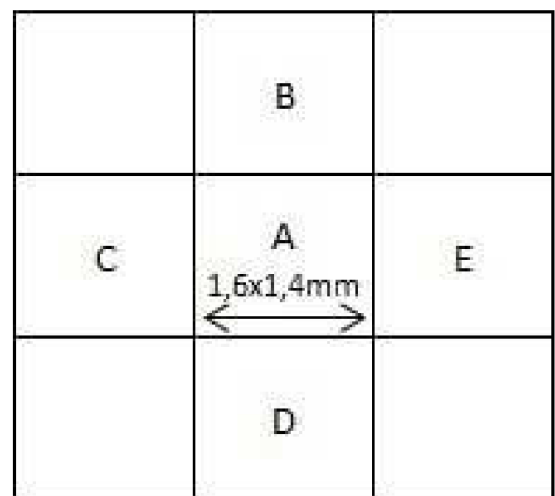
Při zkoumání mikrostruktury byl sledován vliv oscilace na výskyt mikrostaženin. Při oscilaci kol se uplatňuje teorie multiplikace dendritů, tedy ulamování špiček a sekundárních větví dendritů a jejich zanášení do taveniny. Tyto částice pak slouží jako nukleační zárodky a zjemňují zrna. Průběh tuhnutí díky tomu dostává více endogenní charakter. To vede k předpokladu většího výskytu mikrostaženin.

Vyhodnocení pórovitosti probíhalo v laboratoři DPL PBS. Pozorování mikrostruktury bylo provedeno na mikroskopu Axio Observer Z1 a následně vyhodnoceno pomocí softwaru Axio Visione SE 64 od firmy Zeiss.

Hodnocení pórovitosti je provedeno podle předpisu firmy ABB. Nejprve je monitorována celá plocha řezu odlítkem při 25 násobném zvětšení. V tomto režimu jsou vybrány oblasti A, kde se mikrostaženiny vyskytují. Poté se daná oblast zobrazí při osmdesáti násobném zvětšení, při kterém se pórovitost vyhodnocuje (Obr. 50). Při tomto zvětšení má daná oblast rozměry 1,6 x 1,4 mm tedy 2,24 mm². Pomocí softwaru se následně vyhodnotí procentuální podíl mikrostaženin na dané ploše A i na sousedících plochách B až E (obr. 51). Pokud pórovitost ve vedlejších oblastech nepřekročí 1%, záznam se neuvádí.



Obr. 50 Příklad zobrazené oblasti A (3-13)

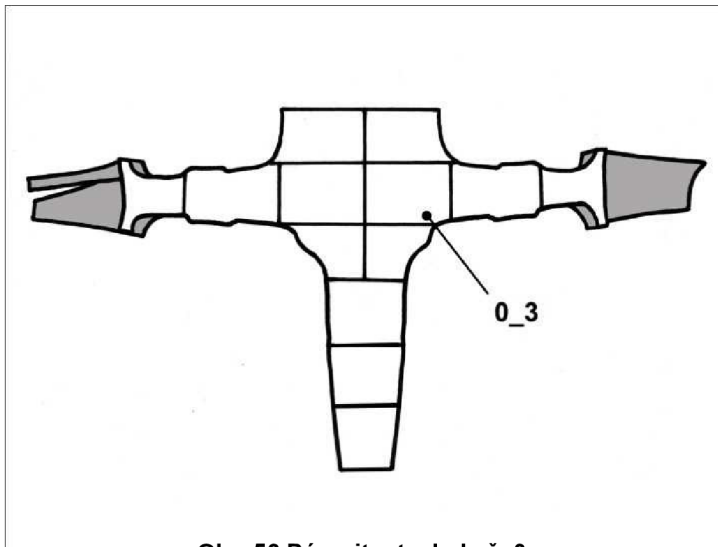


Obr. 51 Způsob analýzy pórovitosti

Tab. 8 Maximální přípustná pórovitost

Zóna	Maximální přípustná pórovitost	
	V jedné zkušební oblasti A	Ve 4 sousedních oblastech B-E
Lopatka	3%	2%
Náboj	5%	3%

Kolo č. 0 (30 ot, 3 x 10 sec)



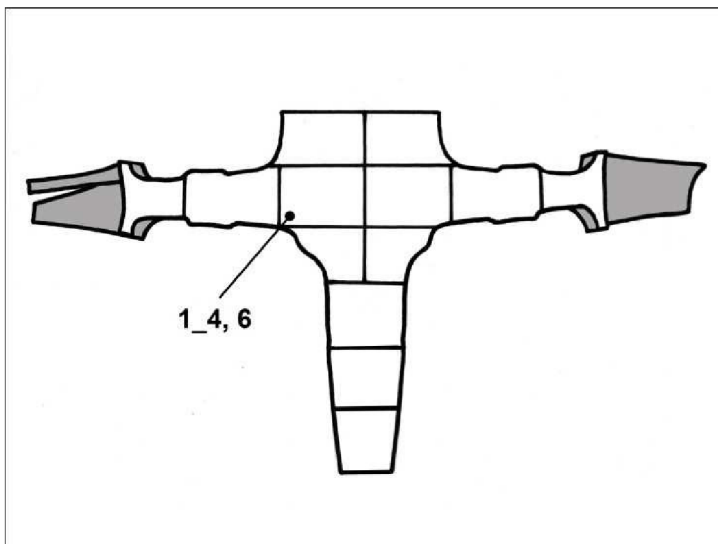
Obr. 52 Pórovitost v kole č. 0

Tab. 9 Pórovitost v kole č. 0

Oblast	Pórovitost [%]
0-1	0,4813
0-2	0,7399
0-3	1,9206
0-4	0,5744
0-5	0,8403
0-6	0,6409

Na sériově litém kole bylo vybráno šest oblastí A. Měřením bylo prokázáno, že pouze v jedné z nich překročila pórovitost hranici jednoho procenta, nicméně nepřesahovala maximální přípustnou hodnotu určenou předpisem. V okolní oblastech B - E byla pórovitost téměř nulová, proto se naměřené hodnoty z těchto oblastí neuvádí.

Kolo č. 1 (30 ot, 6 x 10 sec)



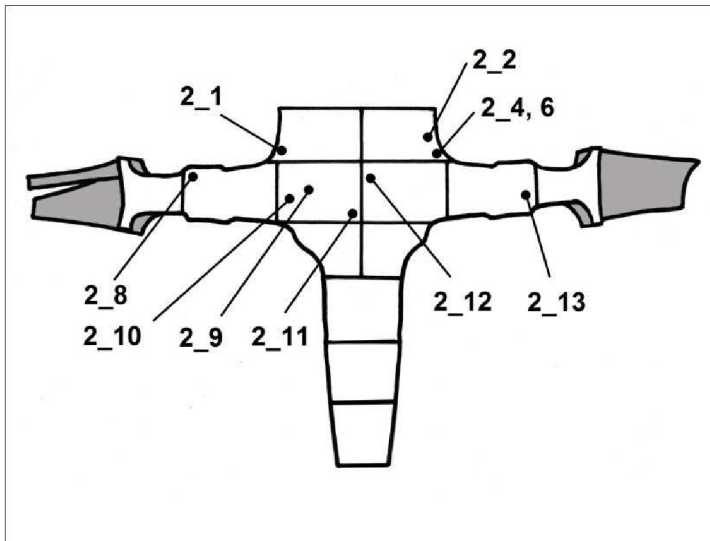
Obr. 53 Pórovitost v kole č. 1

Tab. 10 Pórovitost v kole č. 1

Oblast	Pórovitost [%]
1-1	0,4238
1-2	0,3246
1-3	0,7241
1-4	2,5500
1-5	0,8644
1-6	1,2838
1-7	0,9424

Na kole č. 1 bylo vybráno sedm měřených oblastí. Dvě z nich přesahovaly hodnotu pórovitosti 1%. Vzhledem k jejich blízké vzájemné poloze jsou v náhledu vyznačeny jedním bodem. Naměřené hodnoty opět nepřesahují přípustnou mez. Oblasti B - E byly znovu prakticky bez pórovitosti.

Kolo č. 2 (30 ot, 3 x 20 sec)



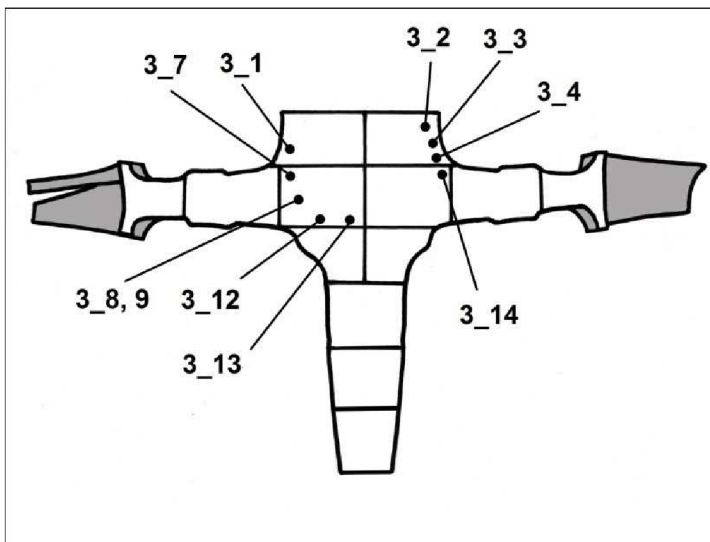
Obr. 54 Pórovitost v kole č. 2

Tab. 11 Pórovitost v kole č. 2

Oblast	Pórovitost [%]
2-1	1,1078
2-2	1,4553
2-3	0,5976
2-4	1,0426
2-5	0,7104
2-6	1,5877
2-7	0,7035
2-8	1,1796
2-9	1,4863
2-10	1,9438
2-11	1,5582
2-12	1,2403
2-13	1,2774

Kolo č. 2 bylo podrobena třinácti měření. Z toho u deseti z nich překročila pórovitost 1%. Nicméně žádné z nich nepřekročilo přípustnou hranici. Pórovitost ve vedlejších oblastech opět nepřesáhla 1%.

Kolo č. 3 (30 ot, 2 x 30 sec)



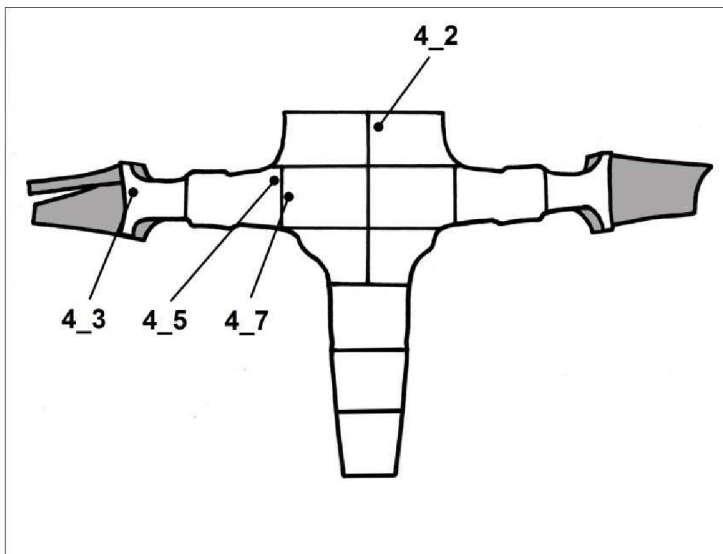
Obr. 55 Pórovitost v kole č. 3

Tab. 12 Pórovitost v kole č. 3

Oblast	Pórovitost [%]
3-1	1,1892
3-2	1,0259
3-3	1,6006
3-4	1,0063
3-5	0,5851
3-6	0,9342
3-7	1,1443
3-8	1,0184
3-9	1,2801
3-10	0,8357
3-11	0,7640
3-12	1,8187
3-13	2,6226
3-14	1,5871
3-15	0,5502
3-16	0,7946
3-17	0,6109

U kola č. 3 bylo měřeno sedmnáct oblastí, tedy nejvíce ze všech odlitků. Hranici 1% přesahovalo deset z nich. Žádná však nepřekročila předepsanou mez. V oblasti 3_13 byla naměřena nejvyšší hodnota pórovitosti ze všech měření a to 2,6226%. Vedlejší oblasti opět nebylo třeba zaznamenávat.

Kolo č. 4 (20 ot, 6 x 10 sec)



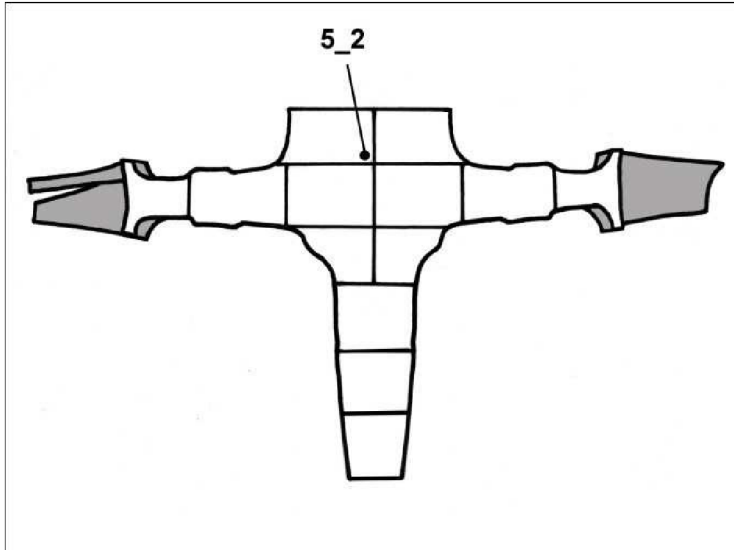
Obr. 56 Pórovitost v kole č. 4

Tab. 13 Pórovitost v kole č. 4

Oblast	Pórovitost [%]
4-1	0,9825
4-2	1,2055
4-3	1,1926
4-4	0,8003
4-5	1,3025
4-6	0,6990
4-7	1,1228
4-8	0,6981
4-9	0,7481
4-10	0,9523

Kolo č. 4 bylo měřeno na deseti místech. Pouze čtyři z nich přesáhly hranici 1%, nicméně žádné povolenou přípustnou mez. Oblasti B - E byly opět takřka bez mikrostaženin.

Kolo č. 5 (50 ot, 6 x 10 sec)



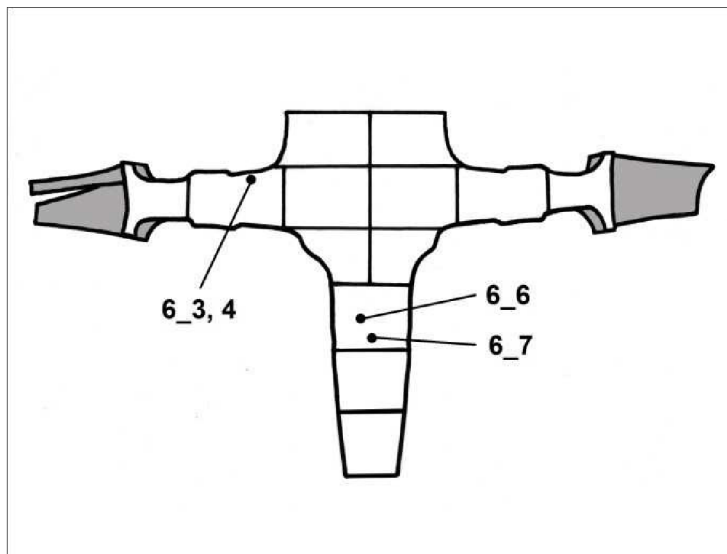
Obr. 57 Pórovitost v kole č. 5

Tab. 14 Pórovitost v kole č. 5

Oblast	Pórovitost [%]
5-1	0,7789
5-2	1,6140
5-3	0,8119
5-4	0,6295

Na kole č. 5 byly měřeny čtyři oblasti. Hranici 1% překročila pouze jedna, avšak nepřesáhla povolenou mez danou předpisem. Vedlejší oblasti nebylo třeba zaznamenávat. Ze všech zkoumaných kol mělo kolo č. 5 nejnižší podíl staženin. Tato skutečnost by mohla být vysvětlena vlivem vyšších otáček. Ty vedou k větší odstředivé síle a lepšímu dosazování. Všechny měřené oblasti se navíc vyskytovaly ve středové oblasti odlitku, kde je velikost odstředivé síly nižší.

Kolo č. 6 (30 ot, 60 x 1 sec)



Tab. 15 Pórovitost v kole č. 6

Oblast	Pórovitost [%]
6-1	0,6938
6-2	0,8794
6-3	1,1501
6-4	1,0027
6-5	0,9130
6-6	1,2400
6-7	1,2892
6-8	0,9373

Obr. 58 Pórovitost v kole č. 6

Na kole č. 6 bylo vybráno osm primárních oblastí A. Na čtyřech z nich překročila pórovitost 1%. Žádná z těchto hodnot však nepřekročila přípustnou mez. V oblastech B - E byla pórovitost opět téměř nulová.

Lopatky byly v podélném řezu zcela bez mikrostaženin. Nebyly tedy určeny žádné primární oblasti A, měření tedy vůbec neproběhlo.

Z výsledků vyplývá, že jemnější struktura odlitku nevede k větší porezitě. Nejvyšší počet oblastí s pórovitostí vyšší než 1% byl u kol č. 2 a 3, které mají naopak hrubozrnnou strukturu. Nejvyšší pórovitost v dané oblasti byla 2,6226% u kola č. 3, které je tvořeno hrubými zrny a 2,55% u kola č. 1, které je v místě výskytu měření jemnozrnné. Kolo č. 3 mělo celkově největší porezitu ze všech kol. Naopak nejlepších výsledků dosáhlo kolo č. 5. Výsledky tedy nepotvrdily předpoklad vyšší porezity u kol s jemnější strukturou.

Přesto, že se míra pórovitosti v odlitcích lišila, žádné turbínové kolo nepřekročilo maximální přípustné hodnoty stanovené v předpisu.

4.6 Vyhodnocení mechanických zkoušek

4.6.1 Zkouška pevnosti v tahu

Zkoušky pevnosti v tahu byly prováděny za pokojové teploty na trhacím zařízení TIRA test 28250 na DPL PBS (Obr. 59 a 60). Jak již bylo zmíněno výše, zkušebními vzorky byly tyčky o průměru 6 mm. Rychlost zatěžování byla 10 mm/min, tedy v rozmezí 6-60 mm/min stanoveném v normě ČSN EN ISO 6892-1.



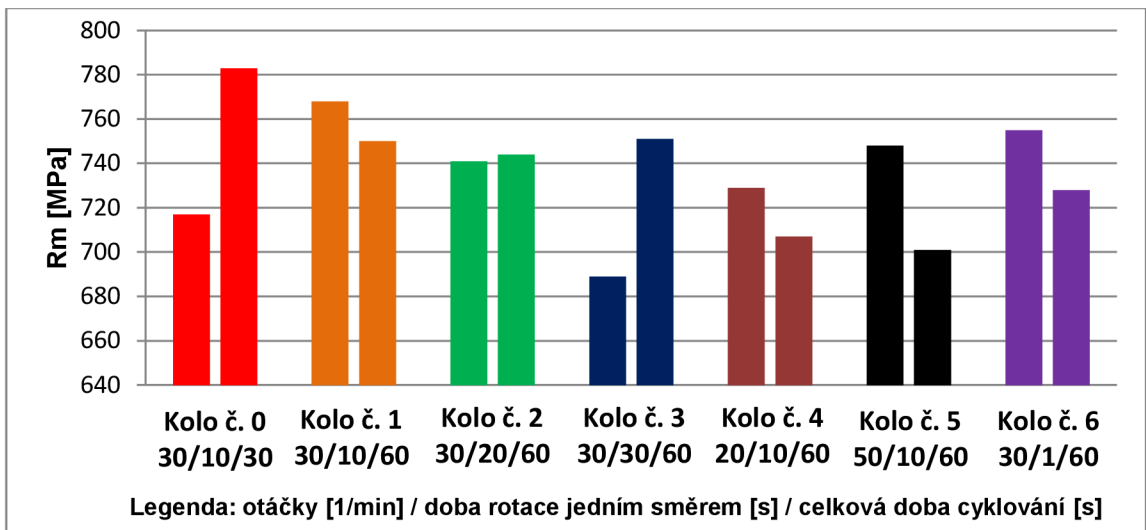
Obr. 59 Trhací zařízení



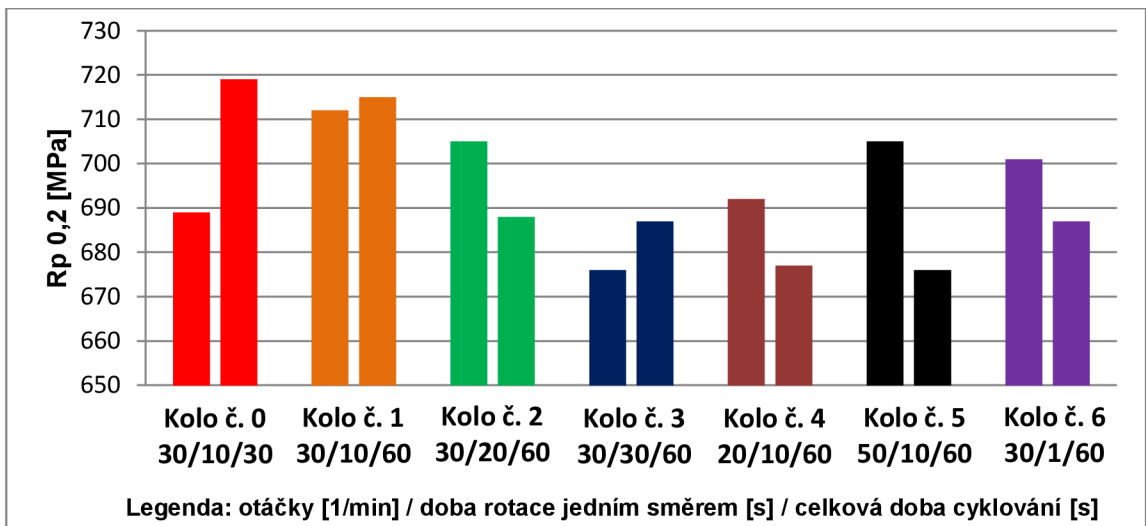
Obr. 60 Závitové čelisti

Tab. 16 Výsledky tahových zkoušek

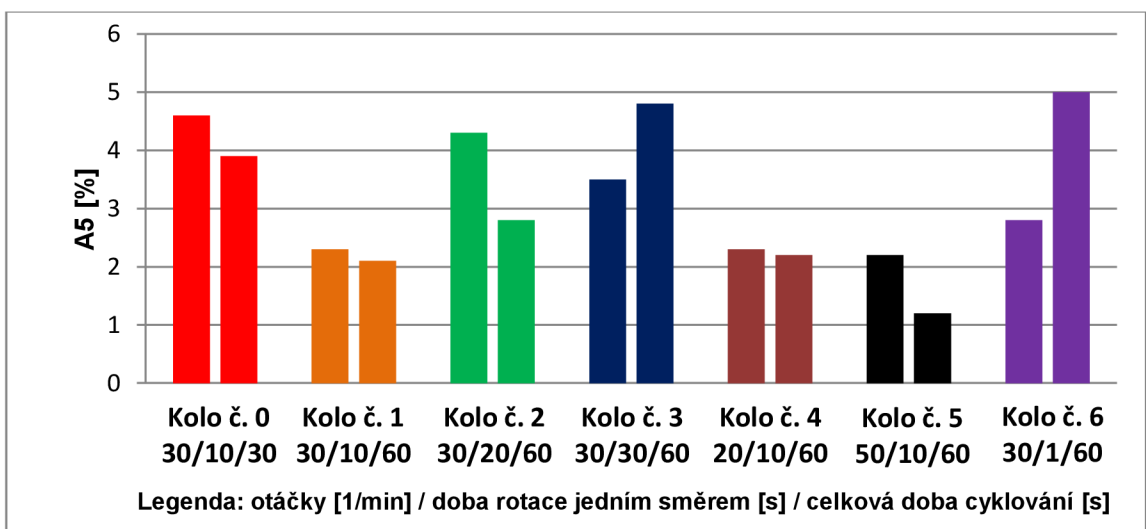
Odlitek	Označení vzorku	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	As [%]
Kolo č. 0	0-1	689	717	4,6
	0-2	719	783	3,9
Kolo č. 1	1-1	712	768	2,3
	1-2	715	750	2,1
Kolo č. 2	2-1	705	741	4,3
	2-2	688	744	2,8
Kolo č. 3	3-1	676	689	3,5
	3-2	687	751	4,8
Kolo č. 4	4-1	692	729	2,3
	4-2	677	707	2,2
Kolo č. 5	5-1	705	748	2,2
	5-2	676	701	1,2
Kolo č. 6	6-1	701	755	2,8
	6-2	687	728	5



Graf 1 Meze pevnosti jednotlivých vzorků



Graf 2 Mez kluzu jednotlivých vzorků

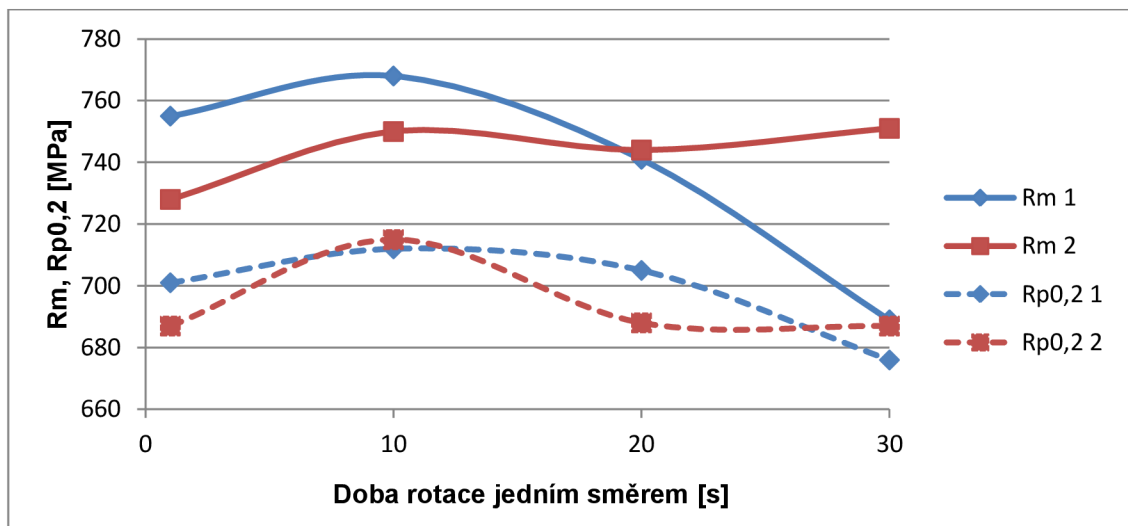


Graf 3 Tažnost jednotlivých vzorků

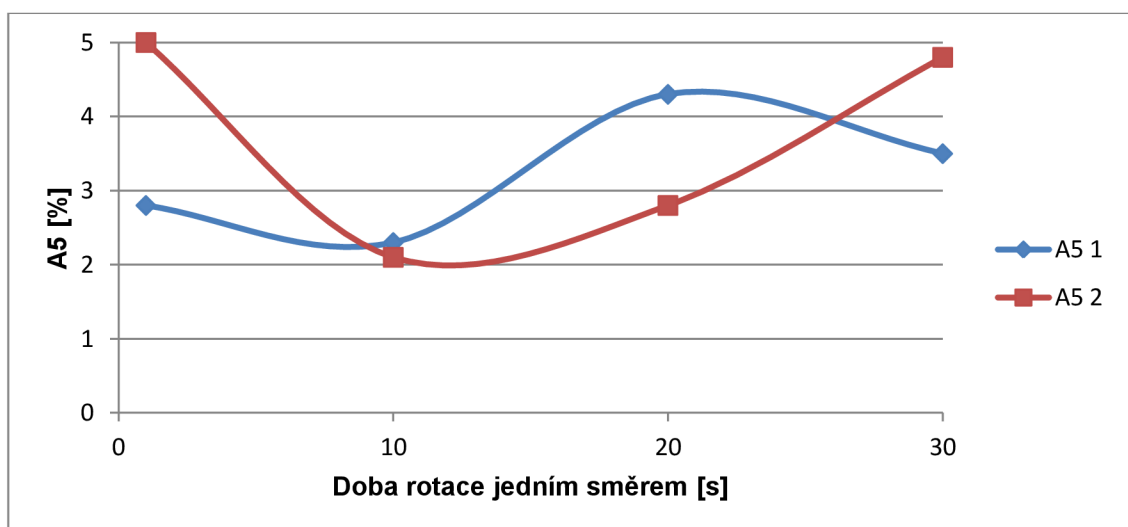
Vzhledem k tomu, že se u odlévaných kol měnily dva různé parametry režimu cyklování, nelze vytvořit závislost jednoho z nich na následných hodnotách tahových zkoušek u všech odlévaných kol. Měnicími se parametry jsou doba rotace skořepiny mezi reverzací otáček a samotné otáčky. Oproti kolu č. 1 se však vždy měnila jen jedna z nich. Kolo č. 1 je proto jako jediné zahrnuto v obou závislostech, tedy jak v závislosti výsledných hodnot na době rotace, tak i na otáčkách.

V závislosti na době rotace (době než dojde k reverzaci otáček) jsou zahrnuta čtyři odlišná kola:

- Kolo č. 6 – doba rotace 1 s
- Kolo č. 1 – doba rotace 10 s
- Kolo č. 2 – doba rotace 20 s
- Kolo č. 3 – doba rotace 30 s



Graf 4 Závislost meze pevnosti a meze kluzu na době rotace jedním směrem (při 30 ot/s)



Graf 5 Závislost tažnosti na době rotace jedním směrem (při 30 ot/s)

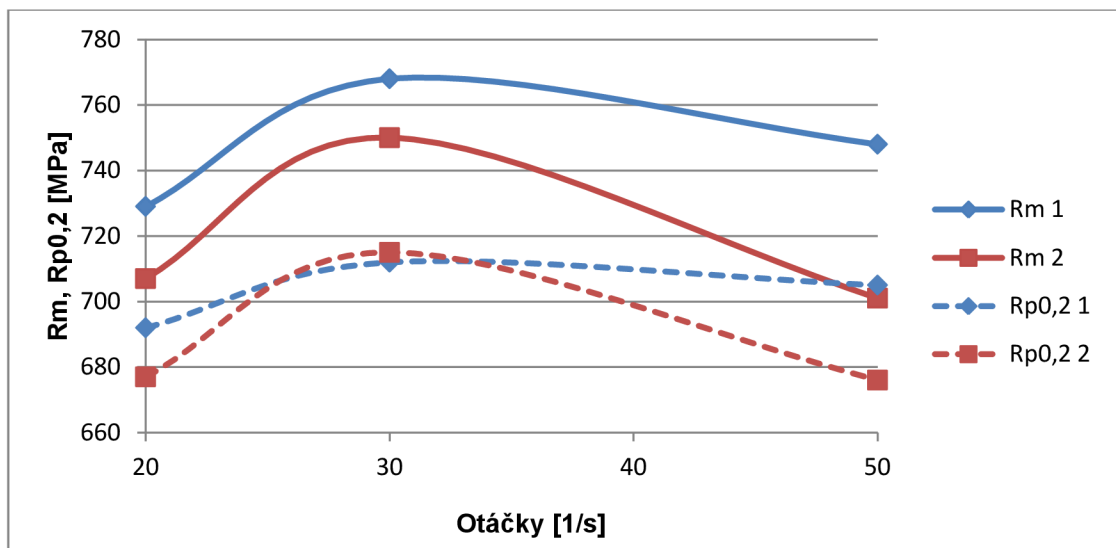
Z výsledků vyplývá, že ideální dobou rotace je 10 sekund. Při prodlužování této doby se R_m i $R_{p0,2}$ snižují. Totéž platí i u zkácení této doby na 1 sekundu. Tato tendence se shoduje s výsledky makrostruktury, kdy nejvyšší hodnoty vycházejí u jemnozrnné struktury. Tažnost má přesně opačnou charakteristiku. Tedy nejnižší hodnoty vycházejí právě při desetisekundové době rotace.

V závislosti na otáčkách skořepiny jsou zahrnuta tři odlitá kola:

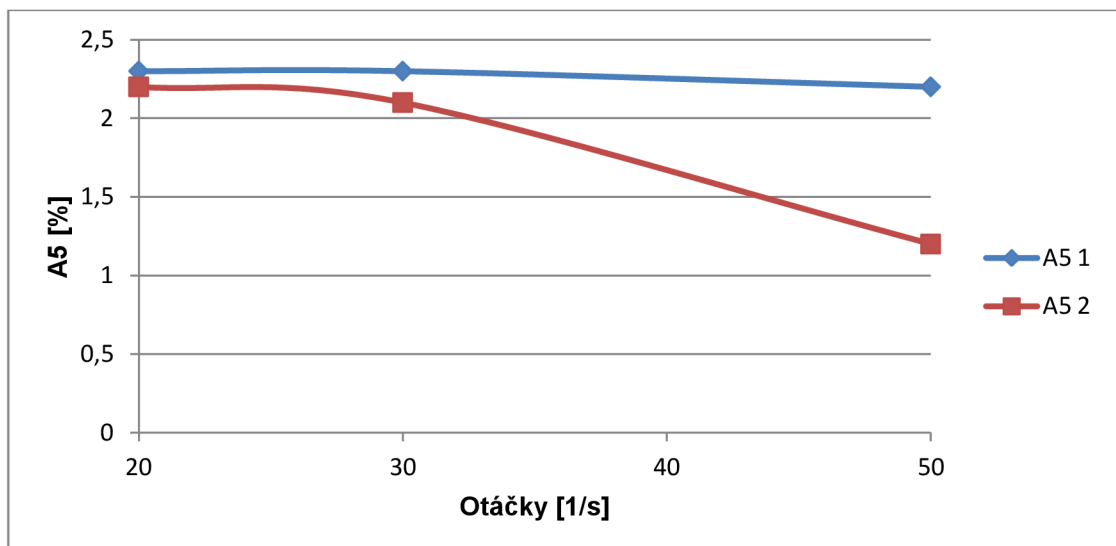
Kolo č. 4 – 20 ot/s

Kolo č. 1 – 30 ot/s

Kolo č. 5 – 50 ot/s



Graf 6 Závislost meze pevnosti a meze kluzu na rychlosti otáčení (při režimu cyklování 6x10)



Graf 7 Závislost tažnosti na rychlosti otáčení (při režimu cyklování 6x10)

V závislosti na otáčkách opět vychází nejlépe kolo č. 1, tedy 30 ot/min. Při jejich snížení na 20 nebo naopak zvýšení na 50 ot/min vycházejí hodnoty Rm i Rp0,2 nižší. Tažnosti vycházejí mezi 2 až 2,5%. Výjimku tvoří druhý vzorek u kola č. 5, kde je tažnost nejnižší ze všech kol.

Ze všech odlévaných kol má nejvyšší hodnoty Rm i Rp0,2 kolo č. 1. Z toho je patrný příznivý vliv zjemnění zrna na mechanické vlastnosti. Vysokých hodnot dosahují také kola č. 2 a 6. Vůbec nejvyšší hodnota Rm 783 MPa byla naměřena u vzorku č. 2 ze seriově litého kola. Pevnost vzorku č. 1 byla ovšem podstatně nižší - 717 MPa. Tyto rozdíly mechanických hodnot v rámci jednoho kola se ve větší míře vyskytují i u kol č. 3 a 5. Hodnoty tažnosti jsou taktéž značně kolísavé. K této skutečnosti přispívá fakt, že průměr zkušebních tyček je pouze 6 mm. Výsledek zkoušky je tedy více ovlivněn mikrostaženinami, většími karbidy nebo drobnou nehomogenitou struktury, než by byl v případě tyček větších.

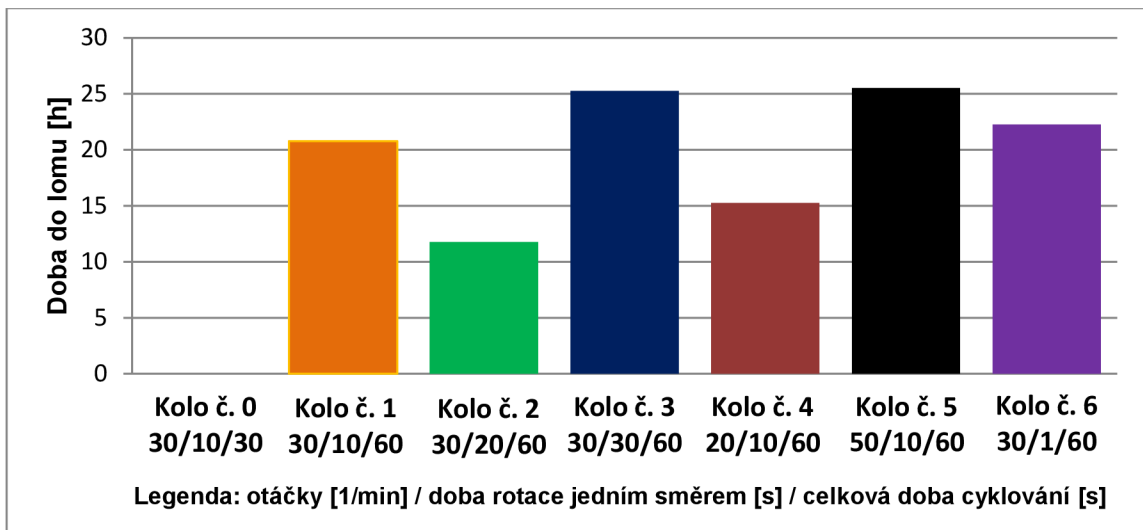
Přestože se výsledky vzorků z kola č. 5 značně lišily a nebyly tedy přesvědčivé, vzhledem k výsledkům makrostruktury a vyhodnocení mikrostruktury je u tohoto režimu cyklování předpoklad dosažení vyšších hodnot mechanických zkoušek. Proto by měl být tento režim cyklování předmětem dalších zkoušek.

4.6.2 Zkouška tečení materiálu

Creepové zkoušky proběhly ve společnosti SVÚM a.s podle ZP 01 – 23 (ČSN EN ISO 204). Zkušební vzorky o průměru 4 mm byly zatíženy napětím 353 MPa při teplotě 870°C.

Tab. 17 Výsledky zkoušky tečení materiálu

Odlitek	Označení vzorku	Doba do lomu [h]	Tažnost [%]	kontrakce [%]
Kolo č. 0	0-3	0	0	0
Kolo č. 1	1-3	20,75	5,9	7,41
Kolo č. 2	2-3	11,75	3,95	7,4
Kolo č. 3	3-3	25,25	6,88	7,47
Kolo č. 4	4-3	15,25	5,38	5,46
Kolo č. 5	5-3	25,5	8,24	5,51
Kolo č. 6	6-3	22,25	5,81	7,41



Graf 8 Doba do lomu při creepové zkoušce

Z výsledků není patrná žádná závislost velikosti zrna na odolnosti proti tečení za zvýšených teplot. Zkušební vzorky byly odebrány z těch míst v odlitku, kde nejsou velké rozdíly v makrostruktuře mezi jednotlivými koly. Výsledky jsou tedy ovlivněny především náhodným vlivem vad a nehomogenity. Vzhledem k malému průměru zkušebních vzorků může výsledek zkoušky značně ovlivnit i menší vada struktury. Vzorek 0-3 byl porušen ještě před zatížením při teplotě 430°C. Příčinou byla rozsáhlá staženina objevená na lomové ploše vzorku. (viz kapitola 4.8 Vyhodnocení lomových ploch)

4.6.3 Tvrdost

Tvrdost byla měřena podle Brinella na tvrdoměru HPO 250 od firmy WPM Leipzig na čelní straně kola (Obr. 61 a 62). Vnikacím tělískem byla kulička z tvrdokovu o průměru 2,5 mm. Doba zatěžování činila 10s při zatížení 187,5 kg.



Obr. 61 Místo měření tvrdosti

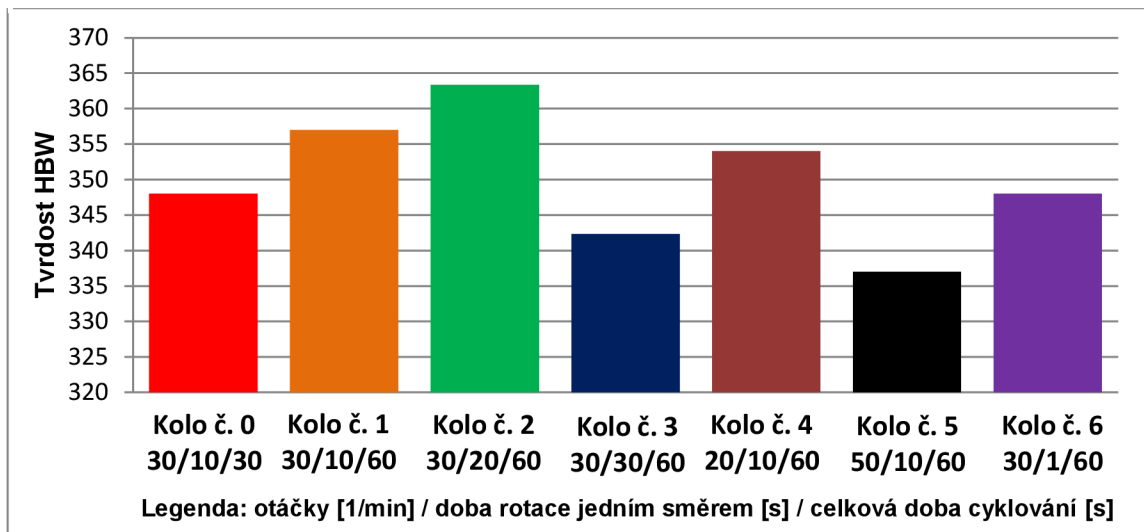


Obr. 62 Tvrdoměr HPO 250

Na každém odlitku byla provedena tři měření. Po odečtení středního průměru vtisku byla pomocí tabulky z normy ČSN EN ISO 6506-1 zjištěna tvrdost. Průměrné hodnoty pak byly zaneseny do grafu 9.

Tab. 18 Výsledky měření tvrdosti

Odlitek	Tvrdomost HBW			
	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr
Kolo č.0	345	354	345	348
Kolo č.1	363	354	354	357
Kolo č.2	354	373	363	363
Kolo č.3	337	345	345	342
Kolo č.4	354	363	345	354
Kolo č.5	329	337	345	337
Kolo č.6	345	345	354	348

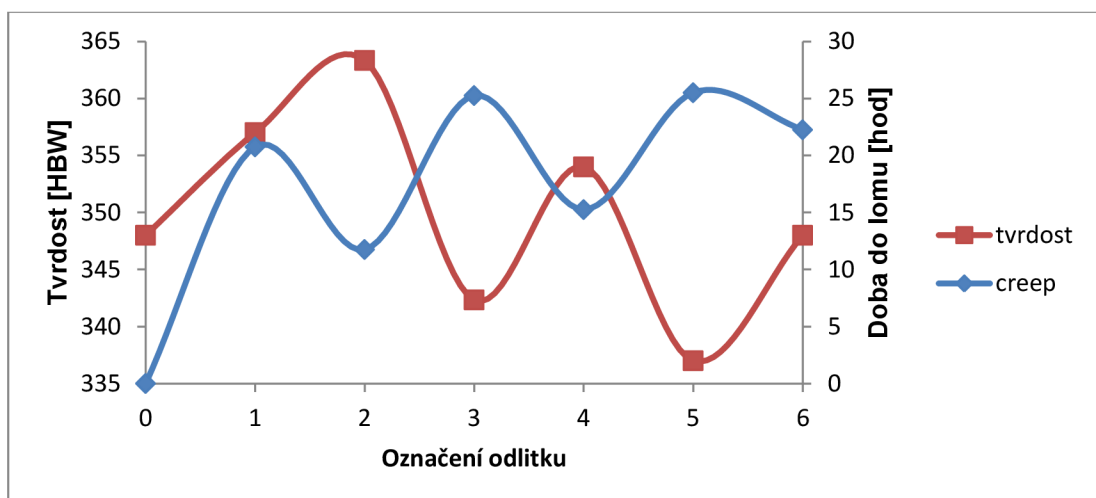


Graf 9 Tvrdość HBW

Z výsledků není patrná žádná jasná závislost tvrdosti na způsobu oscilace. V místě měření nejsou rozdíly ve struktuře nijak markantní. Samotné hodnoty tvrdosti se od sebe také příliš neliší.

Je třeba vzít v úvahu význam měření tvrdosti pro slitinu IN 713LC. Materiálová norma slitiny tvrdost nijak nespécifikuje, hodnota tvrdosti nemá velkou důležitost a není zcela vypovídající. Jedná se tedy pouze pro orientační měření.

Při porovnání výsledků tvrdosti a zkoušky tečení je patrná jistá nepřímá úměra. U kol č. 3 a 5 byla naměřena nejnižší tvrdost, přičemž při creepové zkoušce odolávaly nejdéle. Naopak u kola č. 2 byla naměřena tvrdost nejvyšší a doba do lomu creepové zkoušky byla nejkratší.

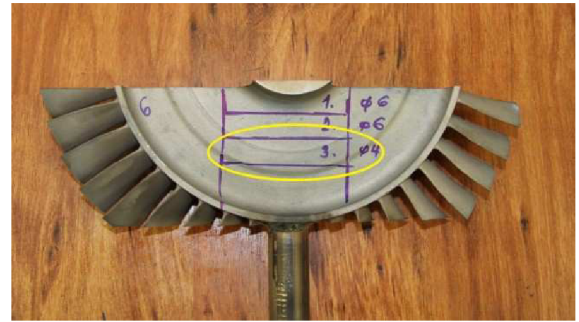


Graf 10 Hodnoty tvrdosti a doby do lomu creepové zkoušky jednotlivých kol

Jistou spojitost potvrzuje i fakt, že zkušební tyčky určené pro zkoušky tečení byly odebírány přibližně ze stejného místa, jako se měřila tvrdost (Obr. 63 a 64).



Obr. 63 Místo měření tvrdosti



Obr. 64 Místo odběru zkušební tyče pro creepovou zkoušku

Vzhledem k ne zcela vypovídajícím hodnotám tvrdosti pro slitinu IN 713 LC a výsledkům creepové zkoušky, které mohly být značně ovlivněny nehomogenitou materiálu a vzhledem k malému průřezu zkušebních tyčí, je nutné tuto spojitost ověřit dalšími zkouškami a měřeními.

4.7 Ověřovací série

Na základě výsledků byly vybrány nejvhodnější varianty režimu cyklování. Hlavní roli hrály tahové zkoušky za pokojové teploty a vzhled makrostruktury. Je však nezbytné přihlídnout i k ostatním parametrům. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u kola č. 1 a 6.

Na základě výsledků byla tedy jako nejlepší vyhodnocena kola č. 1 a 6. Pro ověřovací sérii byly odlity další 4 odlitky, 2 pro každý režim cyklování. Vlivem chyby v nastavení rotační jednotky pracovního stolu nebyl první odlitek vyroben za předepsaných podmínek. Následná dodatečná oprava již nebyla schopna zabezpečit požadovaný režim cyklování. Proto výsledky tohoto odlitku nemohou být brány v potaz (Tab. 19, kolo č. 11). Odlévání proběhlo opět na dvoukomorové vakuové peci VIM IC 5E/II od firmy ALD. Hodnota vakua při lití byla $5 \cdot 10^{-3}$ mbar a lící teplota byla předepsána na $1460 \pm 10^\circ\text{C}$.

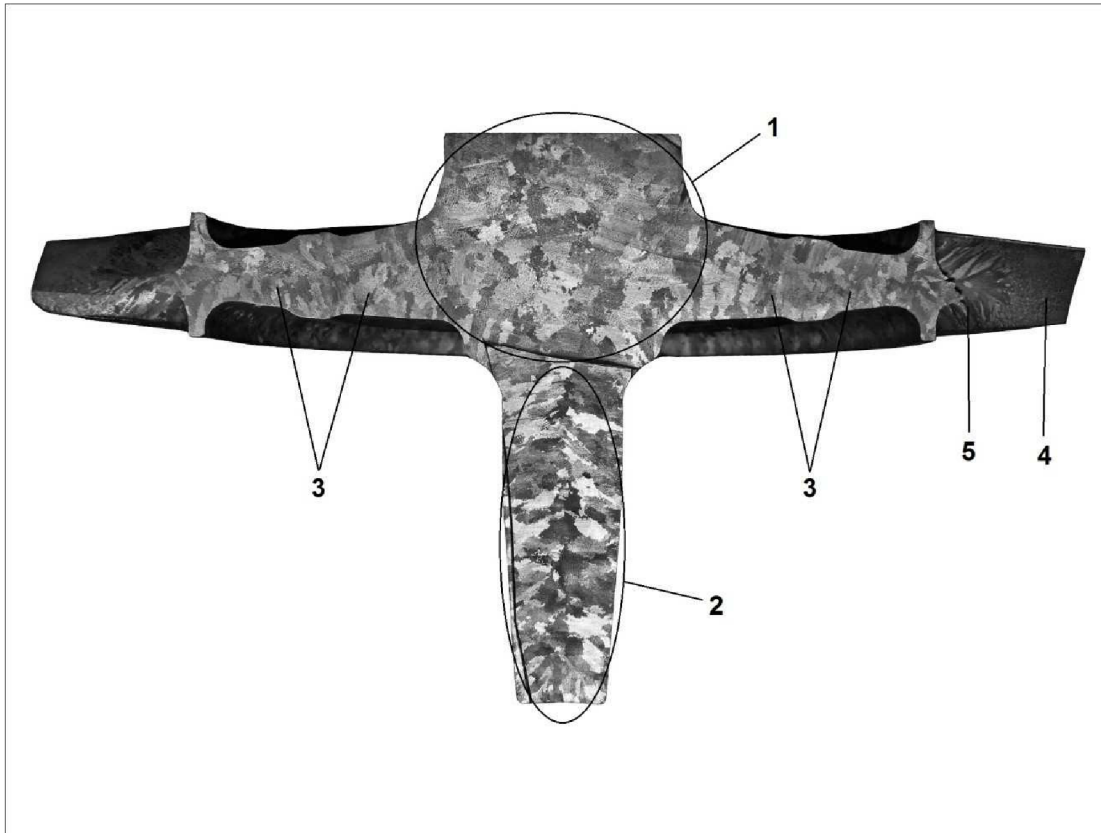
Tab. 19 Podmínky při lití a tuhnutí kol ověřovací série

Označení kola	Pohyb při lití		Pohyb po odlití		Teplota lití
	Otáčky/min	Čas [s]	Otáčky/min	Čas [s]	
Kolo č. 11	130	5	30	???	1462°C
Kolo č. 12	130	5	30	6x10	1460°C
Kolo č. 61	130	5	30	60x1	1466°C
Kolo č. 62	130	5	30	60x1	1461°C

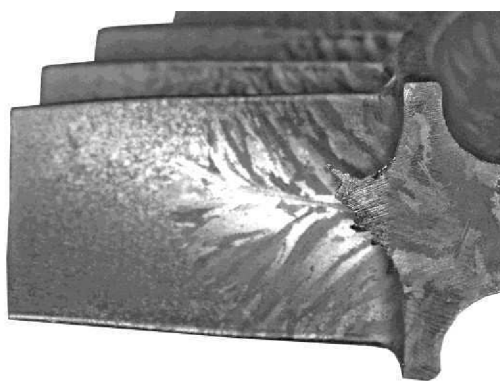
V ověřovací sérii byla vyhodnocena pouze makrostruktura a tahové zkoušky za pokojové teploty.

4.7.1 Vyhodnocení makrostruktury ověřující série

Kolo č.11 (30 ot, ???)



Obr. 65 Makrostruktura kola č. 11

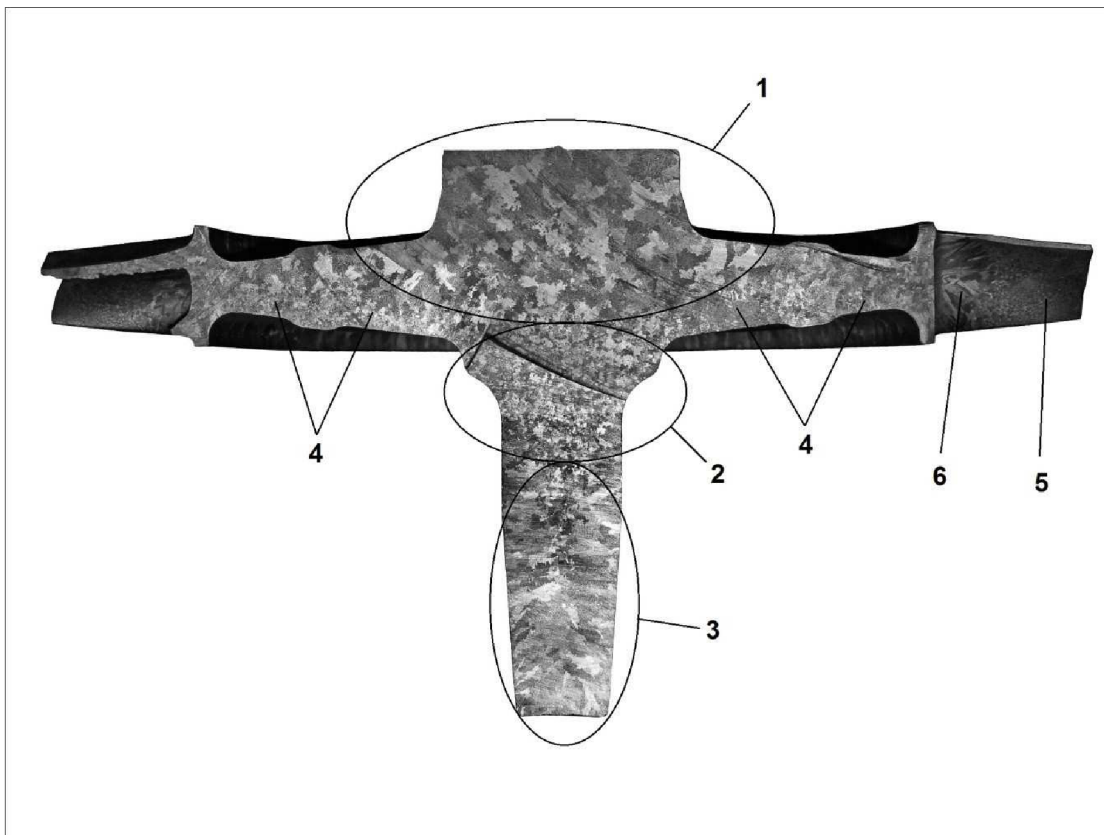


Obr. 66 Lopatka kola č. 11

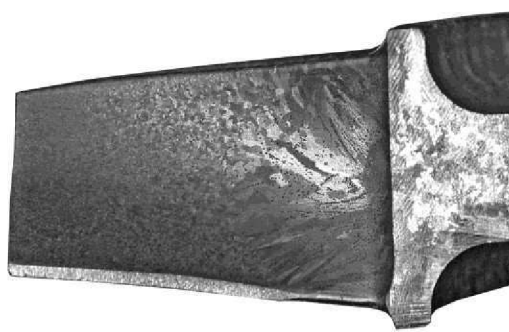
- 1) Hrubá rovnoosá zrna v o rozměrech 13 – 16 mm. V horní oblasti jsou zrna jemnější okolo 8 mm.
- 2) Oblast rovnoosých zrn s rozměry v rozmezí 4 – 12 mm.
- 3) Rovnoosá zrna o velikosti 8 – 12 mm.
- 4) Jemná rovnoosá zrna s velikostí nepřesahující 0,5 mm.
- 5) Sloupcová zrna s maximální délkou 12 mm.

Struktura kola č. 11 je po celé ploše poměrně rovnoměrná. Nejsou zde žádné oblasti velmi jemných zrn, ani oblasti s velmi hrubými zrny. Jak již bylo zmíněno výše, kolo č. 11 nebylo odlito podle předepsaných podmínek, proto jsou výsledky z tohoto odlitku nevyhovující.

Kolo č.12 (30 ot, 6 x 10 sec)



Obr. 67 Makrostruktura kola č. 12

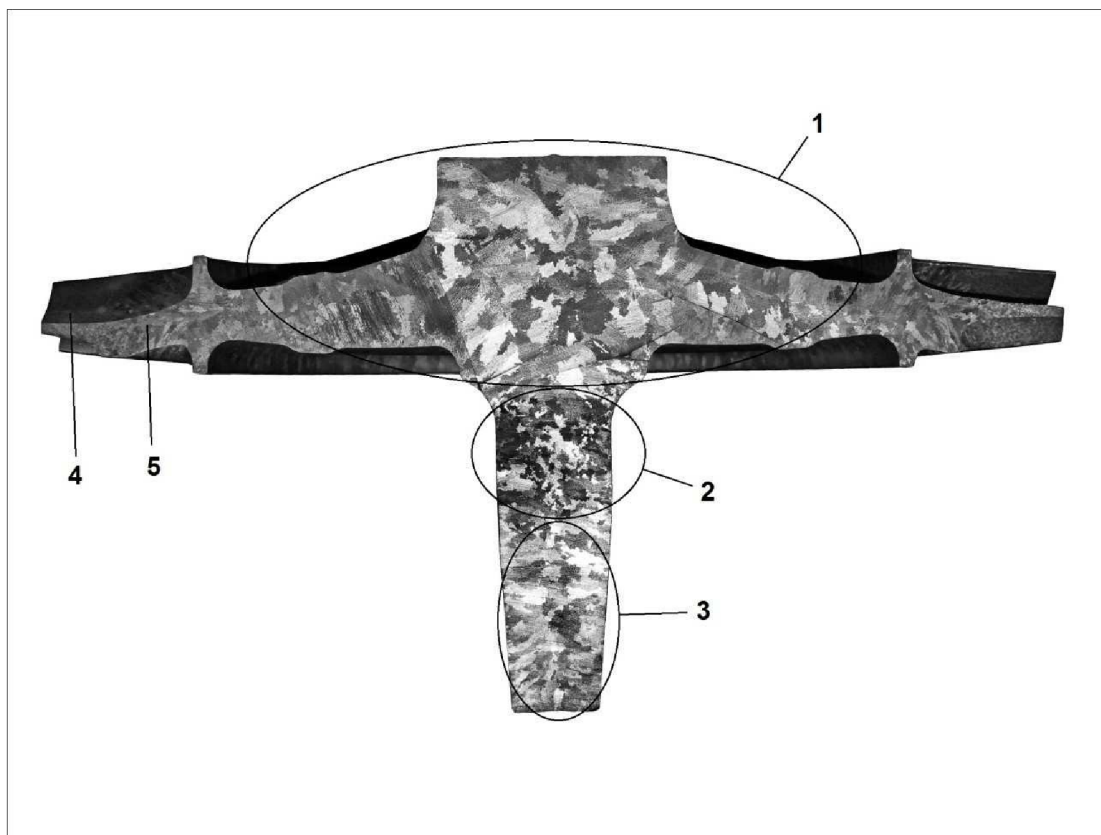


Obr. 68 Lopatka kola č. 12

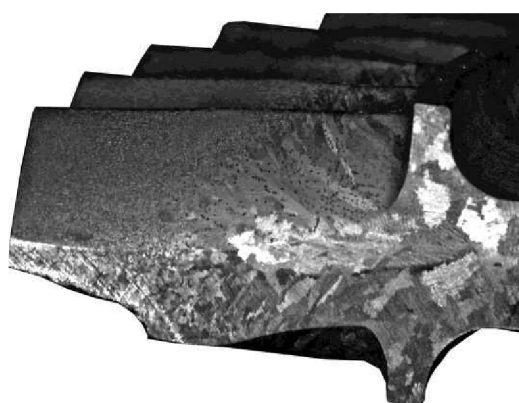
- 1) Oblast hrubých rovnoosých zrn v rozmezí 8 – 16 mm.
- 2) Velmi jemná rovnoosá zrna s velikostí okolo 1 – 3 mm.
- 3) Oblast převážně sloupcových zrn o velikosti 10 – 15 mm. V osové oblasti se vyskytují i rovnoosá zrna o rozměrech do 6 mm.
- 4) Jemná rovnoosá zrna s rozměry do 4 mm.
- 5) Oblast jemných rovnoosých zrn menších než 0,5 mm.
- 6) Sloupcová zrna s velikostí do 9 mm.

Makrostruktura kola č. 12 se příliš neliší od kola č. 1 z původní série, i když oblast jemných rovnoosých zrn není soustředěná plně ve středové oblasti navazující na nálitek, ale je posunuta směrem dolů do čepu kola a také do spodní části disku dále od osy odlitku (Oblast 4). Celkově je struktura kola poměrně jemnozrná a potvrzuje efektivní režim cyklování.

Kolo č.61 (30 ot, 60 x 1 sec)



Obr. 69 Makrostruktura kola č. 61

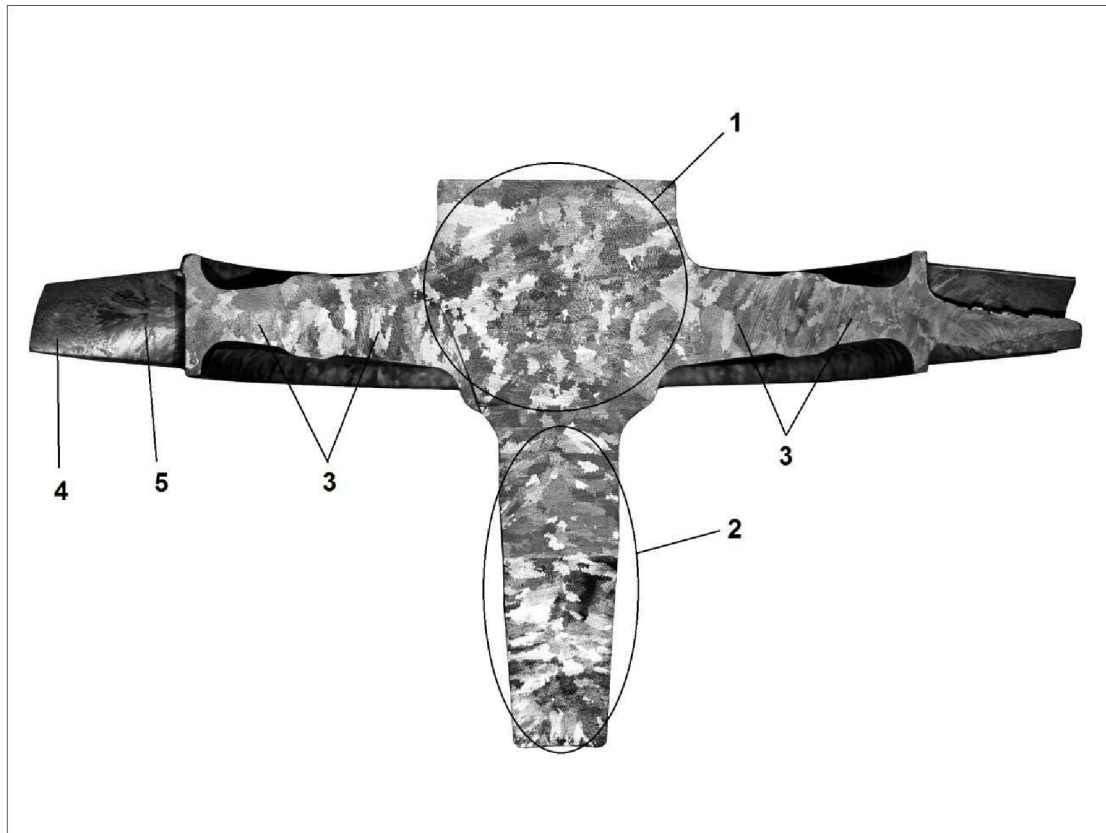


Obr. 70 Lopatka kola č. 61

- 1) Hrubá rovnoosá zrna 9 – 18 mm. Směrem od osy odlitku se mírně zmenšují.
- 2) Oblast jemných rovnoosých zrn 2 – 5 mm.
- 3) Převážně rovnoosá zrna o rozměrech 8 – 12 mm.
- 4) Velmi jemná rovnoosá zrna menší než 0,5 mm.
- 5) Sloupcová zrna s délkou do 11 mm.

Struktura kola č. 61 je velice podobná kolu č. 6 z první série. Oblast 1 je pouze mírně hrubší. Opět se zde vyskytují velmi jemná rovnoosá zrna v čepu odlitku, ovšem ve větší míře (oblast 2). Celkově se tedy potvrzuje efektivní režim cyklování.

Kolo č.61 (30 ot, 60 x 1 sec)



Obr. 71 Makrostruktura kola č. 62



Obr. 72 Lopatka kola č. 62

- 1) Oblast rovnoosých zrn s velikostí v rozmezí 10 – 15 mm. Ve středové oblasti se vyskytují menší zrna s průměrnou velikostí 7 mm.
- 2) Převážně rovnoosá zrna o velikosti 6 – 14 mm.
- 3) Oblast je tvořena rovnoosými zrny o velikosti 10 – 17 mm.
- 4) Velmi jemná rovnoosá zrna s maximální velikostí 0,5 mm.
- 5) Sloupcová zrna s délkou nepřesahující 13 mm.

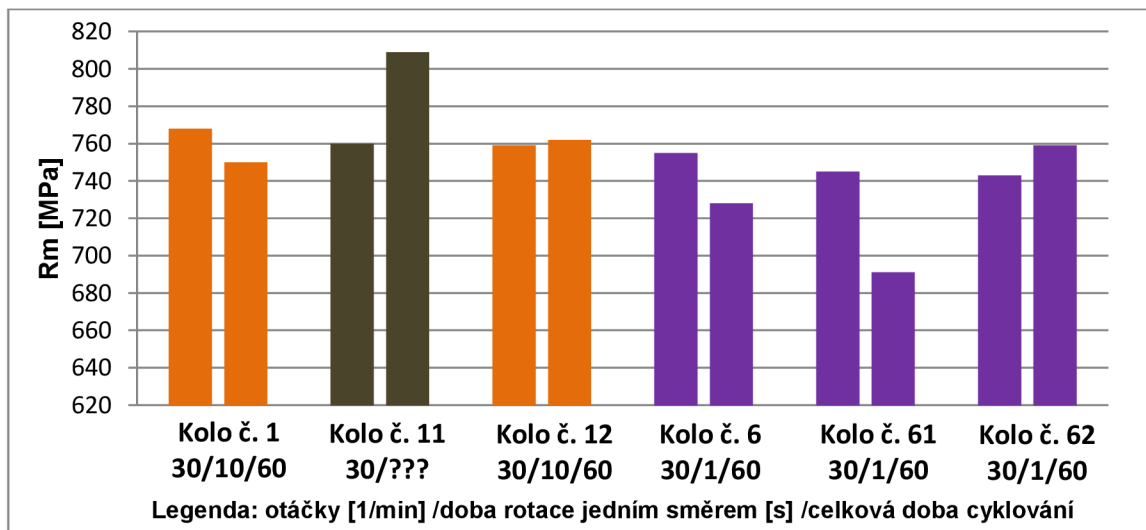
Makrostruktura kola č. 62 je stejně jako v předchozím případě poměrně jemnozrná. Rozdíl je v absenci jemných rovnoosých zrn v oblasti čepu odlitku, která se vyskytovala u obou kol odlévaných za stejného režimu cyklování. Přesto se však potvrzuje příznivý vliv tohoto režimu oscilace na strukturu kola.

4.7.2 Tahové zkoušky

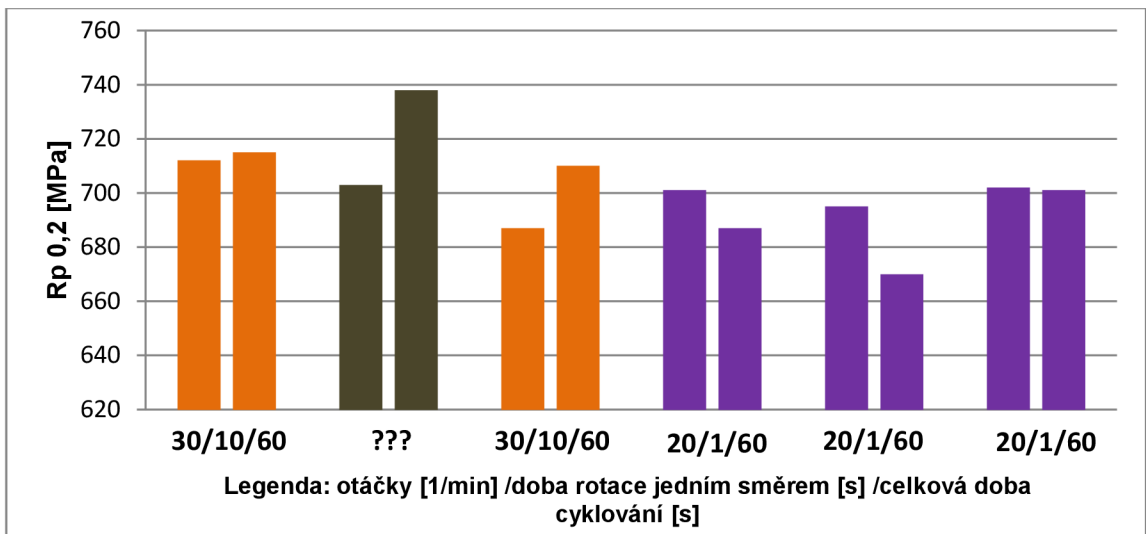
Z nově odlitých kol byly stejně jako v předchozím případě zhotoveny dvě zkušební tyčky pro tahové zkoušky. Místo odebrání z odlitku, zatěžovací síla i všechny další parametry byly identické. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 20 spolu s výsledky příslušného kola z první série pro porovnání.

Tab. 20 Výsledky tahových zkoušek z ověřující série s porovnáním příslušného kola z původní série

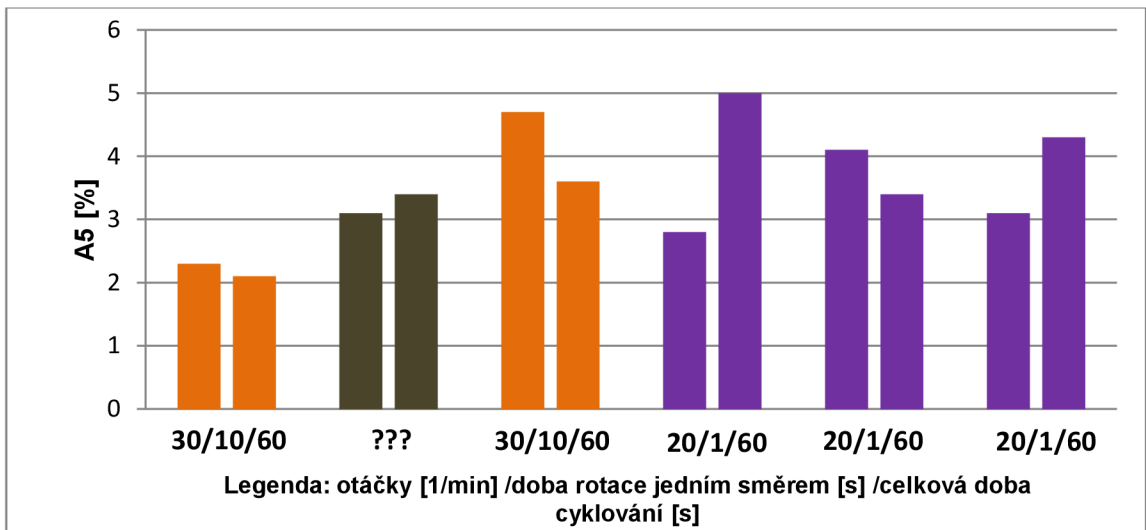
Odlitek	Označení vzorku	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	As [%]
Kolo č. 1	1-1	712	768	2,3
	1-2	715	750	2,1
Kolo č. 1.1	11-1	703	760	3,1
	11-2	738	809	3,4
Kolo č. 1.2	12-1	687	759	4,7
	12-2	710	762	3,6
Kolo č. 6	6-1	701	755	2,8
	6-2	687	728	5
Kolo č. 6.1	61-1	695	745	4,1
	61-1	670	691	3,4
Kolo č. 6.2	62-1	702	743	3,1
	62-2	701	759	4,3



Graf 11 Meze pevnosti jednotlivých vzorků



Graf 12 Meze kluzu jednotlivých vzorků



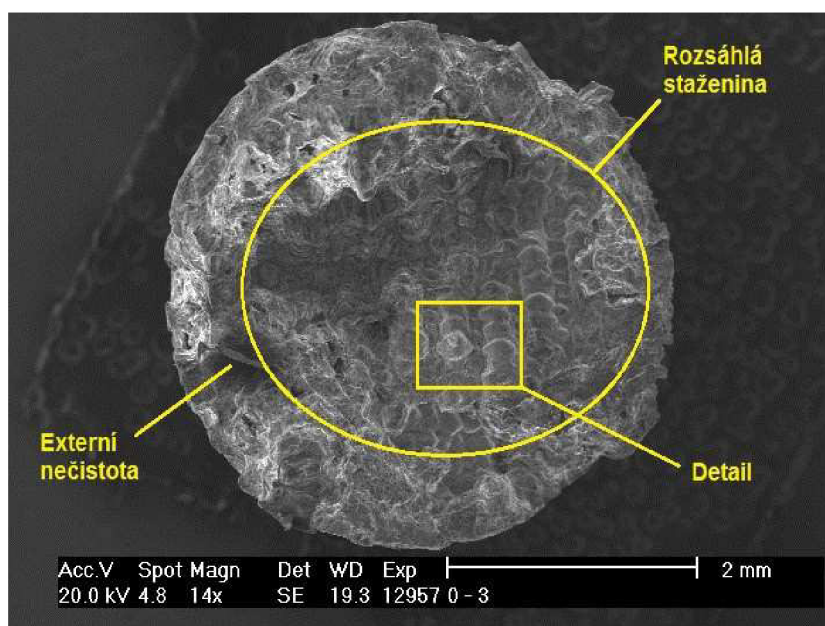
Graf 13 Tažnosti jednotlivých vzorků

Ověřovací série prakticky potvrdila výsledky z původních zkoušek. Výsledné hodnoty meze pevnosti a meze kluzu se od sebe až na výjimky příliš neliší. Nejvyšší meze pevnosti dosáhl vzorek 11-2, který však nemůže být s jistotou zahrnut do výsledků kvůli nedodržení podmínek cyklování. Ve výsledcích tažnosti jsou patrné větší rozdíly.

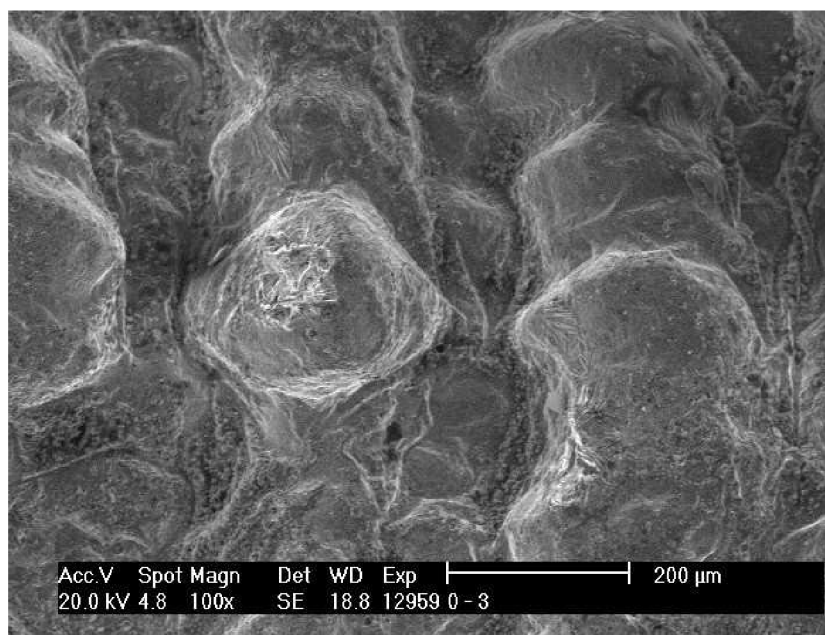
4.8 Vyhodnocení lomových ploch

Lomové plochy byly vyhodnoceny na skenovacím elektronovém mikroskopu Philips XL 30 v režimu sekundárních elektronů. Celkem se hodnotilo 5 zkušebních vzorků se zhoršenými mechanickými vlastnostmi, kde byl předpoklad výskytu vad. Konkrétně 4 vzorky z tahové zkoušky za pokojové teploty (0-1, 3-1, 5-2, 61-2) a 1 vzorek z creepové zkoušky (0-3).

Creepový vzorek 0-3



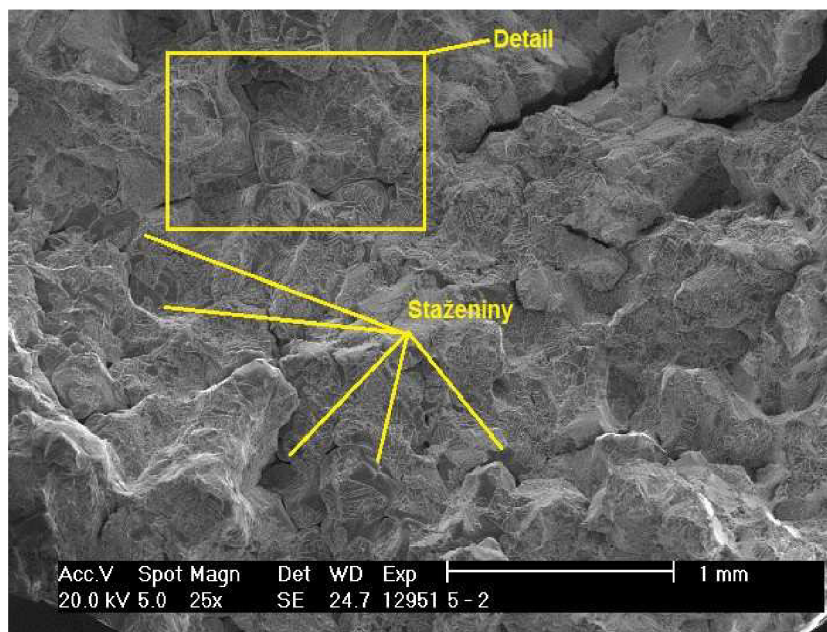
Obr. 73 Vzorek na creepovou zkoušku 0-3



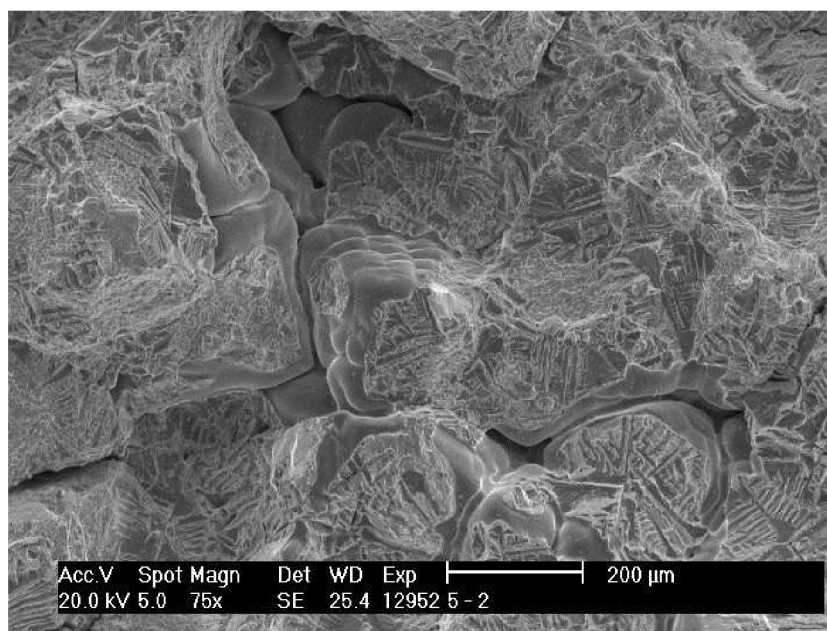
Obr. 74 Detail staženiny creepového vzorku 0-3

Na lomové ploše creepového vzorku 0-3 je zřetelná rozsáhlá staženina, která zaujímá přibližně 50% plochy vzorku. Z detailního obrázku je patrné, že se zde nenachází žádné plochy porušené lomem, které by přenášely napětí. Výsledky creepové zkoušky lze proto považovat za zcela nevyovídající.

Vzorek pro tahovou zkoušku 5-2



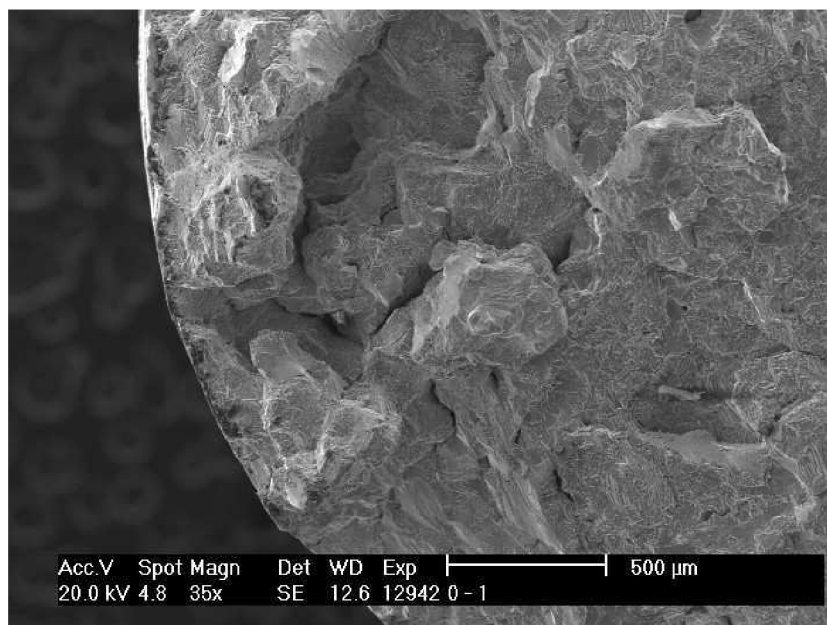
Obr. 75 Výskyt mikrostaženin ve vzorku 5-2



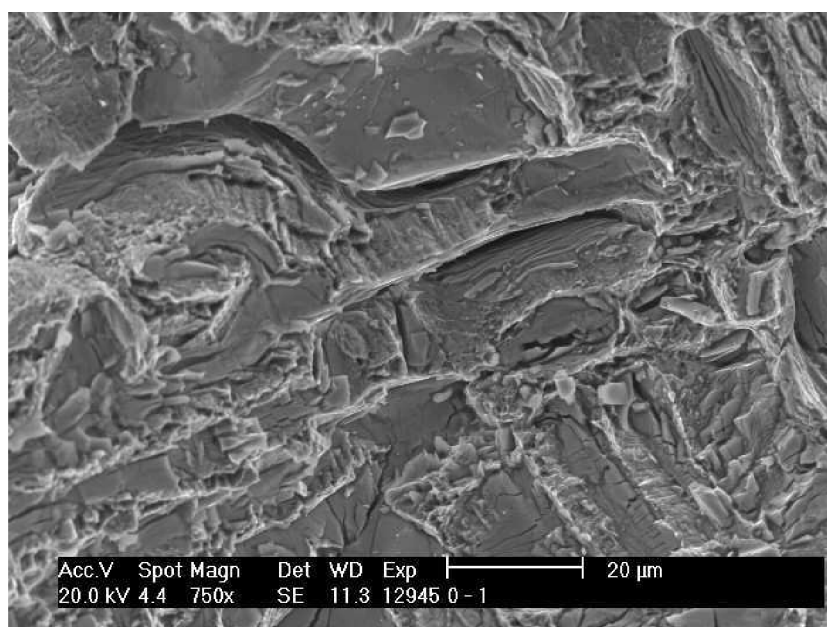
Obr. 76 Detail mikrostaženin ve vzorku 5-2

Ve vzorku 5-2 se vyskytují četné mikrostaženiny. Na detailním obrázku jsou zřetelné hladké zaoblené konce dendritů na povrchu dutin.

Vzorek pro tahovou zkoušku 0-1



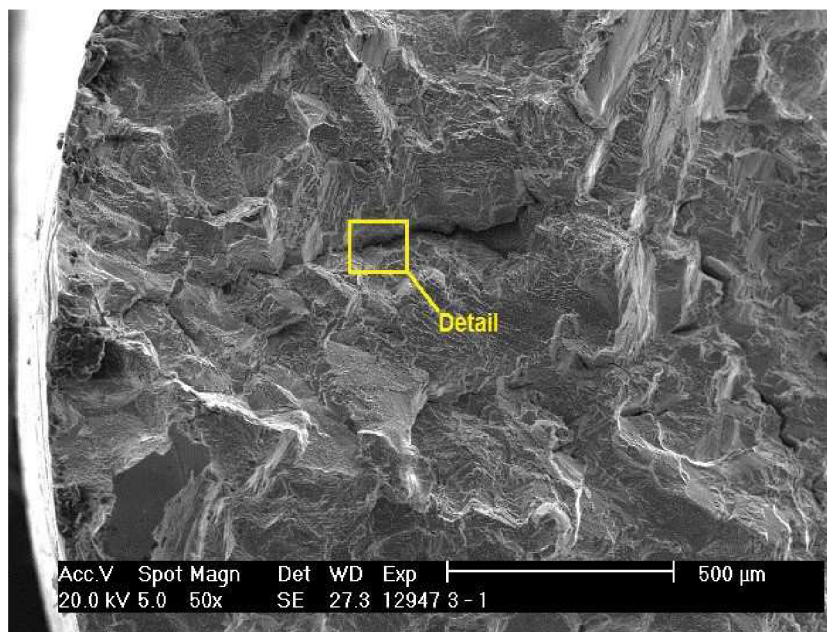
Obr. 77 Lomová plocha vzorku 0-1



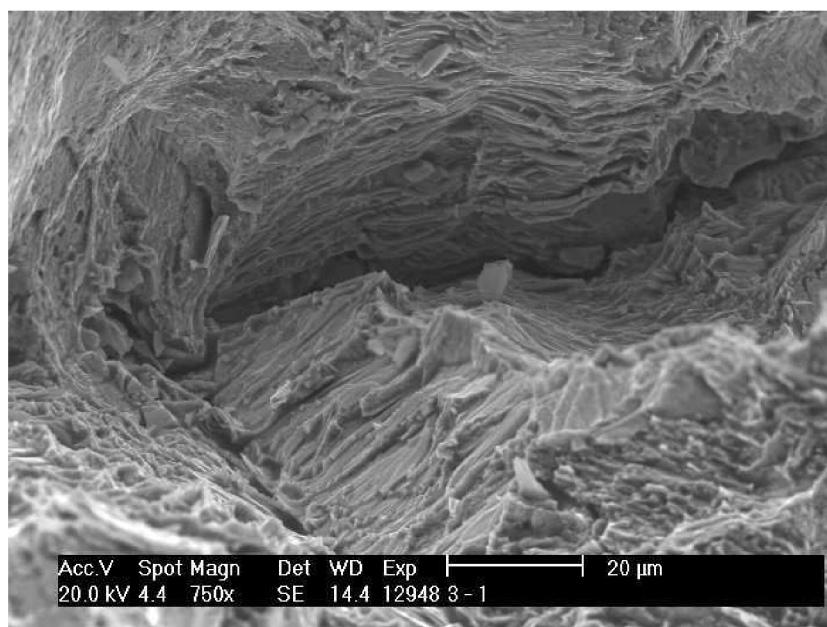
Obr. 78 Detail struktury vzorku 0-1

Z obrázku je patrná značná členitost lomu vzorku 0-1. Při větším zvětšení je patrný výskyt pravděpodobně tvrdých křehkých fází.

Vzorek pro tahovou zkoušku 3-1



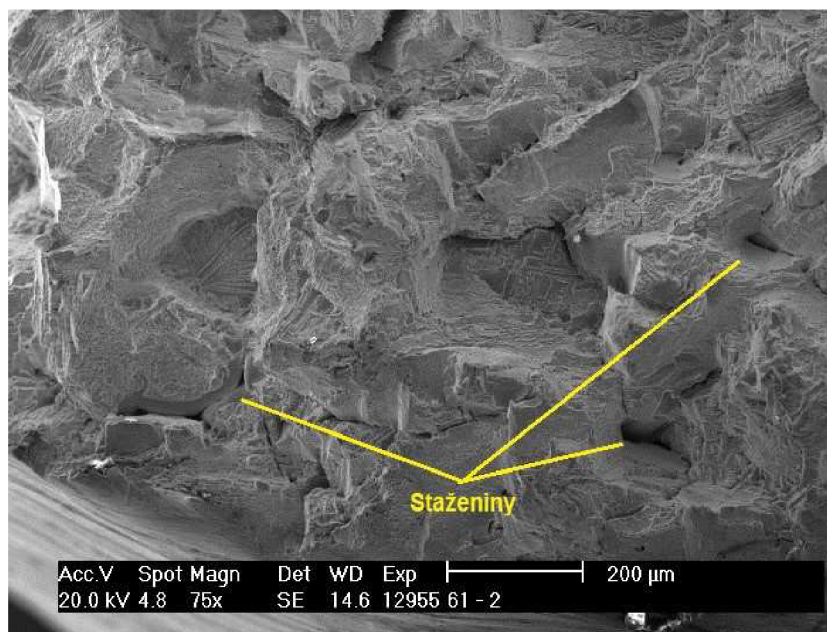
Obr. 79 Lomová plochy vzorku 3-1



Obr. 80 Detail na vzorku 3-1

Lomová plocha vzorku 3-1 je velice podobná vzorku předchozímu. Opět jsou zde patrné četné praskliny, jejichž povrch je pokryt pravděpodobně vyloučenou křehkou fází.

Vzorek pro tahovou zkoušku 61-2



Obr. 81 Struktura vzorku 61-2

Lomová plocha vzorku 61-2 se vyznačuje nižším výskytem vyloučených křehkých fází. Objevují se zde ovšem opět mikrostaženiny.

Z důvodu značné členitosti povrchu nebylo možné určit chemické složení vyloučených fází. Dále kvůli vyčerpání časového plánu mikroskopu nebylo možné zkoumat více vzorků a porovnat tak výsledky se vzorky, které dosahovaly lepších mechanických vlastností. Cílem dalšího výzkumu by proto mohlo být hlubší prozkoumání lomových ploch.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnocení vlivu oscilace skořepinové formy při tuhnutí odlitku na jeho vlastnosti. Experiment ověřoval uplatnění teorie multiplikace dendritů, tedy ulamování špiček a sekundárních os dendritů, které jsou následně zanášeny do taveniny, kde působí jako krystalizační zárodky, což má za následek zjemnění zrna. V experimentální části se tedy vyhodnocoval vliv změny parametrů režimu cyklování na odlitek. Posuzována byla makrostruktura odlitku, pórovitost, mechanické vlastnosti za pokojové i zvýšené teploty a lomové plochy některých zkušebních vzorků.

Experiment byl proveden na turbínovém axiálním kole ze slitiny IN 713LC, které je zařazeno v sériové výrobě DPL PBS. Průměr kola činí 297 mm a hmotnost čistého odlitku je 9 kg. Nejprve byly zvoleny podmínky různých režimů cyklování. Všechny ostatní parametry jako lící teplota, izolace skořepiny nebo teplota žíhání skořepiny byly neměnné. Následně bylo odlito 7 odlitků, z nichž 1 byl odlit za podmínek sériové výroby pro porovnání.

Makrostruktura byla vyhodnocena v axiálním řezu kola. Z výsledků vyplývá, že změna parametrů režimu oscilace má prokazatelný vliv na makrostrukturu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při prodloužení režimu cyklování a zachování ostatních parametrů (kolo č.1). Snižování otáček a počtu reverzací vedlo k výraznému zhrubnutí struktury (kolo č. 2, 3, 4). Naopak zvyšování počtu otáček a reverzací vedlo k požadovanému zjemnění struktury nikoliv však v takovém rozsahu jako tomu bylo u kola č. 1 (kolo č. 5, 6).

Stejně jako makrostruktura byla i pórovitost vyhodnocována po celé ploše axiálního řezu a dále pak na podélném řezu lopatkou. Předpoklad vyšší pórovitosti u odlitků s jemnější strukturou se nepotvrdil. Naopak nejvyšší podíl pórů byl naměřen u kol s hrubozrnnou strukturou (kolo č. 2, 3). Přes značné rozdíly mezi jednotlivými koly však žádné z nich nepřekročilo maximální přípustné hodnoty pórovitosti stanovené v předpisu. Lopatky byly v podélném řezu zcela bez mikrostaženin.

Výsledky tahových zkoušek za pokojové teploty do jisté míry potvrzují předpoklad příznivého vlivu zjemnění zrna na mechanické vlastnosti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo na kole s nejjemnější strukturou (kolo č. 1). Tento trend potvrzují i výsledky kola č. 6. Vysokých hodnot však dosáhlo i kolo č. 2, jehož struktura je spíše hrubozrnná.

Z výsledků creepových zkoušek není patrná žádná závislost velikosti zrna na odolnosti proti tečení za zvýšených teplot. Zkušební vzorky byly odebrány z těch míst v odlitku, kde nejsou velké rozdíly v makrostruktuře mezi jednotlivými koly. Výsledky jsou tedy ovlivněny především náhodným vlivem vad a nehomogenity. Vzhledem k malému průměru zkušebních vzorků může výsledek zkoušky značně ovlivnit i menší vada struktury.

Žádná jasná závislost není patrná ani v případě tvrdosti. V místě měření opět nejsou velké rozdíly ve struktuře. Pro slitinu IN 713LC není však hodnota tvrdosti zcela vypovídající a jedná se tedy pouze o orientační měření.

Na základě výsledků byly vybrány nejvhodnější varianty režimu cyklování, přičemž nejlepších výsledků bylo dosaženo u kol č. 1 a 6. Následně byla odlita ověřovací série 4 odlitků, 2 pro každý režim. Vlivem chyby v nastavení rotační jednotky však nebyl první

odlitek vyroben za předepsaných podmínek. Výsledky tohoto odlitku proto nejsou vypovídající.

Ověřovací série prakticky potvrdila výsledky z původních zkoušek. Vliv na zjemnění zrna je prokazatelný, přestože se od sebe výsledné makrostruktury do jisté míry lišily. Výsledné hodnoty meze pevnosti a meze kluzu se od sebe až na výjimky příliš neliší. Je tedy prokazatelné, že jemnější struktura má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JOCH, Antonín, Karel HERBÁČEK, Petr ŃUKSA, Petr ŠUSTEK a Petr ŠABACKÝ. *Odlévání turbínových kol turbodmychadel technologií přesného lití s využitím rotace skořepinové formy ve vakuu*. Slévárství. 2011, LIX, 3-4, s. 69-71. ISSN 0037-6825.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [3] BENEŠ, Antonín. *Nauka o kovech*. Praha: SNTL, 1974. 355s.
- [4] PODRÁBSKÝ, Tomáš, Karel NĚMEC, Martin JULIŠ. *neželezné kovy a jejich slitiny II*. [online]. VUT brno [cit. 2016-05-18]. dostupné z: <<http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-zimni-semestr>>.
- [5] HEMALA, R. *Stanovení vhodného tvaru zkušebních tyčí pro odstranění vnitřních vad ovlivňujících testování nízko- a vysokocyklové únavy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 79 s.
- [6] ZEMČÍK, Ladislav. *Žáropevné slitiny niklu 1*. Brno, 1990. Vysoké učení technické.
- [7] ZEMČÍK, Ladislav. *Přesné lití žárových částí spalovacích turbín a turbodmychadel: Investment casting of high temperature parts of gas turbines and turbocharges : teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Strojírenská technologie*. Brno: VUTIUM, 2009, 25 s. ISBN 978-80-214-3844-6.
- [8] BHADESHIA, H. K. D. H. *Nickel Based Superalloys* [online]. University Of Cambridge [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/superalloys.html>>.
- [9] *Turbine Blade – Nickel Superalloy* [online]. [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <<http://www.eng-atoms.msm.cam.ac.uk/RoyalSocDemos/Metals-up-close/TurbineBlade>>.
- [10] LOSERTO VÁ, Monika. *Úvod do nauky o materiálu*. [online]. VŠB-TU Ostrava, 2013 [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_Ni_VT_IMC.pdf>.
- [11] DONACHIE, M.J., DONACHIE, S.J. *SUPERALLOYS A Technical Guide*. Second Edition. ASM INTERNATIONAL, 2002. 439 s. ISBN 0-87170-749-7.
- [12] POSPÍŠILOVÁ, S. *Vliv alitosilitace na strukturu a vlastnosti litých niklových superslitin*. Disertační práce na ÚMVI při FSI VUT v brně. Brno, 2007. 113 s.
- [13] HAKL, Jan, Tomáš VLASÁK. *Žáropevné vlastnosti vybraných niklových superslitin*. Slévárství. 2006, LIV, 12, s. 444-452. ISBN 0037-6825.
- [14] *Příprava a hodnocení materiálografických vzorků* [online]. ÚMVI FSI VUT Brno, 2010 [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <<http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/index.php>>.
- [15] ŠMÍD, Miroslav a kol. *Vliv rozdílných podmínek přesného lití na vysokocyklovou únavu superslitiny MAR-M 247 při vysokých teplotách*. Slévárství. 2015, LXIII, 9-10, s. 340-344. ISBN 0037-6825

- [16] HAKL, Jan, Tomáš VLASÁK, Pavel KOVAŘÍK, Pavel NOVÁK, Radovan PECH. *Optimalizace chemického složení lité žáropevné slitiny s cílem prevence vzniku sigma-fáze ve struktuře*. Slévárenství. 2001, XLIX, 10, s. 601-606. ISBN 0037-6825
- [17] HORÁČEK, Milan. *Technologie Vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/studium/studijni_opory>.
- [18] MATOUŠEK, Roman. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 38 s.
- [19] *Výzkum a vývoj technologií přesného lití nových typů odlitků lopatek plynových turbin a turbinových kol plynové turbíny*. Projekt MPO ČR č. FR-T12/104
- [20] EWING, B. A. GREEN, K. A. *Polycrystalline grain controlled castings for rotating compressor and turbine components*. [online]. [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1984/superalloys_1984_33_42.pdf>.
- [21] DELGADO, IR. *Grainex Mar-M 247 Turbine Disk Life Study for NASA's High Temperature High Speed Turbine Seal Test Facility*. [online]. NASA/TM-2005-213873 [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050239002.pdf>>.
- [22] *Hot Isostatic Pressing of Near Net Shaped Parts*. *Hempel-metals.com* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <<http://www.hempelmetals.com/UserFiles/File/hot%20isostatic%20pressing.pdf>>.
- [23] PBS Velká Bíteš [online]. [cit. 2016-5-20]. Dostupné z: <<http://www.pbsvb.cz/sluzby-zakaznikum/presne-odlitky>>.
- [24] JOCH, Antonín, Karel HRBÁČEK. *Přesně lité odlitky ze superslitin na bázi niklu a kobaltu*. [online]. [cit 2016-5.18]. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/presne-lite-odlitky-ze-superslitin-na-bazi-niklu-a-kobaltu.html>>.
- [25] PBS Velká Bíteš, a.s - Soukromý fotoarchiv DPL.
- [26] PBS Velká Bíteš, a.s – *Fotografická dokumentace z exkurze ve výrobě*. (autor: Roman Matoušek). [cit 2014-05-12].

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Kulový uzávěr (monel) [4]
Obr. 2 Vývoj niklových superslitin [7]
Obr. 3 Uspořádání atomů v mřížce Ni₃Al fáze [9]
Obr. 4 Vliv teploty a obsahu γ' na mez kluzu niklových superslitin [10]
Obr. 5 Bimodální struktura a vyšším obsahem fáze γ' [11]
Obr. 6 Uspořádání atomů v mřížce Ni₃Nb fáze [8]
Obr. 7 schéma technologie vytavitelného modelu [17]
Obr. 8 Schéma dvoukomorové indukční vakuové pece [5]
Obr. 9 Konvenčně lité turbinové kolo ze slitiny MAR-M 247 [21]
Obr. 10 Turbinové kolo ze slitiny MAR-M 247 lité metodou Grainex [21]
Obr. 11 Princip multiplikace dendritů [6]
Obr. 12 Síly působící na dendrity při změně rychlosti otáček [19]
Obr. 13 Exogenní a endogenní tuhnutí [18]
Obr. 14 Proces HIP [22]
Obr. 15 Vstříkovací lis [25]
Obr. 16 Robot vodní obalovací linky [23]
Obr. 17 Bojlerkláv [25]
Obr. 18 Karuselová žíhací pec [23]
Obr. 19 Vakuová dvoukomorová indukční pec [23]
Obr. 20 Pneumatické kladivo [26]
Obr. 21 Dvoukomorový závěsný tryskač [23]
Obr. 22 Turbinové axiální kolo [26]
Obr. 23 Voskový model v matečné formě [26]
Obr. 24 Modelová sestava [25]
Obr. 25 Způsob izolace skořepiny [26]
Obr. 26 Způsob izolace skořepiny [26]
Obr. 27 Skořepinová forma po aplikaci exotermického zásypu [26]
Obr. 28 Skořepinové formy na licím poli [26]
Obr. 29 Rozdělení metalografických vzorků
Obr. 30 Místo řezu lopatkou
Obr. 31 Zalité vzorky
Obr. 32 Bruska/leštička Tegamin 30

Obr. 33	Umístění vzorků
Obr. 34	Kotoučová pila Discotom 100
Obr. 35	CNC soustruh ROMI C420
Obr. 36	Makrostruktura kola č. 0
Obr. 37	Lopatka kola č. 0
Obr. 38	Makrostruktura kola č. 1
Obr. 39	Lopatka kola č. 1
Obr. 40	Makrostruktura kola č. 2
Obr. 41	Lopatka kola č. 2
Obr. 42	Makrostruktura kola č. 3
Obr. 43	Lopatka kola č. 3
Obr. 44	Makrostruktura kola č. 4
Obr. 45	Lopatka kola č. 4
Obr. 46	Makrostruktura kola č. 5
Obr. 47	Lopatka kola č. 5
Obr. 48	Makrostruktura kola č. 6
Obr. 49	Lopatka kola č. 6
Obr. 50	Příklad zobrazené oblasti A (3-13)
Obr. 51	Způsob analýzy pórovitosti
Obr. 52	Pórovitost v kole č. 0
Obr. 53	Pórovitost v kole č. 1
Obr. 54	Pórovitost v kole č. 2
Obr. 55	Pórovitost v kole č. 3
Obr. 56	Pórovitost v kole č. 4
Obr. 57	Pórovitost v kole č. 5
Obr. 58	Pórovitost v kole č. 6
Obr. 59	Trhací zařízení
Obr. 60	Závitové čelisti
Obr. 61	Místo měření tvrdosti
Obr. 62	Tvrdoměr HPO 250
Obr. 63	Místo měření tvrdosti
Obr. 64	Místo odběru zkušební tyče pro creepovou zkoušku
Obr. 65	Makrostruktura kola č. 11

Obr. 66	Lopatka kola č. 11
Obr. 67	Makrostruktura kola č. 12
Obr. 68	Lopatka kola č. 12
Obr. 69	Makrostruktura kola č. 61
Obr. 70	Lopatka kola č. 61
Obr. 71	Makrostruktura kola č. 62
Obr. 72	Lopatka kola č. 62
Obr. 73	Vzorek na creepovou zkoušku 0-3
Obr. 74	Detail staženiny creepového vzorku 0-3
Obr. 75	Výskyt mikrostaženin ve vzorku 5-2
Obr. 76	Detail mikrostaženin ve vzorku 5-2
Obr. 77	Lomová plocha vzorku 0-1
Obr. 78	Detail struktury vzorku 0-1
Obr. 79	Lomové plochy vzorku 3-1
Obr. 80	Detail vzorku 3-1
Obr. 81	Struktura vzorku 61-2

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Nominální chemické složení slitin IN 713C a IN 713LC (Hm. %, Ni – základ) [13]
Tab. 2	Nominální chemické složení slitin IN 738C a IN 738LC (Hm. %, Ni – základ) [13]
Tab. 3	Nominální chemické složení slitin IN 792 a IN 792 5A (Hm. %, Ni – základ) [13]
Tab. 4	Chemické složení slitiny MAR-M 247 (hm. %, Ni – základ) [14]
Tab. 5	Chemické složení slitiny ŽS6K (hm. %, Ni – základ) [14]
Tab. 6	Postup Obalování
Tab. 7	Podmínky při lití a tuhnutí jednotlivých kol
Tab. 8	Maximální přípustná pórovitost
Tab. 9	Pórovitost v kole č. 0
Tab. 10	Pórovitost v kole č. 1
Tab. 11	Pórovitost v kole č. 2
Tab. 12	Pórovitost v kole č. 3

Tab. 13	Pórovitost v kole č. 4
Tab. 14	Pórovitost v kole č. 5
Tab. 15	Pórovitost v kole č. 6
Tab. 16	Výsledky tahových zkoušek
Tab. 17	Výsledky zkoušky tečení materiálu
Tab. 18	Výsledky měření tvrdosti
Tab. 19	Podmínky při lití a tuhnutí kol ověřovací série
Tab. 20	Výsledky tahových zkoušek z ověřující série s porovnáním příslušného kola z původní série

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1	Meze pevnosti jednotlivých vzorků
Graf 2	Meze kluzu jednotlivých vzorků
Graf 3	Tažnosti jednotlivých vzorků
Graf 4	Závislost meze pevnosti a meze kluzu na době rotace jedním směrem (při 30 ot/s)
Graf 5	Závislost těžnosti na době rotace jedním směrem (při 30 ot/s)
Graf 6	Závislost meze pevnosti a meze kluzu na rychlosti otáčení (při režimu cyklování 6x10)
Graf 7	Závislost těžnosti na rychlosti otáčení (při režimu cyklování 6x10)
Graf 8	Doba do lomu při creepové zkoušce
Graf 9	Tvrdomost HBW
Graf 10	Hodnoty tvrdosti a doby do lomu creepové zkoušky jednotlivých kol
Graf 11	Meze pevnosti jednotlivých vzorků
Graf 12	Meze kluzu jednotlivých vzorků
Graf 13	Tažnosti jednotlivých vzorků