

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

VÝVOJ A APLIKACE HOŘČÍKOVÝCH SLITIN V DOPRAVNÍ TECHNICE

HABILITAČNÍ PRÁCE

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071307

Ing. Ivo Juříčka, CSc.

Liberec, květen 2002

U357 S

19.1. [2003]

Název práce:

Vývoj aplikace hořčíkových slitin v dopravní technice.

Development and applications of magnesium alloys in transport.

Klíčová slova:

hořčíkové slitiny - magnesium alloys

liti do pisku - sand casting

technologické aspekty - technological aspects

příklady odlitků - examples of casting

OBSAH

1.	ÚVOD	5
2.	HOŘČÍK A JEHO SLITINY	7
2.1.	Hořčík a legující prvky	7
2.2.	Označování Mg slitin a jejich charakteristiky	8
2.3.	Základní vlastnosti hořčíkových slitin	11
2.3.1.	Chemické složení slitin	11
2.3.2.	Mechanické vlastnosti při pokojové teplotě	11
2.3.3.	Mechanické vlastnosti při vyšších teplotách	12
2.3.4.	Speciální mechanické vlastnosti	12
2.3.5.	Fyzikální vlastnosti	12
2.3.6.	Koroze hořčíkových slitin	13
2.4.	Rekapitulace hořčíkových slitin	15
2.4.1.	Slitiny hořčík - hliník	18
2.4.2.	Slitiny hořčík - zirkonium	19
2.4.3.	Vývoj nových slitin	21
2.5.	Zvýšení korozní odolnosti	21
2.5.1.	Konečná úprava povrchu	22
2.5.2.	Mechanická úprava povrchu	22
2.5.3.	Organické povlaky	23
2.5.4.	Pokovování	24
2.6.	Závěrečné hodnocení	24
3.	VÝVOJ NOVÉHO TYPU SLOŽENÉHO ŽELEZNÍČNÍHO KOLA	25
3.1.	Nové vývojové tendence a hlavní závěry	25
3.2.	Zvolená konstrukční alternativa a etapy vývoje	26
3.3.	Zhodnocení zkoušek I. etapy	28

3.3.1.	Chemické složení	29
3.3.2.	Metalografický rozbor	29
3.3.3.	Zkouška tvrdosti	30
3.3.4.	Zkouška vrubové houževnatosti	30
3.3.5.	Zkouška tahem dle ČSN 40 0310	30
3.4	Ověření vlastností slitiny AZ 91 HP v II. etapě vývoje.	31
3.4.1	Průběh tavby a chemické složení	31
3.4.2.	Mechanické vlastnosti	32
3.4.3.	Metalografický rozbor struktury	33
3.4.4.	Fraktografický rozbor	35
3.4.5.	Zhodnocení zkoušek II. etapy vývoje	36
3.5.	III. etapa - komplexní zkoušky prototypových kol	37
3.5.1	Výroba a kompletace prototypu složeného železničního kola	37
3.5.2	Ověření materiálu železničního kola s hlediska únavových vlastností	38
3.5.3	Vizuální a makroskopický rozbor	39
3.5.4	Metalografický rozbor	39
3.5.5	Zhodnocení III. etapy vývoje složeného železničního kola	40
4.	KVALITA A SPECIFICKÉ VADY CHARAKTERISTICKÉ PRO Mg-Al SLITINY.	41
4.1.	Rozbor kvality odlitků	41
4.2.	Mikroporezita	41
4.2.1.	Mikroporezita vzniklá příčinou neusměrněného tuhnutí	43
4.2.2.	Mikroporezita vzniklá naplyněním tekutého kovu	43
4.2.3.	Mikroporezita vzniklá v průběhu TZ (tepelného zpracování)	46
4.2.4.	Povrchová porezita	46
4.2.5	Rozlišení mikroporezity z hlediska příčiny vzniku	47
4.2.6.	Zhodnocení zkušebních taveb odlitků středů kol z hlediska povrchové porezity	49

4.2.7	Měření časového průběhu chladnutí odlitku středu kola a rozbor výsledků	50
4.3.	Oxidické vměstky	52
4.3.1.	Mikrolegování beryliem	53
4.3.2.	Závěr	55
5.	OVLIVNĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	56
5.1.	Zkoušky odlitků	56
5.1.1.	Zkoušky ovlivnění hodnoty meze kluzu	57
5.1.2.	Vliv velikosti zrna na hodnoty pevnosti v tahu	58
5.2.	Únavové vlastnosti materiálu AZ91D	59
5.2.1.	Únavové praskliny vlivem materiálových vad	59
5.2.2.	Únavové praskliny bez materiálových vad	60
5.3.	Zkoušky pro zlepšení únavových vlastností materiálu AZ91D ...	63
5.3.1.	Ovlivnění velikosti zrna	64
5.3.2.	Klíňové zkoušky vlivu odeznívání modifikace na velikost zrna a mechanické vlastnosti	66
5.3.3.	Závislost velikosti zrna na chemickém složení materiálu	68
5.3.4.	Vliv rychlosti ochlazování při tuhnutí odlitku na vlastnosti materiálu	68
5.3.5.	Ověření vlivu rychlosti tuhnutí odlitku po odlití na strukturu po tepelném zpracování	70
5.4.	Barevná metalografie a strukturní rozborů na elektronovém mikroskopu	71
5.4.1.	Barevná metalografie	72
5.4.2.	Elektronová mikroskopie	72
5.5.	Zkouška pro stanovení optimálního režimu TZ	74

5.6.	Návrh režimu TZ a výroba série zkušebních odlitků pro únavové zkoušky	75
5.7.	Návrh výroby a kontroly odlitků kol	77
5.8.	Zhodnocení výsledků ke kapitole ovlivnění mechanických vlastností	80
6.	APLIKACE HOŘČÍKOVÝCH SLITIN V PRAXI	82
7.	ZÁVĚR	83
8.	PROHLÁŠENÍ AUTORA	86
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	87
10.	SEZNAM PŘÍLOŽENÝCH TABULEK	92
11.	SEZNAM OBRAZOVÝCH PŘÍLOH	94

PŘÍLOHY :

Tabulky 1 - 40

Obrázky 1 - 147

1. ÚVOD

Hořčíkové slitiny jsou nelehčími kovovými konstrukčními materiály. Z tohoto důvodu nacházejí použití v konstrukcích, u kterých je jedním z prvořadých požadavků co nejnižší hmotnost. Největší část konstrukčních dílů z hořčíkových slitin byla tradičně spotřebovávána v letectví. V poslední době se však těžiště přesunulo do oblasti dopravní techniky, především do automobilových konstrukcí, kde je snaha o co největší snížení celkové hmotnosti vozidel a tím úsporu pohonných hmot. Slitiny hořčíku se také stále více používají jako náhrada jiných slitin a plastů. Jak je známo, ve světě je dostatek zdrojů pro primární těžbu surovin obsahujících hořčík.

Výrobní kapacity jsou v celém světě dostatečné a neustále se rozšiřují. Skutečná průmyslová výroba odlitků z hořčíkových slitin začala počátkem minulého století, k prudkému rozvoji pak došlo ve druhé světové válce s aplikací v leteckých konstrukcích. Po přechodném poklesu pak výroba postupně rostla. V roce 1955 dosáhla světová výroba 92 500 t za rok, v roce 1967 již 182 000 t /rok. Typickým příkladem tohoto období je motorová kliková skříň a převodovka vozu Volkswagen Beetle s ročním objemem 40 000 t. Současný stav celosvětové výroby je již 350 000 t/ročně, přičemž v průmyslově vyspělých zemích poptávka dále roste.

Tento stav souvisí v první řadě s výrazným zlepšením komplexu vlastností hořčíkových slitin, zejména zvýšením korozní odolnosti, která byla považována za jejich největší nedostatek, za druhé pak s masovostí současné výroby automobilů.

Podobně jako u jiných materiálů došlo i v oblasti hořčíkových slitin k výraznému pokroku vývojem slitin s odlišnými soubory vlastností, které jsou důsledkem nejen jejich chemického složení, ale i technologického zpracování. Kromě technologie lití je to především tepelné zpracování a povrchové úpravy. V současné době jsou vypracovány i zcela nové technologie výroby součástí, které pronikají do výrobních závodů.

Cílem habilitační práce je předložit soubor nových poznatků autora ve výzkumu, vývoji a aplikaci hořčíkových slitin. Příkladem může být aplikace technologie odlévání odlitků do furanových směsí se speciálními inhibitory hoření [1], např. odlitku skříně pohonu leteckého motoru DV 2 TURBOFAN (*obr. 1 a 2*). Dále zavedení nových typů slitin vysoké čistoty AZ91HP a AZ63HP pro součásti vyžadující vyšší korozní odolnost a únavovou pevnost, např. automobilová kola (*obr. 33*) a složená železniční kola (*obr. 108*).

Uvedený soubor poznatků vychází z provedených zkoušek, které probíhaly od roku 1989. Právě v této době bylo jediné pracoviště v České republice, tj. slévárna hořčíkových slitin v Hradci Králové, předurčena k uzavření vzhledem k útlumu leteckého průmyslu a ztráty zakázkové náplně. Prakticky neexistoval zájem rozvíjet dále obor hořčíkových slitin a odborná pracoviště v ČR neměla potřebu zahrnout do svých programů úkoly spojené s výzkumem a vývojem Mg slitin. Navíc z let minulých existovalo informační embargo v souvislosti s tím, že se hořčíkové slitiny využívaly ve vojenském programu.

V této době jsem pochopil, že likvidace jediného pracoviště v České republice by se mohla stát vážným omylem a rozhodl jsem se zabývat studiem tohoto specifického materiálu, novou technologií a zvýšením užitných vlastností Mg slitin. Jedině touto cestou bylo možno odvrátit hrozbu útlumu, prokázat realnost aplikace výsledků vývoje a tím rozšířit možnosti využití hořčíkových slitin do dalších odvětví průmyslové výroby.

Kromě základního poslání zahájit vývojové práce, zajistit zavedení nových poznatků do praxe a tím prokázat udržení výroby unikátních odlitků, bylo mým cílem zahájit diskusi s odbornými pracovišti v ČR o perspektivě využití Mg slitin a pokračování zlepšování komplexu vlastností a vývoji nových technologií. Na začátku mého snažení o prosazení rozvoje hořčíkových slitin mi jako první poskytla podporu VŠB - TU Ostrava - fakulta Metalurgie a materiálového inženýrství, kde jsem se zabýval externě v rámci kandidátské disertační práce tématem „Studium interakce forma - kov při výrobě odlitků z hořčíkových slitin“ [2]. Poté následovalo navázání kontaktů s dalšími odbornými pracovišti, např. s VUT Brno, TU Liberec, Univerzitou Pardubice, TU Žilina a Karlovou univerzitou v Praze.

Na rozvoji Mg slitin v ČR se podílela i fy Magalco Praha, s jejíž podporou bylo docíleno konkrétních výsledků v technické oblasti a propagaci hořčíkových slitin v zahraničí. Rovněž byly navázány kontakty s renomovanými firmami zabývajícími se tímto oborem činnosti, t.j. norskou firmou Hydro Magnesium a anglickou firmou Magnesium Elektron Ltd.

2. HOŘČÍK A JEHO SLITINY

2.1. Hořčík a legující prvky

Hořčík je lesklý stříbro-bílý kov s hexagonální mřížkou a s vlastnostmi uvedenými v *tab. 1*. Měrná hmotnost hořčíku čistoty 99,9 % je $1,74 \text{ kg/dm}^3$. Hořčík je v podobě čistého kovu měkký, má nízkou mechanickou pevnost a proto není obvykle používán ke konstrukčním aplikacím.

Přísady některých prvků (Zn, Ce, Mn, Al) zvyšují měrnou hmotnost hořčíkových slitin a naopak přísada lithia měrnou hmotnost výrazně snižuje. (viz *obr. 3*). Vysoká hodnota záporného elektrochemického potenciálu hořčíku (1,7 V) ukazuje, že se jedná o chemicky málo odolný kov. Proto hořčík, ale zejména jeho některé slitiny, mají malou odolnost proti korozi. Chemická odolnost je v převážné míře závislá na příměsinách, zejména železa, niklu a mědi. Zvládnutí a cenová dostupnost tzv. velmi čistých hořčíkových slitin je jeden ze zásadních příčin prudkého zvýšení uplatnění v posledních desetiletích.

Pečlivým výběrem legujících prvků (Al, Zn) byly vyvinuty slitiny pro všeobecné použití a slitiny pro speciální použití. Stejně jako v ostatních soustavách kovových slitin určuje mechanické vlastnosti hořčíkových slitin kombinace dobře známých mechanismů zpevňování (zpevnění tuhým roztokem, vytvrzení disperzními částicemi, deformační zpevnění a zpevnění hranicemi zrn). Podmínky legování ovlivňují i ostatní vlastnosti, včetně reaktivity taveniny, slévárenských vlastností a odolnosti proti korozi [3, 4].

Legující prvky používané s hořčíkem je možné rozdělit do dvou kategorií:

- 1) **Prvky s aktivním vlivem** na taveninu. Příkladem může být berylium ($\leq 15 \text{ ppm}$), které snižuje rychlost oxidace taveniny, a mangan ($\leq 0,6 \text{ hm } \%$), který snižuje obsah železa a tím i rychlost koroze těchto slitin. Tyto přísady jsou účinné v relativně malých koncentracích a nevyžadují velkou rozpustnost v tavenině.
- 2) **Prvky modifikující mikrostrukturu slitiny** v důsledku výše popsaných mechanismů zpevňování. Tato skupina obsahuje prvky, ovlivňující slévárenské vlastnosti. S výjimkou přísad pro zjemnění zrna (očkování uhlíkem), které mohou být aktivní již

při malých koncentracích, musí tyto prvky být poměrně dobře rozpustné v roztaveném hořčíku. Z technického hlediska patří mezi zajímavé legující prvky hliník, cín, měď, lanthan, lithium, mangan, neodým, stříbro, thorium, zinek a zirkonium.

2.2. Označování Mg slitin a jejich charakteristiky

Ve většině zemí, které vyrábějí nebo zpracovávají slitiny hořčíku, byly používány k označení těchto slitin vlastní normy. GOST Rusko, BORD Velká Británie, DIN Německo, NF Francie, ASTM USA, ČSN Česká a Slov. republika apod. Souběžně však byla pro jednotné označování používána norma ASTM.

Označování slévarenských (i tvařitelných) hořčíkových slitin je v souladu s ASTM B275 [5] je založeno na jejich chemickém složení. Písmena představují základní legující prvky:

A	hliník	M	mangan
C	měď	Q	stříbro
E	kovy vzácných zemin (RE)	S	křemík
G	hořčík	T	cín
H	thorium	W	yttrium
K	zirkonium	Z	zinek
L	lithium		

Následují nominální obsahy ve hmotnostních procentech, zaokrouhlené na celá čísla a písmena v abecedním pořadí, rozlišující malé rozdíly v chemickém složení, přizpůsobovaném podle specifických požadavků technologie lití a následného tepelného zpracování. Pod označením AZ91 tak najdeme slitinu Mg-Al-Zn se zhruba 9 hm.% Al a 1 hm.% Zn, přidaná písmena C, D a E znamenají po řadě slitinu běžné čistoty (AZ91C), vysoké čistoty pro lití pod tlakem (AZ91D) a pro lití do pískových nebo kovových forem s možností následného tepelného zpracování (AZ91E).

V tab. 2 je uvedeno porovnání mezinárodních označení slévarenských hořčíkových slitin, používaných v nejdůležitějších průmyslových zemích (Japonsko se přidružuje značení podle ASTM).

Označení tepelného zpracování se provádí podle ASTM B296 [5] :

- F tepelně nezpracovaný
- O žíhaný, rekrystalizovaný (pouze u tvářených výrobků)
- H deformačně zpevněný
 - H1 pouze deformačně zpevněný
 - H2 deformačně zpevněný a částečně žíhaný
 - H3 deformačně zpevněný a stabilizačně vyžíhaný
- T tepelně zpracovaný pro získání stabilního stavu jiného než F, O nebo H
 - T4 po rozpouštěcím žíhání
 - T5 po ochlazení a umělém stárnutí
 - T6 po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí
 - T7 po rozpouštěcím žíhání a stabilizačním žíhání
 - T8 po rozpouštěcím žíhání, tváření za studena a umělém stárnutí.

Charakteristiky slévarenských Mg slitin pro lití do pískových a kovových forem.

AM100A	10 Al, 0.1 Mn	T4, T6	Slitina pro lití do kokil. Svařovatelná, tlakově těsná, dobrá stabilita v atmosfér. podmínkách
AZ63A	6 Al, 3 Zn, 0,15 Mn	T4, T6	Dobrá odolnost proti korozi ve slané vodě i při vysokém obsahu Fe, dobrá houževnatost, nesnadno odlévatelná. V současnosti zřídka používaná (anody)
AZ91E	8.7 Al, 0.7 Zn, 0.13 Mn	T6	Slitina pro obecné použití. Dobrá pevnost při pokojové teplotě, vyhovující vlastnosti až do 175 °C, dobrá stabilita v atmosférických podmínkách, vynikající odolnost proti korozi ve slané vodě, nejpoužívanější slitina skupiny MgAlZn
AZ92C	9 Al, 2 Zn, 0.1 Mn	T60	Slitina pro obecné použití. Vynikající pevnost při pokojové teplotě, vyhovující vlastnosti do 175 °C, dobrá stabilita v atmosférických podmínkách
EQ21A	1.5 Ag, 2.1 Di 0.7 Zr	T6	Vytvrzovatelná slitina. Vysoká mez kluzu až do teplot 250 °C, tlakově těsná, svařovatelná

EZ33A	2.7 Zn, 0.6 Zr, 3.3 RE	T5	Odolná proti creepu až do 250 °C, vynikající slévárenské vlastnosti, tlakově těsná, svařovatelná
HK31A	3.3 Th, 0.7 Zr	T6	Odolná proti creepu až do 345 °C při krátkodobé expozici, tlakově těsná, svařovatelná
HZ32A	3.3 Th, 2.1 Zn, 0.6 Zr	T5	Odolná proti creepu do 345 °C, tlakově těsná, svařovatelná
QE22A	2.5 Ag, 2.1 Di, 0.7 Zr	T6	Vytvrzovatelná slitina. Vysoká mez kluzu do 250 °C, tlakově těsná, svařovatelná
QH21A	2.5 Ag, 1.0 Di, 1.0 Th, 0.7 Zr	T6	Dobrá odolnost proti creepu, vysoká mez kluzu do 300 °C, tlakově těsná, svařovatelná
WE43	4.0 Y, 3.4 RE, 0.7 Zr	T6	Vytvrzovatelná slitina. Dobré vlastnosti do 250 °C při dlouhodobých expozicích, tlakově těsná, svařovatelná, s dobrou odolností proti korozi
WE54A	5.2 Y, 3.0 RE, 0.7 Zr	T6	První ze skupiny slitin s yttriem. Vyjimečná pevnost při pokojové i zvýšených teplotách
ZC63A	6.0 Zn, 2.7 Cu, 0.25-0.75 Mn	T6	Dobré vlastnosti při pokojové teplotě, vyhovující pevnost při mírně zvýšených teplotách, vynikající slévárenské vlastnosti, tlakově těsná, svařovatelná
ZE41A	4.2 Zn, 1.2 RE, 0.7 Zr	T5	Snadno odlévatelná, svařovatelná, tlakově těsná, vyhovující pevnost při zvýšených teplotách
ZE63A	5.8 Zn, 2.6 RE, 0.7 Zr	T6	Vynikající slévárenské vlastnosti, tlakově těsná, svařovatelná, vysoké vlastnosti v tenkostěnných odlitcích
ZH62A	5.7 Zn, 1.8 Th, 0.7 Zr	T5	Pevnější než ZE 41, se stejnými slévárenskými vlastnostmi, svařovatelná, tlakově těsná
ZK51A	4.6 Zn, 0.7 Zr	T5	Dobrá pevnost při pokojové teplotě
ZK61A	6.0 Zn, 0.7 Zr	T6	Vynikající pevnost při pokojové teplotě. Snížené slévárenské vlastnosti, u odlitků je možno dosáhnout vynikajících vlastností.

Charakteristiky slévárenských hořčíkových slitin pro lití pod vysokým tlakem

AZ91D	9.0 Al, 0.7 Zn, 0.13 Mn	Obecně používaná slitina. Dobrá pevnost při pokojové teplotě, dobré slévárenské vlastnosti, dobrá stabilita v atmosférických podmínkách, vynikající odolnost proti korozi ve slané vodě
AM60B	6.0 Al, 0.13 Mn	Dobrá plasticita a houževnatost, vynikající odolnost proti korozi ve slané vodě, dobrá mez kluzu a pevnost
AS21(X)	1.7 Al, 1.1 Si, 0.4 Mn	Nejlepší odolnost proti creepu ze slitin pro lití pod tlakem, dobré vlastnosti při pokojové teplotě, použitelná pro součásti, pracující při vysokých teplotách
AS41(X)	4.3 Al, 1.0 Si, 0.35 Mn	Dobrá odolnost proti creepu do 175 °C, dobré vlastnosti při pokojové teplotě, vynikající odolnost proti korozi ve slané vodě, použitelná pro součásti, pracující při vysokých teplotách

2.3. Základní vlastnosti hořčíkových slitin**2.3.1. Chemické složení slitin**

Chemické složení slévárenských hořčíkových slitin pro lití do pískových forem a do kovových kokil je uvedeno v *tab. 3*, pro lití pod tlakem v *tab. 4*. Pro použití v korozních prostředích jsou určeny slitiny vysoké čistoty, obsahující velmi malé koncentrace příměsí těžkých kovů Ni ($\leq 0,001\%$), Fe ($\leq 0,005\%$) a Cu ($\leq 0,03\%$). Ostatní vlastnosti jsou shodné s vlastnostmi slitin běžné čistoty.

2.3.2. Mechanické vlastnosti při pokojové teplotě

Charakteristické mechanické vlastnosti slévárenských hořčíkových slitin jsou uvedeny v *tab. 5* (pro odlitky lité do pískových forem a kovových kokil) a v *tab. 6* (pro odlitky lité pod tlakem). Je však třeba mít na zřeteli, že u odlitků mohou být mechanické vlastnosti odlišné v různých místech, v závislosti na tloušťce a vzdálenosti od vtokové

soustavy. Některé normy dovolují pro vzorky vyříznuté z odlitků snížení pevnosti v tahu až o 25% a tažnosti až o 75%. Např. ASTM B80 pro odlitky do pískových forem ze slitiny AZ91C i E udává R_m průměrnou 173 MPa a minimální 117 MPa (proti 234 MPa pro odděleně lité tyče), $R_{p0,2}$ průměrnou 69 MPa a minimální 62 MPa (proti 76 MPa).

U většiny slévárenských hořčíkových slitin nabývá Youngův modul pružnosti E hodnoty 45 GPa, modul pružnosti ve smyku G je 17 GPa a Poissonova konstanta 0,35 a není udávána jeho závislost na tepelném zpracování. U slitin HZ32A a ZH62A je při stejných hodnotách modulů Poissonova konstanta 0,30, u slitin WE43 a WE54 je E po řadě 44,2 resp. 44,4 GPa, Poissonova konstanta v obou případech 0,27.

2.3.3. Mechanické vlastnosti při vyšších teplotách

Zvýšení teploty má nepříznivý vliv jak na mez pevnosti, tak na mez kluzu. Zkoušky vlivu teploty jsou zpravidla prováděny čtyřmi způsoby:

- a) zkouška je provedena bezprostředně po ohřevu na požadovanou teplotu
- b) zkouška je provedena po určité době žhání na požadované teplotě přímo při této teplotě
- c) zkouška je provedena po prodlevě na požadované teplotě po ochlazení na teplotu pokojovou
- d) creepová zkouška.

Změny mechanických vlastností slévárenských slitin hořčíku s teplotou jsou uvedeny v *tab. 7*, creepové vlastnosti a Youngův modul pružnosti E v *tab. 8*.

2.3.4. Speciální mechanické vlastnosti

Pro konstrukční účely je nezbytné znát také únavové charakteristiky a hodnoty vrubové houževnatosti při pokojové teplotě. Tyto údaje jsou shrnuty v *tab. č. 9*, ve které jsou hodnoty buď v literatuře uvedené přímo, nebo odečtené z grafických závislostí.

2.3.5. Fyzikální vlastnosti

V *tab. 10 a 11* jsou shrnuty základní fyzikální vlastnosti vybraných slitin, dostupné v literatuře. Slitiny zde nejsou děleny podle způsobu lití. Technologické vlastnosti, slévárenské vlastnosti a hodnocení schopnosti elektrolytického pokovování, obrábění a povrchových úprav hořčíkových slitin jsou uvedeny v *tab. 12*.

2.3.6. Koroze hořčíkových slitin.

Většina prvků, které jsou v hořčíkových slitinách přítomny nebo jsou do nich legovány, má omezenou rozpustnost v hořčíku v tuhém stavu, takže je umožněna precipitace. Téměř všech případech jsou tyto fáze ušlechtilější (tj. mají vyšší redukčně-oxidační potenciál) než matrice. Jejich vliv na korozi v solné lázni silně závisí na jejich potenciálu vzhledem k matici a jejich účinnosti jako katodických míst, tzn. na snadnosti, s jakou uvolňují plynný vodík [6].

Prvky, které jsou zpravidla v hořčíkových slitinách přítomny, mohou být podle svého vlivu na korozi v solné lázni rozděleny následovně:

- 1) obecně příznivé a výhodné - hliník, beryllium, mangan, prvky vzácných zemin, křemík, zinek a zirkonium;
- 2) mírně nepříznivé - stříbro;
- 3) zvláště škodlivé - nikl (a kobalt), železo, měď.

Pro nejdůležitější skupinu slévarenských slitin vedl světový vývoj k nalezení technologických postupů, umožňujících udržovat velmi nízký obsah kritických příměsí (Ni, Fe, Cu) a kontrolovaný obsah Mn, což se projevilo zvýšením odolnosti proti korozi nejen v laboratorních testech v prostředí par NaCl, ale i v běžném provozu automobilů.

Působení okolního prostředí

Atmosféra. Na povrchu hořčíkové slitiny vystavené působení atmosféry bez solných par se vytváří šedý film, složený především z hydroxidu hořečnatého, který kov chrání před korozi. Chloridy, sírany a ostatní hydrofilní látky korozi podporují porušováním této tenké vrstvy. Konstrukční hořčíkové slitiny jsou odolné proti korozi ve venkovní atmosféře a středně odolné v průmyslové a přímořské atmosféře. U slitin Mg-Al-Zn vyšší čistoty je rychlost koroze v mořské atmosféře výrazně nižší.

Voda. Je-li hořčík ponořen do destilované vody bez možnosti absorpce oxidu uhličitého, klesá rychlost počáteční koroze rychle na velmi nízkou hodnotu. Na povrchu se vytvoří ochranná tenká vrstva hydroxidu hořečnatého a dojde ke snížení koroze. Pokud je voda vyměněna, koroze pokračuje a zvyšuje se při absorpci oxidu uhličitého v důsledku rozpouštění ochranné vrstvy. Rychlost koroze hořčíkových slitin v destilované nebo přírodní vodě se zvyšuje také se zvýšením teploty. Hliník jako legující prvek je výhodný, neboť podporuje vznik ochranné tenké vrstvy hydrotalkitu $[Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O]$.

Kyseliny. Hořčík je napadán všemi kyselinami s výjimkou fluorovodíkové a chromové. Ve většině koncentrací těchto kyselin se vytváří pasivační ochranná vrstva, což vysvětluje jejich používání v postupech povrchových úprav.

Solné roztoky. Neutrální roztoky solí těžkých kovů, jako jsou nikl, železo a měď, působí na hořčíkové slitiny jako korozní prostředí.

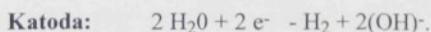
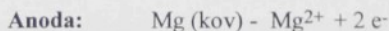
Ostatní prostředí. Chování hořčíku při styku s velkým počtem látek při pokojové teplotě je popsáno v [3]. Protože je hořčík kovem alkalických zemin, je stabilní ve většině zásaditých a neutrálních roztoků, jeho silná afinita k fluoru a povaha výsledného pasivního filmu (tvořeného hlavně hydroxidem a částečně fluoridem hořečnatým) vysvětluje extrémně nízkou korozi hořčíkových slitin v elektrolytech obsahujících fluoridy. Hořčík je stabilní v přítomnosti většiny organických sloučenin. Metanol, který je slabě kyselý, však hořčík napadá velmi rychle, pokud není k dispozici dostatečné množství vody (> 0.5%), která povrch pasivuje. Hořčík je možno bezpečně a účinně čistit chlоровanými organickými rozpouštědly.

Elektrochemická koroze

K tomu, aby probíhala elektrochemická koroze, musí být splněny dvě podmínky:

- (1) styk dvou nepodobných kovů
- (2) přemostění takového spoje dvou kovů vodivým roztokem (elektrolytem).

Elektrochemický proces, který v článku obsahujícím hořčík probíhá za normálních okolností, se dá popsat :



Ve slaném prostředí může kyselá povaha vznikajícího chloridu hořečnatého vést k rychlému napadání hořčíkových slitin.

Nejvhodnější ochranou proti galvanické korozi je kvalitní konstrukční provedení [3], [4]. Mělo by zajišťovat dobré odvádění kapalin, aby se zabránilo zachycování elektrolytu, výběr vzájemně slučitelných kovů, utěsnění přiléhajících ploch, malý poměr velikosti katodické a anodické oblasti a použití bariérových vrstev odolných alkalidům.

Největší kompatibilitou s hořčíkem se vyznačují hliníkové slitiny řad 5000 a 6000. Pocínováním, kadmiováním nebo zinkováním upevňovacích šroubů z oceli je možné snížit galvanické účinky hořčíku v solné mlze o 60-70 %, což je pro řadu praktických aplikací dostačující. Dalšího snížení účinku elektrochemické koroze je

možno dosáhnout přidáním vrstvy polymeru.

Snížení nebo kompenzace galvanického proudu je možno dosáhnout i přidavným odporem na kovové nebo do elektrolytické části galvanického článku. Takový odpor může být tvořen izolačním materiálem, jako jsou nekovové šrouby, izolační podložky nebo pásy, nebo organické povlaky.

Kombinace malých hořčíkových anod a velkých katodických oblastí vede k intenzivnímu koroznímu rozpadávání hořčíku. Tohoto jevu se využívá při ochraně proti korozi hořčíkovými anodami (např. ochrana vnitřního prostoru bojlerů).

Při lakování galvanického článku musí být pokryta katoda nebo celý článek. V žádném případě nesmí být kryta pouze hořčíková část. Malé oblasti hořčíku s porušením a poškrábáním laku mohou trpět intenzivní korozi.

Struktura. Důležitou roli při korozním chování hraje velikost a rozložení katodických fází, které je ovlivňováno parametry lití a tváření a tepelného zpracování. Homogenizované a uměle stárnuté vzorky slitiny AZ91E (T6) vykazují podstatně nižší korozi než vzorky v litém (F) a homogenizovaném (T4) stavu [7]. Tepelné zpracování ovlivňuje především rozdělení intermetalické fáze β ($Mg_{17}Al_{12}$) ve slitině. Stárnutí na stav T6 vede k precipitaci této fáze nejvíce ve spojitě síti sekundárních částic podél hranic zrn. Po zpracování na stav T4 je fáze β úplně rozpuštěna. Při ochlazování na vzduchu ze stavu T4 mohou mít zbytky fáze β stejný efekt jako kompletní zpracování na stav T6. Tolerance mezního obsahu nejdůležitějších příměsových prvků ve slévarenských slitinách AZ91 jsou ovlivňovány rychlostí ochlazování a koncentrací manganu [8], [9], [10]. V prvních stádiích koroze dochází k napadení v mikroskopických iniciačních důlcích přilehlých k intermetalickým částicím [11], čímž může být jasně dokumentována úloha fáze $Mg_{17}Al_{12}$ soustředěné na hranicích zrn.

Detaily profilu povrchu odlitku z Mg-Al slitiny jsou zobrazeny na *obr. 30, 31 a 32*.

2.4. Rekapitulace hořčíkových slitin

Pro lití do pískových nebo kovových forem je k dispozici větší množství hořčíkových slitin. Vedle již uvedených slitin typu MgAlZn s Mn a bez něho (AM nebo AZ) jsou to slitiny MgZr (K); slitiny MgZnZr, legované či nikoli prvky vzácných zemin (ZK, ZE a EZ); slitiny MgThZr s a bez Zn (HK, HZ a ZH); slitiny legované Ag a Zr s prvky vzácných zemin nebo Th (QE a QH); slitiny s yttriem, prvky vzácných zemin a Zr (WE), a konečně slitina typu MgZnCuMn.

Hořčíkové slitiny s hliníkem jako hlavním legujícím prvkem - AM100A, AZ63A, AZ81A, AZ91C, AZ91E a AZ92A - se vyznačují dobrou odlévatelností, dobrou tažností a relativně vysokou mezí kluzu při teplotách do 120 °C. Z hlediska odolnosti proti korozi zaujímá i v této skupině materiálů výsadní postavení slitina AZ91E s významně omezeným obsahem Fe, Cu a Ni. Pro slitiny tohoto typu je charakteristické, že se zvyšujícím se obsahem Al se při stejném tepelném zpracování zvyšuje jejich pevnost, snižuje se však tažnost. Chemické složení je proto žádoucí měnit podle požadavků na daný odlitek na základě výsledků přímo na něm provedených zkoušek.

Slitina hořčíku se zirkoniem K1A je významná svou vysokou schopností tlumení, nevýhodou je nízká pevnost a mez kluzu.

Důležitou skupinu hořčíkových slitin představují **slitiny se zinkem** jako hlavní legurou - ZK51A, ZK61A, ZK63A a ZH62A. Tyto slitiny se mezi slévarenskými slitinami vyznačují nejvyšší pevností a je z nich možno odlévat i odlitky složitých tvarů. V porovnání se slitinami typu MgAl je však třeba počítat s vyššími náklady. Z tohoto důvodu jsou tyto slitiny používány tam, kde jsou výjimečně vysoké požadavky na pevnost. Doporučovány jsou především pro použití za pokojové teploty.

Vysokou pevností a vysokou mezí kluzu je charakterizována slitina ZE63A, která tyto vlastnosti získává tepelným zpracováním ve vodíkové atmosféře. Vynikající jsou i lící vlastnosti.

Slitina ZE41A byla vyvinuta pro rostoucí potřebu slitiny se střední pevností, dobrou svařitelností a zlepšenou slévatelností. Vyznačuje se i dobrou odolností proti únavě a nízkou náchylností ke smršťování. Lze ji používat až do teplot 160 °C.

Představitelem **nové skupiny hořčíkových slitin**, které neobsahují ani hliník ani zirkonium, je slitina ZC63. Charakterizuje ji dobrá slévatelnost a těsnost proti tlaku. Je i dobře svařovatelná. Není třeba rafinace pro zjemnění zrna, pro dosažení popsaného komplexu vlastností je nutno provést tepelné zpracování. Má velmi dobré vlastnosti při pokojové a mírně zvýšených teplotách. Korozní odolnost je srovnatelná se slitinou AZ91C, je však horší než u AZ91E.

Hořčíkové slitiny s prvky vzácných zemin a zirkoniem jsou určeny pro práci při teplotách mezi 175 a 260 °C. Slitina tohoto typu se zinkem jako dalším legujícím prvkem - EZ33A - má dobrou stabilitu pevnosti, je-li vystavena působení zvýšených teplot. Má i dobrou tlakovou těsnost, některé tvary odlitků se však odlévají hůře než ze

slitin typu AZ. Ve stavu T5 ji lze používat i v konstrukci motorových skříní, pracujících při teplotách do 205 °C.

Slitiny hořčíku s thoriem a zirkoniem - HK31A a HZ32A - jsou určeny především pro provozní teploty 200 °C a vyšší. K dosažení požadovaného komplexu vlastností je u slitiny HK31A nezbytné zpracování na stav T6, zatímco u slitiny HZ32A postačí pouze umělé stárnutí (T5). Slitina ZH62A se Zn jako další leguroou je určena především pro pokojové teploty. Slitiny tohoto typu mají horší lící vlastnosti se sklonem k tvorbě vměstků a vad v důsledku turbulence ve vtokové soustavě. Doporučuje se vyšší rychlost lití, zejména u tenkostěnných odlitků.

Slitiny hořčíku s přidáním stříbra mají velmi dobré vlastnosti při pokojové teplotě. Je-li legováno ještě thoriem nebo prvky vzácných zemin, zlepšují se i vlastnosti za zvýšených teplot. Slitiny QE22A a EQ21A mají vysokou pevnost i mez kluzu i při teplotách nad 205 °C. Slitina QH21A má za pokojové teploty vlastnosti srovnatelné, přitom však lepší v oblasti teplot od 205 do 260 °C. Všechny tři slitiny se vyznačují dobrými lícími vlastnostmi a dobrou svařovatelností. Pro dosažení vyšších vlastností vyžadují tepelné zpracování na stav T6 (rozpuštěcí žhání a umělé stárnutí).

Moderní slitiny WE54 a WE43 s yttriem a prvky vzácných zemin jsou charakterizovány vysokou pevností a mezí kluzu, které si udržují i při vysokých teplotách. Slitina WE54 si své vlastnosti uchová při 300 °C až 1000 hodin, slitina WE43 při 250 °C až 5000 hodin. Obě slitiny jsou dobře slévateľné a svařovateľné, pro optimalizaci vlastností však opět vyžadují rozpouštěcí žhání a umělé stárnutí. Jejich korozní odolnost je srovnatelná se slitinami typu AZ. V důsledku legování yttriem jsou však poměrně drahé.

Pro lití pod tlakem jsou komerčně používány slitiny MgAlZnMn (podle ASTM označované AZ), MgAlMn (AM) a MgAlSiMn (AS). Typické vlastnosti tlakově litých odlitků z těchto slitin jsou uvedeny v tab. 6. Odlitky lité pod tlakem jsou používány v litém stavu bez následného tepelného zpracování. Nejpoužívanější slitinou pro lití pod tlakem je slitina AZ91D. Vyznačuje se dobrými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi v kombinaci s velmi dobrou slévateľností a odolností proti korozi. Velmi dobrá korozní odolnost je výsledkem omezení přípustného obsahu Fe, Ni a Cu, které představují z hlediska odolnosti proti korozi nejvýznamnější nebezpečné příměsi. Z hlediska nákladů je pro ty účely, kdy nehrozí nebezpečí koroze, nebo je podstatně sníženo, např. lakováním, používán i stejný typ slitiny s menší čistotou, označovaný AZ91B. Jeho

výhodou je, že může být vyráběn i z odpadu nebo druhotných surovin.

V případech, kdy je důraz kladen na větší tvárnost, než jaké lze dosahovat u slitiny AZ91, je používána slitina AM60B s vysokou čistotou. V důsledku snížení nominálního obsahu Al má tato slitina v porovnání s předcházející poněkud nižší hodnoty pevnosti a meze kluzu v tahu, zato má lepší tažnost i houževnatost. Také tato slitina má dobrou odolnost proti korozi. Používá se především na automobilová kola a pro výrobu sportovního nářadí.

Pro použití za vyšších teplot jsou vhodné slitiny AS41A a AS21. Tyto slitiny se vyznačují dobrou odolností proti creepu, a to až do teplot 175 °C. Za pokojové teploty mají dostatečnou pevnost a mez kluzu v kombinaci s dobrou plastičností. Slitina AS21 je přitom lepší v odolnosti proti creepu, poněkud horší jsou mechanické vlastnosti za pokojové teploty. Pro aplikace s vyššími nároky na odolnost proti korozi je pod označením AS41XB zaváděna tato slitina s vysokou čistotou.

Z hlediska možnosti využití slitin v podmínkách ČR mají největší význam a zároveň podmínky slitiny na bázi Mg-Al a Mg-Zr, které jsou podrobeny zkoumání.

2.4.1. Slitiny hořčík - hliník.

Hliník je pro hořčík zdaleka nejdůležitějším legujícím prvkem. Jeho maximální rozpustnost v tuhém stavu v soustavě Mg - Al je 12,7 hm.% při eutektické teplotě 437 °C. Eutektická intermetalická fáze obsahuje 32 hm.% Al a její složení je $Mg_{17}Al_{12}$. Technické slitiny obsahují méně než 10 hm. % Al a - v souladu s rovnovážným diagramem - mohou krystalizovat jako homogenní hořčíková matrice s hliníkem v tuhém roztoku. K tomuto případu však nedochází - vzniká poměrně velké množství eutektických složek.

Rovnovážný diagram slitiny Al-Mg je typický pro soustavu s precipitačním vytvzrčováním (viz *obr. 4*). Po rozpouštěcím žhání při teplotách těsně pod teplotou eutektickou se rozpouští fáze β - $Mg_{17}Al_{12}$ a po následném rychlém ochlazení (zakalení) vzniká přesycený tuhý roztok. Při následujícím umělém stárnutí při 150-220 °C se vytvářejí destičkové precipitáty, které mají značný vytvzrčující účinek.

Technické slitiny Mg-Al obvykle obsahují malé množství (0-2 hm.%) zinku, který je poněkud zpevňuje. Vyšší množství zinku zvyšuje objemový podíl eutektických složek, snižuje teplotu tuhnutí, a může způsobovat smršťování za tepla (trhlíny za tepla).

Rozpouštěcí žhání slitin Mg-Al-Zn zvyšuje jejich plasticitu. Pokud není používáno rozpouštěcího žhání (jako u odlitků litých pod vysokým tlakem), je maximální plasticity dosahováno při použití slitin s nízkým obsahem hliníku a zinku (např. slitina AM60 obsahující 6 hm.% Al). Dalšího zlepšení plastických vlastností je možné dalším snížením obsahu Al, poněkud se však zhorší vlastnosti slévárenské.

Pro použití při vysokých teplotách jsou požadovány vyšší creepové vlastnosti, kterých je dosahováno snížením obsahu hliníku a tím i objemového podílu eutektika s nízkou teplotou tání. Další zlepšení je možné přidáním prvků, které v matici tvoří jemné disperzní částice (disperzní zpevnění). V odlitcích litých pod vysokým tlakem, které tuhnou velkou rychlostí, vede přidání křemíku ke vzniku jemné disperzních částic Mg_2Si ; tím je dán základ slitin Mg-Al-Si.

Legování manganem hraje zásadní roli řízením obsahu železa snížením jeho rozpustnosti v tavenině. Zjemňování zrna, pokud je nezbytné, je prováděno přidáváním uhlíku do taveniny při teplotě vyšší než 750 °C (přednostně asi 780 °C) .

Slitina Mg-Al byla předmětem dalšího zkoumání ve spojitosti s vývojem nových typů odlitků v ČKD [12, 13, 14, 15]. Vzhledem k rozsáhlosti uvedeného tématu jsem výsledky uvedl v dalších samostatných kapitolách a obrazové části.

2.4.2. Slitiny hořčík - zirkonium

Řada hořčíkových slitin s výbornými vlastnostmi byla vyvinuta po objevu extrémního účinku zirkonia na zjemnění zrna. Tento účinek je důsledkem vzniku velmi jemných částic zirkonia, které se s vysokou hustotou vytvářejí již v tavenině a působí tak jako účinná nukleační přísada. Rozpustnost zirkonia v tavenině je bohužel snižována přítomností prvků jako jsou hliník a mangan, což brání využití tohoto mechanismu zjemňování zrna ve slitinách, obsahujících hliník. Rovnovážný diagram Mg-Zr je znázorněn na *obr. 5*.

Mg-Zn-RE-Zr. Binární slitiny Mg-Zn vykazují špatné mechanické i slévárenské vlastnosti. Přidání zirkonia pro zjemnění zrna a prvků vzácných zemin (RE) pro snížení mikropórovitosti, vedlo k vývoji slitin jako jsou EZ33 a ZE41. Tyto slitiny byly široce používány pro odlitky do pískových forem ve stavu T5 (po ochlazení a umělém stárnutí) pro aplikace, vystavené mírně zvýšeným teplotám (asi do 200 °C). Slitina ZE63 je variantou s vysokou pevností, ve které je použito rozpouštěcího žhání v atmosféře vodíku, které odstraňuje křehké fáze Mg-Zn-RE na hranicích zrn. Protože při lisování je

mikropórovitost malá, je možné pro tento účel používat slitiny Mg-Zn-Zr bez legování RE.

Mg-Ag-RE-Zr. Přidání stříbra a předslitiny obohacené neodymem společně se zirkoniem výrazně zlepšuje vytvrzení umělým stárnutím, je-li slitina podrobena úplnému tepelnému zpracování na stav T6 (rozpuštěcí žhání a umělé stárnutí). Vznikající precipitáty jsou velmi stabilní; slitina se vyznačuje vysokou mechanickou pevností a dobrými creepovými vlastnostmi při teplotách blízkých se 250 °C.

Mg-Y-RE-Zr. Nejnověji vyvinutý systém slitin pro použití při vysokých teplotách je založen na legování yttriem a předslitiny obohacené neodymem. Tyto slitiny byly vyvinuty na základě stále rostoucích požadavků leteckého průmyslu na vlastnosti při vysokých teplotách a mohou nahradit slitiny Mg-Ag-RE-Zr nebo slitiny obsahující radioaktivní thorium. Slitiny musí být taveny ve speciální inertní atmosféře (argon) a svých vlastností dosahují tepelným zpracováním na stav T6.

Zabýval jsem se možností aplikovat slitinu RZ5 (Zn 3,5 - 5%, RE 0,8 - 1,7 %, Zr 0,4 - 1,0%, zbytek Mg) na odlitky skříní převodovky a diferenciálu na soutěžní vozy WRC - Škoda Motorsport. Je to vysocepevnostní hořčíková slitina ideální pro použití na odlitky s vysokou integritou při okolních teplotách až do 150 °C. Optimální vlastnosti se dosáhnou ve stavu T5 po 2 hod. při 300 °C a poté chladnutí nepropustná při 170 - 180 °C po dobu 10-16 hod. [16].

Uvedená slitina byla navržena pro aplikaci na odlitky:

- vana zadního diferenciálu (PJ 1003) - obr. 6
- hydraulická vložka stř. diferenciálu (PJ 1748) - obr. 6
- hlavní skřín zadního diferenciálu (PJ 1001) - obr. 6
- hlavní skřín (PJ 1787) - obr. 7
- boční víko převodovky (PJ 1790) - obr. 7
- kryt převodu (PJ 1788) - obr. 8
- boční víko zad. diferenciálu (PJ 1002) - obr. 8

Pro odzkoušení navržené technologie byla odlita serie odlitků ze slitiny Mg-Al. Slitinu RZ 5 nebylo možno z organizačních důvodů v ČKD aplikovat, a to zejména pro její specifické vlastnosti (možnost záměny materiálu ve výrobě) Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o zajištění odlévání výše uvedených odlitků z materiálu RZ5 v Anglii. Je zřejmé, že víceúčelnost této slitiny ji předurčuje k širokému použití jak v letectví, tak v automobilovém a elektronickém průmyslu.

Dle informací firmy MEL [16] můžeme využití litiny RZ5 nalézt např. pro:

- převodovky helikoptér
- video kamery
- vojenské vybavení
- počítačové díly
- letecké motory
- letecké komponenty
- kola motocyklů
- výkonné nástroje

2.4.3. Vývoj nových slitin

Vývoj konvenčních hořčíkových slitin dosáhl úrovně, při které je již ve velké míře využíváno všech potenciálních možností zvyšování vlastností. Další zlepšení je proto možné kombinováním existujících nebo upravených slitin s novými technologickými postupy. Příklady aktivit v oblasti výzkumu může být squeeze-casting a tváření slitin v polotuhém stavu. Velký potenciál pro zlepšení vlastností konvenčních i nově vyvinutých slitin nabízí zjemňování mikrostruktury při velmi rychlém tuhnutí. Schopnost hořčíkových slitin smáčet většinu zpevňujících vláken a částic je činní velmi přitažlivými pro výrobu kompozitů s kovovou maticí.

Zvláštní pozornost je věnována slitinám systému Mg-Al-Ca a Mg-Li. V prvním případě lze dosahovat ultrajemného zrna, ve druhém je přitažlivá velmi nízká měrná hmotnost. Právě poslední jmenovaná slitina Mg - Li je podrobena zkoumání ve VÚT Brno a je připravována ke zkušebnímu odlití konkrétního odlitku. Zároveň byla na vzorku této slitiny s různými obsahy lithia odzkoušena povrchová ochrana - chromátování [17]. Tyto slitiny jsou spolu s kompozity a moderními technologiemi výroby součástí (prášková metalurgie, squeeze-casting) předmětem dalších prací.

2.5. Zvýšení korozní odolnosti

Nedílnou součástí řešení zvýšení korozní odolnosti je povrchová úprava. Dekorativní účely konečné úpravy musí být podřízeny účelové funkční ochraně. Např. odlitky u automobilových či kolejových aplikací vystavené abrazivním účinkům musí mít odlišnou konečnou úpravu oproti odlitkům užívaných v interiérech.

2.5.1. Konečná úprava povrchu.

Používané postupy jsou většinou schopny vyhovět všem požadavkům praxe, ať se jedná o vytváření povrchových vrstev chemicky nebo elektrochemicky, lakování z mokra, vytváření povlaků z prášků umělých pryskyřic, niklováním nebo elektrolytickým pokovováním [18].

2.5.2. Mechanická úprava povrchu.

Pro mechanické úpravy povrchu součástí z hořčíkových slitin jsou používány běžné postupy, jako je broušení brusnými pásy, broušení na kotoučích, leštění, kartáčování, leštění na kotoučích, tryskání a omílání v bubnech nebo vibrátorech. Úprava povrchu vibračním omíláním s keramickými nebo pryskyřici pojených třísek je široce používána při hromadné výrobě pro odstraňování ořepů i vyhlazování.

Pro hořčík je možno použít stejných postupů broušení a leštění jako pro hliník a zinek. V důsledku jeho přirozené náchylnosti ke zmatnění je leštění používáno pouze při přípravě povrchu hořčíkové součásti pro pokovování nebo lakování čirým lakem.

Otryskávání povrchu hořčíku za sucha je obvykle vynecháváno, protože nejrozšířenější tryskací média kontaminují povrch katodickými částicemi, což vede ke snížení odolnosti proti korozi.

Podle zkušeností mají nejméně nepříznivý vliv broky, nasekané z drátu hliníkové slitiny řady 5000 s nízkým obsahem železa a mědi. Pro odstranění povrchové kontaminace je otryskávání následováno mořením v kyselině, kterým se z otryskaného povrchu odebírá vrstva tloušťky minimálně 0,05 mm.

Pro minimalizaci nebezpečí požáru musí být zabráněno hromadění hořčíkového prachu v pracovním prostoru, v sacích kanálech a potrubích nebo na oděvech obsluhy. Používáno má být zařízení dobře uzemněných a odolných proti výbuchu ve spojení se schválenými odlučovací prachu za mokra.

Čištění. Většina postupů čištění hořčíkových slitin zahrnuje čištění v rozpouštědlech nebo alkalických roztocích a moření v kyselině. Pro odstraňování oleje nebo vosku se ve standardních odmašťovacích zařízeních využívajících odpařování používá organických rozpouštědel, jako je trichlorethan a stabilizovaný tri- nebo perchloretylen. Protože je většina hořčíkových slitin odolná proti působení alkalických látek, lze pro ně používat čistících roztoků na bázi alkalických hydroxidů, uhličitánů, silikátů a pyrofosforečnanů užívaných při čištění ocelí. Moření v kyselině je používáno

pro odstraňování kontaminace povrchu částicemi písku, korozními produkty a zbytků po tryskání, chromátování nebo spálených mazadlech.

Přechodové vrstvy. Přechodové vrstvy reagují s povrchem slitiny a přetvářejí ho na povlakovou složku, jejich primární funkcí je zlepšení přilnavosti organických povlakových vrstev a předcházení podleptávání v korozních prostředích, ke kterému by mohlo docházet v místech porušení povlaku. Používány jsou většinou chromátové přechodové vrstvy [19]. Pro řadu středně korozních prostředí vytváří dostatečnou podkladovou vrstvu pro barevné lakování fosfátová přechodová vrstva. Fosfátování povrchu je již dlouho používáno pro podkladové vrstvy pod organické povlaky lisovaných a pod tlakem litých rámu kufrů. Anodické povlaky jsou používány jako základ pro silně zatěžované lakované vrstvy nebo v případech, kdy je požadována dodatečná ochrana proti opotřebení.

2.5.3. Organické povlaky.

Na hořčíkové slitiny je možno nanášet, různé typy organických povlaků při použití běžných metod. Při výběru nosiče i pigmentu je však třeba vzít v úvahu alkalickou povahu a elektrochemické vlastnosti kovu; musí být použito pojiva odolného proti alkalidům a vhodné pigmentace. Pro dosažení optimální ochrany proti korozi musí být před dalším chromátováním nebo jinou povrchovou úpravou zařazeno odstranění částic z otryskávání mořením v kyselině.

Pro dosažení maximální ochrany proti korozi je nutno použít slitiny s vysokou čistotou, zejména v případech, kdy může docházet k poškození odřením o kameny nebo poškrábání.

Základní nátěry na hořčíkových slitinách musí být voleny na bázi pojidel, odolných proti působení alkalidů (např. vinyl, epoxid, polyvinylbutyral, akryl, polyuretan a vinylepoxid). Jako obecně používané pigmenty jsou voleny chromáty zinku a stroncia, zatímco pigmenty hliníkové, zinkové, olovnaté nebo železnaté není možno použít. Pro použití při teplotách vyšších než 200 °C je třeba použít podkladu i nosiče barvy na bázi silikonu, epoxidového silikonu nebo polyamidu. Katodické (kataforetické) elektrolytické barvení je u hořčíkových slitin používáno jak pro základní tak i pro konečnou úpravu (např. pro mřížky automobilů nebo malé součástky počítačů).

2.5.4. Pokovování.

Většina slévarenských i tvařitelných hořčíkových slitin může být pokovována. Obvykle je používán Ni nebo Cr, může to však být i jiný kov. Základní postup je podobný jako při pokovování hliníku v tom, že u obou typů slitin je třeba před pokovováním vytvořit přechodovou vrstvu ponořením do zinkové lázně.

2.6. Závěrečné hodnocení

V současné době existuje již poměrně velká skupina hořčíkových slitin, ze kterých je možno vybírat pro daný účel použití slitinu s nejvhodnějším komplexem vlastností. V praxi však tento výběr zůstává omezen na zhruba čtyři slitiny: AZ91, AZ81, AM60 a AZ6, případně ještě AZ92 a AZ61. Tyto slitiny také velmi dobře splňují požadavky konstruktérů dopravních strojů při návrzích součástí, které nejsou vystaveny extrémním podmínkám.

Nezanedbatelnou výhodou těchto slitin je, že v důsledku jejich univerzálního použití nenarážejí na bariéru nejmenší série, pod kterou již neúměrně vzrůstají výrobní náklady. Zejména toto hledisko zatím nejvíce brání rozšíření nových slitin s výhodnějšími komplexy vlastností, jako jsou především AS21 pro vyšší teploty a WE54 s vyšší pevností při pokojové i zvýšených teplotách.

Z hlediska dostupnosti hořčíkových slitin v rámci ČR je nutno uvažovat pouze odlitcích do pískových forem, po určité přípravě i do kovových kokil. Lze počítat s tím, že v dohledné době bude v ČR k dispozici stroj pro tlakové lití [20]. Z porovnání vlastností však vyplývá, že odlitky z pískových forem jsou při kvalitní výrobě bez slévarenských a jiných vad pro daný účel zcela vyhovující, neboť v důsledku možnosti tepelného zpracování lze dosahovat relativně výhodného komplexu vlastností při relativně nízkých nákladech.

3. VÝVOJ NOVÉHO TYPU SLOŽENÉHO ŽELEZNIČNÍHO KOLA

3.1. Nové vývojové tendence a hlavní závěry

V současné době je zejména v Evropě zřetelně patrný zvýšený zájem o vývoj nového typu železničního kola, na které jsou kladeny zcela nové požadavky. Dominantním požadavkem je snížení hlučnosti. To klade na konstruktéra podstatně širší požadavky ve srovnání s dosavadním vývojem klasické koncepce celoocelového kola, jehož vývoj nutno v současné době považovat za ukončený.

Na tuto novou situaci velmi aktivně reagoval výzkum německých drah, který vyhlásil k vývoji nové generace dvojkolí za použití nekonvenčních materiálů v oblasti desky kola. Nekonvenčními materiály se zde rozumí prostředí s nízkým modulem pružnosti ve srovnání s ocelí.

Jeden z příkladů zahraniční koncepce nového typu kola je uveden na *obr. č. 9*. Deska kola je vytvořena poměrně složitou laminátovou segmentovou soustavou skořepin (1) vyplněnou porézní látkou (2). Touto "deskou" je spojen ocelový náboj (4) s věncem (3).

V ČR , na Univerzitě v Pardubicích, byla vyvinuta konstrukční varianta kompozitního kola (viz *obr. č. 10*) [21]. Projekt byl iniciován podnikem Železářny a Drátovny Bohumín a. s. Slévárenská technologie a technologie obrábění včetně výroby prototypových dílů byly realizovány v ČKD Motory, a.s. v Hradci Králové. Výpočtové práce byly prováděny ve spolupráci s Laboratořemi LENAM, s.r.o. Liberec a montážní a zkušební práce ve spolupráci s VÚŽ Praha [22].

Z teoretického hlediska se jedná o vlnový problém v komplikované mechanické soustavě, tedy o vytvoření soustavy kola impendancně laděného tak, aby přenos energie od místa styku s kolejnicí do vozidla byl minimalizován.

Všeobecně se předpokládá, že dominantním zdrojem hluku kolejového vozidla je pouze kolo (dvojkolí) samotné. Ve skutečnosti je nutno vnímat celou soustavu vozidla. Kolo se na emisi zvukových efektů bude podílet jen dílčím způsobem. Vyjímecnost tohoto prvku soustavy vozidla však spočívá v tom, že v oblasti kontaktu s kolejnicí vzniká fyzikální děj produkující energii, která je příčinou všech následných efektů. Z nich nás především zajímají efekty zvukové. Neuvažujeme-li vliv obtékání vzduchu kolem

pohybujícího se vozidla lze provést následující klasifikaci:

1. Přímé vyzařování akustické energie do okolního prostředí z akustického zdroje, který představuje kontakt kola s kolejnicí (v podstatě se jedná o bodový zdroj).
2. Rozkmitání rotujícího kola.
3. Rozkmitání kolejnice uložené na podloží.
4. Rozkmitání nesené soustavy (skříně vozidla).

Zásady pro novou konstrukci kola.

Z naznačených úvah plynou v podstatě dvě základní podmínky pro vytvoření konstrukce kola:

1. Nezbytnost potlačení takového kmitání kola, aby byl minimalizován jeho účinek jako zářiče zvuku.
2. Kolo nutno vytvořit jako soustavu, která je schopna omezit tok energie, vznikající na kontaktu kola s kolejnicí, do neseného vozidla.

3.2. Zvolená konstrukční alternativa a etapy vývoje

Z hlediska splnění formulovaných poznatků a se zřetelem na reálnou možnost hromadné výroby byla navržena konstrukční varianta znázorněná na *obr. 10*. Ta vychází ze 3 hlavních částí kola, t.j. ocelového náboje, klasické ocelové obruče a desky kola ze slitiny Mg, která se skládá z centrálního kotouče a skořepiny.

Numerickým modelováním odezvy kola na statické zatížení byla vyhledána optimální varianta tvaru desky kola, která je vytvořena vnější dvoudílnou uzavřenou skořepinou - poz. 2, 3, svírající vnitřní kotouč 4. Složená ocelová nábojová část - poz. 5, 6, 7 je vytvořena jako předpjatý válcový spoj. Obruč 1 je natažena za tepla. sedlo nápravy je nalisováno za studena. Vnitřní výplň uzavřené skořepiny představuje pórovitá látka, vytvářející vnitřní přetlak o max. hodnotě 1,0 MPa. Veškeré montážní přesahy byly stanoveny tak, aby bylo docíleno žádoucího sevření ve všech lisovacích spojkách. K tomuto rozboru byl použit kvazirovinný rotačně souměrný model, který byl zároveň využit k posouzení deformace a napjatosti v jednotlivých částech kola.

Rozborem výsledků bylo prokázáno, že vnitřní kotouč 4 je předurčen pro přenos radiálního zatížení. Z toho plyne, že napjatost ve skořepinové části je vzhledem k radiální složce zatížení invariantní. Vliv axiální složky kolového zatížení pak převážně

zachycuje skořepinová část desky.

Řešitel úkolu, Dopravní fakulta Univerzity Pardubice, předal konstrukční dokumentaci nového typu kola k posouzení možností aplikace Mg slitiny. Po vzájemné konzultaci bylo rozhodnuto o použití odlitku z materiálů MgAlZn na výrobu desky (skořepiny) spojující náboj s věncem dle již uvedeného schematického návrhu na obr. 10. Předpoklad použití byl formulován takto:

1. Odlitky z materiálu MgAlZn s vyplněním vnitřního prostoru porézní látkou zařazenou do sestavy mezi dva ocelové prvky, vytvoří soustavu, která je schopna omezit tok energie vznikající na kontaktu kola s kolejnici.
2. Z porovnání konstant pro hořčikovou slitinu $E = 0,62 \cdot 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$, $\gamma = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-3}$ a pro ocel $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$, $\gamma = 7,8 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-3}$ vyplývá, že rozhodující činitel - koeficient měrné mechanické impedance - je u hořčikových slitin cca 4-krát nižší než u oceli, což vytváří podmínku přenosového útlumu energie [23].
3. Z hlediska úspěšné aplikace hořčikové slitiny typu MgAlZn na odlitky železničního soukolí používané v té době na slévárně hořčikových slitin ČKD Motory, a.s. Hradec Králové dle ČSN 424911 bude nutné ověřit, případně dále zlepšit následující charakteristiky tohoto materiálu:
 - ověřit aplikaci nových typů norských surovin s vysokou čistotou v podmínkách slévárny hořčikových slitin
 - ověřit materiálové charakteristiky a mechanické vlastnosti tohoto materiálu, včetně tepelného zpracování
 - ověřit únavové vlastnosti tohoto materiálu
4. Srovnání laminátových segmentů s odlitky z hořčikové slitiny lze charakterizovat takto:
 - aplikace následné sériové výroby s využitím moderních technologií (např. nízkotlaké odlévání do kokil) a třískové obrábění skýtá u odlitku záruku přesnosti a reprodukovatelnosti
 - u hořčikové slitiny je bezproblémová záruka recyklovatelnosti
 - možnost volby jednodušší konstrukce skořepiny

Po konečném rozhodnutí o variantě řešení s použitím odlitků z hořčíkové slitiny byl upřesněn a stanoven tento postup:

I. etapa

- technicko-technologické posouzení konstrukční dokumentace z hlediska výroby odlitků a jejich obrábění
- zpracování technologické dokumentace a výroba modelů
- po zhotovení modelů výroba dvou kompletů vzorových odlitků, včetně tepelného zpracování z běžně používaného materiálu dle ČSN 424911
- jeden komplet podrobit rozměrové a jakostní kontrole a předat k ověření technologického postupu na opracování
- druhý komplet podrobit rentgenové zkoušce, rozřezat a z jednotlivých výsečí odebrat vzorky pro mechanické zkoušky.

II. etapa

- ověření materiálu AZ91HP
- ověření tepelného zpracování ve dvou variantách
- zhotovení vzorků k ověření únavové pevnosti z materiálu AZ91HP ve dvou variantách tepelného zpracování (T4, T6)

III. etapa

po konzultaci výsledků z II. etapy rozhodnutí v souladu s časovým harmonogramem o:

- zhotovení šesti kompletů k následujícím komplexním zkouškám
- upřesnění postupu opracování
- upřesnění spojení odlitků skořepiny - manipulační v ČKD HK, pevnostní ve Výzkumném ústavu železničním v Praze
- předání šesti kompletů opracovaných a sestavených skořepin k další montáži a zkoušení

3.3. Zhodnocení zkoušek z I. etapy

Při konstrukčním návrhu byla v souvislosti s návazností na slévarenskou technologii provedeny úpravy konstrukce odlitků.

Navržená koncepce kola s odlitky z Mg slitiny byla podrobena numerickému modelování odezvy železničního kola nového typu na statické zatížení [22].

V průběhu řešení bylo:

- a) vytvořeno několik konečně prvkových modelů kola
- b) byla provedena analýza kontaktních tlaku na styku jednotlivých částí kola

- nezatíženého kolovými silami
- c) byly vypočítány napjatosti v kvazirovinném rotačně symetrickém modelu kola nezatíženého kolovými silami
 - d) byla provedena analýza vlivu kolových sil na napjatost a deformaci objemového modelu kola zatíženého kolovými silami.

Vybrané části modelování laboratoře experimentální a analytické mechaniky jsou znázorněny na *obr. 11 - 14* a jsou v této práci přiloženy pouze jako příklad systémového řešení spolupráce konstruktéra a výpočtáře se slévárenským technologem. Na *obr. 11 a 12* je např. prostřednictvím izoploch znázorněno jednak rozložení radiálního napětí, jednak obvodového napětí pro vybrané testované varianty. *Obr. 13* znázorňuje napjatosti vzniklé v kole. Vliv radiální kolové síly na napjatost v segmentu kola je patrný z *obr. 14* [22].

Po upřesnění konstrukční dokumentace z hlediska slévárenské technologie a opracování byly vydány podklady pro výrobu modelového zařízení a odlity dvě sady vzorových odlitků ze standardního materiálu dle ČSN 424911. Sestava střední tlumicí části železničního soukolí je zřejmá z *obr. 10*. Skládá se ze tří odlitků z hořčíkové slitiny. Dva odlitky pláště (zhotoveny na jeden model DF 0011 a rozdíl řešen v rámci opracování) a jednoho odlitku středu č.m. DF 0013, dále uvádím rozsah a výsledky zkoušek zaměřených na optimalizaci materiálu provedených v rámci první etapy řešení.

Základní zkoušky byly provedeny na odlitku citovaného druhého vzorového kusu. Ze snímků (viz *obr. 15 a 16*) je zřejmý postup řezů pro zkušební tyče.

3.3.1 Chemické složení

Chemické složení je uvedeno v *tab. 13*. Rozbor byl proveden na kvantometru typ 3580 OES firmy ARL. U každého odlitku byl proveden rozbor na třech různých místech v různých průřezích. Zjištěné chemické složení odpovídá ČSN 424911 [24].

3.3.2 Metalografický rozbor

Byl proveden na mikroskopu Neophot 21. Metalografické výbrusy byly leptány kyselinou šťavelovou. Hodnocení struktury se provádělo při zvětšení 100x. Velikost zrna po tepelném zpracování T4 byla stanovena lineární metodou dle ČSN 42 0462. Zjištěné velikosti zrn jsou uvedeny v následující tabulce, struktury metalografických výbrusů jsou na *obr. 17 a 18*.

Druh kola	Číslo snímku	Velikost zrna	Poznámka
DF 0011	9113	1	-
DF 0011	9114	4	-
DF 0011	9115	1-2	-
DF 0013	9110	2-3	mikrořediny
DF 0013	9111	2-3	-
DF 0013	9112	3-4	-

Větší zrno se vyskytuje v silnějších průřezích. Struktura po tepelném zpracování T6 je na snímcích č. 9119, 9120 (DF0011) - viz obr. 20, a na snímcích č. 9116, 9117, 9118 (DF 0013) - viz obr. 19. Zjištěné struktury odpovídají použitému tepelnému zpracování T4 a T6.

3.3.3. Zkouška tvrdosti

Tvrdosti byly ověřovány na přístroji HPO 250 kuličkou 2,5 mm při zatížení 31,25 kg. Pro ověření byly použity z každého kola 3 vzorky z různých průřezů. Na každém vzorku byla provedena 3 měření - výsledky jsou uvedeny v tab. 14.

Norma ČSN 424911 předepisuje min. tvrdost pro T2 - T4 rovnající se 50 HB a pro T2 - T6 hodnotu 65 HB. Zjištěné hodnoty tvrdosti jsou tedy vyhovující.

3.3.4. Zkouška vrubové houževnatosti

Zkoušky byly provedeny na kyvadlovém kladivu typu Charpy výrobce WPM Lipsko. Byly použity zkušební tyče dle ČSN 42 0381 s vrubem U2. Z každého typu kola byly vyrobeny tři zkušební tyče po tepelném zpracování T4 a tři vzorky po T6. Výsledky měření dokumentuje tab. 15.

Vytvrzením materiálu za tepla (T6) dochází k poklesu hodnot vrubové houževnatosti proti stavu žíhanému (T4) cca o 50 %. Norma ČSN 42 4911 zkoušku měření vrubové houževnatosti nevyžaduje ani neuvádí hodnoty.

3.3.5. Zkouška tahem dle ČSN 40 0310

Pro zkoušky byly odebrány vzorky z odlitku. Z nich byly vyrobeny zkušební tyče válcové s hladkými válcovými hlavami dle ČSN 42 0315. Zkoušky pro $d_0 = 10$ a 12 mm byly provedeny na trhacím stroji EDZ-20. Pro měření meze kluzu byl použit průtahoměr

T3-EDZ. Zkoušky na zkušebních tyčích o $d_0 = 5$ mm byly z důvodu malých rozměrů provedeny na trhacím stroji ZD 10/90 bez průtahoměru. Hodnotu R_{p02} nebylo proto možno stanovit. Výsledky měření dokumentují *tab. 16, 17, 18 a 19*.

Závěr z I. etapy

- z hlediska technologie výroby odlitků provést úpravu vtokového systému (použití filtrace, zlepšení nálitkování).
- na základě výsledku opracování zkušebního odlitku provést upřesnění modelového zařízení a modelové dokumentace
- pro výrobu šesti kompletu nebyl materiál dle ČSN 424911 doporučen a byl nahrazen materiálem AZ91HP.

3.4. Ověření vlastností slitiny AZ 91HP - v II. etapě vývoje

Druhá etapa byla zaměřena na ověření vlastností slitiny AZ 91HP v podmínkách slévárny hořčíkových slitin v ČKD.

Pro zvýšení odolnosti hořčíkových slitin proti korozi byly vyvinuty slitiny vysoké čistoty, u kterých je výrazně snížen především obsah Fe, Cu a Ni. Udržení koncentrace těchto prvků na požadované nízké úrovni i v průběhu přetavování a lití konečných výrobků vyžadovalo ověřit případné vlivy jednotlivých operací technologického procesu.

Za tímto účelem byla uskutečněna ve slévárně hořčíku experimentální tavba slitiny AZ91HP, dodané firmou Norsk Hydro. Dále je popsán průběh tavby a shrnuty výsledky analýzy chemického složení, metalografického a fraktografického rozboru a stanovení mechanických vlastností odebraných vzorků a jejich vyhodnocení ve vztahu k parametrům jednotlivých technologických operací.

3.4.1 Průběh tavby a chemické složení

Tavba byla provedena v indukční peci Siemens s maximálním příkonem 114 kVA (380 V, 300 A). Vsázku tvořily housky slitiny AZ91HP dodané fy Norsk Hydro. Hmotnost vsázky byla 120 kg. Pro zjemnění zrna byla do vsázky přidána směs vosku s uhlíkem. Na začátku lití byla teplota tekutého kovu 760 °C. Jako první byly odlity vzorky pro kvantometr, dále 15 ks odlitků do pískových forem a po nich klínové vzorky a zkušební tyče pro zkoušku tahem. Teplota taveniny na konci lití byla 730 °C.

Pro zkoušky mechanických vlastností a analýzy struktury byly použity zkušební tyče v litém stavu a ve stavu po tepelném zpracování režimem T4 (375 °C po dobu 3 hod., pak 415 °C po dobu 22 hod.; ochlazení na vzduchu). Odebrány byly také vzorky pro analýzu chemického složení.

Chemické složení.

Analýza chemického složení byla provedena na kvantometu OES firmy ARL. Výsledky jsou uvedeny v *tab. 20*, spolu s chemickým složením suroviny podle technického listu a amerického standartu ASTM pro slitinu AZ91E vysoké čistoty pro výrobky, zhotovené litím do písku.

Z porovnání uvedených údajů vyplývá, že obsah hlavních legujících prvků Al, Zn a Mn odpovídá údajům Norsk Hydro a vyhovuje standardu ASTM. Stanovený obsah Zn a Mn přitom leží přibližně v polovině tolerančního pole, obsah Al v jeho horní třetině. Obsah příměsí Cu a Si je v tomto porovnání výrazně nižší, obsah Ni lze v mezích přesnosti stanovení považovat za vyhovující.

Obsah Fe se proti hodnotě, deklarované výrobcem, poměrně výrazně zvýšil. Pokud je obsah Fe vyšší než 0,005%, nesmí být poměr Fe:Mn vyšší než 0,032. Výpočet poměru Fe:Mn dává hodnotu 0,0367, podle tohoto kritéria tedy chemické složení odlitků nesplňuje požadavky standardu ASTM. Pro jeho dodržení by při daném obsahu Fe musel být obsah Mn minimálně 0,275 %. Lze konstatovat, že mírné zvýšení obsahu Mn by mohlo být nejschůdnější cestou ke splnění daných požadavků.

3.4.2. Mechanické vlastnosti.

Mechanické vlastnosti byly stanoveny zkouškou tahem podle ČSN 42 0310 vždy na třech odděleně odlitých zkušebních tyčích kruhového průřezu podle ČSN 42 0333. Výsledky stanovení meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , tažnosti A_5 a A_{50} a kontrakce Z ve stavu litém a tepelně zpracovaném jsou shrnuty v *tab. 21*. V tabulce jsou uvedeny i hodnoty tvrdosti HB, stanovené pro každou tyč jako průměr ze tří měření.

Je možno konstatovat, že hodnoty mechanických vlastností u všech zkoušených tyčí daného stavu byly velice blízké. Z malého rozptylu lze především soudit na nepřítomnost lících nebo povrchových vad a tudíž i na dobrou kvalitu odlitých tyčí.

Z tabulky také zřetelně vyplývá příznivý vliv tepelného zpracování, po kterém materiál získává relativně vysokou plasticitu při současném výrazném zvýšení

pevnostních vlastností. Na tahovém diagramu je možno určit mez kluzu, jejíž hodnota o málo převyšuje mez pevnosti v litém stavu.

V ASTM B 80 jsou předepsány pouze minimální hodnoty mechanických vlastností slitiny AZ91E po tepelném zpracování režimem T6, t.j. na maximální vytvrzení při umělém stárnutí. Z *tab. 21* je patrné, že těmto požadavkům zkoušené tyče odlité v ČKD Hradec Králové vyhovují se značnou rezervou. Při porovnání s hodnotami mechanických vlastností, uváděnými jako obvyklé pro stavy T4 a T6, je však zřejmé, že použitý režim tepelného zpracování dává v porovnání s režimem T4 podle ASTM nižší hodnoty pevnosti a tažnosti při příliš vysoké mezi kluzu a tvrdosti. Pevnostní vlastnosti zkoušených tyčí se přibližují hodnotám, dosahovaných tepelným zpracováním na stav T6, ve kterém zase nejsou požadovány zde dosažené vysoké hodnoty tažnosti.

3.4.3. Metalografický rozbor struktury.

Porovnání mikrostruktury v litém stavu a ve stavu po tepelném zpracování bylo provedeno na podélných výbrusech, odebraných z hlav zkoušených tyčí.

Mikrostruktura litého stavu je znázorněna na *obr. 21*. Tvoří ji dendritická zrna tuhého roztoku α -Mg s patrným dendritickým odmišením. Po hranicích dendritických buněk se vyskytují útvary intermetalické fáze, kterou je možno podle bílého zbarvení po naleptání glykolovým leptadlem identifikovat jako $Mg_{17}Al_{12}$. Přítomnost této fáze je v souladu s rovnovážným fázovým diagramem a pro litý stav hořčíkové slitiny tohoto druhu typická. Potvrzením je i zčernání této fáze po naleptání leptadlem na bázi kyseliny fluorovodíkové a glykolu (*obr. 22 a 23*). Na těchto obrázcích jsou také zvýrazněny oblasti po okrajích dendritických buněk, obohacené Al v důsledku dendritického odmišení. Na těchto obrázcích jsou také zřetelněji odlišeny útvary tuhého roztoku α -Mg v eutektiku.

Na *obr. 23* je možno lokálně pozorovat i malé oblasti s lamelární strukturou, tvořenou lamelami tuhého roztoku α -Mg a výše popsané intermetalické fáze. Vznik těchto oblastí je spojen s rozpadem přesyceného tuhého roztoku bezprostředně po přechodu do tuhého stavu. Tento pochod, označovaný jako diskontinuální rozpad, se vyznačuje krystalografickou závislostí na mřížce původní fáze a difúzním mechanismem. Proto k ní může docházet pouze za dostatečně vysokých teplot. Vzhledem k tomu, že pro difúzi je třeba také dostatečného času, svědčí přítomnost precipitátu o relativně pomalém ochlazování.

Na *obr. 22* se tyto oblasti projevují jako bílé útvary, ohraničené z jedné strany eutektickými útvary a z druhé hranicí dendritického odmišení. Vnitřní struktura těchto útvarů s drobnými černými částicemi potvrzuje, že vedoucí fází této přeměny je tuhý roztok α , ve kterém jsou drobné lamely tmavé fáze $Al_{12}Mg_{17}$.

Po tepelném zpracování se vzhled mikrostruktury podstatně mění (viz *obr. 22*). Struktura se stává hrubší, mizí útvary fáze $Al_{12}Mg_{17}$ vytvářejí se zřetelné hranice zrn, dekorované drobnými částicemi, a zvýrazňují se částice uvnitř zrn. Na druhé straně se objevují nové útvary, charakterizované ostrými hranicemi dovnitř zrn a méně zřetelnými na straně původních hranic dendritických zrn. Rozměry těchto útvarů jsou podstatně větší než rozměry původních lamelárních oblastí v litém stavu. Detailní *obr. 23* dokumentuje vnitřní strukturu těchto útvarů.

Z hlediska fyzikální metalurgie lze vznik této struktury vysvětlit rozpouštěním fáze $Mg_{17}Al_{12}$ po hranicích dendritických buněk i v lamelách při tepelném zpracování, v jeho důsledku dochází k doplňování Al do přesyceného tuhého roztoku a jeho difúzi do oblastí s jeho menší koncentrací. Tím se zvětšují oblasti přesycení, ve kterých při pomalém chladnutí na vzduchu proběhne opakovaná diskontinuální precipitace, pro kterou je charakteristická ostrá fronta růstu, tj. ostrá hranice uvnitř zrna. V porovnání s litým stavem je pak objemový podíl těchto strukturních útvarů podstatně větší.

V nenaleptaném stavu a při větších zvětšeních lze uvnitř zrn nalézt ojedinělé drobné hranaté i čtnejší částice tmavé barvy (*obr. 23*). Hranaté částice jsou v literatuře uváděny jako fáze, obsahující Fe, vytvářející se v čistém Mg. Ve slitinách Mg jsou obdobné fáze popisovány jako globulární. Lze předpokládat, že v dané slitině je ve fázích tohoto typu vázáno i určité množství Mn.

Neostré kontury globulárních částic však na druhé straně naznačují, že by se mohlo jednat o komplexní intermetalické fáze, obsahující i Al a Zn, vzniklé přeměnou tuhého roztoku v průběhu tepelného zpracování v místech, kde se v důsledku silného odmišení tyto prvky vyskytovaly ve vysoké koncentraci. Tomuto vysvětlení nasvědčuje skutečnost, že tyto částice jsou přítomny pouze ve stavu po tepelném zpracování.

3.4.4. Fraktografický rozbor.

Pro posouzení příčin rozdílného chování materiálu v litém a tepelně zpracovaném stavu při zkoušce tahem bylo provedeno sledování lomových ploch přetržených zkušebních tyčí řádkovací elektronovou mikroskopií.

Jak dokumentuje *obr. 24*, probíhá lom u materiálu v litém stavu převážně po hranicích dendritických buněk. Na většině lomové plochy dochází ke štěpnému lomu, který se šíří přes útvary fáze $Mg_{17}Al_{12}$ (*obr. 24 a 25*). Ojediněle lom prochází i místy výskytu lamelární struktury, kde lomová plocha nabývá charakter tvárného jamkového lomu. Slabými místy materiálu v litém stavu jsou tedy útvary fáze $Mg_{17}Al_{12}$ po hranicích dendritických buněk.

Ve slitině po tepelném zpracování probíhá lom jednak transkrystalicky, jednak interkrystalicky (*obr. 26*). Transkrystalický lom je charakterizován rovinnými fazetami, které jsou důsledkem šíření trhliny přes jednotlivá zrna podle určitých krystalografických rovin. Jak ukazují *obr. 27*, jsou tyto fazety v lomové ploše orientovány náhodně; jejich normála nabývá orientace od rovnoběžné ke směru působení zatěžovací síly až po orientaci k němu kolmou. Je zřejmé, že vznik fazet s orientací normály kolmo na směr namáhání je důsledkem vzniku stavu trojosé napjatosti při kontrakci zkušební tyče. Detailní *obr. 28* dokumentuje, že v tomto případě se nejedná o štěpení, ale o dekohezi podél krystalograficky orientovaných destičkovitých útvarů, po jejichž okrajích je matrice vytažena do tvárných můstků.

Je zřejmé, že u materiálu po tepelném zpracování jsou slabými místy struktury právě tyto oblasti, ve kterých lom probíhá přes popsané transkrystalické fazety. Jejich velikost a krystalografická orientace je důkazem, že tento charakter lomové plochy souvisí s metalograficky prokázanými oblastmi diskontinuálního rozpadu přesyceného tuhého roztoku v okolí hranic zrn.

V místech mimo tyto fazety lom probíhá interkrystalicky, to znamená po hranicích zrn, hustě obsazených částicemi intermetalických fází (*obr. 28*). Tato interkrystalická lomová plocha je tvořena tvárnými jamkami okolo těchto fází. V některých místech byl nalezen i tvrný lom s jamkami, ve kterých větší částice fází nebyly nalezeny (*obr. 29*).

3.4.5. Zhodnocení zkoušek II. etapy vývoje

Vzorky slitiny AZ91HP v litém stavu a po tepelném zpracování na stav T4 byly podrobeny rozboru mikrostruktury a fraktografickému rozboru lomových ploch po zkoušce tahem. Zkouškou tahem byly stanoveny základní mechanické vlastnosti. Chemické složení bylo ověřeno absorpční hmotovou spektroskopií. Z komplexního hodnocení získaných experimentálních výsledků lze odvodit následující závěry:

1. Obsah Fe je podstatně vyšší než 0,005 hm.%, požadovaných z hlediska vyhovující korozní odolnosti pro výrobky ze sledované slitiny. Je tedy třeba přijmout opatření, která by pomohla obsah Fe udržet na reálně možné nejnižší úrovni. Nelze však předpokládat udržení hodnoty 0,004 hm.%, deklarované výrobcem na instalovaném zařízení. V tomto směru lze však využít kritéria pro omezení poměru Fe : Mn a zvýšit obsah Mn.
2. Mechanické vlastnosti vyhovují standardu ASTM. V porovnání s obvykle uváděnými hodnotami se však projeví rozdíly, ukazující na možnost optimalizace postupu výroby, zejména tepelného zpracování.
3. V mikrostruktuře stavu po tepelném zpracování byly nalezeny zbytky fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Ačkoliv bylo dosaženo přeměny jistého podílu této fáze na tuhý roztok s následnou precipitací, zůstává ještě určitý podíl nevyužit. Je pravděpodobné, že právě zde lze hledat příčinu rozdílů mezi mechanickými vlastnostmi sledovaného materiálu a publikovanými údaji. Ukazuje na potřebu optimalizace režimu rozpouštěcího žhání.
4. Fraktografická analýza prokázala, že slabými místy struktury po tepelném zpracování z hlediska mechanického namáhání jsou oblasti, ve kterých proběhl precipitační proces. Jelikož jejich velikost i objemový podíl je ovlivňován rychlostí ochlazování z teploty rozpouštěcího žhání, zejména v intervalu nad 200 °C, je žádoucí se možností zvýšení této rychlosti dále zabývat.
5. V litém stavu bylo pozorováno výrazné dendritické odmišení, které rovněž podporuje výskyt oblastí precipitačního rozpadu a je tedy žádoucí jeho omezení. Dendritické odmišení je důsledkem konstitučního podchlazení, kterému lze teoreticky předejít dostatečně rychlým ochlazením taveniny. Tento záměr je sice v praktických podmínkách jen obtížně uskutečnitelný, přesto považují za účelné se jím zabývat.

Provedené zkoušky přinesly první vlastní poznatky o mikrostruktuře a mechanických vlastnostech slitiny AZ91HP při lití do pískových forem v našich

provozních podmínkách. Pro takový případ bude vhodné vypracovat pro každý náročný odlitek vlastní systém zkoušení, včetně odběru vzorků.

K širšímu zobecnění získaných poznatků vlastností sledované slitiny bude třeba zpracovat větší soubor výsledků a to jak z běžného provozu, tak i za řízených podmínek dalších experimentálních taveb. Dále bude třeba se zaměřit na ověření optimálního režimu tepelného zpracování, i na optimalizaci postupu tavení.

3.5. III. etapa - Komplexní zkoušky prototypových kol

3.5.1 Výroba a kompletace prototypu složeného železničního kola

Na základě uvedených výsledků materiálového ověřování popsaného ve druhé etapě a rozměrového upřesnění bylo rozhodnuto odlitky šesti kompletů zajistit takto:

- použít materiál AZ91HP
- tepelné zpracování T6
- manipulační spojení provést variantně
- pevnostní spojení dle postupu navrženého Výzkumným ústavem železničním v Praze

Odlitky šesti kompletů byly komplexně i materiálově vyhodnoceny. Bylo provedeno opracování a rozměrový protokol ke všem dílům. Jednotlivé díly skořepiny byly v naší slévárně manipulačně spojeny ve dvou variantách.

Spojování odlítků středové skořepiny.

K lepení manipulačního spojení bylo použito přípravku Loctite, dle doporučení výrobcem byla zvolena varianta lepení s aktivátorem

- Postup:
- odmaštění benzinem, odmaštění přípravkem Loctite 7601, nanesení aktivátoru na obě lepené plochy.
 - Loctite 7649, nanesení vlastního lepidla Loctite 326 na obě lepené plochy.

Tento postup se ukázal jako nevhodný. Kolo tímto způsobem slepené, vytvořilo ve stykových plochách přesně obrobených kol vrstvou lepidla, která způsobila nárůst rozměru šířky (rozměr 87,6 mm na straně obruče a 126 mm na straně hřídele). Tato rozměrová vada se nedala odstranit ani stažením pomocí svěrek. Bylo proto rozhodnuto ověřit též původně navrhovanou variantu sváření pláštů a změnit původní navržený způsob lepení - viz Tab. 22. Zavaření bylo provedeno bodově, a to sváry cca 30 - 35 mm délky pod argonem na 6 místech po obvodu.

Na vzorcích byl ověřen nový způsob lepení a to: po odmaštění (benzín a odmašťovač Loctite 7601) bylo nanесeno lepidlo Loctite 648 vždy jen na jednu plochu. Zajištění bylo provedeno svěrkami. Soudržnost po slepení byla dobrá. Tento postup je reálné aplikovat provozně a z hlediska nebezpečí zanesení prutů při bodovém svařování do opracované soustavy skořepiny ho považují za vhodnější.

Přehled způsobů manipulačního spojení

Přehled způsobů manipulačního spojení je uveden v *tab. 22*

Závěrem k tomuto způsobu lze tedy doporučit pro nultou sérii následující postup: po odmaštění benzinem a odmašťovacím prostředkem Loctite 7649 nanесení lepidla Loctite 648 bez aktivátoru a v potřebném přípravku ponechat cca 5 minut.

Šest kompletů středové skořepiny opracovaných a spojených s odlitků z hořčíkové slitiny AZ91HP bylo včetně materiálových a rozměrových protokolů předáno k dalším zkouškám.

3.5.2 Ověření materiálu železničního kola z hlediska únavových vlastností

Ve Výzkumném ústavu železničním provedli v letech 1995 a 1996 únavové zkoušky materiálu AZ91HP. Zkoušky byly provedeny na vzorcích tepelně zpracovaných na T4 a T6. Výsledky zkoušek tehdy prokázaly lepší hodnoty meze únavy pro stav tepelného zpracování T6.

Na základě těchto zkoušek byla provedena koncem roku 1998 zátěžová zkouška železničního kola vyrobeného dle výkresu dvoukolí - 001 s upevněním jednoho kola s kratší hřídelí. Hřídel sloužila k pevnému zafixování kola při zkoušce. Kolo bylo zatěžováno střídavým ohybem boční silou 40 kN v jednom místě na obvodu ocelové obruče kola (viz *Obr. 112*). Ke vniku praskliny došlo mezi 435 800 a 554 238 cyklem. Jedná se o obvodovou prasklinu poblíž věnce v místě rádiusu (*obr. 110*). V době zjištění zasahovala již 140 stupňů obvodu kola. Jedná se o atypický lom pro danou zkoušku z hlediska místa vzniku. Při těchto zkouškách na ocelovým materiálech dochází k prasklinám ne u vnějšího průměru, ale poblíž vnitřního průměru kol. K zjištění deformací byly nalepeny tenzometry v ose kola. Největší deformace byla logicky zjištěna v blízkosti zatížení (viz. *obr. 108, 109*). Po dohodě ze ŽDB Bohumín závodu železniční dvojkolí - zadavatelem únavové zkoušky kola v SVUM Běchovice - bylo v

Bohumíně provedeno vylišování hřídele a rozebrání vnější ocelové obruče. Zbytek kola byl podstoupen k dalšímu ověřování.

Postoupený skelet zkoušeného železničního kola byl rozřezán dle *obr. 111*. Řezy na obrázku jsou označeny zeleně. K dalšímu šetření byly použity části označené na tomto snímku I a II, na kterých byly praskliny po únavové zkoušce. Pohled na vyříznutou část kola I ukazuje *obr. 113*. Na tomto snímku je zřejmé sestavení skeletu železničního kola ze středního dílu a dvou dílu plášťů, které v této zkoušené variantě byly na vnějším dílu svařeny. Na *obr. 114* je pak čelní pohled na vnější plochu pláště kola s prasklinami.

3.5.3 Vizualní a makroskopický rozbor

Z přiložených mikrosnímků je zřejmé, že na plášti kola vznikly dvě praskliny obvodového směru. Jedna přímo v rádiusu na snímcích označená „A“ a druhá v rovné ploše pláště posunuta směrem ke středu kola. Obě tyto praskliny jsou propojeny prasklinami v osovém směru. Dle rozboru lomových ploch bylo zjištěno, že prvotní prasklina vznikla v oblasti rádiusu „A“. Lomová plocha této praskliny je zachycena *obr. 115*. V oblasti rádiusu „A“ na vnitřní stěně pláště došlo k vzniku únavové praskliny. Silový lom „B“, který ústí až na vnějším povrchu pláště, tvoří cca 4/5 průřezu. Vlastní průběh lomu v daném průřezu dokumentuje *obr. 116*. Na tomto obrázku je zachycen plášť s prasklinou a druhý plášť bez praskliny. Z tohoto snímku je patrný vrub v místě, kde došlo k vzniku první únavové praskliny. Při větším zvětšení je rovněž patrné, že oblast tohoto rádiusu na vnitřní stěně pláště, nemá hladký povrch (viz *obr. 115*).

3.5.4 Metalografický rozbor

Metalografickým rozbořem z oblasti praskliny bylo zjištěno, že struktura má stejný charakter v oblasti iniciace únavového lomu i ve zbylé části lomu. Je zachycena na snímku č. 284 (viz *obr. 113*, leptáno kyselina šfavelová) a má stejný charakter jako běžné tepelné zpracování na stav T6. Na snímku č. 285 *obr. 113* je zachycena další prasklina zjištěná na výbruse při vnitřním povrchu pláště. Ze snímku je zřejmé, že prochází přes zrna základního materiálu.

Závěrem tohoto zjištění lze konstatovat, že hlavní příčinou vzniku prvotní únavové praskliny s následnou destrukcí kola, je vrubový účinek rádiusu označeného „A“ na vnitřním povrchu pláště skeletu železničního kola. K odstranění této závady či k jejímu výraznému potlačení doporučuji úpravu daného rádiusu. Průběh lomů přes zrna

svědčí o dobré jakosti vlastního materiálu. Z hlediska výsledků únavových zkoušek je vhodnější uplatnit tepelné zpracování T4.

3.5.5. Zhodnocení III. etapy vývoje složeného železničního kola

Kromě uvedené destrukční zkoušky provedené SVUM Běchovice, únavové zkoušky provedené v UMI Brno, byly provedeny hlukové zkoušky, numerická simulace, hodnocení vlivu náplně na dynamické vlastnosti, vliv odstředivých sil a další. Tuto neúplnou citaci souboru provedených vývojových prací uvádím pouze pro ilustraci rozsahu první etapy tohoto vývoje. Výrazně pokrokové konstrukční řešení nového typu složeného železničního kola má svým pojetím vysoký inovační charakter. Jeho výsledky v oblasti aplikace hořčíkové slitiny v železniční dopravě jsou vysoce inspirativní. Jsem přesvědčen, že získané poznatky by při dalším pokračování tohoto vývoje prokázaly reálnost provozní aplikace tohoto složeného železničního kola.

Pokračování ve vývoji bude nutné zaměřit na využití materiálu AZ91HP, tepelně zpracovaného na stav T4. Výsledky zkoušek, které jsem obdržel z VUT-ÚMI Brno, prokázaly výrazně lepší únavové vlastnosti tohoto stavu tepelného zpracování v porovnání se stavem T6. Tato skutečnost byla potvrzena i při dalších únavových zkouškách provedených později v letech 2001 a 2002 v souvislosti se řešením problémů automobilových kol soutěžní verze.

4. KVALITA A SPECIFICKÉ VADY CHARAKTERISTICKÉ PRO Mg-Al SLITINY

4.1. Rozbor kvality odlitků

Výchozím podkladem vstupního rozboru jsou detailní rozborů nekvalitní výroby (měsíční, čtvrtletní, roční) v časovém rozpětí let 1995-2000. Z těchto rozborů byly vybrány rozhodující detaily a převažující vady. Tento rozbor byl podroben analýze se záměrem posoudit a zohlednit časové a věcné difference v jednotlivých rozbořech. Výstupem je následující tabulka, která byla vodítkem pro orientaci dále uvedených prací zaměřených na zřízení úrovně kvality a tím i konkurenceschopnosti vlastní slévárny. Viz příloha - tab. 23.

Technicko-obchodní problematiku, a ve svém důsledku konkurenceschopnost, u odlitků pro automobilový průmysl negativně ovlivňovaly především mikrořediny a oxidy, popáleniny a trhliny. Únavové trhliny na odlitcích kol pro soutěžní aplikace, jejichž vznik iniciovaly mikrořediny, jsou řešeny v souvislosti se vznikem těchto vad. V další kapitole pak jsou zkoumány únavové charakteristiky systémově v návaznosti na získané základní poznatky z řešení vývoje složeného železničního kola.

4.2. Mikroporozita:

Vznik této vady v závislosti na smršťování při tuhnutí a vylučování plynů u odlitků z této slitiny při odlévání do písku se zabývaly práce autorů [25, 26]. Většina těchto prací řeší problém průběhu tuhnutí slitiny eutektického dvouprvkového charakteru MgAl s širokým intervalem tuhnutí. Tedy se sklonem k tvorbě interkrystalických či interdendritických pórů, které se spojují a vykazují pak nižší hustotu a jsou příčinou netěsností či iniciací k tvorbě únavových prasklin. Problematika plynové porozity je v získaných informacích zmiňována pouze okrajově. Podrobněji je tato problematika řešena u hliníkových slitin, kterých se z hlediska rozdílu rozpustnosti plynu, zejména vodíku v tekutém a tuhém stavu, tento problém především týká. Na obr. 4 je znázorněna závislost rozpustnosti na teplotě u hořčíku a hliníku. Souvislost vzniku mikroporozity v souvislosti s tepelným zpracováním je v získaných podkladech ještě méně objasňována.

V období konce roku 1999 byla odlita série odlitků automobilových kol pro sportovní účely (*obr. 33*). U odběratele byly zjištěny netěsnosti koncentrované do 4 míst po obvodu kola (*obr. 34*). V případě soutěžních kol se i sebemenší netěsnost nepřipouští. Bezprostředně na toto období navázal shodný problém u odlitků středu kol. Jednalo se o trhliny vzniklé za provozu v místě zaústění paprsků do ráfku kola (*obr. 35 a 36*). Únavová trhlina vznikla v místě paprsku. V tomto místě byla ve všech případech zjištěna mikroporezita.

Pro odstranění této vady bylo přistoupeno k systematickému řešení orientovanému jak teoreticky, tak na praktické ověřování. V první etapě byla uskutečněna detailní проверка celého výrobního procesu s podrobnou kontrolou provedenou metalurgickou laboratoří. Zejména v případě kola, kde se jednalo o netěsnost, jsme měli k dispozici velký soubor odlitků s konkrétními tavnými a tepelným zpracováním. Převážnou část z těchto 120 kusů se nám podařilo speciální metodou úspěšně utěsnit. Závěr z prověrky souboru ze 120 kusů těchto sportovních kol lze stručně shrnout takto:

Téměř 60-ti procentní výskyt této vady byl v časovém období měsíce listopadu (přechodové období s vysokou relativní vlhkostí), 25-ti procentní výskyt spadá do období, kdy z hlediska obchodně-organizačního byla použita vsázka z přetaveb třisek a zbývajících 15 procent jsme nedokázali přesněji přiřadit. Je možno připustit, že vady souvisí s technologií, případně jejím nedodržováním. Vady jsme speciální metodou opravili a po přetlakování bylo konstatováno, že oprava byla úspěšná. Při provádění oprav utěsňováním a následné kontrole byla všechna tato kola podrobně prohlédnuta i z hlediska čistoty povrchu po opracování a byl zjištěn výskyt drobných povrchových oxidů. Několik odlitků z opravovaného souboru bylo vyřazeno a podrobeno zkoumání v metalurgické laboratoři a následně pak ve VUT-ÚMI Brno. Cílem bylo rozlišit dále uvedené tři základní druhy mikroředin z hlediska příčin jejich vzniku. Pro vyjasnění mikroporezity plynového charakteru, jsme zhotovili vzorky z recyklace třisek, které byly s jistotou naplyněny. Zkoumání mikroporezity z příčiny tepelného zpracování bylo prováděno v laboratorních podmínkách. Zjištěné charakteristiky jednotlivých příčin vzniku mikroporezity jsou následující:

4.2.1. Mikroporezita vzniklá příčinou neusměrněného tuhnutí odlitků

Obvyklý postup v odstranění tohoto typu mikroředin u konkrétních odlitků je veden snahou dosáhnout usměrněného tuhnutí.

Odstranění vady bylo řešeno v zásadě konstrukčně technologickou úpravou, a to změnou úkosu žebra a zvýšením počtu vtokových zářezů. Toto rozhodnutí vyplynulo z podrobného rozboru vadných kusů. Rozložení vad mělo po obvodu vzestupný a sestupný charakter (*obr. 35, 36*). V místech vytváření mikroředin se pak při provozu těchto středů kol vytvářely únavové trhliny. Technologickou úpravou se vada uvedeného odlitku odstranila. Problém následných únavových prasklin při dalších destrukčních zkouškách prováděných u zákazníka nebyl již iniciován mikroředinami. Při dalších únavových zkouškách vznikly praskliny v jiném místě odlitku.

4.2.2. Mikroporezita vzniklá naplyněním tekutého kovu

V případě, že obsah plynu v tekutém kovu je vyšší než jeho rozpustnost v tuhém stavu, způsobí jeho vyloučení v odlitku plynovou porezitu. Převážně se vyskytuje lanžetovitě, což je v literatuře označováno výrazem "trhliny v ledovci". Tento charakter měly i mikroředin na kolech (*obr. 37/1*). Když je tavenina v tekutém stavu, nepůsobí na ni smršťovací síly a vodík se může volně vylučovat podle rozpustnosti v závislosti na teplotě. V této fázi je žádoucí případné naplynění z této taveniny odstranit pod hranici rozpustnosti v tuhém stavu.

U hořčíkových slitin je citlivost na vznik plynové porezity výrazně menší než u slitin hliníku. Tyto vady se nám však na již citovaném konkrétním odlitku kola prokazatelně vyskytly. Na snímku z této vady (*obr. 37/2*) je zřejmé, že do mezidendritických prostorů se v procesu tuhnutí při teplotě v rozmezí likvidu a solidu a při vysoké koncentraci vodíku se vlivem snížené koncentrace při tuhnutí vytěsňuje atomární vodík. Výsledkem tohoto děje je vytvoření mikrostaženin ve formě tzv. vodíkové mikroporezity.

Řešení odplynění taveniny

Dříve prováděné postupy ošetření taveniny zaváděním chlóru a to jak ve formě plynné, tak v tabletách, byly z hlediska ekologického hodnoceny negativně a výrobky tohoto druhu se přestaly vyrábět a používat. Náhradu za tento tradiční postup se

používají tablety, které mají jak modifikační, tak odplyňující účinnost. Po zjištění plynové porezity v odlitcích kol vznikl problém, jak se zárukou taveninu odplynit, jaký přípravek použít a především, jak účinnost odplynění zkontrolovat.

Odplyňování taveniny hořčíkových slitin bylo se zaměřením na běžnou tavbu a na recyklační tavby třísek úvodem ověřeno na několika tavnách s použitím profukování SF₆ a tabletami firmy SPEFORM.

Vyhodnocení taveniny z hlediska naplynění bylo ověřováno v našich podmínkách takto:

Metalografický rozbor

Metoda vycházela z rozborů prováděných při zjišťování a charakteristice vad u vzorků z odlitků. Na rozříznutém vzorku se provede metalografický výbrus, na kterém se rozsah vady hodnotí. Tato metoda indikuje vady, v našem případě plynovou porezitu pouze v daném řezu, což je zásadní nevýhoda této metody, protože řez nemusí procházet přímo vadou v případě, že se nejedná o velký rozsah. Z tohoto důvodu nebyla závislost mezi odplyňovanými a neodplyňovanými vzorky jednoznačně prokázána. Metoda byla při dalších zkouškách aplikována na hodnocení účinku odplynění na lomové ploše zkušebních tyčí po přetržení. Tyč je přetržena v místech nejmenší pevnosti průřezu. Není-li v tomto místě mikroředina, považujeme kontrolovaný materiál jako vyhovující.

Závěr k problematice plynové mikroporezity:

- průkazný výskyt mikroporezity plynového charakteru je sezónního charakteru prokazatelně z období vyšší atmosférické vlhkosti.
- další výskyt souvisí s použitím přetaveb třísek

Opatření:

- změna vsázky:
 - Použití suroviny AZ 91 HP (surovina s vyšší čistotou)
 - Použití ošetřeného vratu (zásadně důsledně přetryskaného) a vytríděného materiálu z odlitků vyrobených z AZ91
 - Použití speciálních tablet na odplynění (preventivní opatření souvisí s tím, že za současného stavu není vyvinuta konkrétní provozní kontrola naplynění taveniny)
- změna technologie:
 - Použití keramických filtrů do vtokové soustavy
 - Změna vtokového systému

Po těchto opatřeních se vada typu plynová mikroporozita na detailu odlitku kola již nevyskytla. Další řešení pokračovalo změnou technologie přetavby třísek, které bylo poloprovodně ověřeno.

Byla provedena řada zkoušek zjišťování mikroředin v lomu odlitků i zkušebních tyčí bez tepelného zpracování. To by značně urychlilo vlastní proces výroby, protože by bylo možné vyřadit vadné odlitky z výroby ještě před tepelným zpracováním. Zkoušky však jednoznačně prokázaly, že mikrořediny v materiálu lze, jsou-li ve větším rozsahu, sledovat vizuálně, a v menších rozsazích makroskopicky na lomových plochách pouze po tepelném zpracování.

Dlouhodobým sledováním těchto vad v odlitcích jsme zjistili, že je lze identifikovat makroskopicky podle charakteristického zabarvení a textury povrchu. Prakticky to provádíme sledováním lomové plochy na stereomikroskopu při zvětšeních 50 až 100 x. Mikroporozita se vyskytovala v našich odlitcích ve trojím zabarvení. V některých případech se vyskytovalo jedno zabarvení samostatně, jindy měl povrch dvě nebo všechny tři možné barvy v různých místech lomu. Jednalo se o barvu černou, zlatavou, nebo stříbrnou. Metalografickým rozbořem lomu v místě těchto vad jsme ověřili, že se jedná pouze o mikrořediny ve všech případech barev. Tyto mikrořediny však měly vždy stejný charakter, ať se jednalo o kterékoliv zabarvení povrchu. Ve spolupráci s VUT-ÚMI Brno, kterému jsme předali tyto tři druhy vad, jsme se snažili tyto vady blíže identifikovat. Rozbořem vad na elektronovém rastrovacím mikroskopu bylo zjištěno, že vady s černým zabarvením jsou dutiny bez jakéhokoliv ovlivnění dalšími prvky. Ve vadách se zlatým a stříbrným zabarvením se zjišťovalo zvýšení koncentrace některých prvků. Tato zjištění se nám však nepodařilo prakticky využít pro rozlišení vad vznikajících naplyněním, stahováním nebo tepelným zpracováním.

Na základě těchto odborných poznatků byla zavedena makroskopická kontrola lomových ploch všech zkušebních tyčí po tahové zkoušce pomocí stereomikroskopu. Mikroředina se zde pozná nejen dle již popsaného zabarvení, ale i dle odlišného charakteru lomové plochy, která má v místě této vady charakter "natavování povrchu". Při výskytu řediny stříbrného zabarvení může dojít snadno, zejména při menší zkušenosti pracovníka, k záměně s výskytem precipitátu lamelární struktury, která se při tomto sledování jeví stejně. V tomto případě se provádí výbrus z daného místa, a vada se jednoznačně identifikuje metalograficky.

4.2.3. Mikroporezita vzniklá v průběhu tepelného zpracování

Tato vada souvisí s režimem tepelného zpracování. Ovlivňuje ji zejména rychlost náběhu na teplotu. Na *obr. 38/5* je tato vada demonstrována.

Na některých vzorcích byly v laboratoři zjišťovány určité odlišnosti v tvaru a charakteru této mikroporezity. V některých případech se objevovaly na povrchu v okolí této vady drobné převýšeniny charakteru krupiček (*obr. 38/4*). Z detailního rozboru bylo zjištěno, že tento charakter vady se vyskytl v souboru třiceti taveb pouze u odlitků tepelně zpracovaných v peci č. 1. Bylo prokázáno, že u odlitků ze stejné tavby, které byly tepelně zpracovány v jiné šachtové peci, se tyto vady nevyskytovaly. Prověřením režimu průběhu tepelného zpracování byl zjištěn výrazně rychlý náběh na žíhací teplotu. Po tomto zjištění jsme tuto vadu vyvolali žíháním vzorků z tyčí v laboratoři. Strmý náběh na teplotu z následným režimem 3 hod. na teplotě 460 °C, na těchto vzorcích prokázal výskyt této vady z důvodu strmého náběhu na tuto teplotu. Popis vady na *obr. 38/4* prokazuje jednoznačně závislost výskytu této vady na tepelném zpracování provedeném v laboratoři, kterým byla tato vada vyvolána.

Na *obr. 117* je dokladována neúspěšná zkouška tepelného zpracování, kdy přehřátím elektrické pece na 440⁰ C a nedostatečným vytvořením ochranné atmosféry došlo k znehodnocení zkoumaného odlitku automobilového kola. Na snímcích jsou znázorněny charakteristické vady, t.j. oxidace povrchu.

Závěr k řešení mikroporezity vzniklé tepelným zpracováním

- U náročných odlitků s rozdílnými tloušťkami stěn byl navržen a zaveden třístupňový režim homogenizačního žíhání T4 s podlehou v prvním stupni 350 °C, v druhém 385 °C a ve třetím stupni 415 °C.
- U elektrických pecí na tepelné zpracování je nutno zařadit důslednou periodickou kontrolu teplotního režimu.

4.2.4. Povrchová porezita

Jedná se o nespecifikovanou vadu, jejíž výskyt zasahuje většinou jen do malé povrchové vrstvy odlitku. Označili jsme ji proto povrchovou porezitou. To, že se jedná skutečně o povrchovou vadu, jsme se přesvědčili opakovanými lomovými zkouškami. Na *obr. 39* je fotografie této vady. Vada se vyskytuje na svislé stěně příruby odlitku středu kola, mezi některými paprsky (*obr. 38*). Návrh na ověřovací zkoušky byl tedy

předložen s cílem ověření pravděpodobných příčin.

V první etapě zkoušek bylo ověřováno:

- Vliv teploty liti (bylo ověřováno měřením teploty, která v průběhu liti v dále uvedené toleranci klesá)
- Vliv vtokového systému (zaústění zářezu) na místo výskytu vady
- Vliv jádrové směsi a účinnost ochranných postřiků.

4.2.5. Rozlišení mikroporozity z hlediska příčiny vzniku

V rámci řešení souboru příčin vzniku mikroporozity byla shromážděna řada výsledků, zpracovaných v podmínkách vybavení naší laboratoře a doplněna výsledky získanými v laboratoři VUT-ÚMI Brno. Z těchto podkladů byl zpracován k jednotlivým příčinám a charakteristice následující rozbor:

Pro zjištění charakteru řediny, vzniklé při tepelném zpracování, byla zkušební tyč (litá) po přetržení při zkoušce tahem vložena do pece vyhřáté na 460°C a žháná 3 hodiny. Úmyslný rychlý ohřev bez předeřevu a vysoká teplota žhánání měly zajistit vznik ředin vytavením hranic zrn. Zkušební tyč před tímto tepelným zpracováním vykazovala při tahové zkoušce vysokou pevnost (250 MPa) a vizuální a makroskopickou kontrolou lomu nevykazovala před dalším tepelným zpracováním řediny.

Byl proveden výbrus z axiálního řezu v ose tyče v místě přetržení. Makrosnímek výbrusu (zvětšení 6,3x) je na v horní části *obr. 40*. Lomová plocha tyče je označena žlutě.

Struktura základního materiálu z tohoto výbrusu je na spodní části *obr. 40* (zvětšeno 125x, leptáno kyselinou šťavelovou). Je tvořena tuhým roztokem α . Diskontinuální precipitáty se vyskytují jen ve velmi malém množství. Tvoří nespojitě ojedinělé ostrůvky na hranicích zrn. Na obrázku z metalografického výbrusu je tato složka označena **H**. Dále lze na obrázku identifikovat dutiny (řediny) dvojího charakteru. Řediny s členitým povrchem (t.zv. "kudrnaté") jsou na *obr. 40* označeny **Ř**. Vyskytují se téměř vždy na hranicích zrn, výjimečně ojediněle i uvnitř zrn. Dále jsou zde v malém množství dutiny (řediny po hranicích zrn s málo členitým povrchem na obrázku označeny **X**.

Obrázky z elektronového mikroskopu tohoto vzorku jsou v na *obr. 41 a 42*. Snímek č. 11178 (*obr. 41*) zachycuje oblast při povrchu lomové tyče při malém zvětšení

(30x). Lomová plocha vznikla před "opakovaným" tepelným zpracováním. Snímek č. 11179 (*obr. 41*) zachycuje oblast přechodu mezi tuhým roztokem α a diskontinuálním precipitátem při větším zvětšení. Zrno je značně narušeno v důsledku extrémních tepelných účinků. Charakter "kudrnaté" řediny při velkých zvětšeních je zachycen na snímcích č. 11180 a č. 11181 na *obr. 42*. Z obrázků je patrný velice členitý a narušený povrch těchto ředin. Snímek č. 11183 (*obr. 43*) z el. mikroskopu zachycuje různé řediny při zvětšení 100x obdobně jako obrázek z metalografického mikroskopu (*obr. 40*), ale z jiného místa. Na snímku č. 11182 je opět zachycena staženina při zvětšení 500x (*obr. 43*).

Materiálové rozborů k výzkumu vzorku s ředinami po TZ jsou na *obr. 44 až 47*. Z plošné analýzy vzorku (č. 11183) je zřejmé, že se jedná o Mg-Al slitinu, kde základní složku tvoří Mg s podílem Al kolem 8 %. Toto složení z plošné analýzy lze brát jako informativní pro ověření, že se nejedná o záměnu vzorku. Přesné chemické složení tohoto vzorku, získané emisní spektrální analýzou na spektrometru fy SPECTRO, udává tavba 212/4 v % (přetavba):

Al = 9,10 Zn = 0,71 Mn = 0,20 Si = 0,116 Cu = 0,007 Fe = 0,013;

Z obsahu kyslíku je zřejmé, že je v lomové ploše vysoký obsah oxidů. Souvisí to s přípravou vzorku - lomová plocha vystavena žhání v normální atmosféře. Další *obr. 46 a č. 47* již zachycují rozborů přímo strukturních složek. Rozbor povrchu „kudrnaté“ staženiny je na *obr. 46 a 47*. Je zřejmé, že je tvořen oxidy základních prvků Mg, Al, eventuálně Si. Jiné prvky se zde ve větších koncentracích nevyskytují.

Dalším zaměřením provedených rozborů bylo rozlišení staženin vzniklých tepelným zpracováním, staženin vlivem působení plynu (vodíku) a klasických staženin v důsledku nedosazení taveniny. Na vzorcích z různých staženin byla provedena stejná měření jako na vzorku s mikrostaženinou vzniklou při TZ. Na základě provedených šetření jsme jednoznačně schopni zjistit staženinu vzniklou tepelným účinkem na již ztuhlý odlitek. To lze ověřit i chemickým rozbořem na elektronovém mikroskopu. Povrch této staženiny je tvořen pouze oxidy hořčíku a hliníku. Staženiny vzniklé nedosazením a vlivem vodíkové poretizy nelze odlišit místním chemickým rozbořem. V literatuře [27],

je popsána problematika vodíkové mikroporezity Al-Mg slitin. Ve spojení s výsledky této práce je možno v určitých případech provést metalografického rozlišení, a to dojde-li k vyloučení plynu uvnitř zrn. Na řediny na hranicích zrn má vliv koncentrace plynů (vodíku) v tavenině, množství „oxidických plen“ v tavenině a vznik prvotních mikrostaženin. Vznik ředin pak je zapříčiněn současným působením těchto tří faktorů, z nichž jeden může být dominantní. V našem případě kola s povrchovou vadou to byly „oxidické pleny“ v materiálu.

4.2.6. Zhodnocení zkušebních taveb odlitků středů kol z hlediska povrchové porezity

Výskyt povrchové porezity byl sledován při zkušebních taveb provedených za různých podmínek. Závěr vyplývající z průběhů provedených zkoušek je uveden v tabulkách *tab. 24 - 29* v příloze.

- Vady jsou převážně v místech prvních vtoků vlevo i vpravo a ojediněle proti jiným vtokům. Souvislost byla prokázána zkouškou č. 4, kdy při odlití otevřené formy bylo zjištěno, že plnění prvních vtoků nastává o 3 sek. dříve než u ostatních.
- Vliv pořadí lití a poklesu teploty v rozsahu běžného provozu se neprokázal.
- Znečištění jádrových směsí ani kladný či záporný vliv postřiku jader neměl zásadní vliv na uvedenou vadu. Z ověřovaných postřiků byl zaveden alkoholový postřik Alcon Mg2 dodávaný firmou Furtenbach s přidáním 3% kyseliny borité, který prokázal výrazné zvýšení povrchové kvality.

Ze získaných výsledků zkoušky č.4 se jako zásadní jevila úprava vtokové soustavy tak, aby došlo ke zrovnoměrnění plnění a maximálně bylo omezeno víření taveniny. Byla realizována umístěním rozvodového kanálku do spodní poloviny formy a zaústěním zářezů v horní části rozvodového kanálu. Plnění se zrovnoměnilo, což prokázala zkouška č. 5. Došlo k výraznému snížení této vady především co do rozsahu. Výskyt vady nebyl však zcela potlačen.

Na základě výše uvedených zjištění, že výskyt vady souvisí jak s plněním formy, tak s průběhem chladnutí, rozhodl jsem se ověřit teplotní pole odlitku středu kola se zaměřením na inkriminovaná místa výskytu této vady.

4.2.7 Měření časového průběhu chladnutí odlitku středu kola

Pro zkoušky bylo rozhodnuto použít odlitek ze seriové výroby, na kterém byly uplatněny závěry z předchozích opatření. Tato vada se na odlitcích této série v menším rozsahu sice dále vyskytovala, v průběhu apretace byla však odstraněna.

Jádro bylo použito z běžné výroby je zhotoveno z furanové směsi s 1,2 % Askuranu FH 310 a 0,8 % Harteru R50 (dodavatel Ashland) a křemičitého písku SH 27 (Šajdíkovy Humence) s přísadou 0,5 % síry a 0,75 % kyseliny borité. Jako postřik byl použit již uvedený přípravek Alcon Mg 2 upravený přídavkem kyseliny borité. Jádro připravené k založení je na *obr. 48*.

Formy jsou vyráběny z jednotné bentonitové směsi dle standardního předpisu ME 32 s použitím vratné směsi oživované křemičitým pískem Provořín 36, pojivem Sabenil s přísadou síry a kyseliny borité tak, aby celkový obsah síry ve směsi byl 5 - 5,4 % a obsah kyseliny borité byl 0,8-1 %. Spodní díl formy se založeným jádrem je vidět na *obr. č. 49*. Vrchním dílem formy byly do pěti zvolených míst zavedeny termoelektrické články v provedení N 33 druh J (železo - měď nikl) pro měřicí rozsah - 40 ÷ 700 °C. Plášť termoelektrického článku Ø6 mm je z Cr Ni Ti oceli dle TGL 7143. Kompenzační vedení je typu KXKD s izolací skelnou přízí.

Místa snímání teplot byla zvolena takto:

- Term. č.1 - do ráfku odlitku středu kola nad zaústěním prvního vtoku, tedy do místa, kde se sledovaná vada nejčastěji vyskytuje.
 - Term. č.2 - do ráfku odlitku nad druhým vtokem, tedy do místa, kde se sledovaná vada nikdy nevyskytla
 - Term. č.3 - do žebra proti čtvrtému vtoku, kde by se měl projevit izolační vliv furanového jádra a polohy
 - Term. č.4 - do bočního nálitku 20 mm od horní plochy ráfku z hlediska polohy při lití.
- U termočlánků Term č.1 - 4 byl nastaven časový interval nasčítávání hodnot 3 sec, a to především z hlediska možnosti co nejpřesnějšího posouzení doby bezprostředně po odlití
- Term. č.5 - do středového nálitku z hlediska posouzení jeho účinnosti. Výsledky byly nasčítávány v časovém intervalu 3 minut. S popisovaným ověřováním přímo nesouvisí proto nejsou výsledky měření v této souvislosti uvedeny.

Na *obr. 51* jsou na vyklepaném odlitku s vtokovou soustavou jednotlivé polohy termočlánků patrné.

Měření a hodnocení výsledků

Kompenzační vedení jednotlivých termočlánků bylo propojeno přes PX Controller od firmy Com Ap na počítač PC 386, monitor SAMTRON model SC-428 KS. Proudové napájení zajišťoval nabíječ NB 203 (stejnoseměrný proud pro PX Controller). Na Controlleru bylo v průběhu celého měření možno sledovat nasčítávané hodnoty jednotlivých měřených míst. Celé měření bylo situováno do prostoru tavírny. Uspořádání je patrné z *obr. 52*. Zkouška byla realizována v rámci tavby č. 330-2.

Vsázka - 49 kg surovina AZ91D

- 61 kg vrat z materiálu AZ 91D

- Odplynění tabletami 2 x T 300 (0,15 kg)

- Modifikace tabletami 3 x T 200 (0,22 kg)

Zkušební odlitek byl odlit při teplotě 730 °C za 31 sec. Odlévání je vidět na *obr.č. 50* a zobrazení průběhu teplot krátce po odlití na monitoru počítače na *obr. 53*.

Chemické složení:

Al	Zn	Si	Fe	Cu	Be	Ni
8,47	0,68	0,028	0,008	0,008	0,0005	0,005

Po tepelném zpracování byly u dvou odlitků ze zbývajících třech z tavby 330-2 identifikovány menší vady typu povrchové porozity u prvních vtoků a u jednoho nepatrný náznak této vady též u prvního vtoku.

Na *obr. 54* je zobrazen průběh teplot chladnutí z jednotlivých měřených míst zaznamenávaných v 3 sec intervalech přístrojem PX do 144 sec. Na *obr. 55* je pak průběh zobrazen v intervalech 306 sec.

Rozhodující zjištění uvádím v následujících bodech:

- Pořadí plnění jednotlivých vtoků odpovídá zjištění ze zkoušky č.5 (otevřená forma po úpravě vtokového systému). Začíná u vtoků č.4 a prakticky ve zlomcích sekundy postupuje ke vtokům č.3, 2 a 1. Svědčí o tom nepatrná prodleva mezi náběhy teplot na Term.č.2 a Term. č.1. Prodleva u Term.č. 3 a 4 je dána umístěním termočlánků ve vztahu k počátku plnění formy.

- Bezprostředně po odlití cca za 6 sec se křivky teplot na Term. č.1 a Term. č.2 srovnaly. V dalším průběhu byl pokles teploty na ráfku na vtoku č.1 rychlejší (Term. č.1) oproti poklesu teplot na ráfku u vtoku č.2 (Term č.2). V časovém intervalu 300 sec po odlití se již projevil výrazný rozdíl těchto dvou teplot, který dále pokračuje. Při dosažení teploty cca 400 °C se křivky teplot přibližují (viz obr. 55). Zvětšující se rozdíl teplot při konci krystalizace a ostrý úhel mezi žebrem a ráfkem vytváří teplotní podmínky pro tvorbu této vady právě v tomto místě. Zjištěné výrazné koncentrace oxidů v těchto povrchových vadách laboratoří VUT-ÚMI Brno, tento předpoklad potvrzuje.
- Průběh teploty v nálitku je v průběhu liti nižší. Přibližně po 12 sec po odlití dosahuje již nejvyšší teplotu ze všech měřených míst, kterou si podrží až do teploty cca 370 °C. V rozhodujícím období tuhnutí převyšuje teplota v nálitku 20 mm od horní hrany ráfku ostatní měřené hodnoty. Náletek je tedy funkční, o čemž svědčí periodické lomové zkoušky odlitků.
- Průběh chladnutí na žebro (Term č.3) odpovídá svým průběhem nejmenší síle stěny odlitku, a to až do hodnoty 380 °C, kdy se rychlost ochlazování oproti ostatním sledovaným místům zpomalí, a až do konce sledování (cca 4 hod) je v tomto místě teplota nejvyšší.

Na základě posouzení průběhu teplot v místech výskytu povrchové vady u prvních vtoků oproti druhým vtokům, kde se vada nevyskytuje, byly provedeny zkoušky s rozšířením obvodových nálitků na obě strany o 25 mm. Na 12 odlitcích odlitých ve čtyřech tavných se tato vada ani v jednom případě již nevyskytla.

Závěr

Přes odstranění povrchové vady technologickými opatřeními nepovažují teoretické objasnění této vady za vyčerpávající. Považují za nutné pokračovat v teoretickém i praktickém výzkumu příčin vzniku této vady. Zaměřit se především na vliv teplotního pole, průběh plnění formy tekutým kovem a vliv rozdílných průřezů tloušťek stěn.

4.3. Oxidické vměstky:

Příčiny vzniku oxidických vměstků a jejich eliminace souvisí s:

- narušením oxidové trubice při liti
- vtokovou soustavou (turbulence, víření kovu, apod.)
- formovací směsí (nesprávná jakost z hlediska potřebného množství inhibitorů, vlhkosti,

- prodyšnosti apod.)
- vlhkostí chladítek, nátěrů apod.
- sklonem taveniny k zahoření při použití nesprávného postupu či nevhodných solí při tavení
- sklonem taveniny k zahoření z hlediska nedostatečné ochrany

Jak již bylo uvedeno v úvodu, zabýval jsem se příčinou oxidace hořčíkových odlitků a studiem interakce forma - kov při výrobě odlitků z Mg slitin v kandidátské disertační práci [2].

Vzhledem k závěrům předchozího výzkumu jsem se v kapitole 4.3.1. zaměřil na aplikaci mikrolegování beryliem a tím možnosti snížení výskytu oxidických vměstků.

4.3.1. Mikrolegování beryliem

Z citovaných příčin byl v rámci této práce řešen sklon taveniny k zahoření při použití mikrolegování beryliem. Z pozitivních vlastností příměsi berylia v hořčíkových slitinách uvádí v "Metalografii neželezných kovů" - M.V. Malcev jeho příznivý vliv na snížení oxidů. Berylium totiž tvoří na povrchu zrna pevnou a souvislou oxidickou vrstvu, která chrání před oksyločváním v kapalném i v pevném stavu. Dle původní ČSN 424915 je obsah berylia v hořčíkových slitinách $MgAlZn$ povolen do maximální výše 0,01 %. Berylium má však i nepříznivý účinek, a to na hrubnutí zrna. Zejména z tohoto důvodu byl upřesněn tento kladný, ale i negativní vliv následujícími zkouškami.

Ve třech zkušebních tavbách byla ověřena vlastnost berylia jak z hlediska zabránění tvorby oxidických vměstků, tak vlivu na velikost zrna. Všechny tři tyto tavby měly základní obsah berylia 0,0003 % a jeho zvýšení bylo na obsah 0,0007- 0,0026 %. Pro každou zkoušku zvýšeného obsahu Be bylo odlito osm zkušebních tyčí. Sedm z nich bylo použito na ověření pevnosti a tažnosti a jedna na metalografický rozbor. Všechny tyče byly tepelně zpracovány na režimu T4.

Chemický rozbor

Chemický rozbor byl proveden na kvantometru SPECTROLAB Jr. pro každou tavbu, a to:

1. po natavení
2. pro úpravě složení modifikací a rafinací
3. před litím

Výsledky jsou uvedeny v příloze v *tab. 28*

Mechanické hodnoty

Provedeními zkouškami byly zjištěny mechanické hodnoty, které jsou uvedeny v *tab. 29*:

Na lomových plochách přetržených zkušebních tyčí nebyly prakticky žádné oxidy zjištěny. Za normálních podmínek u taveb, které mají nižší obsah Be než 0,0003 %, se oxidy vyskytují ve větším rozsahu.

Na *obr. 56 a 57* je na snímku č. 267 je lom trhací tyče s obsahem Be 0,0022 %, na snímku č. 268 lom trhací tyče s 0,0012 % Be, na snímku č. 270 lom trhací tyče s 0,0007 % Be a na snímku č. 269 s obsahem 0,0003 % Be. Již z tohoto posouzení je zřejmý negativní vliv berylia na růst zrna.

Metalografický rozbor

Metalografický rozbor z hlavy zkušební tyče byl proveden k ověření velikosti zrna a současně byla ověřena i kvalita provedeného tepelného zpracování. Metalografickým rozbohem bylo prokázáno, že malé zvýšení obsahu berylia neovlivnilo strukturu jednotlivých složek, kromě velikosti zrna. Velikost zrna byla hodnocena dle ČSN 42 0462 a byly zjištěny tyto hodnoty:

č. tavby	č. vsázky TZ	Velikost zrna
661/6	483	3
663/8	492	1/2
667/7	497	1/2

Na *obr. 58 a 59* je na snímku č. 266 je zobrazená velikost zrna s obsahem 0,0022 % Be, na snímku č. 265 s obsahem 0,0012 % Be, na snímku č. 264 s obsahem 0,0007 % Be a na snímku č. 263 s obsahem 0,0003 % Be.

4.3.2. Závěr

U provedených zkoušek se zvýšeným obsahem berylia došlo k výraznému snížení výskytu oxidů v lomových plochách zkušebních tyčí i u lámaných odlitků. Při obsahu 0,0022 % Be došlo k velkému zhrubnutí zrna a k výraznému snížení mechanických hodnot. U obsahu 0,0012 % Be bylo již dosaženo vyšších mechanických hodnot, zrno však bylo nerovnoměrné (viz snímek č. 265 na obr. 58). S poklesem obsahu na 0,0007 % Be došlo k dalšímu zjemnění zrna. Bylo dosaženo i dobrých mechanických vlastností. Praktický význam těchto zkoušek vyústil v optimalizaci obsahu berylia v tavenině ve dvou kategoriích. U vysoce namáhaných odlitků v rozpětí 0,0003 - 0,0008 % Be a u ostatních méně náročných odlitků s výskytem oxidických vměstků bylo uplatněno zvýšení obsahu berylia až na hodnotu 0,001 %.

Průměr vzdušný	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr vodní	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022
Průměr celkový	0,0007	0,0012	0,0022

5. OVLIVNĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Tento soubor řešení je svým zaměřením orientován na zvýšení užitných vlastností slitin MgAlZn. Prováděné ověřování se tedy koncentruje především na mechanické vlastnosti a únavové charakteristiky. Při řešení této etapy jsem navázal na závěry uvedené v kapitolách o současných materiálových trendech hořčíkových slitin a o složeném železničním kole. Za prioritní jsem považoval ověření velikosti zrna, potlačení výskytu křehké strukturní β - fáze ($\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$) v návaznosti na vedení tavby a režim tepelného zpracování.

Praktickým výstupem celého řešení je zajištění kvalitních odlitků s vyhovujícími statickými i únavovými mechanickými hodnotami se zaměřením na požadavky firmy BBS.

5.1. Zkoušky odlitků

Statické zkoušky pevnosti v tahu na odlitých zkušebních tyčích i na tyčích z kusu se provádějí v závodě denně od každé odlité tavby. Pro ověření vlivu jednotlivých druhů vad u Mg slitin na mechanické hodnoty, bylo vybráno 50 zkušebních tyčí s příslušnou vadou a stanovena průměrná hodnota pevnosti v tahu a tažnosti, dle následující tabulky:

Druh vady	σ_{Rm} (Mpa)	σ tažnost (%)
Bez vad	248	12,8
Oxid	240	10,5
Zadrogenina	238	11,3
Hrubé zrno	220	10,1
Řediny	155	4,9

Z provedeného šetření vyplynulo, že největší snížení statických mechanických hodnot způsobují řediny. Souvisí to se skutečností, že v případě jejich výskytu ve zkušebních vzorcích se jednalo většinou o vadu ve větší části průřezu tyče. Menší, ale

nezanedbatelné snížení mechanických hodnot v důsledku výskytu zadrobenin a oxidů není tak výrazné, zde však může vzniknout větší zmetkovitost v důsledku špatné kvality povrchu odlitků a ovlivnění únavových vlastností.

5.1.1. Zkoušky ovlivnění hodnoty meze kluzu

Z důvodu nízké hodnoty meze kluzu materiálu byla provedena v laboratoři řada zkoušek na ověření hodnoty R_{p02} materiálu AZ91D po tepelném zpracování na režimu T4. Zkoušky měly ověřit vliv vsázky, modifikace a tepelného zpracování na tuto hodnotu.

Vliv vsázky

Zkušební níže uvedené tavby se prováděly v kelímku o obsahu 110 kg. Zkoušky vlivu technologie tavení byly provedeny na čtyřech různých tavbách. Jednotlivé tavby byly provedeny za těchto podmínek :

- | | | |
|----|--------------|--|
| A) | Tavba 855/7 | - modifikační tablety Syngas 20
- modifikace ponorným zvonek
vsázka: 110 kg Mg
+ vratný materiál dle ČSN 42 4911 |
| B) | Tavba 855/9 | - modifikační tablety Syngas 20
- modifikace ponorným zvonek
vsázka: 45 kg Mg
4,30 kg AlZn6Mn3
+ vratný materiál dle ČSN 42 4911 |
| C) | Tavba 861/8 | - modifikační tablety SPEFFINAL T 200
- modifikace ponorným zvonek
vsázka: 54 kg Mg
5,20 kg AlZn6Mn3
+ vratný materiál AZ91 dle DIN 1729 |
| D) | Tavba 861/10 | - modifikační tablety SPEFFINAL T200
- modifikace bez zvonu
vsázka: 54 kg Mg
5,20 kg AlZn6Mn3
+ vratný materiál AZ91 dle DIN 1729 |

Z každé tavby bylo odlito 8 zkušebních tyčí, celkem 32 kusů. Protože při tepelném zpracování došlo k prohnutí některých tyčí, nemohly být všechny zkoušky provedeny. Tepelné zpracování bylo provedeno v dvoustupňovém režimu T4 s dobou výdrže 22 hod. při teplotě 418⁰ C.

Vliv modifikace a tepelného zpracování

Byly použity zkušební tyče z běžné vsázky s obsahem Mg a AlZn6Mn3 a vratný materiál. Označení zkoušek:

E - Zkušební tyče s materiálem úplně bez modifikace a bez tepelného zpracování.

F - Zkušební tyče rovněž nemodifikované, ale tepelně zpracované na T4 (22 hod.).

G - Zkušební tyče modifikované, ale tepelně nezpracované.

Výsledky zkoušek jsou v *tab. 32 - tab. 35*.

Provedenými zkouškami bylo prokázáno, že ani hrubým porušením technologických předpisů, ke kterému prakticky nemůže dojít, nebylo u materiálu jakosti AZ91D docíleno nižší meze kluzu než předepisuje norma. Ke snížení meze kluzu nedošlo ani při použití materiálu bez modifikace a bez tepelného zpracování. Zkoušky prokázaly pokles hodnot R_m a A₅ při nedodržení modifikace F a výrazný pokles těchto hodnot při nedodržení tepelného zpracování E, G. Hodnoty R_m u varianty E a R_m u varianty G ukazují, že pouhou modifikací bez vhodného tepelného zpracování nelze zajistit při lití do pískových forem výraznější zvýšení mechanických hodnot. R_{p02} a HB se při různých zkouškách výrazněji neliší.

5.1.2. Vliv velikosti zrna na hodnoty pevnosti v tahu

U hořčíku a jeho slitin velikost zrna ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti, včetně únavových, ale i odolnost vůči korozi a zabíhavost. Výhoda zjemněného zrna spočívá v rovnoměrném rozmístění strukturních součástí, včetně nečistot. V důsledku tohoto rovnoměrného rozložení je například i následné tepelné zpracování účinnější.

Soubor, z kterého byl rozbor prováděn, reprezentuje 163 taveb a 489 zkušebních tyčí. Velikost zrna je hodnocena dle ČSN 42 0462 (viz *obr. 66*) V příloze je uvedena výsledná tabulka (*tab. 34*) průměrných hodnot R_m, vztažených k jednotlivým zjištěným velikostem zrna. Nejmenší soubor byla velikost zrna 5, která reprezentuje nejmenší velikost, a to 6 taveb a 18 zkušebních tyčí. U velikosti zrna 4 bylo posuzováno 46 taveb

a 138 zkušebních tyčí, což reprezentuje nejběžnější zjišťované hodnoty. Do rozboru byly zařazeny i kritické velikosti "0" a menší než 0, jako extrémní hodnoty, které jednoznačně prokazují výrazně nižší hodnotu R_m . Tento rozbor reprezentuje 3 základní složené vsázky a 68 % vyráběného sortimentu. Rozborem v podmínkách naší slévárny byla prokázána souvislost mezi velikostí zrna a hodnotami pevnosti v tahu R_m v MPa. Pokles pod únosnou mez R_m je menší než 240 MPa se v průměru projevuje až od velikosti zrna $G = 2$.

Z přehledu je zřejmé, že zkoumaný soubor neprokázal souvislost se složením vsázky. Souvislost je tedy třeba hledat v procesu tavení a v době prodlevy od aplikace modifikačních tablet do doby odlévání. Tento soubor vychází z průměru zkušebních tyčí průměr 13 mm, a tudíž reprezentuje pouze určitou sílu stěny a rychlost ochlazování.

5.2. Únavové vlastnosti materiálu AZ91D

S problematikou únavových vlastností tohoto materiálu jsme se setkali již při řešení vývoje železničního kola. Ve větším rozsahu jsme byli nuceni se touto problematikou zabývat v souvislosti s odlitky středů kol a kol pro firmu BBS. Řešení únavových vlastností tohoto materiálu a odlitku bylo nutné vést ve dvou rovinách, které spolu částečně souvisí.

5.2.1. Únavové praskliny z materiálových vad

Tato prasklina byla zjištěna po provozním zatížení odlitku. V laboratoři byl proveden rozbor dodaných odlitků a posouzení vad.

Z provedených šetření a rozborů lze shrnout tyto závěry:

Kola praskají v důsledku vzniku únavových lomů v paprscích. Iniciačním centrem únavových lomů jsou řediny v materiálu. Únavový lom tvoří více jak 90 % vlastní plochy lomu. Odpočinkové čáry únavového lomu jsou výrazné a poměrně husté. Z uvedeného lze soudit, že k lomu došlo při slabém namáhání součástí vzhledem k jejímu dimenzování.

Pro ověření rozmístění, výskytu a charakteru ředin bylo provedeno z náhodně vybraného zpracovaného kola 26 výbrusů ze všech paprsků. Charakter rozřezání kola a provedené výbrusy jsou znázorněny na *obr. 60*. Povrch všech výbrusů byl zkoumán stereomikroskopem při zvětšeních 100 až 200x. Oblast ředin je na výbrusech označena.

Nejprve byly ze dvou paprsků provedeny výbrusy z axiálního řezu přes celý

paprsek až do masivního středu kola. Bylo zjištěno, že řediny se vyskytují pouze v paprsku v oblastech pod napojením k přírubě v délce cca 20 mm. Zjištěné místo výskytu ředin je tedy totožné s oblastí vzniku únavových lomů. Proto byly z dalších paprsků provedeny výbrusy pouze z této oblasti.

Provedenými rozbory byly zjištěny tyto skutečnosti :

- 1) Oblast výskytu ředin v kolech je shodná s oblastí, kde dochází k praskání. V jiných oblastech nebyly řediny zjištěny.
- 2) Řediny se vyskytují pod napojením k přírubě v délce cca 20 mm směrem ke středu kola.
- 3) V příčném řezu paprsků jsou orientovány na straně rádiusu paprsku, tedy v místě, odkud lom vychází.
- 4) Na zkoumaném kole se vyskytovaly hlavně na jeho jedné polovině.
- 5) Ve větším rozsahu se vyskytovaly vady pouze na jednom paprsku a byly orientovány z jedné strany. Stejný výskyt orientace prasklých paprsků je i v protokole BBS.

Vyřešením problému porezity, podrobně popsané v předchozí kapitole se tyto únavové praskliny odstranily a nevyskytovaly se v těchto oblastech ani při únavových zkouškách.

5.2.2. Únavové praskliny bez vlivu materiálových vad

Únavové zkoušky středů kol u našeho odběratele firmy BBS Schiltach jsou prováděné na zkušebním zařízení, jehož schéma je v příloze na *obr. 61*.

Z dodávky kol, ve které jsme provedli řadu technologických změn, uvedených v předchozí kapitole o kvalitě (uplatněno odplynění a změna režimu tepelného zpracování), vybral náš zákazník 9 kol, které byly Státním materiálovým ústavem ve Stuttgartu podrobeny ultrazvukové zkoušce v oblastech paprsků. Touto zkouškou byly indikovány drobné ojedinělé vady. Jejich skutečnou existenci potvrdilo i naše metalografické ověření na kole s označením F6. Vada byla indikována na paprsku č. 4. Z této části paprsku byl zákazníkem proveden v označeném místě výřez a připraven metalografický výbrus. Dle ultrazvuku se měla vada nacházet při povrchu.

Metalograficky byl výskyt této "povrchové vady" potvrzen. Jednalo se o mikroporezitu při povrchu paprsku o celkovém plošném rozměru cca 2,5 x 1 mm v jedné oblasti a 2 x 1,5 mm v druhém místě. Odběr vzorku a charakter vady jsou zachyceny na *obr. 62*. Lze tedy konstatovat, že indikace zjištěné ultrazvukem na těchto devíti kolech jsou skutečně vady. Jedná se o ojedinělé drobné místní vady při povrchu neopracovaného odlitku charakteru mikroporezity.

Z těchto devíti kol bylo 5 kusů podrobeno únavové zkoušce na již zmíněném zařízení dle *obr. 61*. Kola byla zatěžována 4.340 Nm a hlavní parametry, které zákazník sledoval, byl počet cyklů do zjištěné první praskliny, a počet cyklů do celkové destrukce kola. Zkouškou byly zjištěny tyto základní údaje, které jsme použili pro další výzkum problematiky kol a jejich kvality.

P.č. kola	Počet cyklů do 1. praskliny	Počet cyklů do celkové destrukce	Prasklé paprsky po celkové destrukci
1	390.000	630.000	neudáno
3	410.000	870.000	6, 1, 2, 3, 5, 7
4	0	470.000	1, 2, 3, 6
8	210.000	360.000	10, 1, 9

Současně s těmito výsledky nám byly firmou BBS předány k šetření příčin vad kola p.č. 3 a p.č. 4. Nespokojenost zákazníka je jednak v nízkých hodnotách zkoušek 4 a 8, ale i ve velkém rozptýlu hodnot v porovnání jednotlivých zkoušek.

Na základě výsledků dosud provedených zkoušek a šetření jsem zaměřil další výzkum do dvou oblastí. Jedna, která se jeví v současnosti méně podstatná, je, s čím souvisí a co je příčinou vzniku první praskliny při prováděných únavových zkouškách. Druhá, která má v současnosti podstatně větší váhu na kvalitu odlévaných kol je, proč se šíří únavový lom v Mg slitině po vzniku první praskliny různou rychlostí.

Odběratel požadoval při únavových zkouškách dosažení počtu min. 900.000 cyklů do celkové destrukce kola. Porovnáním výsledků únavové zkoušky nám předaných kol č. 3 a č. 4 jsem zjistil, že za zcela nevyhovující lze považovat kolo č. 4, kde došlo k celkové destrukci po velmi nízkém počtu cyklů a navíc došlo k celkové destrukci ve velmi krátkém časovém intervalu bez indikace první praskliny. Vizualní a makroskopickou kontrolou povrchu paprsků v oblasti, ze které praskliny vycházely,

jsme zjistili zhoršenou kvalitu sražení hran, která je prováděna ručně zákazníkem. Jiné povrchové vady nebyly na těchto dvou vzorcích kol zjištěny.

Chemický rozbor

Při opracování některých povrchů těchto odlitků u zákazníka dojde k odstranění některých předlitých údajů a nelze již těmto kolům přiřadit číslo tavby a výlevu k identifikaci chemického složení. Porovnání chemického složení zkoušených kol bylo dalším krokem ke stanovení rozdílu. Bylo provedeno na vyříznutém vzorku z ráfku ze stejných míst u obou kol. Spektrometrickým rozbořem těchto vzorků bylo zjištěno následující složení v %. Pro srovnání jsme provedli i rozbor kola od výrobce z Itálie.

Označení vzorku	Al	Zn	Mn	Si	Be
Kolo č. 3	8,29	0,73	0,21	0,019	0,0008
Kolo č. 4	8,41	0,71	0,20	0,024	0,0007
Kolo Itálie	8,70	0,74	0,21	0,020	0,0007

Zjištěným chemickým složením nebyly prokázány podstatnější rozdíly, které by mohly být příčinou iniciace lomu. Rozbor obsahoval dalších 10 stopových prvků, které se rovněž nelišily. Ani při dalších chemických ověřováních v průběhu zkoušek nebyla zjištěna přímá souvislost mezi únavovým lomem a chemickým složením. Chemická složení se však vždy pohybovala v předepsaných tolerancích dle normy.

Metalografický rozbor

Metalografickým rozbořem těchto dvou kol se měly prokázat případné strukturní odlišnosti.

U kola p.č. 3 byl proveden metalografický výbrus z paprsků č.6 a 2. Řez byl veden tak, aby zachycoval průběh únavového lomu od jeho počátku až do přechodu v silový dolom, který byl proveden v ČKD dolomením. Struktura měla v celém sledovaném průřezu stejný charakter. V místě, odkud silový lom vycházel, ani v jiné části řezu nebyly zjištěny žádné vady. Nebyla tedy prokázána žádná souvislost mezi ojedinělými povrchovými vadami, které byly ultrazvukem zjištěny v opačné části žeber. Mikrostruktura z tohoto kola je na snímku č. 103 (viz obr. 63). Jedná se o běžnou strukturu Mg slitiny, tvořenou tuhým roztokem α s určitým obsahem precipitátů

hliníku, který je vyloučen po hranicích zrn. Při větším zvětšení je tento precipitát lamelárního charakteru zachycen na snímku č. 105 - (viz *obr. 63*). Snímek zachycuje únavovou prasklinu při průchodu tímto precipitátem. Dochází zde k určitému zlomu směru v šíření únavové praskliny, což souvisí s rozdílnými vlastnostmi obou složek. Únavový lom jde z podstatně větší části přes zrna a jen ojediněle a výjimečně kopíruje hranice zrn. Toto bylo prokázáno i u všech dalších šetření k únavovým lomům Mg slitiny, které byly provedeny. Velikost zrna dle ČSN 42 0462 odpovídá stupni 4/3.

Stejným způsobem ze stejného místa jsme provedli rozbor **kola č. 4** z paprsků č. 1 a 6. Označení paprsků provedl zákazník. Struktura tohoto kola je zachycena na snímcích č. 99 a 100 (viz *obr. 64*). Lomová plocha únavového lomu se jeví v tomto řezu a při tomto zvětšení téměř rovná a je zřejmý její transkrystalický průběh. Silový dolom na snímku č. 100 klasicky kopíruje hranice zrn. Podstatný rozdíl ve struktuře je pouze v obsahu precipitační složky, která se ve vzorcích obou paprsků z tohoto kola prakticky nevyskytovala. Při tepelném zpracování došlo k jejímu úplnému rozpuštění.

Provedeným metalografickým rozbohem kola cizího výrobce (označeno Itálie) byl rovněž zjištěn výskyt precipitátu hliníku ve struktuře ještě ve větším rozsahu než u našeho zkoumaného kola č. 3. K tomuto kolu však nemáme údaje o jeho únavových vlastnostech. Z hlediska statických pevnostních hodnot byly prověřeny hodnoty pevnosti v tahu, tažnosti a rázovou houževnatost se zjištěním, že jsou na stejné úrovni jako u našich vyrobených kol.

5.3. Zkoušky pro zlepšení únavových vlastností

Ukázalo se jako nezbytné okamžité provedení zkoušek pro zlepšení únavových vlastností materiálu AZ91D v odlitcích bez slévárenských vad. Zákazník vyžadoval odlití zkušebních odlitků kol, u kterých bude dosaženo při únavových zatěžovacích zkouškách hodnota min. 900.000 cyklů do celkové destrukce bez výkyvů k nižším hodnotám. Cílem zkoušek tedy bylo zajistit taková opatření, aby hodnota počtu cyklů do destrukce přesahovala 900.000 s dostatečnou rezervou. Problematika porezity a oxidů byla vyřešena opatřeními uvedenými v kapitole o kvalitě. Výzkum jsme tedy zaměřili do dvou oblastí, které jsme považovali za prioritní k dosažení požadovaných vlastností. Byly provedeny zkoušky na ovlivnění velikosti zrn a na ověření vlivu různých režimů tepelného zpracování T4, které mají zřejmě důležitý vliv právě na rychlost šíření únavových lomů v tomto materiálu.

5.3.1. Ovlivnění velikosti zrna

Ovlivnění velikosti zrna je u hořčíkových slitin důležité nejen pro zlepšení únavových vlastností, ale i pro zlepšení dalších mechanických vlastností již popsanych.

Základní zkouška na ověření vlastností po tepelném zpracování (dále TZ) v oblasti paprsků kol byla provedena na odlitých zkušebních tyčích o zkušebním průměru $d_0 = 13,0$ mm a průměru hlavy tyče $d = 19,0$ mm. Tyto rozměry odpovídají průřezu paprsků kol, kde dochází k únavovým lomům. Velikost zrna byla hodnocena z průměrů d i d_0 zkušební tyče. Velikost zrna se v těchto dvou průřezích pro danou zkoušku nelišila. Zkušební tavba na odeznívání modifikačního účinku tablet Spefinal T200 byla provedena s prodlevami reprezentujícími transport taveniny na ruční pracoviště.

Vsázka : 66 kg AZ91D

44 kg vratný materiál AZ91D

Průběh : Natavení na teplotu 750°C

Modifikace 4 tabletami T200 (300 kg)

Vlastní průběh modifikace 2,5 min. (ukončen pohyb na hladině taveniny), čas 11.44 hod.

Zvýšení teploty na 800 °C (simulace teploty při převozu na ruční formovnu)

Pokles teploty na 740 °C a pak udržování na této teplotě a odlévání vzorků dle následující tabulky:

Poř.č.	Čas po modifikaci v min/sec	Označení tyče tavba - poř.č.
1	14/55	207/6-1
2	20/8	207/6-2
3	25/24	207/6-3
4	30/6	207/6-4
5	35/15	207/6-5
6	40/57	207/6-6

Všechny zkušební tyče byly založeny do jedné vsázky tepelného zpracování v režimu 375°C /3 hod. a 415°C /18 hod.

Hodnocení tavby**Chemický rozbor**

Kvantometrickým rozbořem z odlitého vzorku bylo zjištěno toto chemické složení v % :

Al = 8,95	Zn = 0,78	Mn = 0,21	Zn = 0,020
Cu = 0,006	Fe = 0,019	Be = 0,0005	Ce = 0,011

Mechanické hodnoty

Zkoušky byly provedeny na odlitých zkušebních tyčích po 4 tyčích ke každé sadě. Tabulka udává hodnoty pevnosti v tahu R_m v MPa jednotlivých zkoušek a průměrnou hodnotu ze 4 měření

Č. zkoušky	Hodnoty R_m	Průměrná hodnota
1	241-256-256-260	253
2	241-252-241-260	248
3	245-245-237-245	243
4	230-237-241-241	237
5	222-226-230-226	226
6	230-230-230-230	230

Makroskopický rozbor

Fotodokumentace lomových ploch je na *obr. 66*. S rostoucím intervalem mezi modifikací a vlastním litím dochází k hrubnutí zrna. K výraznějšímu vizuálnímu zhrubnutí dochází od zkoušky č. 4. U zkoušky č. 6 je již lomová plocha tvořena destičkovými ploškami, které způsobují určitý pokles statické pevnosti a podstatné zvýšení křehkosti materiálu, který bude málo odolný vůči rázům.

Metalografický rozbor

Pro metalografický rozbor byla vybrána vždy jedna tyč z každé sady zkoušek. Výbrus byl připraven z hlavy zkušební tyče cca 2 cm od čela tyče. Zrno bylo hodnoceno dle ČSN 42 0462 s těmito výsledky :

Č. zkoušky	Číslo velikosti G
1	4/3
2	3/2
3	3/2
4	2
5	2/1
6	1/2

V tabulce znamená např. 4/3 - převládá velikost zrna č. 4, zbytek je zrno velikosti č. 3. Rozdíl ve velikostech zrn ukazují *obr. 65 a 66*.

Výsledky této zkoušky lze stručně shrnout takto :

- Modifikační účinky do 15 min. jsou velmi dobré, do 25 min. přijatelné.
- Modifikační účinky po 25 min. klesají zlomově v rozpětí dalších 5 min.
- Odlévání by mělo být ukončeno nejpozději do 25 min. odlitím zkušebních tyčí.

Druhá zkušební tavba k problematice očkovacího procesu byla zaměřena na :

5.3.2. Klínové zkoušky vlivu odeznívání modifikace na velikost zrna a mechanické vlastnosti

Průběh tavby :

- vsázka : 66 kg surovina AZ91D
 - 6 kg čistý Mg
 - 38 kg vratný materiál z AZ91D

celkem : 110 kg

- Odplynění - 2 tablety Spefinal T 300
teplota taveniny 760°C
- Modifikace - 4 tablety Spefinal T 200
teplota taveniny 760°C
- Časový průběh vlastní tavby
 - 6.15 hod. - zahájení tavby
 - 7.15 hod. - odplynění
 - 7.25 hod. - modifikace
 - 7.35 hod. - odběr vzorku na chemické složení

Pro zkoušku byly použity odstupňované klíny 10, 20, 40 mm odlité do pískové formy.

Tabulka časového průběhu odběru vzorků po modifikaci

Poř.č.	Tavba/Výlev/Označ.	Čas od modifikace min/sec
1	302/6/3	21/30
2	302/6/5	31/20

Tepelné zpracování vzorků

Všechny vzorky byly zpracovány v jedné šarži tepelného zpracování ve třístupňovém režimu, a to :

- náběh na první stupeň 1,5 hod. na teplotu 350°C
- výdrž na teplotě 350°C po dobu 3,5 hod.
- výdrž na teplotě 380°C po dobu 4,0 hod.
- výdrž na teplotě 415°C po dobu 18,0 hod.

Hodnocení tavby

Spektrometrickým rozbořem tavby 302/6 bylo zjištěno toto chemické složení v % :

Al=8,30	Zn=0,71	Mn=0,20	Si=0,017	Cu=0,000	Fe=0,006
Be=0,0007	Zr=0,003	Sn=0,010	Ni=0,002	Pb=0,066	Cd=0,001

Zkouška tahem byla provedena na zkušebních válcových tyčích o zkušebním průměru $d_0 = 6$ mm a zkouška rázem v ohybu na válcových tyčích o průměru 9 mm. U rázových zkoušek hodnotíme nárazovou práci potřebnou k přeražení zkušební tyče.

Z každého stupně klínu byly odebrány dva vzorky na zkoušku tahem a dva na zkoušku rázovou. Tabulka *tab. 35* (viz příloha) udává průměrnou hodnotu z těchto dvou měření.

Zkoušky prokazují, že na snížení hodnoty rázové houževnatosti má velký vliv doba prodlevy mezi modifikací a vlastním litím zejména u slabších průřezů. Hodnota rázové houževnatosti je nepřímou závislá na velikosti zrna.

Z á v ě r

Na základě těchto zkoušek byla provedena opatření k zajištění odlití do 20 min. od modifikace. V průběhu roku budou provedeny další zkoušky odeznívání modifikace na klínech o různé síle. Na jejich základě budou upraveny předpisy lití i pro další odlitky.

5.3.3. Závislost velikosti zrna na chemickém složení materiálu

Pro ověření vlivu chemického složení na velikost zrna bylo vybráno 5 zkušebních tyčí s extrémně hrubým zrnem a jedna zkušební tyč s jemným lomem. Z hlav těchto zkušebních tyčí byl proveden kvantometrický rozbor. Hrubé tyče jsou označeny 1 až 5, jemnozrná tyč 6. Výsledky rozborů jsou v *tab. 36*.

Zjištěné chemické složení vzorku s jemnou strukturou a vzorků s hrubým zrnem se podstatněji neliší. Šetření tedy neprokázalo souvislost mezi hrubou strukturou a anomáliemi v chemickém složení. Hledání příčiny nutno zaměřit do oblasti modifikace a procesu tavení.

5.3.4. Vliv rychlosti ochlazování při tuhnutí odlitku na vlastnosti materiálu

Ověřením vlivu rychlosti ochlazování na strukturu a vlastnosti slitiny AZ91 se experimentálně zabývá DP - VÚT, provedená na provozu slévárny Mg slitin. Jsou zde však řešeny vlastnosti tohoto materiálu v litém stavu bez tepelného zpracování. Protože více než 90 % odlitků vyžadují zákazníci po tepelném zpracování T4, rozhodl jsem se rozšířit tuto práci o hodnoty slitiny AZ91 tepelně zpracované. Ke zkouškám byl použit klín odlitý do pískové formy s označením 4.1, 4.2, 4.3, viz tabulka :

Tloušťka stěny (mm)	50	25	10
Označení vzorku	4.1	4.2	4.3
Rychlost chladnutí (°C/sec)	0,31	0,33	0,60

Chemické složení slitiny v % bylo následující :

Al = 8,615 Zn = 0,63 Mn = 0,21 Si = 0,101 Fe = 0,012 Be = 0,0001

Diagram rychlosti chlazení odlitků klínů po odlití do pískové formy pro jednotlivé stupně 4.3, 4.2, 4.1 a kokily pro stupně K4, K3, K2, K1 je na *obr. 67*. Tuhnutí odlitku v pískové formě 4,5 sec., 9 sec. a 36 sec. je na *obr. 68, 69 a 70*. Chlazení odlitků v pískové formě po 3 a 9,5 min. zachycují *obr. 71 a 72*. Tato počítačová simulace lité umožňuje určení nejpomaleji tuhoucích míst v odlitku a vytyčení oblastí s rizikem výskytu největší pórovitosti. Tomu odpovídá i zjištěný výskyt pórovitosti tohoto odlitku, viz *obr. 73*.

Klín byl v ČKD tepelně zpracován režimem :

předehřev 350°C/ 3 hod.

380°C/ 4 hod.

410°C/18 hod.

Mechanické zkoušky

Z každého stupně klínu byly vyrobeny 2 zkušební tyče pro zkoušku tahem o zkušebním průměru $d_0 = 6,3$ mm. Zkouška byla provedena na zkušebním zařízení ZD10/90. Výsledky jsou uvedeny v *tab. 37*.

Výsledky zkoušek potvrzují růst hodnot pevnosti v tahu a tažnosti s rostoucí rychlostí ochlazování.

Metalografický rozbor

Pro porovnání struktur byly provedeny metalografické výbrusy ze zbytků po rázových zkouškách. Tyto byly tepelně zpracovány v režimu T4 současně s klínem odlitým do pískové formy. Dokumentaci jsme provedli při stejných zvětšeních jako v DP - viz *obr. 74, 75 a 76*, pro jednotlivé zkoušky z klínů 4.1, 4.2, 4.3. Současně byly zhotoveny výbrusy z tahových zkoušek tepelně zpracovaného celého klínu, viz *obr. 77*.

Hodnoty velikosti zrna ze vzorků z klínu			
Označení vzorku	4.1	4.2	4.3
Velikost zrna dle ČSN 42 0462	2	2/3	3

Struktury potvrzují skutečnost, že při lité do pískových forem dochází ke zjemňování zrna s rostoucí rychlostí ochlazování. Ve slabších průřezech je v porovnání se silnější stěnou odlitku vyloučeno i menší množství precipitátu hliníku.

5.3.5. Ověření vlivu rychlosti tuhnutí odlitku po odlití na strukturu po tepelném zpracování

Ověření vlivu režimu tepelného zpracování na konečnou strukturu finálního výrobku bylo dalším nezbytným krokem pro zajištění komplexního technologického postupu na výrobu odlitků kol v kvalitě dle požadavku firmy BBS. Při hodnocení konečného efektu tepelného zpracování jsme sledovali především jeho vliv na obsah precipitátu lamelárního typu po hranicích zrn a na nežádoucí křehkou fázi $Mg_{17}Al_{12}$, která velmi negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti.

V úvodu zkoušek jsme se zaměřili na zodpovězení otázky, ovlivňuje-li výchozí struktura výskyt nežádoucích fází po tepelném zpracování v odlitcích.

Pro zkoušku byl odlit čtyřstupňový klín o síle stěny jednotlivých stupňů 10, 20, 40 a 80 mm. Po odlití byl klín podélně rozřezán na 7 dílů o šíři cca 1 cm přes jednotlivé stupně. Výřezy byly očíslovány čísly 1 až 7. Výřezy 1 a 7 jsou z kraje klínu, výřezy 3, 4 ze střední části klínu.

Chemické složení klínu

Klín byl odlit z tavby 302-6. Na odlitém vzorku do kokily bylo zjištěno toto složení v % :

Al = 8,30	Zn = 0,71	Mn = 0,20	Si = 0,017
Cu = 0,000	Fe = 0,006	Be = 0,0007	Zr = 0,003

Výřez č. 3 a 4 byl tepelně zpracován na T4 (č. TZ +126). Teoreticky byl tepelně zpracován vzorek stejného průřezu (cca 10 mm), který však měl v době tuhnutí rozdílnou sílu stěny. Zkouška měla prokázat, má-li vliv na konečný charakter struktury po tepelném zpracování pouze síla stěny, nebo je-li nutné při stanovení režimu TZ zvažovat další faktory. Doposud se předpokládalo, že na výskyt precipitátu hliníku ve struktuře větších průřezů má hlavní vliv rychlost chladnutí z žhací teploty a doba výdrže v závislosti na síle stěny.

Z jednotlivých stupňů klínu z výřezu č. 4 byl odebrán vzorek o rozměrech 10x10 mm na metalografický rozbor. Vzorek byl odebrán vždy ze středu průřezu příslušného stupně klínu. Zrno a struktura byly vyvolány kyselinou štávelovou a toto bylo zdokumentováno při zvětšení 50x, viz *obr. 78 a 79*. Popis a přiřazení snímku je v níže

uvedené tabulce:

Síla stěny v mm	Č.snímků	Velikost zrna G
10	63	5
20	64	4
40	65	3
80	66	3/2

Z tabulky a přiložených snímků je zřejmá jemná struktura zrna v tenkém průřezu a stoupající velikost zrna s růstem síly stěny odlitku klínu. Rovněž obsah precipitátů hliníku po tepelném zpracování T4 je u odlitku v síle stěny 10 mm téměř nulový a roste se stoupající silou stěny. Největší obsah Al je v nejsilnějším zkoumaném průřezu 80 mm.

Na výřezu č. 3 bylo provedeno další tepelné zpracování T4 (č. TZ 140). Struktury z jednotlivých stupňů jsou na *obr. 80 a 81*. Lamelární precipitát se téměř úplně rozpustil. Velikost zrna je shodná s výřezem č. 4.

Zkouškou bylo ověřeno, že materiál má nejjemnější zrno v nejtenčím odlévaném průřezu a se stoupající silou stěny zrno hrubne. Přestože byly tepelně zpracovávány vzorky stejné síly z jednotlivých stupňů, nebyl prokázán vliv tepelného zpracování na velikost zrna. Tepelným zpracováním tedy nebyla velikost zrna ovlivněna.

Zkouška prokázala, že má velký vliv na strukturu po tepelném zpracování charakter tuhnutí odlitku. Ve struktuře vzniklé pomalým chladnutím větších průřezů bude po odlití při stejném režimu TZ (doba ohřevu i rychlost ochlazování) větší podíl precipitátů hliníku ve struktuře. Jeho množství se dá snížit prodloužením doby výdrže na teplotě.

5.4. Barevná metalografie a strukturní rozborů na elektronovém mikroskopu

Z důvodu nedostatečné přístrojové vybavenosti nebyly tyto metody v laboratoři ČKD prováděny. Při řešení problematiky vad v Mg slitinách byla zahájena spolupráce s VUT-ÚMI Brno a s VŠB-TU Ostrava, kde byla možnost využití těchto zařízení a speciálních postupů, včetně kvalitní fotodokumentace.

5.4.1. Barevná metalografie

V kapitole č. 3 jsem provedl klasický metalografický rozbor slitiny AZ 91 D s popisem struktur v černobílém provedení, včetně fotodokumentace v litém stavu i po tepelném zpracování T4. Porovnáme-li tyto snímky s fotodokumentací barevné metalografie slitiny AZ 91 D rovněž ve stavu litém (*obr. 82, 83 a 84*) a po tepelném zpracování T4 (*obr. 85, 86 a 87*), vidíme výrazný rozlišovací rozdíl. Pro vyvolání barevné struktury byla použita kyselina molybdenová. Zabarvením lze snadněji a přesněji rozlišit shodné strukturní složky a jejich četnost ve struktuře. Ze snímků je i lepší čitelnost rozložení jednotlivých intermetalických fází v eutektiku. Na *obr. 88* jsou zachyceny barevné struktury našeho materiálu AZ 91 D.

5.4.2. Elektronová mikroskopie

Využití řádkového elektronového mikroskopu skýtá velké možnosti jednak v upřesnění identifikace jednotlivých strukturních složek a v objasňování vzniku různých materiálových vad. S jeho využitím můžeme provést mikroanalýzy jednotlivých strukturních složek a fází, liniové mikroanalýzy ve stanoveném úseku, plošné analýzy nebo rozložení určitého prvku v určité metalografické oblasti. Všechny tyto metody byly použity při zkoumání vlastností a vad slitiny AZ 91 D.

K rozboru byly použity desky odlité v ČKD MOTORY a.s. o rozměru 100 x 200 x 20. Použitá slitina měla následující složení v % :

Al = 8,25 Zn = 0,63 Mn = 0,22 Si = 0,035 Cu = 0,003

Vzorky byly podrobeny detailní strukturní fázové analýze, jak ve stavu po odlití, tak po žhání 375°C /3 hod + 415°C /20 hod. s ochlazením na klidném vzduchu. Mikrostruktura byla hodnocena po naleptání v 4 % nitalu a po aplikaci barevného leptání v 5% kyselině molybdenové. Na metalografických výbrusech ze vzorků těchto desek jsme provedli lokální elektronovou mikroanalýzu přítomných fází. Pro analýzu jsme použili scanovací elektronový mikroskop Philips 30, který byl doplněn analyzátelem EDAX s korekcí ZAF. Při stanovení byla použita bezstandartní analýza.

Oblast, ze které jsme provedli lokální elektronovou mikroanalýzu, je na *obr. 89*.

Hodnocená místa jsou na snímku označena 1 až 5. Ve všech rozbořech se vyskytoval určitý podíl kyslíku. Při přípravě tohoto metalografického výbrusu jsme použili leštící hlinku Al_2O_3 . Přepřacováním vzorku s použitím diamantové pasty se kyslík v rozbořech nevyskytl. Z toho soudím, že výskyt kyslíku v takových obsazích, ve kterých byl zjištěn, byl zapříčiněn přípravou vzorků. Na *obr. č. 90* jsou označeny další analyzované oblasti 6 až 10. Zajímavý je velký rozdíl v chemickém složení vměstků 1 a 2 z *obr. 89*, které se na snímku z elektronového mikroskopu jeví stejné. Proti vměstku 1 obsahuje vměstek 2 nízký obsah Mg a vysoké obsahy Al, Mn, Zn. Analýza tuhého roztoku alfa se blíží chemickému rozboru vzorku z emisního spektrometru. V křehké beta fázi, kterou jsme dosud identifikovali jako $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, jsme mikroanalýzou zjistili i určitý obsah zinku, viz BTZ 5 na *obr. 89*.

Zajímavé výsledky, které potvrdily závěry z fázové mikroanalýzy, nám dala i plošná analýza zaměřená na stanovení rozložení prvků Mn, Mg a Al v eutektiku s fází $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, obklopenou mezidendritickým eutektikem, viz *obr. 91*.

Liniová mikroanalýza tohoto vzorku, viz *obr. 92*, byla vedena tuhým roztokem alfa (1), fází $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ (2) a tuhým roztokem alfa s vměstkem (3). Přestože je tato metoda zaměřena pouze na stanovení prvků v dané linii, dobře doplňuje již uvedené rozbořy. Na *obr. 93 a 94* jsou rozbořy z plošné a liniové mikroanalýzy vzorků z tyče po přebroušení s použitím diamantové pasty. Výsledky pro jednotlivé strukturní složky mají obdobný charakter. Strukturní mikroanalýza tohoto vzorku je na *obr. 95 a 96*. Zajímavé zde je nerovnoměrné rozdělení příměsí (Al, Zn). V tuhém roztoku je méně Al než 6 %, tedy méně než ve vsázce. Toto potvrzuje náš předpoklad, že bílá tvrdá fáze je $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Dle rozborů se zinek rozpouští více ve fázi $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$.

Provedenou chemickou mikroanalýzou strukturních složek na elektronovém mikroskopu byla prokázána výrazná dendritická segregace spojení s obohacením mezidendritických oblastí až na 38,85 hm. % Al a 4,8 hm. % Zn. Byla zjištěna přítomnost masivní fáze o výše uvedeném obsahu typu $\text{Mg}_{17}(\text{Al}, \text{Zn})_{12}$, která byla obklopena mezidendritickým eutektikem tvořeným intermetalickou fází a tuhým roztokem příměsí (Al, Zn) v hořčíku. Eutektické oblasti byly částečně obohaceny příměsami (9,34 - 12,78 hm. % Al a 1,74 - 2,74 hm. % Zn) oproti matici. Minoritní fáze je v eutektiku přítomna ve tvaru jemných jehliček. Zjištěné výsledky odpovídají

poměrně širokému intervalu krystalizace, který má slitina AZ 91 D a který vyvolává často rozsáhlou dendritickou segregaci a lokální výskyt intermetalických fází sekundárních tuhých roztoků s vysokým obsahem přísad. Ty tvoří buď masivní částice nebo součást mezidendritického segregacečního eutektika, kde je fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Ta je buď ve formě jemných precipitačních útvarů - tyčinek, jehliček, případně zrnitých částic. Z důvodu této nežádoucí heterogenity struktury, která se projeví obzvlášť při pomalém ochlazování (např. lití do pískových forem a velké průřezy) nabývá podstatně na významu následné tepelné zpracování, které může tyto nežádoucí vlastnosti buď částečně nebo i úplně eliminovat. Proto jsme zaměřili velkou část této studie na řešení vhodného tepelného zpracování pro zajištění optimálních vlastností odlitků.

Ke stejným závěrům s použitím stejných metod hodnocení dospěli i na Katedře nauky o materiálech v Katovicích - Politechnika Slaska. K hodnocení jim byly předány stejné vzorky materiálu hodnocené v této práci.

Ve spolupráci s Politechnikou Slaska a VUT-ÚMI Brno jsem řešil i využití elektronového mikroskopu při identifikaci vad v odlitcích. Vzorek z odlitku s povrchovou vadou a mikroporezitou je zdokumentován v příloze na *obr. 97*.

Charakter křehkého lomu přes zrna z lomové plochy vzorku s ředinami je na *obr. 98* - snímek č.26. Větší část lomu má však mezidendritický charakter, viz *obr. 98/27*. Chemická mikroanalýza z oblasti vad 1, 2, 3 dle *obr. č. 98* je uvedena na *obr. 99*. Zajímavé je zde zejména chemické složení kolem povrchové vady 2. Jedná se zde o téměř čistý hořčík v dutině vady. Vada souvisí s úpravou taveniny čistým hořčíkem při snižování obsahu Al ve vsázce. Byla řešena úpravou technologie lití. Další rozbor vady ve spolupráci s oběma ústavami jsou v řešení.

5.5. Zkouška pro stanovení optimálního režimu tepelného zpracování

Zkoušky byly provedeny na klínových vzorcích s odstupňovanou silou stěny 10, 20 a 40 mm. Bylo provedeno 7 variant ze 4 taveb. Z klínů byly z každé síly zhotoveny dvě zkušební tyčky na zkoušku tahem průměr 6 mm a dva válečky na rázovou zkoušku průměr 9 mm. Klíny byly založeny vždy do jedné polohy stejné pece. Zkoušky byly zaměřeny na ověření náběhu na teplotu a vliv výdrže na prodlevách. Výsledky mechanických a metalografických zkoušek jsou zhodnoceny v *tab. 38*. Obsah zbytku

precipitátu na hranicích zrn (perlitického Al) je hodnocen ve stupních 0 až 6. 0 značí zrno bez zbytku perlitického Al a 6 jeho největší obsah. U taveb 254-2, 259-6 a 259-8, kde byly k dispozici ještě duplicitně odlité zkušební tyče, je uvedeno jejich vyhodnocení.

Zhodnocení této zkoušky a výsledků z únavové zkoušky bylo podkladem k návrhu a provedení druhé zkoušky tepelného zpracování směřované na odeslání 8 kusů vzorků pro rozhodující zkoušky na únavu do BBS.

Z hlediska mechanických hodnot v silách stěn 10 a 20 mm se jeví všechny zkoušky vyhovující. V síle 40 mm je větší pokles pevnosti u tavby 265/3-TZ 90, kdy je vysoký obsah precipitátu hliníku ve struktuře. U vzorku 259/8 při stejném tepelném zpracování jsou však hodnoty vyhovující. Souvisí to pravděpodobně s nižším obsahem hliníku v této tavbě.

Podrobné metalografické vyhodnocení těchto zkoušek bylo provedeno včetně dokumentace z klínů. Zkoušky prokázaly, že výskyt precipitátu hliníku ve struktuře závisí na režimu tepelného zpracování, obsahu hliníku v základním materiálu a charakteru tuhnutí odlitku. Z provedených zkoušek v *tab. 38* je nejméně vhodné TZ 90, které nezajistilo vhodnou strukturu bez výskytu většího obsahu precipitátu lamelární složky pro různé obsahy hliníku v základním materiálu. U této tavby byl rovněž vysoký obsah křehké fáze $Mg_{17}Al_{12}$. Z hlediska rovnoměrnosti rozložení jednotlivých fází mezi silami stěn 10 až 40 mm je nejlepší tepelné zpracování 87 a 88, tedy s třístupňovým rovnoměrným ohřevem. Jednotlivé tavby z provedených klínových zkoušek měly tato chemická složení v % :

Tavba	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Be
254/2	9,49	0,83	0,20	0,019	0,011	0,0007
259/6	8,65	0,74	0,19	0,020	0,009	0,0006
259/8	8,38	0,71	0,18	0,019	0,008	0,0006
265/3	8,72	0,76	0,20	0,019	0,008	0,0008

5.6. Návrh režimu TZ a výroba série zkušebních odlitků

Ještě před touto konečnou zkouškou jsme provedli ověření rovnoměrnosti

teplot v různých místech pece. Zkušební vzorky byly založeny do spodní, střední a horní polohy pece. U vzorků z jednotlivých pater byla hodnocena pevnost v tahu, tažnost a rázová houževnatost. Na základě výsledků měření nebyly zjištěny podstatnější rozdíly v měřených místech.

Pro závěrečnou tavbu, ze které se měly vybrat odlitky k únavovým zkouškám, bylo použito do vsázky 138 kg vratného a 112 kg nového materiálu. Tento poměr vsázky se blíží reálným možnostem výroby využití vratného materiálu (č. tavby 269/9). Z tavby bylo odlito 9 ks kol. Na základě výsledků klínových zkoušek byl zvolen třístuňový, tedy pomalý náběh na rozpouštěcí teplotu. Tepelné zpracování bylo provedeno dle dvou variant A a B. Varianta B předpokládala větší stupeň rozpuštění intermetalických fází v konečné struktuře po TZ. Dle varianty B bylo odlito 5 zkušebních odlitků kol, dle varianty A 4 odlitky.

Na základě vizuální kontroly kvality těchto odlitků bylo vybráno z každé varianty jedno kolo pro komplexní zkoušky. Z dříve odlitých kol z tavby 254/2 bylo provedeno ověření dalších dvou variant C a D režimu tepelného zpracování vždy po třech kusech. Po jednom kole z těchto variant byly vybrány pro laboratorní zkoušky. Z odlitků těchto čtyř kol variant A, B, C, D byly vyrobeny tyče pro tahovou zkoušku a válečky $\varnothing 9$ mm pro zkoušku rázovou. Vzorky byly odebrány z ráfku a paprsku, jeden z oblasti vtoku, kde se vyskytovaly při minulých ověřeních nejčastěji vady a z ráfku a paprsku dále od vtoku. Popis údajů k provedené zkoušce a výsledky mechanických zkoušek jsou v *tab. 39*. Ze získaných hodnot lze vyvodit tyto závěry :

1. V oblasti prvního vtoku jsou podstatně horší mechanické vlastnosti, než v oblasti dále od vtoku. Protože se v jednotlivých variantách jedná vždy o zkoušku na jednom kole při jednom tepelném zpracování a zkoušky jsou ze stejných průřezů, souvisí tato nehomogenita s technologií výroby.
2. Z hlediska pevnosti v oblasti žeber jsou všechny zkoušky dobré. U zkoušky D jsou však podstatně nižší než u ostatních zkoušek hodnoty rázové houževnatosti.
3. Z hlediska rovnoměrnosti mechanických hodnot v oblasti žebra i ráfku je nejlepší

varianta B. U této zkoušky rovněž nejsou podstatné rozdíly mezi oblastí vzorku a dále od vtoku. Reprodukovatelnost výsledku by bylo dobré ověřit dalšími zkouškami.

Ze všech mechanických zkoušek k těmto kolům byly ze zbytků zkušebních tyčí připraveny metalografické výbrusy z ráfků i žeber. Výsledky metalografického rozboru včetně fotodokumentací z jednotlivých oblastí jsou v odborné laboratorní zprávě č. 251/C15/02/J. Výsledky strukturního hodnocení korespondují s výsledky mechanických zkoušek. Nejnižší obsah precipitátu hliníku je u vzorků z kola č. 10 varianty B. Tomu odpovídá i rovnoměrnost a stabilita mechanických hodnot.

Výběr 8 ks vzorových odlitků pro únavové zkoušky v BBS byl proveden po dvou kusech z variant A, B, C, D. Zkouškou na únavu opracovaného odlitku na zařízení dle *obr. 61* zjistil zákazník tyto hodnoty - viz. *tab. 40*.

Protože zákazník bere pro tato kola jako rozhodující kritérium pro hodnocení kvality počet cyklů do celkové destrukce, považujeme jako optimální variantu A.

Jako zcela nevyhovující se jeví varianta D. U těchto vzorků bylo provedeno po základním žihání na stav T4 (360°C /3 hod., 415°C /22 hod.) stárnutí materiálu při teplotě 200°C po dobu 8 hodin. Dle metalografického rozboru došlo při této teplotě k rozpadu tuhého roztoku a k vylučování intermetalických fází uvnitř zrn. Z hlediska statických zkoušek došlo k malému zvýšení meze pevnosti a poklesu tažnosti. Tepelné zpracování T6 vede rovněž ke zvýšení meze průtažnosti, která nebyla při této zkoušce hodnocena. Únavové vlastnosti po umělém stárnutí vykazaly nejhorší výsledky. Ke vzniku první praskliny došlo po velmi malém počtu zatěžovacích cyklů a rovněž šíření únavové praskliny uvnitř materiálu probíhalo velkou rychlostí. Tuto variantu jsme hlavně pro zhoršení únavových charakteristik vyřadili jako celek z dalších šetření.

5.7. Návrh výroby a kontroly odlitků kol

Na základě výsledku zkoušek na únavu ohybem za rotace ze čtyř zkušebních variant (A,B,C,D) byla vybrána pro dodávku série 200 kol varianta A, která vykazala nejlepší výsledky únavových hodnot. Kromě běžných statických zkoušek pevnosti v

tahu, z kterých nelze posuzovat únavové vlastnosti, bylo nutno doplnit ověření série o další zkoušky, na základě kterých by se dalo posuzovat dodržení technologie dle této varianty. Protože dosud provedené výzkumy prokázaly určitou souvislost mezi obsahem precipitátu lamelární fáze ve struktuře po tepelném zpracování a rychlosti šíření únavového lomu, byla zavedena speciální kontrola mikrostruktury. Dosud provedené výzkumy prokázaly rovněž závislost obsahu lamelárního precipitátu ve struktuře na :

- rychlosti chlazení tohoto materiálu po odlití, která je závislá kromě jiných faktorů na síle stěny odlitku ve zkoumaném místě.
- době výdrže na žíhací teplotě při tepelném zpracování na T4.

Na základě těchto faktů bylo rozhodnuto provést sledování mikrostruktury v přesně určeném místě odlitku. Protože se anomálie v obsazích lamelárního precipitátu vyskytovaly nejvíce v paprscích č. 2 a č. 3, byly tyto dva paprsky stanoveny jako rozhodující pro posouzení struktury odlitých kol. Navíc bylo provedeno i posouzení mikrostruktury ráfku v místě přilehlém k těmto paprskům.

Pro porovnávací vzorky byla použita kola č.15 z var.A a č.9 z var.B. U těchto kol bylo dosaženo těchto hodnot při únavové zkoušce:

č. kola	počet cyklů do 1. praskliny	počet cyklů do destrukce
9	850.000	1.550.000
15	1.100.000	1.950.000

Z těchto kol byly vyrobeny z oblasti prvního a druhého paprsku a přilehlé části ráfku zkušební tyče pro zkoušku pevností tahem, nebo kruhová tyč pro zkoušku rázem v ohybu. Po provedení těchto zkoušek byly z oblasti lomových ploch těchto zkušebních tyčí provedeny kontroly mikrostruktury s vyhodnocením velikosti zrna a obsahu zbytkového precipitátu ve struktuře. Z výsledku těchto zkoušek byla provedena fotodokumentace struktur při zvětšení 50x, viz *obr. 100* pro kolo č. 15 varianty A a *obr. 101* pro kolo č. 9 varianty B.

Tabulka mechanických hodnot pro varianty A-B

	Pevnost (MPa)	Tažnost (%)	Náraz. práce (J)	Vel. zrna (G)
Varianta A				
žebro č. 2	260	13,3	-	3/4
žebro č. 3	-	-	20	3/4
ráfek	-	-	-	2/3
Varianta B				
žebro č. 2	261	13,7	-	3/4
žebro č. 3	-	-	23	3
ráfek	-	-	-	2/3

Protože se jednalo o opracovaná kola, nebylo možno provést pevnostní hodnoty z ráčku z důvodu tenkých stěn. Proto byla z ráčku vyhodnocena pouze mikrostruktura. Rovněž u paprsků byl počet odebraných vzorků omezen. Metalografický rozbor prokázal výskyt určitého podílu precipitátu hliníku ve struktuře. Toto bylo zjištěno i u vzorku později odebraného z varianty C, která rovněž vykazala dobré výsledky v porovnání s úvodní sérií kol před provedenými technologickými úpravami a úpravami TZ. Výskyt mikroporezit nebyl ve sledovaných oblastech zjištěn. Křehká složka $Mg_{17}Al_{12}$ se sice ojediněle vyskytovala, ale z důvodu malých obsahů precipitátu hliníku, zejména v oblasti paprsků, nedošlo k výraznějšímu snížení mechanických hodnot a hlavně v tomto množství nebyl ovlivněn konečný efekt únavové složky.

Dle varianty A bylo odlito a tepelně zpracováno 200 kusů kol. Při tavení byl dodržen poměr vsázky materiálu, bylo použito odplynění vratného materiálu dle předepsaného postupu a liti bylo ukončeno vždy do 20 minut od modifikace. Pro tepelné zpracování série byl použit režim dle varianty A, viz *tab. 39*. Z každé tavby a tepelného zpracování byly provedeny zkoušky tahem u 3 odlitých tyčí a hodnocena mikrostruktura ke každé tavbě. U všech přetržených tyčí byla provedena kontrola lomové plochy na metalografickém mikroskopu. U 6 kol ze série byly vyříznuty vzorky dle výše popsaného postupu zkoušení a provedeny statické zkoušky a metalografické vyhodnocení. Ve dvou případech při kontrole vzorků z odlitých kol byl obsah

precipitátu hliníku mírně zvýšený proti variantě A. To vedlo i k poklesu pevnosti. Zvýšené obsahy křehké fáze však nebyly ani v těchto případech prokázány. Celá odlitá série 200 kol byla odeslána zákazníkovi jako vyhovující.

5.8. Zhodnocení výsledků ke kapitole ovlivnění mechanických vlastností

Hlavním cílem zkoušek této kapitoly bylo zajistit hodnotu únavových vlastností středů kol č.m. 0228001/B. Při prvních únavových zkouškách u zákazníka bylo dosahováno nízkých hodnot počtu cyklů do vzniku první praskliny a současně nízký počet cyklů do celkové destrukce. To znamená, že únavová prasklina se šířila v materiálu velmi rychle.

Velmi dobré výsledky a výrazné zlepšení únavových vlastností, které byly úspěšným vyústěním a zakončením této práce ukazuje tabulka průměrů základních únavových hodnot před a po provedených úpravách. Dokumentace středů kol po únavových zkouškách je v příloze na *obr. č. 101 - 107* včetně vad - prasklin.

Tabulka průměrů únavových hodnot středů kol

Varianta	ø počtu cyklů do 1. destrukce	ø počtu cyklů do destrukce	ø počtu cyklů od 1. praskliny do destrukce
před změnami	375.000	582.000	212.000
A	685. 000	1.660.000	925.000
B	630.000	1.250.000	625.000
C	725.000	1.525.000	800.000
D	265.000	870.000	605.000

Tabulka jednoznačně ukazuje, proč bylo rozhodnuto doporučit vyrábět odlitky podle varianty A. Provedenými technologickými úpravami a změnami tepelného zpracování se podařilo proti původním hodnotám zlepšit o 100 % počet cyklů do vzniku první praskliny i počet cyklů do celkové destrukce. Rychlost šíření praskliny, klasifikovaná počtem cyklů od 1. praskliny do konečné destrukce, je po provedených úpravách více než 4x menší.

Provedenými rozbory byly prokázány určité závislosti mezi strukturou a tepelným zpracováním a vliv struktury na požadované únavové vlastnosti. Zvýšení počtu cyklů do 1. praskliny bylo dosaženo provedenými změnami odstraněním oxidů a ředin v materiálu. Prokázala se i závislost této hodnoty na úpravě povrchu u zákazníka. Snížení rychlosti šíření únavové praskliny bylo dosaženo úpravou režimu TZ kvalitně odlitých odlitků. Zkouškami byla prokázána závislost mezi výskytem precipitátu hliníku ve struktuře a šířením únavové praskliny. Současně však musí být zajištěno snížení křehké fáze $Mg_{17}Al_{12}$ na min. hodnotu. Úspěšným zakončením této práce bylo zajištění 200 ks kvalitních odlitků těchto středů kol pro firmu BBS, které jsou nosným programem výroby slévárny.

6. APLIKACE HOŘČÍKOVÝCH SLITIN V PRAXI

Příklady použití odlitků z hořčíkových slitin, vyráběných v ČKD Motory, a.s. uvádí obrazová příloha.

V této kapitole jsem si nekladl za cíl provést rozbor jednotlivých součástí. Cílem bylo poukázat na praktické využití výsledků vývoje na konkrétních odlitcích, odlévaných do pískových forem [31, 33, 34, 35].

Uvedené příklady mohou sloužit pro další náměty využití Mg slitin v různých oborech.

Jako příklad odlitků pro dopravní techniku je možno uvést:

1. Odlitky pro letadla - např.:

obr. 1, 128, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 146

2. Odlitky pro automobily a motocykly - např.:

obr. 6, 7, 8, 33, 102, 120, 121, 122, 123 124, 125, 126 127, 129, 130 131 132 133,
134, 135, 136, 144

3. Odlitky pro železniční kola - např.:

obr. 108

Pro jiná odvětví jsou zde uvedeny příklady na obr. 118, 119 a 147.

7. ZÁVĚR

Předložená habilitační práce si kladla za cíl uvést nový soubor poznatků ve výzkumu, vývoji a aplikaci hořčíkových slitin v dopravní technice.

I přes v minulosti potlačovaný rozvoj výroby odlitků z Mg slitin mi bylo umožněno se teoreticky zabývat vývojem Mg slitin a novými technologiemi jejich zpracování. Prakticky jsem dokázal spolu s týmem spolupracovníků ČKD a.s. - slévárenské divize aplikovat výsledky vývoje, t.j. perspektivní materiály na bázi Mg a zavést nové metalurgické a technologické postupy do praxe.

Snad to byla právě tato okolnost, která dále motivovala moji odbornou a vědeckou činnost v oboru, který je v ČR unikátní. Dalším aspektem byla skutečnost, že v minulosti se pro výrobu odlitků se využívala pouze jediná slitina dle ČSN 424911 a technologie I. generace, využívající bentonitové směsi pro výrobu forem a jader. Vzhledem k této skutečnosti se postupně staly odlitky nekonkurenceschopnými.

Motivačním prvkem rovněž byla skutečnost, že v průběhu mé odborné činnosti ve funkci pracovníka metalurgického vývoje se začaly potvrzovat jednoznačné prognózy o progresivním vývoji Mg slitin ve světě [28].

V současné době totiž tyto perspektivní materiály prožívají renesanci v různých oblastech použití, zejména pak v dopravní technice.

Soubor zlepšení užitných vlastností Mg slitin a zavádění nových postupů výroby kladně ovlivnil situaci jediného výrobce odlitků hořčíkových slitin, ČKD Motory, a.s.

V souvislosti s tímto závěrem je možno konstatovat, že:

1. Srovnávacím studiem literatury, využitím zkušeností ze slévárny hořčíkových slitin a vyhodnocením vlastních experimentů byla analyzována interakce plynné atmosféry vznikající ve slévárenské formě [2].

2. teoreticky a prakticky byl vyhodnocen mechanismus ochranného působení inhibitorů hoření a byla vyvinuta nová technologie na bázi samotuhnoucí směsi a aplikována na velmi složitý odlitek, skříně pohonu leteckého motoru (obr.1) [1]. Ve fázi poloprovozních zkoušek je rovněž využití technologie odlévání tenkostěnných odlitků

na tzv. voskový model, se zavedením speciálního metalurgického postupu potřebného pro odlití kvalitního odlitku [29].

3. Teoreticky a prakticky byly zkoumány nové typy slitin na bázi Mg-Al, t.j. AZ91, AZ63, a vysocečisté slitiny AZ91HP a AZ63HP. V této části jsou záměrně zdůrazněny nové aspekty korozní odolnosti hořčíkových slitin. Uvedené slitiny byly navrženy pro aplikaci a jsou plně využívány v praxi. Součástí návrhu je i aplikace speciální slitiny na bázi Mg-Zr [30].

4. Teoreticky a prakticky byl uveden příklad spolupráce konstruktéra, výpočtáře a slévárenského technologa při řešení velmi složitého problému týkajícího se vývoje nového typu železničního kola, na které jsou kladeny požadavky snížení hlučnosti. Nový typ železničního kola byl odlit z materiálu AZ91HP a podroben rozsáhlému studiu v oblasti sledování chemického složení, metalografických zkoušek, rozborů struktury a mechanických vlastností. I přes zastavení výzkumných a vývojových prací je možno konstatovat, že byly prokázány nové možnosti aplikace a to vzhledem k získaným výsledkům pokrokového konstrukčního řešení nového typu složeného železničního kola [21, 24]. Zvlášť důležité jsou první vlastní poznatky o mikrostruktuře a mechanických vlastnostech při různém typu tepelného zpracování a taktéž zjištění iniciací únavových prasklin.

5. Teoreticky a prakticky byly řešeny vady odlitku zejména pak ty, které negativně ovlivňovaly celkovou kvalitu, zejména speciálních soutěžních automobilových kol. Především se jednalo o identifikaci příčin vzniku mikroředin, povrchové porezity a oxidů, a s tím souvisejících únavových prasklin, vznikajících při testování. Plynová porezita byla úspěšně odstraněna.

Dále byl zaveden nový metalurgický postup, navržena změna vtokové soustavy s možností zařazení filtrace pomocí keramických filtrů [31]. U náročných odlitků s rozdílnými tloušťkami stěn byl navržen a zaveden třístupňový režim homogenizačního žíhání. Neméně významným poznatkem jsou výsledky výzkumu legování základního materiálu AZ91HP beryliem a stanovení obsahu 0,0003 - 0,0008 % Be pro náročné odlitky. Soubor opatření prokázal pozitivní výsledek a to zvýšením kvality odlitků pro výše uvedené aplikace.

6. Teoretickým a praktickým studiem struktury analyzované v souvislosti s výskytem vad u odlitků odlévaných do pískových forem bylo dosaženo poznatků o možnosti zlepšení mechanických vlastností. Výsledky byly aplikovány pro odlitky automobilových kol pro významného německého odběratele firmu BBS. V souvislosti s tímto výzkumem byly studovány nové možnosti využití barevné metalografie a hodnocení struktury na elektronovém mikroskopu ve spolupráci s významnými pracovišti v ČR i zahraničí.

7. Byly zdokumentovány příklady využití odlitků z Mg-Al slitin (viz obrazová příloha), které byly vyrobeny na pracovišti autora, t.j. ve slévárně hořčíkových slitin ČKD, a.s., a jsou námětem pro další úvahy o využití v jiných konstrukčních prvcích.

8. Byla zahájena spolupráce s výzkumnými a odbornými pracovišti, Technickými univerzitami v České republice i v zahraničí, a spolu s nimi publikovány poznatky vývoje v dané oblasti [36, 37, 38, 39, 40, 41,42]. V současné době je autorem zpracováván program dalšího postupu při výzkumu a vývoji nových materiálů na bázi Mg a nových technologií jejich zpracování s výše uvedenými odbornými pracovišti.

8. PROHLÁŠENÍ AUTORA

Autor si vyhrazuje k této habilitační práci veškerá autorská práva. Tato práce nesmí být bez předchozího souhlasu autora zveřejněna, rozšiřována a ani předána jiné fyzické či právnické osobě.

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Juříčka, I.: Progresivní technologie výroby odlitků z Mg slitin do furanových směsí. Interní zpráva ČKD Hradec Králové, a.s., 1991
- [2] Juříčka, I.: Studium interakce forma - kov při výrobě odlitků z hořčíkových slitin. Kandidátská disertační práce 1992, Ostrava
- [3] Emley, E.F.: Principes of Magnesium Technology, Pergamon Press, Oxford, 1966
- [4] Busk, R.S.: Magnesium Product Design, Marcel Dekker Inc., New York, 1986
- [5] Annual Book of ASTM Standards: "Non-ferrous Metal Products" vol. 2.02, ASTM, Philadelphia, PA, 1992
- [6] Metals Handbook, 9th ed. vol.13: „Corrosion“ American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1987
- [7] Lunder, O., Lein, J.E., Aune, T.K., Nisancioglu, K.: "The Role of $Mg_{17}Al_{12}$ Phase in the Corrosion of Mg Alloy AZ91", Paper 49: "Corrosion 88", National Association of Corrosion Engineers, St. Louis, 1988
- [8] Hillis, J.E.: "The Effects of Heavy Metal Contamination on Magnesium Corrosion Performance", SEA Tech. Pap. 830523, 1983
- [9] Reichek, K.N., Clark, K.J., Hillis, J.E.: "Controlling the Salt Water Corrosion Performance of Magnesium AS41 Alloy", SAE Tech. Pap. 850 417, 1985
- [10] Aune, T.K., Lunder, O., Nisancioglu, K.: "In Situ Microscopic Investigation of Corrosion on a Magnesium Alloy", IMS Conf., Toronto, July 1988

- [11] Aune, T.K., Lunder, O., Nisancioglu, K.:
Early Stages of Corrosion of Magnesium Alloy AZ91 HP in Chloride Solutions, Abstract, National Association of Corrosion Engineers, 1989
- [12] Juříčka, I.: Vývoj a provozní zavedení slitiny AZ 91 HP.
Technická zpráva ČKD č.SL - 313 - 098 / 94 / SL3
Hradec Králové, 1994
- [13] Juříčka, I.: Vady odlitků z hořčíkových slitin.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 -098 / 94/ SL3
Hradec Králové, 1994
- [14] Juříčka, I.: Metalurgické zpracování slitiny AZ 63 HP pro odlitky anodových tyčí.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 - 101 / 95/ SL3
Hradec Králové, 1995
- [15] Juříčka, I.: Struktura Mg-Al slitin a jejich mechanické vlastnosti.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 - 104 / 97/ SL3
Hradec Králové, 1997
- [16] Technický list 452 Magnesium Elektron, Elektron RZ5
- [17] Juříčka, I.: Povrchová ochrana zkušebních vzorků ze slitin Mg - Li,
Technická zpráva ČKD č. SL - 410 - 110 / 00 / SL3
Hradec Králové, 2000
- [18] Metals Handbook, 9th ed., vol 5: "Properties and Selection: Surface Cleaning, Finishing and Coating
American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982
- [19] Juříčka, I.: Interní předpis ČKD - Chromátování odlitků vyrobených do pískových forem
Hradec Králové, 1999

- [20] Juříčka, I.: Studie tlakového lití Mg slitin
Technická zpráva ČKD č.SL - 410 - 113 / 01 / SL3
Hradec Králové, 2001
- [21] Kaloč, R.: Vývoj železničního kola s neželeznými prvky
Závěrečná zpráva ŽDB P-4/1-Ž
Univerzita Pardubice, 1995
- [22] Humen V. : Odezva nového typu železničního kola na statické zatížení.
Potěšil, R. Zpráva Laboratoře experimentální, numerické a analytické
mechaniky LENAM 94/3, Liberec 1994
- [23] Kout, J.,: K problematice hluku kolejového vozidla
Kaloč, R Vědeckotechnický sborník ČD č.6/1998
- [24] Juříčka, I.: Vývoj technologie a metalurgie výroby odlitku železničního
kola.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 - 099 / 94/ SL3
Hradec Králové, 1994
- [25] Green, R. D.: Poresity-Free Magnesium Alloy Castings Thermal
Requirements. Trans. Amer. Foundrym. Soc. 68, 1960
- [26] Aliracvi, J.E., Gruzleski, F., Dimayuga, G.J., Zuliani, B.
Closset - Beseitigung der Mikrolunkerung
in Sandgußstücken aus der Magnesiumlegierung AZ 91
- [27] Rusín, K.: Stanovení technologie metalurgického zpracování taveniny Al-Mg
před vlastním litím
Technická zpráva VUT -ÚMI
Brno, 1998
- [28] Juříčka, I.: Studie marketingové koncepce sléváren
ČKD Hradec Králové a.s.,
Hradec Králové, 1996

- [29] Juříčka, I.: Vývoj technologie odlitků z Mg slitin metodou vytavitelného modelu.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 - 109 / 00/ SL3
Hradec Králové, 2000

- [30] Juříčka, I.: Vývoj technologie výroby hořčíkových slitin na bázi Mg-Zr pro dopravní techniku , Interní zpráva ČKD
Hradec Králové, 1998

- [31] Juříčka, I.: Magnesium Alloys in Czech Republic, Papers presented at the
Ptáček, L. Conference Magnesium Alloys and their Applications,
Ustohal, V. ISBN 3-88355-255-0
Wolfsburg, 1998

- [32] Juříčka, I.: Filtrace hořčíkových slitin při výrobě odlitků pro letecký průmysl.
Technická zpráva ČKD č. SL - 264 - 091 / 89/ SL3
Hradec Králové, 1989

- [33] Juříčka, I.: Vývoj technologie odlévání skříně pohonu letadla L 159 do samotuhnoucích směsí.
Technická zpráva ČKD č. SL - 313 - 093 / 90/ SL3
Hradec Králové, 1990

- [34] Juříčka, I.: Vývoj hořčíkových odlitků pro dopravní prostředky
IV. mezinárodní metalurgické sympozium
Rajecké Teplice, 1996

- [35] Juříčka, I.: Perspektivy slitin na bázi hořčíku
Konference Současné problémy v kolákových vozidlách,
Žilina, 1995

- [36] Juříčka, I.: Production, use and development of Magnesium alloys in the
Lukáč, P. Czech Republic
Maisnar, J. 3rd International Magnesium Conference, Manchester, 1996

- [37] Čech, J.: Použití hořčíkových slitin ve slévárenství,
Juříčka, I. Konference CO-MAT-TECH, Trnava, 1997

- [38] Ptáček, L.: Analýza struktury Mg slitiny
Juříčka, I. IV. mezinárodní symposium,
Rajecké Teplice, 1996

- [39] Juříčka, I.: Hořčíkové slitiny v dopravní technice, Scientific Papers of the
University of Pardubice, Series B, The Jan Perner Transport
Faculty, ISBN 80-7194-032-1, Pardubice, 1995

- [40] Juříčka, I.: Perspektivy slitin na bázi hořčíku
XII. Mezinárodní konference Súčasný problémy v koľajových
vozidlách, Zborník prednášok ISBN 80-7100-287-9,
Žilina, 1995

- [41] Juříčka, I.: Hořčíkové slitiny, - úspěšná konkurence hliníkovým slitinám
Konference Současné poznatky o materiálech a technologických
procesech ve slévárství hliníkových slitin,
Mladá Boleslav, 1999

- [42] Čížek, L.: Structure and Properties of the Selected Magnesium Alloys,
Kořený, R. Proceedings: 10th International Scientific Conference
Juříčka, I. „Achievements in Mechanical and Materials and Engineering“,
ISBN83-914458-4-4, Gliwice, 2001

- [43] Kořený, R.: Perspektywy wykorzystania stopow magnezu
Čížek, L. Sborník konference, Nowe technologie i materialy v metalurgii
Juříčka I. inżynierii materialowej, ISBN 83-913330-4-3, 2001
Chrapoński, J.

- [44] Juříčka, I.: Růst využití hořčíkových slitin v dopravě,
2. vědecká konference Dopravní fakulty Jana Pernera,
Pardubice, 1999

10. SEZNAM PŘILOŽENÝCH TABULEK

Tab. 1	Vlastnosti hořčíku
Tab. 2	Mezinárodní označení slévárenských hořčíkových slitin
Tab. 3	Slévárenské hořčíkové slitiny pro lití do písku a do kovové kokily
Tab. 4	Hořčíkové slitiny pro lití pod tlakem
Tab. 5	Mechanické vlastnosti odlitků litých do písku nebo kokil
Tab. 6	Mechanické vlastnosti odlitků litých pod tlakem
Tab. 7	Vliv zvýšení teploty na mez pevnosti slévárenských hořčíkových slitin
Tab. 8	Vliv zvýšení teploty na creepové napětí a modul pružnosti
Tab. 9	Únavová pevnost a vrubová houževnatost vybraných hořčíkových slitin
Tab. 10	Měrná hmotnost a tepelné vlastnosti vybraných hořčíkových slitin
Tab. 11	Elektrické vlastnosti hořčíkových slitin
Tab. 12	Technologické vlastnosti hořčíkových slitin
Tab. 13	Chemické složení odlitků železničních kol
Tab. 14	Zkoušky tvrdosti odlitků železničních kol
Tab. 15	Zkouška vrubové houževnatosti železničních kol
Tab. 16	Zkouška tahem - kolo DF 0011
Tab. 17	Zkouška tahem - kolo DF 0011
Tab. 18	Zkouška tahem - kolo DF 0013
Tab. 19	Zkouška tahem - kolo DF 0013
Tab. 20	Porovnání analýzy chemického složení
Tab. 21	Mechanické vlastnosti slitiny AZ91HP, lité do písku
Tab. 22	Přehled způsobů manipulačního spojení
Tab. 23	Úroveň kvality odlitku z Mg-Al slitin
Tab. 24	Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č.1
Tab. 25	Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č.2
Tab. 26	Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č.3
Tab. 27	Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č.6

Tab. 28	Chemický rozbor slitiny Mg-Al s přísadou Be
Tab. 29	Mechanické hodnoty slitin Mg-Al s přísadou Be
Tab. 30	Hodnoty meze kluzu R_{p02} (MPa)
Tab. 31	Hodnoty pevnosti v tahu R_m (MPa)
Tab. 32	Hodnoty tažnosti A_5 (%)
Tab. 33	Hodnoty tvrdosti HBS 2,5/31,25
Tab. 34	Vztah mezi velikostí zrna a pevností v tahu
Tab. 35	Mechanické zkoušky odlitků klínů - č.1
Tab. 36	Chemické složení zkušebních tyčí
Tab. 37	Mechanické zkoušky odlitků klínů - č.2
Tab. 38	Tepelné zpracování klínů z Mg slitin
Tab. 39	Zkoušky kol pro BBS - statické
Tab. 40	Zkoušky únavy středů kol

11. SEZNAM OBRAZOVÝCH PŘÍLOH

- Obr. 1 Odlitek skříně pohonu leteckého motoru DV 2 TURBOFAN
- Obr. 2 Letecký motor DV 2 TURBOFAN
- Obr. 3 Vliv přísadových prvků na měrnou hmotnost Mg slitin
- Obr. 4 Rovnovážný diagram slitiny Al- Mg
- Obr. 5 Rovnovážný diagram slitiny Mg-Zr
- Obr. 6 Vana zadního diferenciálu (PJ 1003)
Hydraulická vložka stř. diferenciálu (PJ 1748)
Hlavní skříň zadního diferenciálu (PJ 1001)
- Obr. 7 Hlavní skříň (PJ 1787)
Boční víko převodovky (PJ 1790)
- Obr. 8 Kryt převodu (PJ 1788)
Boční víko zadního diferenciálu (PJ 1002)
- Obr. 9 Koncepce nového typu kola - laminátová segmentová soustava
- Obr. 10 Sestava nového typu železničního kola z Mg-Al slitiny
- Obr. 11 Rozložení radiálního napětí (σ_x)
- Obr. 12 Rozložení obvodového napětí (σ_z)
- Obr. 13 Znázornění napjatosti vzniklé v kole za různých podmínek
- Obr. 14 Vliv radiální kolové síly na napjatost v segmentu kola
- Obr. 15 Postup řezů z odlitku železničního kola pro zkušební tyče na tahovou zkoušku
- Obr. 16 Postup řezů z odlitku železničního kola pro zkušební tyče na tahovou zkoušku
- Obr. 17 Struktury z metalografických výbrusů z kol DF 0011
- Obr. 18 Struktury z metalografických výbrusů z kol DF 0013
- Obr. 19 Struktura po tepelném zpracování T6 kol DF 0013
- Obr. 20 Struktura po tepelném zpracování T6 kol DF 0011
- Obr. 21 Mikrostruktura v litém stavu
- Obr. 22 Mikrostruktura v litém stavu a po tepelném zpracování T4

- Obr. 23 Mikrostruktura po tepelném zpracování T4
- Obr. 24 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 25 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 26 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 27 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 28 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 29 Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu
- Obr. 30 Profil povrchu AZ63HP po 14 dnech v prostředí SO₂
- Obr. 31 Profil povrchu AZ63HP po 28 dnech v prostředí SO₂
- Obr. 32 Profil povrchu AZ63HP po 42 dnech v prostředí SO₂
- Obr. 33 Odlitek automobilového kola pro sportovní účely
- Obr. 34 Netěsnosti na obvodi ráfku automobilového kola
- Obr. 35 Praskliny středů kol v místě vyústění žebra do ráfku
- Obr. 36 Praskliny středů kol v místě vyústění žebra do ráfku
- Obr. 37 Mikroporozita od naplynění v průběhu tuhnutí
- Obr. 38 Mikroporozita vzniklá při tepelném zpracování
- Obr. 39 Vada ve stěně příruby odlitku středu kola mezi žebry
- Obr. 40 Vzorok s ředinami vzniklými při tepelném zpracování
- Obr. 41 Snímek z lomové plochy a struktury při povrchu
- Obr. 42 Mikroředina vzniklá při TZ při různých zvětšeních
- Obr. 43 Snímek ředin z elektronového mikroskopu při různých zvětšeních
- Obr. 44 Plošná analýza vzorku s ředinami po TZ
- Obr. 45 Rozbor z lomové plochy vzorku s ředinami po TZ
- Obr. 46 Rozbor z oblasti „kudrnaté staženiny“
- Obr. 47 Rozbor z oblasti „kudrnaté staženiny“
- Obr. 48 Jádro z furanové směsi
- Obr. 49 Spodní díl formy se založeným jádrem
- Obr. 50 Odlévání zkušebního odlitku
- Obr. 51 Vyklepaný odlitek s číselným označením umístění termočlánků
- Obr. 52 Uspořádání měřicích prvků

- Obr. 53 Zobrazení průběhu teplot krátce po odlití na monitoru počítače
- Obr. 54 Křivky chladnutí - interval 3 sec
- Obr. 55 Pokračování křivek chladnutí - interval 306 sec
- Obr. 56 Lomy zkušebních tyčí s příměsí Be
- Obr. 57 Lomy zkušebních tyčí s příměsí Be
- Obr. 58 Struktura při různých obsazích Be
- Obr. 59 Struktura při různých obsazích Be po naleptání vzorku kys. šťavelovou
- Obr. 60 Odběr vzorků z prasklého středu kola
- Obr. 61 Schema zkušebního zařízení pro únavové zkoušky opracovaných středů kol
- Obr. 62 Metalografický výbrus z paprsku kola F6 s indikovanou vadou po zkoušce ultrazvukem
- Obr. 63 Mikrostruktura z kola č. 3
- Obr. 64 Mikrostruktura z kola č. 4
- Obr. 65 Hodnocení velikosti zrn Mg slitin
- Obr. 66 Odezňování modifikace - vzorek č.1 až 6
- Obr. 67 Digram chladnutí odlitků klínů
- Obr. 68 Plnění pískové formy po 4,5 s
- Obr. 69 Plnění pískové formy po 9 s
- Obr. 70 Tuhnutí odlitku v pískové formě po 36 s
- Obr. 71 Chladnutí odlitku v pískové formě po 3 min.
- Obr. 72 Chladnutí odlitku v pískové formě po 9,5 min.
- Obr. 73 Pórovitost v odlitku z pískové formy
- Obr. 74 Vzorek 4.1 ze zkoušky rázem po T4
- Obr. 75 Vzorek 4.2 ze zkoušky rázem po tep. zpracování T4
- Obr. 76 Vzorek 4.3 ze zkoušky rázem po tep. zpracování T4
- Obr. 77 Struktura z klínu po tep. zpracování T4
- Obr. 78 Struktura z klínu (vzorek č.4) po T4 - zpracováním výřezu 10 mm přes všechny stupně
- Obr. 79 Struktura z klínu (vzorek č.4) po T4 - zpracováním výřezu 10 mm přes všechny stupně
- Obr. 80 Struktura z klínu (vzorek č.3) po 2x TZ T4

- Obr. 81 Struktura z klínu (vzorek č.3) po 2x TZ T4
- Obr. 82 Struktura vzorků z odlitých desek 100x200x20mm bez tepel. zpracování
- Obr. 83 Struktura vzorků z odlitých desek bez tepelného zpracování
- Obr. 84 Struktura vzorků z odlitých desek bez tepelného zpracování
- Obr. 85 Struktura vzorků z odlitých desek po tepelném zpracování na T4
- Obr. 86 Struktura vzorků z odlitých desek tepelně zpracovaných na T4
- Obr. 87 Struktura vzorků z odlitých desek tepelně zpracovaných na T4
- Obr. 88 Barevná struktura vzorku AZ91D
- Obr. 89 Struktura z desky bez TZ s oblastmi 1 až 5 pro fázovou analýzu
- Obr. 90 Struktura z desky bez TZ s oblastmi 6 až 10 pro fázovou analýzu
- Obr. 91 Plošná analýza eutektika se zaměřením na stanovení rozložení prvků Al,Mg,Mn
- Obr. 92 Liniová mikroanalýza fází $Mg_{17}Al_{12}$, vměstku a tuhého roztoku
- Obr. 93 Plošná analýza eutektika po vybroušení vzorku s použitím diamant. pasty
- Obr. 94 Liniová mikroanalýza vzorku z obr. 91 vedená přes fázi $Mg_{17}Al_{12}$
- Obr. 95 Fázová mikroanalýza strukturních složek z tyče pro únavu bez TZ
- Obr. 96 Chemické složení k obr. 93
- Obr. 97 Vzorek s povrchovou vadou a vzorek s mikroporezitou
- Obr. 98 Fraktografie lomové plochy a povrchu
- Obr. 99 Mikroanalýza v oblasti 1,2,3 dle obr. 96
- Obr. 100 Struktury z kola č.15 var.A závěrečné únavové zkoušky
- Obr. 101 Struktury z kola č.9 var.B závěrečné únavové zkoušky
- Obr. 102 Celkový pohled na střed kola č.3 po zkoušce únavy
- Obr. 103 Střed kol č.3 a č.4 vrácené po zkouškách únavy
- Obr. 104 Charakteristické praskliny po zkoušce únavy kola č.4
- Obr. 105 Praskliny po zkoušce únavy kola č.3
- Obr. 106 Detail průběhu praskliny po zkoušce únavy kola varianta A - atyp. průběh
- Obr. 107 Praskliny po zkoušce únavy kola varianta A - atypický průběh
- Obr. 108 Železniční kolo po zkoušce únavy
- Obr. 109 Železniční kolo po zkoušce únavy

- Obr. 110 Detail železničního kola - prasklina
- Obr. 111 Odběr vzorků z železničního kola po zkoušce únavy
- Obr. 112 Únavová zkouška železničního kola
- Obr. 113 Železniční kolo v řezu a mikrostruktura s lomem
- Obr. 114 Čelní pohled na vnější plochu pláště s prasklinami
- Obr. 115 Iniciační centrum lomu v místě A a detail prvotní praskliny
- Obr. 116 Plášť železničního kola s prasklinou v místě A
- Obr. 117 Automobilové kolo po nesprávném režimu TZ
- Obr. 118 Vodicí deska pily
- Obr. 119 Posuvný kryt pily
- Obr. 120 Víko
- Obr. 121 Páka
- Obr. 122 Víko
- Obr. 123 Sací potrubí
- Obr. 124 Polovina skříně motoru
- Obr. 125 Těhlice (závěs kola)
- Obr. 126 Náboj kola zadní a přední
- Obr. 127 Těhlice (závěs kola)
- Obr. 128 Rám spodní
- Obr. 129 Kryt řemenu
- Obr. 130 Brzdová čelist
- Obr. 131 Víko ložiska
- Obr. 132 Automobilové kolo
- Obr. 133 Kolo veterán Rolls-Royce
- Obr. 134 Motocyklové kolo 18x2,5-3"
- Obr. 135 Motocyklové kolo s dutými loukotěmi
- Obr. 136 Motocyklové kolo 16"
- Obr. 137 Skříň leteckého motoru
- Obr. 138 Skříň leteckého motoru
- Obr. 139 Skříň pohonu

- Obr. 140 Skříň pohonu
- Obr. 141 Ráfek kola letounu
- Obr. 142 Ráfek kola letounu
- Obr. 143 Lopatka
- Obr. 144 Skříň vačkového hřídele
- Obr. 145 Vstupní skříň kompresoru
- Obr. 146 Těleso středních převodů
- Obr. 147 Svařenec - 3ks odlitků z MgAl slitiny (celková hmotnost 400 kg)

Tab. 1. Vlastnosti hořčíku

Vlastnosti	Mg
Atomové číslo	12
Atomová hmotnost	24,312
Měrná hmotnost při 20°C [kg.m ⁻³]	1740
Měrná hmotnost v tuhém stavu (650°C) [kg.m ⁻³]	1640
Měrná hmotnost v tekutém stavu (700°C) [kg.m ⁻³]	1540
Teplota tavení [°C]	650
Teplota varu [°C]	1107
Měrná tepelná kapacita [kJkg ⁻¹ K ⁻¹] při 20°C	1,026
Měrná tepelná kapacita [kJkg ⁻¹ K ⁻¹] při 300°C	1,151
Měrná tepelná kapacita [kJkg ⁻¹ K ⁻¹] v tuhém stavu 650°C	1,361
Měrná tepelná kapacita [kJkg ⁻¹ K ⁻¹] v tuhém stavu 700°C	1,323
Tepelná vodivost [kW m ⁻¹ K ⁻¹] při 20°C	0,155
Elektrický odpor [μΩcm] při 20°C	4,46
Elektrický odpor [μΩcm] při 300°C	9,5
Elektrický odpor [μΩcm] v tekutém stavu 650°C	28,0
Tvrdost HB	30 - 40

Tab. 2. Mezinárodní označení slévárenských hořčíkových slitin

Mezinárodní ISO	Spolková Republika Německo	Velká Británie	Francie AFNOR**	USA ASTM	Rusko GOST
	TD*	TD*			
	AS41				
	A6				
	AZ61	AZM	G-A6Z1	AZ61	MA3
Mg-Al6Zn3 ^A					
Mg-Al8Zn1 ^A	AZ81	A8	G-A9	AZ63	ML4
Mg-Al9Zn1 ^B	AZ91	C, AZ91	G-A9Z1	AZ81	ML5
Mg-Al9Zn2				AZ91	ML6
Mg-Ag3RE2Zr	MSR	MSR, QE22	G-Ag2.5	AZ92	
Mg4REZr	RZ5	RZ5	G-Z4TR	QE22	
MgZn6Th2Zr	TZ6	TZ6		ZE41	
Mg-Zn5Zr ^A				ZH62	
Mg-Zn6Zr ^A				ZK51	ML12
Mg-RE3Zn2Zr ^A	ZRE1	ZRE1	G-TR3Z2	ZK61	ML8
Mg-TH3Zn2Zr	ZT1	ZT1	G-Th3Z2	EZ33	ML11
				HZ32	

* Obchodní označení ** Association Francaise de Normalisation.

A - uvádí pod stejným označením i ČSN 42 4996

B - v ČSN 42 4996 uvedena slitina MgAl10Zn

Poznámka: V ČSN 42 4996 uvedeny ještě slitiny MgZn5LaZr a MgNd2Zr jako slitiny s prvky vzácných zemin.

Tab. 3. Slévárenské horčíkové slitiny pro lití do písku a do kovové kokily [hm.%, zbytek Mg], (ASTM B 80)

Slitina	Fe	Al	Mn	Zn	Th	RE	Zr	Si	Cu	Ni	Jiné	Celkem
AM100A	min max	9,3 10,7	0,10 0,30	0,30	...	...	...	0,30	0,10	0,01	...	0,30
AZ63A	min max	5,3 6,7	0,15 0,35	2,5 3,5	...	...	...	0,30	0,25	0,01	...	0,30
AZ81A	min max	7,0 8,1	0,13 0,35	0,40 1,0	...	...	...	0,30	0,10	0,01	...	0,30
AZ91C	min max	8,1 9,3	0,13 0,35	0,40 1,0	...	...	...	0,30	0,10	0,01	...	0,30
AZ91E	min max	8,1 9,3	0,17 0,35	0,40 1,0	...	...	...	0,20	0,015	0,001 0	0,01	0,30
AZ92A	min max	8,3 9,7	0,10 0,35	1,6 2,4	...	...	...	0,30	0,25	0,01	...	0,30
EQ21A	min max	...	...	...	...	1,5 3,0	0,4 1,0	...	0,05 0,10	0,01	0,30	...
EZ33A	min max	...	...	2,0 3,1	...	2,5 4,0	0,5 1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
HK31A	min max	...	...	0,30	2,5 4,0	...	0,40 1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
HZ32A	min max	...	...	1,7 2,5	2,5 4,0	0,10	0,50 1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
K1A	min max	...	...	...	...	...	0,40 1,0	...	...	...	...	0,30

Slitina	Fe	Al	Mn	Zn	Th	RE	Zr	Si	Cu	Ni	Jiné	Celkem
QE22A	min	...	...	...	...	1,8	0,40	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	...	...	2,5	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
QH21A	min	...	...	0,20	0,6	0,6	0,40	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	0,20	1,6	1,5	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
WES4A	min	...	0,15	0,20	...	1,5	0,40	0,01	0,03	0,005	0,20	0,30
	max	...	0,15	0,20	...	4,0	1,0	...	0,03	0,005	0,20	0,30
ZE41A	min	...	0,15	3,5	...	0,75	0,40	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	0,15	5,0	...	1,75	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
ZE63A	min	...	...	5,5	...	2,1	0,40	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	6,0	...	3,0	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
ZH62A	min	...	...	5,2	1,4	...	0,50	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	6,2	2,2	...	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
ZKS1A	min	...	...	3,6	...	...	0,50	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	5,5	...	...	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30
ZK61A	min	...	...	5,5	...	...	0,6	...	0,10	0,01	...	0,30
	max	...	...	6,5	...	...	1,0	...	0,10	0,01	...	0,30

Tab. 4. Hořčíkové slitiny pro lití pod tlakem [hm.%, zbytek Mg], (ASTM B 94)

Slitina		Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Jiné kovové nečistoty jednotlivě
AM60A	min	5,5						...	...
	max	6,5	0,13	0,22	0,50	0,35	0,03		
AM60B	min	5,5							
	max	6,5	0,25	0,22	0,10	0,010	0,002	0,005	0,02
AS41A	min	3,5	0,20		0,50			...	...
	max	5,0	0,50	0,12	1,5	0,06	0,03		
AZ91A	min	8,3	0,13	0,35				...	...
	max	9,7		1,0	0,50	0,10	0,03		
AZ91B	min	8,3	0,13	0,35				...	...
	max	9,7		1,0	0,50	0,35	0,03		
AZ91D	min	8,3		0,35					
	max	9,7	0,15	1,0	0,10	0,030	0,002	0,005	0,02

Tab. 5. Mechanické vlastnosti odlitků litých do písku nebo kokil

Slitina, stav	Rm [MPa]	Rp 0,2 [MPa]		A 50 [%]	HRB [jedn.]
		tah	tlak		
AM100A - T61	275	150	150	1	65
AZ63A - T6	275	130	130	5	73
AZ81A-T4	275	83	83	15	55
AZ91C- a E-T6	275	145	145	6	66
AZ92A-T6	275	150	150	3	84
EQ21A-T6	235	195	195	2	65-85
EZ33A-T5	160	110	110	2	50
HK31A-T6	220	105	105	8	55
HK32A-T5	185	90	90	4	57
K1A-F	180	55	...	1	...
QE22A-T6	260	195	195	3	80
QH21A-T6	275	205	...	4	...
WE43A-T6	250	165	...	2	75-95
WE54-T6	250	172	172	2	75-95
ZC63-T6	210	125	...	4	55-65
ZE41A-T5	205	140	140	3,5	62
ZE63A-T6	300	190	195	10	60-80
ZH62A-T5	240	170	170	4	70
ZK51A-T5	205	165	165	3,5	65
ZK61A-T5	310	185	185	...	68
ZK61A-T6	310	195	195	10	70

Tab. 6. Mechanické vlastnosti odlitků litých pod tlakem

Slitina, stav	Rm [MPa]	Rp 0,2 [MPa]		A 50 [%]	HRB [jedn.]
		tah	tlak		
AM60A- a B-F	205	115	115	6	...
AS21 X1	240	130	130	9	...
AS41A-F	220	150	150	4	...
AZ91A,B a D-F	230	150	165	3	63

Tab. 7. Vliv zvýšení teploty na mez pevnosti slévárenských hořčíkových slitin [MPa]

Slitina	Zkoušeno při dané teplotě					Zkoušeno při pokojové teplotě	
	Žháno 10 min při			Žháno 1000 h při		Žháno 1000 h při	
	20°C	150°C	315°C	205°C	315°C	205°C	315°C
AZ63A-T6	275	165	55	110	...	255	...
AZ92A-T6	275	195	55	115	...	270	...
EQ21A-T6	261	211	132	...	...	246	...
EZ33A-T5	160	145	83	130	76	170	180
HK31A-T6	215	195	125	180	62	240	180
HZ32A-T5	200	145	83	115	76	220	235
QE22A-T6	266	208	80	...	...	...	...
QH21A-T6	275	235	97	...	...	...	...
ZC63A-T6	242	179	...	...	...	...	...
ZE41A-T5	218	167	77	...	...	...	...
ZH62A-T5	290	195	69	...	...	...	...
WE43-T6	265	243	163	...	...	250	...
WE54-T6	280	255	184	235	...	272	217

Tab. 8. Vliv zvýšení teploty na creepové napětí a modul pružnosti

Slitina	Creepové napětí [MPa]		Modul pružnosti [GPa]	
	205°C	315°C	205°C	315°C
AZ92A-T6	3,4	...	31	21
EQ21A-T6	62	...	41	31
EZ33A-T5	38	6,9	40	38
HK31A-T6	64	14	40	39
HZ32A-T5	52	22	40	39
QE22A-T6	55	...	37	31
ZC63A-T6	49	...	...	...
ZE41A-T5	31	...	41	24
ZH62A-T5	17	...	40	38
WE43A-T6	96	...	39	37
WE54A-T6	132	...	41	36

Tab. 9. Únavová pevnost a vrubová houževnatost vybraných hořčíkových slitin

Slitina	TZ	Mez únavy při $5 \cdot 10^8$ [MPa]	Vrubová houževnatost Charpy s V-vrubem [J]
AM100A	F	70	0,8
	T4	75	2,7
	T61	70	0,9
AZ63A	F	76	1,4
	T4	83	3,4
	T5	76	3,5
	T6	76	1,5
	T7	115	-
AZ81A	T4	-	6,1
AZ91A,B,D	F	97	2,7
AZ91C,E	T4	80-95*	4,1
	T6	80-95*	1,4
AZ92A	F	83	0,7
	T4	90	2,7
	T5	76	
	T6	83	1,1
	T7	90	
EQ21A	T6	95	
	T6	63 ^A	
QE22A	T6	97	1,4-2,7
	T6	63 ^A	6,8-13,6 ^B
	T6	30 ^C	
QH21A	T6	105	
	T6	63 ^A	
ZE41A	T5		1,4
ZE63	T6		0,33-0,55 0,063-0,084 ^B
ZH62A	T5		3,4 ^D

* - pro $1 \cdot 10^8$, A - s U-vrubem $K_f=2$, B - Charpy na hladké tyči,
C - s V-vrubem $K_f=3$, D - Izod s vrubem

Tab. 10. Měrná hmotnost a tepelné vlastnosti vybraných hořčíkových slitin

Slitina	Hustota [g/cm ³]	Teplota			Koefficient lineární teplot, roztaž. [S.m/m.K]	Tepelná vodivost [W/m.K]	Měrné teplo [kJ/kg.K]
		likvidus [°C]	solidus [°C]	zač. tavení [°C]			
AM60A,B	1,80	615	540		25,6	62	
AM100A	1,83	595	463	430	25,0 ^A	73 ^C	1,05 ^D
AS41A,XB	1,77	620	565		26,1	68	1,01 ^E
AZ63A	1,83	610	455		26,1	77 ^C	1,05 ^D
AZ81A	1,80	610	490		25,0	51,1	
AZ91A-E	1,81	595	470	421	26,0	72 ^C	1,05 ^E
AZ92A	1,83	595	445	410	26,0 ^A	72 ^C	1,05 ^D
EQ21	1,81	640	540		26,7 ^B	113	1,00 ^F
EZ33A	1,83	645	545		26,1	100	1,05 ^E
HK31A	1,80	650	590	627-632		92-113	
HZ32Z	1,83	650	550		26,7 ^B	110	0,96
K1A	1,74	650	650		27,0 ^A	122	
QE22A	1,80	645	550		26,7 ^B	113	1,00 ^F
QH21A	1,83	640	535		26,7	113	1,00
WE43	1,84	640	540-550			51,3	
WE54	1,85	640	545-555			52	
ZC63	1,87	635	465			122	
ZE41A	1,82	645	525			113	
ZE63A	1,87	635	510		26,5	109	0,96
ZH62A	1,86	630	520		27,1 ^B	110	0,96
ZK51A	1,83	640	560		26,0	110	1,02
ZK61A	1,83	635	530		27,0 ^B		

A - v intervalu 18 - 100°C, B - v intervalu 20-200°C, jinak 20 - 100°C

C - v intervalu 100 - 300°C, jinak při 20°C nebo neudáno

D - při 25°C, E - při 20°C, F - v intervalu 20 - 100°C.

Tab. 11. Elektrické vlastnosti hořčkových slitin

Slitina, stav TZ	Elektrická vodivost [%/IACS]						Elektrický odpor [$\text{n}\Omega \cdot \text{m}^{-1}$]					
	F	T4	T5	T6	F	T4	T5	T6	F	T4	T5	T6
AM100A	11,5	9,9	...	12,3	150	175	...	140	...	...	...	...
AZ63A	15,0	12,3	13,8	...	115	140	125	...	...	...	...	...
AZ81A	12,0	...	...	...	130	...	...	...	...	...	...	...
AZ91A,B,D	10,1	...	...	...	170	...	...	...	...	...	...	...
AZ91C,E	11,5	9,9	...	11,2	150	175	...	151,5	...	...	...	...
AZ92	12,3	10,5	...	12,3	140	165	...	140	...	...	...	...
EQ21	...	...	...	25,2	...	...	...	68,5	...	...	...	...
EZ33A	...	...	25,0	...	...	...	70	...	...	...	...	...
HK31A	...	...	...	22,0	...	...	65	77	...	...	...	...
HZ32A	...	...	26,5	...	...	...	...	...	...	...	...	...
K1A	...	...	...	...	57	...	...	...	...	...	...	...
QE22A	...	...	...	25,2	...	...	...	68,5	...	...	...	...
QH21A	...	...	...	...	...	...	...	68,5	...	...	...	...
WE43	...	...	...	6,8*	...	...	...	148	...	...	...	...
WE54	...	...	...	5,8*	...	...	...	173	...	...	...	...
ZC63	...	...	...	...	...	...	...	54	...	...	...	...
ZE41	...	...	...	...	...	...	60	...	...	...	...	...
ZE63A	...	...	...	30,9	...	...	...	56	...	...	...	...
ZH62A	...	...	26,5	...	...	...	65	...	...	...	...	...
ZK51A	...	...	28,0	...	...	...	62	...	...	...	...	...

* - uvedeno v [MS/m]

Tab. 12. Technologické vlastnosti hořčíkových slitin

Slitina	Slévárenské vlastnosti				Ostatní vlastnosti			
	Nepro- pustno st pod tlakem	Zabí- ha- vost	Náchylnost k mikropóro- vitosti	Schop- nost běžného TZ	Obrobi- telnost	Elektro- lytické pokove- ní	Úpravy povr- chu	Svařo- vatel- nost
AM100 A	2	1	2	ano	1	2	2	1
AZ63A	3	1	3	ano	1	1	1	3
AZ81A	2	1	2	ano	1	2	2	1
AZ91C	2	1	2	ano	1	2	2	2
AZ91E	2	1	2	ano	1	2	2	1
AZ92A	2	1	2	ano	1	2	2	2
EQ21A	2	2	2	ano	1	2	1	1
EZ33A	1	2	1	ano	1	1	1	1
HK31A	1	2	1	ano	1	1	1	1
HZ32A	1	2	1	ano	1	-	2	2
K1A	2	2	2	ano	1	3	2	1
QE22A	2	2	2	ano	1	2	1	1
QH21A	2	2	2	ano	1	2	1	1
WE54A	2	2	2	ano	1	-	2	2
ZE41A	2	2	2	ano	1	1	1	2
ZE63A	1	2	1	ano	1	-	1	1
ZH62A	2	2	2	ano	1	1	1	-
ZK51A	3	2	3	ano	1	2	1	3
ZK61A	3	2	3	ano	1	2	1	3

Tab. 13. Chemické složení odlitků železničních kol [hm. %]

Al Ti	Zn Zr	Mn Sn	Si Ni	Cu Pb	Fe	Be
7.73 0.0008	0.59 0.0000	0.22 0.000	0.017 0.0000	0.006 0.000	0.012	0.00010
8.36 0.0005	0.68 0.0000	0.21 0.000	0.018 0.0000	0.007 0.000	0.011	0.00009
8.01 0.0008	0.63 0.0000	0.20 0.000	0.016 0.0000	0.006 0.000	0.009	0.00009
7.89 0.0009	0.63 0.0000	0.21 0.000	0.017 0.0000	0.006 0.000	0.011	0.00009
7.97 0.0008	0.64 0.0000	0.19 0.000	0.014 0.0000	0.006 0.000	0.009	0.00008
8.03 0.0008	0.64 0.0000	0.22 0.000	0.016 0.0000	0.007 0.000	0.011	0.00010

Tab. 14. Zkoušky tvrdosti odlitků železničních kol

Typ kola	Tep. zprac.	Označ. vzorku	Zjištěné hodnoty HBS 2,5/31,25		
DF 0011	T4	1	52,2	54,8	52,2
-"	T4	2	54,8	53,4	54,8
-"	T4	3	52,2	53,4	52,2
DF 0013	T4	1	50,9	52,2	53,4
-"	T4	2	52,2	52,2	52,4
-"	T4	3	53,4	52,2	54,8
DF 0011	T6	11	69,1	67,3	67,3
-"	T6	33	71,0	73,0	73,0
DF 0013	T6	11	69,1	65,5	67,3
-"	T6	22	71,0	69,1	67,3
-"	T6	33	69,1	69,1	65,5

Tab. 15. Zkouška vrubové houževnatosti železničních kol

Typ kola	Tep. zpracování	Označ. vzorku	Náraz. práce KU ₂ (J)	Vrubová houževnatost KCU ₂ [MPa]
DF 0011	T4	011	7,8	9,8
"-	T4	012	7,8	9,8
"-	T4	013	7,9	9,8
"-	T6	014	3,2	4
"-	T6	015	3,2	4
"-	T6	016	3	3,8
DF 0013	T4	01	6,5	8,1
"-	T4	02	6,7	8,4
"-	T4	03	6,7	8,4
"-	T6	04	3,1	3,9
"-	T6	05	2,9	3,6
"-	T6	06	3	3,8

Tab. 16. Zkouška tahem - kolo DF 0011

T4 (zkušební tyče odebrány z odlitku)

Č. tyče	do (mm)	Rm(MPa)	Rp (MPa)	Rp02 (MPa)	A5(%)	Poznámka
4	5,1	240	117	neměřeno	13,5	-
5	5,1	255	125	"-	15,0	-
6	5,1	267	131	"-	17,5	-
11	12,0	243	62	82	14,3	mikrořediny
12	12,0	186	62	85	6,0	"-

Tab. 17. Zkouška tahem - kolo DF 0011

T6 (zkušební tyče odebrané z odlitku)

Č. tyče	do (mm)	Rm(MPa)	Rp (MPa)	Rp02 (MPa)	A5(%)	Poznámka
7	5,1	233	142	neměřeno	4,5	mikrořediny
8	5,1	228	149	"-	5,5	-
9	5,1	225	162	"-	6,0	-
14	12,0	222	100	117	7,3	-
15	12,0	148	78	100	2,5	mikrořediny

Tab. 18. Zkouška tahem - kolo DF 0013

T4 (zkušební tyče odebrané z odlitku)

Č. tyče	do (mm)	Rm(MPa)	Rp (MPa)	Rp02 (MPa)	A5(%)	Poznámka
6	10,0	172	65	84	9,6	mikrořediny
7	10,0	236	167	211	10,8	-"
8	12,0	234	65	94	10,6	oxid
9	12,0	252	66	91	11,5	-

Tab. 19. Zkouška tahem - kolo DF 0013

T6 (zkušební tyče odebrané z odlitku)

Č. tyče	do (mm)	Rm(MPa)	Rp (MPa)	Rp02 (MPa)	A5(%)	Poznámka
44	10,1	181	110	132	1,2	mikrořediny
55	10,1	181	120	140	1,4	mikrořediny
66	10,1	200	124	144	3	-
77	10,1	181	114	142	1,6	mikrořediny
88	12,0	217	114	136	4,3	oxid
99	12,0	230	99	127	6,0	-

Tab. 20. Porovnání analýzy chemického složení [hm. %]

Vzorek	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Cu	Si
1	9,8	0,7	0,24	0,0088	0,0011	0,0032	0,018
Norsk	8,00	0,30	0,17	max.	max.	max.	max.
Hydro	9,50	1,00	min.	0,004	0,001	0,015	0,05
ASTM	8,1	0,40	0,17	max.	max.	max.	max.
B80	9,3	1,00	0,35	0,005 ^A	0,0010	0,015	0,20

Tab. 21. Mechanické vlastnosti slitiny AZ91HP, lité do písku

Stav	Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	A_{50} [%]	Z [%]	HB
Litý	1	-	152	1,8	2,1	0	71,7
	2	-	152	1,8	1,7	0	72,0
	3	-	153	2,2	2,2	0	72,7
	x	-	152,3	1,9	2,0	0	72,1
	s	-	0,6	0,2	0,3	0	0,8
Po TZ	1	155	258	10,8	11,5	5,8	68,8
	2	157	262	11,0	11,6	5,4	71,7
	3	156	259	11,7	11,9	6,5	68,2
	x	156,0	259,7	11,2	11,7	5,9	69,6
	s	1,0	2,1	0,5	0,2	0,6	1,8
ASTM	T6	110	234	-	3	-	-
[1]	T4	90	275	-	15	-	55
	T6	145	275	-	6	-	7

Tab. 22. Přehled způsobů manipulačního spojení

Poř.číslo sest. odlitků	Způsob spojení	Použitý postup spojení
1.	lepeno	Lep. Loc 326 s aktiv. 7649
2.	svařováno	
3.	lepeno	Lep. Loc. 648 bez aktivátoru
4.	lepeno	Lep. Loc. 648 bez aktivátoru
5.	svařováno	
6.	svařováno	

Tab. 23. Úroveň kvality odlitku z Mg-Al slitin

Rok	Procento ztráty v kg z celkového objemu výroby v %		Zaměření a charakter odlitku s vysokým % ztrát	Podíl vad sestupně reprezentující 70% objemu vad
	Externí	Interní		
1995	1,3	6,2	letecký prům., aut. prům., skříně, disky	4, 5, 6, 1
1996	0,29	8,77	aut. průmysl, kola, středy kol	1, 3, 2, 5, 6
1997	0,97	6,88	aut. průmysl, kola, středy kol	6, 5, 7
1998	3,10	8,87	aut. průmysl, kola, středy kol, disky	3, 5, 6, 1, 7
1999	2,13	5,52	aut. průmysl, disky, kola, středy kol	5, 6, 7, 2, 1, 4
2000	1,62	7,74	aut. průmysl, disky, kola, středy kol	6, 5, 7, 2, 1
2001				

Vady:

1- vady rozměrů, 2- zadrobeniny, 3- bubliny, 4- vměstky, 5- oxidy, 6- řediny včetně mikroředin, 7- popáleniny

Tab. 24. Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č. 1

Pořadí liti	Vyhodnocení vizuální kontroly	Teplota liti °C	Sledování opatření	Chem. složení / Tepelné zpracování
1	Stř. rozsah, 1 vtok vpravo	745	Odplynění do spodku formy 4 ks tablety Spec. T300 na velký kelimek, číslováno dle pořadí liti	Al 9,19
2	Bez vad	742		Zn 0,77
3	Stř. rozsah, 1 vtok vpravo+vlevo	740		Mn 0,19
4	Velký rozsah, 1 vtok vpravo + zadrobeno žebro i věnec	737		Si 0,008
5	Bez vad	734		Cu 0,005
6	Bez vad	731		Fe 0,008
7	Stř. rozsah, 1 vtok vlevo	728		Be 0,006
8	Velký rozsah, 1 vtok vpravo	726		Ni 0,006
9	Malý rozsah, 1 vtok vpravo	724		Ce 0,007
				TZ T4 3 hod - 375 °C 22 hod. - 415 °C

Tab. 25. Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č. 2

Pořadí liti	Vyhodnocení vizuální kontroly	Teplota liti °C	Sledování opatření	Chem. složení /
1	Malá vada, 1 vtok vpravo	740	a, postřík C	Al 8,74 Zn 0,81
2	Malá vada, 1 vtok vpravo	736	a, bez postříku	Mn 0,21 Si 0,017 Cu 0,001
3	Velká vada, 1 vtok vpravo a 4 vtok vlevo	732	b, postřík C	Fe 0,008 Be 0,0007 Ni 0,003
4	Malá vada, 1 vtok vpravo a 1 vtok vpravo	729	b, nebarveno	Pb 0,073

Tab. 26. Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č. 3

Číslo zkuš. odlitku	Pořadí liti	Vyhodnocení vizuální kontroly	Teplota liti °C	Sledované opatření	Chem.složení/ Tepelné zpracování
1	1	Stř. rozsah, 1 vtok vpravo	744	c	Al 9,49
2	4	Malý rozsah, 1 vtok vpravo a 4 vlevo	732	c	Zn 0,83 Mn 0,20
3	5	Malý rozsah, 1 vtok vpravo a vlevo	730	c	Si 0,019 Cu 0,001
4	6	Velký rozsah, 1 vtok vpravo i vlevo	727	d	Fe 0,011
5	7	Malý rozsah, 1 vtok vlevo	725	d	Be 0,0007 Ni 0,002
6	8	Stř. rozsah, 1 vtok vpravo i vlevo	722	bez postříku	T2-T4 aT6
7	9	Stř. rozsah, 1 vtok vpravo	720	bez postříku	Dvě varianty za účelem
-	2	6 klínových vzorků	740	-	hodnocení tep.
-	3	3 sady zkušebních tyčí	735	-	zprac. bez vlivu na sled. vadu

Tab. 27. Hodnocení odlitků středu kol - zkouška č. 6

Číslo zkuš. odlitku	Pořadí liti	Vyhodnocení vizuelní kontroly	Teplota liti	Sledo- vané opatření	Chem.složení/ Teplota zpracování
8	1	Bez vady	740	Změna vtok. soustavy	Al 8,70
9	2	Bez vady	738		Zn 0,74
10	3	Malý rozsah, 4 vtok vpravo	735		Mn 0,21
11	5	Malý rozsah, 4 vtok vpravo	728		Si 0,020
12	6	Bez vady	726		Cu < 0,001
13	7	Bez vady	724		Fe 0,007
14	8	Malý rozsah, první vtok vpravo i vlevo	722		Be 0,0007
15	9	Bez vady	720		Ni 0,004
-	4	2x sada trhaček	730		T2-T4 ve dvou variantách

Tab. 28. Chemický rozbor slitiny Mg-Al s přísadou Be

č. tavby	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Be
661/6/1	8,45	0,71	0,20	0,022	0,007	0,0003
661/6/2	8,48	0,70	0,22	0,022	0,008	0,0026
661/6/3	8,43	0,70	0,22	0,021	0,008	0,0022
Zkuš. tyč	8,84	0,64	0,24	0,022	0,010	0,0022
663/8/1	9,17	0,79	0,20	0,046	0,009	0,0003
663/8/2	9,29	0,80	0,20	0,047	0,012	0,0012
663/8/3	9,24	0,78	0,20	0,047	0,011	0,0012
Zkuš. tyč	8,75	0,71	0,21	0,044	0,011	0,0012
667/7/1	9,11	0,77	0,20	0,026	0,009	0,0003
667/7/2	9,34	0,76	0,20	0,026	0,011	0,0007
667/7/3	9,27	0,75	0,20	0,027	0,011	0,0007

Tab. 29. Mechanické hodnoty slitin Mg-Al s přísadou Be

č. tavby	Rm (MPa)	Průměrná hodnota	Tažnost (%)	Průměrná hodnota
661/6	162		4,1	
	162		5,5	
	166		5,0	
	168	162,7	6,1	5,06
	162		4,6	
	158		5,0	
	161		5,1	
663/8	230		7,6	
	225		9,5	
	222		6,8	
	215	220,4	6,5	7,7
	218		5,8	
	218		9,5	
	215		8,5	
667/7	223		9,0	
	241		10,6	
	245		11,5	
	253	238,6	10,8	9,9
	241		11,0	
	234		7,8	
	233		8,3	

Tab. 30. Hodnoty meze kluzu $R_{p0.2}$ (MPa)

Poř. číslo zkoušky	A	B	C	D	E	F	G
	855/7	855/9	861/8	861/10	-	-	-
1	106	96	106	106	111	92	110
2	106	93	98	98	106	103	106
3	107	98	98	96	106	93	113
4	106	96	94	102	103	103	113
5	106	98	102	106	-	-	-
6	109	98	102	108	-	-	-
7	-	98	108	98	-	-	-
8	106	106	98	106	-	-	-
Ø	106	98	101	102	106	98	110

Tab. 31. Hodnoty pevnosti v tahu R_m (MPa)

Poř. číslo zkoušky	A	B	C	D	E	F	G
	855/7	855/9	861/8	861/10	-	-	-
1	245	249	252	245	141	233	157
2	226 ¹⁾	245	249	249	151	226	157
3	249	245	249	245	143	223	164
4	245	245	252	249	153	226	161
5	249	252	252	249	-	-	-
6	249	245	245	241	-	-	-
7	-	245	241	245	-	-	-
8	245	249	241	249	-	-	-
Ø	244	247	248	246	147	227	160
Ø	247 ²⁾						

Legenda :

1) zadržená trhací tyč

2) průměr tažnosti bez zadržené tyče

Tab. 32. Hodnoty tažnosti A5 (%)

Poř. číslo zkoušky	A	B	C	D	E	F	G
	855/7	855/9	861/8	861/10	-	-	-
1	11,5	12,0	12,5	11,3	2,1	10,6	2,6
2	8,6 ¹⁾	11,6	11,1	11,5	2,6	8,0	3,6
3	11,3	11,6	12,6	11,1	2,3	10,3	4,0
4	11,6	12,6	12,0	11,8	1,8	8,5	3,8
5	11,3	11,8	11,8	12,1	-	-	-
6	12,1	11,5	11,1	11,6	-	-	-
7	-	11,0	11,3	11,5	-	-	-
8	12,0	11,6	10,6	11,8	-	-	-
Ø	11,2	11,8	11,6	11,6	2,2	9,4	3,5
Ø	11,6 ²⁾						

Legenda :

1) zadrobená trhací tyč

2) průměr tažností bez zadrobené tyče

Tab. 33. Hodnoty tvrdosti HBS 2,5/31,25

Měření bylo provedeno jen na vzorcích, ze kterých byl připraven metalografický výbrus.

Poř. číslo zkoušky	A	B	C	D	E	F	G
	855/7	855/9	861/8	861/10	-	-	-
1	54,8	56,1	53,4	56,1	-	-	-
4	56,1	54,8	54,8	53,4	-	-	-
8	56,2	54,8	56,1	56,1	56,1	54,8	-
Ø	55,7	55,2	54,8	55,2	56,1	54,8	-

Tab. 34. Vztah mezi velikostí zrna a pevností v tahu

Počet taveb	Počet tyčí	Velikost zrna G	Pevnost v tahu R _m (MPa)	Odlévání materiál odlitků	Typy odlitků
6	18	5	270,1	ČSN 42 4911	motokárová kola
7	21	4/5	263,2	ČSN 42 4911, AZ 91	motokárová kola, středy kol
46	138	4	258,3	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, motokárová kola, středy kol, ostatní sortiment
13	39	3/4	252,0	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, motokárová kola, středy kol, ostatní sortiment
25	75	3	251,0	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, motokárová kola, středy kol, ostatní sortiment
16	48	2/3	248,0	ČSN 42 4911 , AZ 91, AZ 63	aut. kola, středy kol, ostatní sortiment
9	27	2	243,0	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, středy kol, ostatní sortiment
12	36	1	237,4	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, středy kol, ostatní sortiment
8	24	0	225,0	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, motokárová kola
21	63	<0	212,0	ČSN 42 4911, AZ 91	aut. kola, motokárová kola, středy kol, ostatní sortiment

Tab. 35. Mechanické zkoušky odlitků klínů - č. 1

Tavba	Měřená veličina	Síla 10 mm	Síla 20 mm	Síla 40 mm
302-6/3	Rm (MPa)	263,5	255,0	228,5
302-6/5	“	250,0	256,0	219,5
302-6/3	A5 (%)	13,8	11,6	8,9
302-6/5	“	12,8	13,0	12,1
302-6/3	Ráz. (J)	28,0	21,5	14,0
302-6/5	“	19,5	19,5	14,0

Tab. 36. Chemické složení zkušebních tyčí

	1	2	3	4	5	6
Al	7,61	7,52	7,57	7,35	7,45	7,50
Zn	0,54	0,56	0,58	0,53	0,57	0,57
Mn	0,21	0,23	0,22	0,22	0,20	0,24
Si	0,023	0,052	0,053	0,021	0,058	0,062
Cu	0,007	0,014	0,015	0,007	0,018	0,017
Fe	0,020	0,016	0,015	0,023	0,015	0,015
Be	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
Ti	0	0	0	0	0	0
Zr	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0,009	0,008	0	0,016	0,013

Tab. 37. Mechanické zkoušky odlitků klínů - č. 2

Označení vzorku	4.1	4.2	4.3
Pevnost v tahu	1-Rm (MPa)	215	233
	2-Rm (MPa)	215	241
	Ø-Rm (MPa)	215	237
Tažnost	1-A5 (%)	7,3	9,7
	2-A5 (%)	10,0	8,7
	Ø-A5 (%)	8,65	9,2

Tab. 38. Tepelné zpracování klinů z Mg slitin

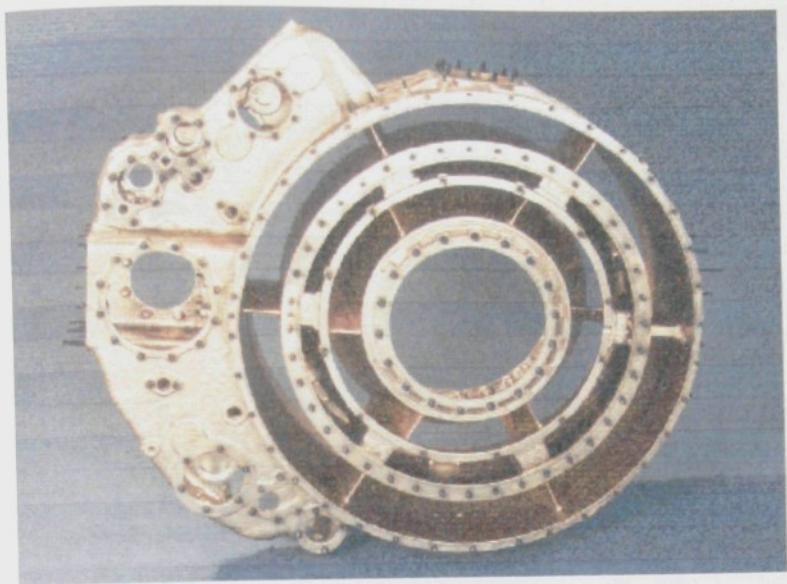
Tavba	Číslo TZ	Tloušťka [mm]	Pevnost Rm [Mpa]		Ráz [J]	Tažnost [%]		Velikost zrna	Obsah perlitu	Obsah Al chem. [%]	Režim TZ °C/hod.	Pozn.
254 2	84	10	268	276	25	12,0	12,0	4/5	1	9,1	360/3 415/22	
		20	262	273	19	12,3	12,0	3/4	2			
		40							5			
		litá tyč	271	264	-	14,3	12,5	3/4	-			
		litá tyč	260	-	-	14,5	-	-	-			
254 2	85	10	275	262	24	11,6	12,6	4	1	9,1	375/3 420/18	
		20	255	265	47	11,3	13,6	3/4	2			
		40	209	-	6	-	-	-	5			
		litá tyč	275	264	-	15,5	12,6	4	-			
		litá tyč	264	-	-	13,1	-	-	-			
259 6	87	10	263	268	24	13,3	12,3	-	1	8,7	350/2 375/6 415/15	
		20	273	258	18	10,3	11,6	-	2			
		40							5			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
259 6	88	10	262	265	21	10,3	13,3	-	2	8,7	350/2 385/7 415/18	
		20	268	252	-	11,3	10,0	-	4			
		40			-	-	-	-	5			
		litá tyč	256	252	-	12,3	10,3	-	-			
		litá tyč	267	-	-	13,3	-	-	-			
259 8	87	10	262	262	59	13,0	13,0	5/4	1	8,4	350/2 375/6 415/15	
		20	258	252	26	12,3	11,3	4	2			
		40	169	-	18	4,6	-	-	5			
		litá tyč	245	267	16	12,0	13,5	4	-			
		litá tyč	252	-	-	11,6	-	-	-			
259 8	88	10	262	268	30	12,3	13,6	4/5	0	8,4	350/2 385/7 415/18	
		20	262	253	24	13,3	14,6	4	0			
		40	215	-	15	6,3	-	-	5			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
259 8	90	10	270	268	29	14,0	14,6	-	0	8,4	350/2 380/7 415/12	
		20	258	255	24	12,3	12,0	-	0			
		40	185	230	15	7,0	8,3	-	5			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
265 3	90	10	200	275	16	9,6	11,3	-	3	8,7	350/2 380/7 415/12	
		20	257	268	11	9,6	11,3	-	5			
		40	205	172	4	6,0	1,3	-	6			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
		litá tyč	-	-	-	-	-	-	-			
kolo 3	84	-	-	-	19	-	-	-	1	8,3	360/3	
kolo 4	84	-	-	-	22	-	-	-	0	8,4	415/22	

Tab. 39. Zkoušky kol pro BBS - statické

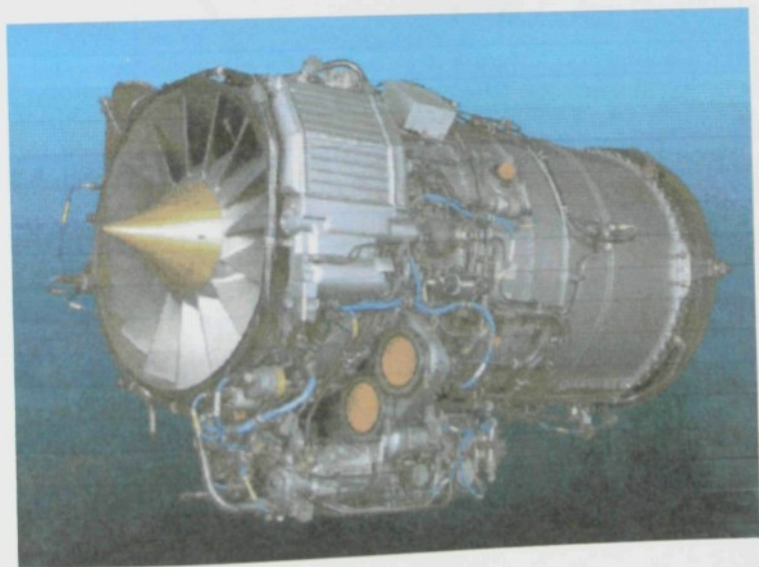
Varianta	Číslo TZ	Režim TZ	PČ kola tavba	Žebro	Ráfek	Rm [Mpa]	A5 [%]	Ráz [J]	Pozn.
A	95	350/3,5	14	I	I	212	6,0	8	
						252	12,0	17	
		380/4 410/18	269/9	I	I	255	11,6	17	
						265	12,3	22	
B	94	350/3,5	10	I	I	245	9,6	11	
						252	11,6	23	
		385/7 415/18	269/9	I	I	258	12,6	18	
						258	12,0	23	
C	85	375/3	5	I	I	166	4,6	6	
						250	11,0	14	
		420/18	254/2	I	I	245	7,0	13	
						265	12,0	21	
D	84 96	360/3	6	I	I	215	3,3	4	
						253	4,6	6	
		415/22 200/8	254/2	I	I	258	4,0	7	
						268	4,6	7	

Tab. 40. - Zkoušky únavy středů kol

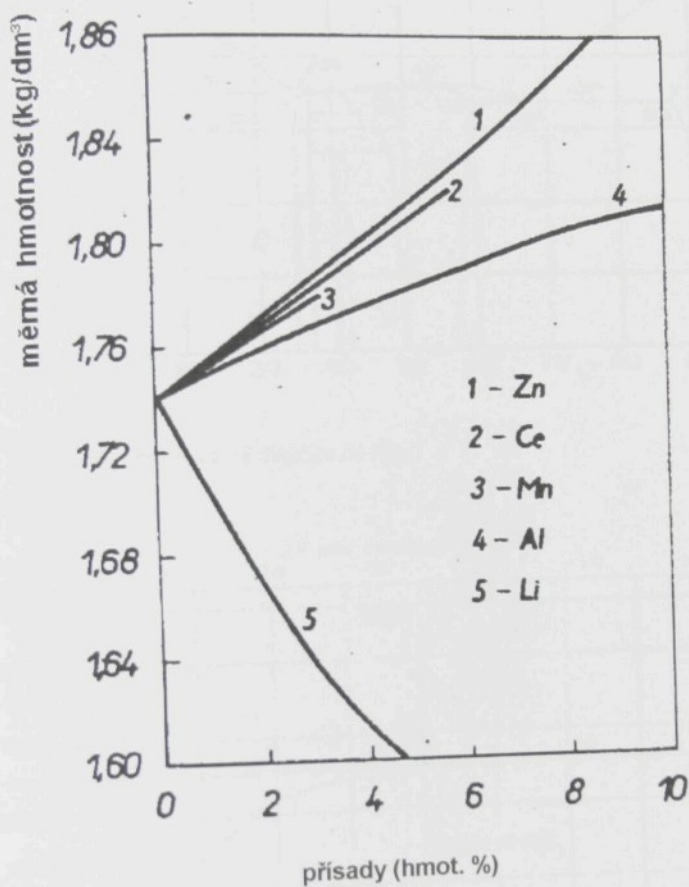
Č. kola	Varianta	Počet cyklů do trhliny v prvním žeburu	Počet cyklů do destrukce
13	A	370 000	1 370 000
15	A	1 100 000	1 950 000
8	B	410 000	950 000
9	B	850 000	1 950 000
2	C	1 100 000	1 670 000
7	C	350 000	1 380 000
1	D	320 000	680 000
4	D	210 000	1 060 000



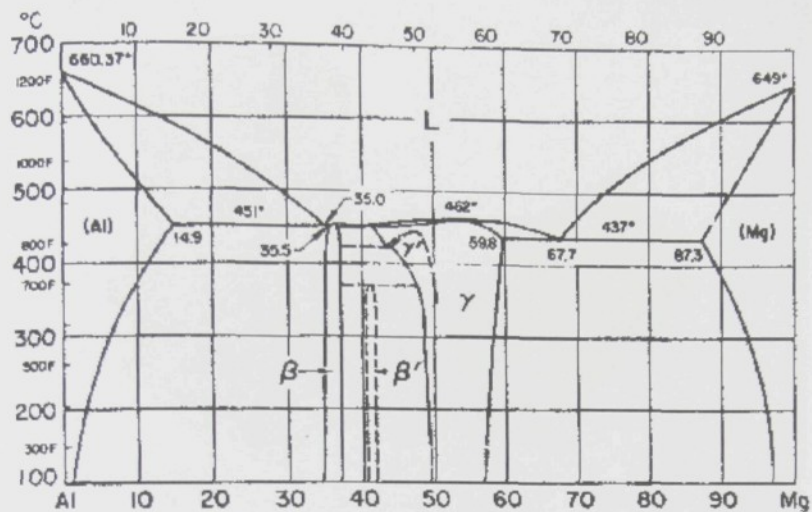
Obr. 1. - Odlitek skříně pohonu leteckého motoru DV2 TURBOFAN



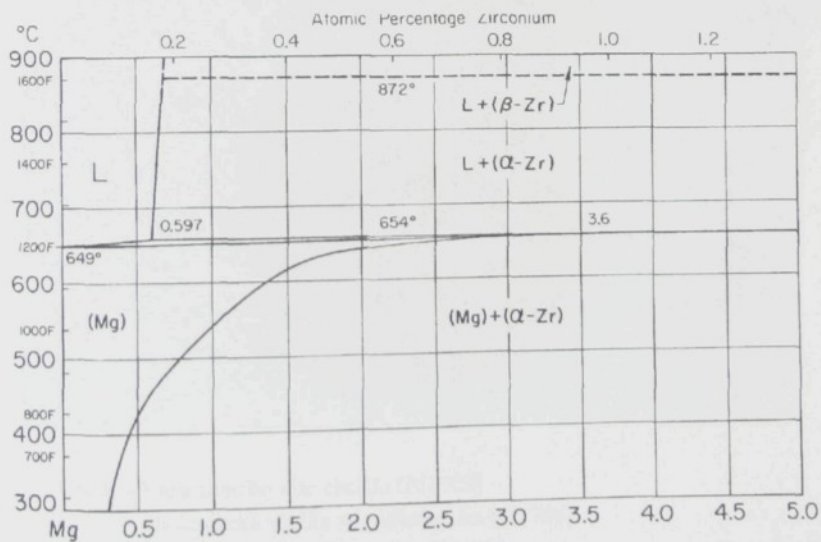
Obr. 2. - Letecký motor DV2 TURBOFAN



Obr. 3. - Vliv přísadových prvků na měrnou hmotnost



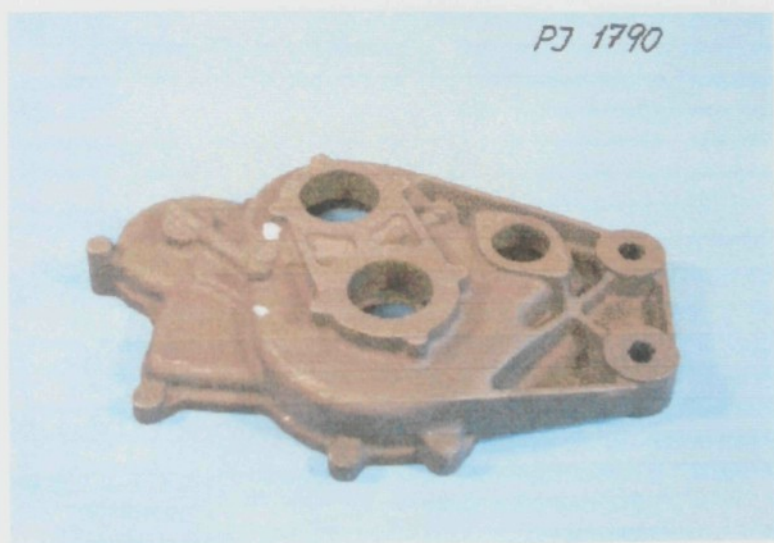
Obr. 4. - Rovnovážný diagram Al-Mg



Obr. 5. - Rovnovážný diagram Mg-Zr



Obr. 6. - Vana zadního diferenciálu (PJ1003)
Hydraulická vložka stř. diferenciálu (PJ1748)
Hl. skříň zadního diferenciálu (PJ1001)



Obr. 7. - Hlavní skříň (PJ1787)
Boční víko převodovky (PJ1790)

PJ 1788



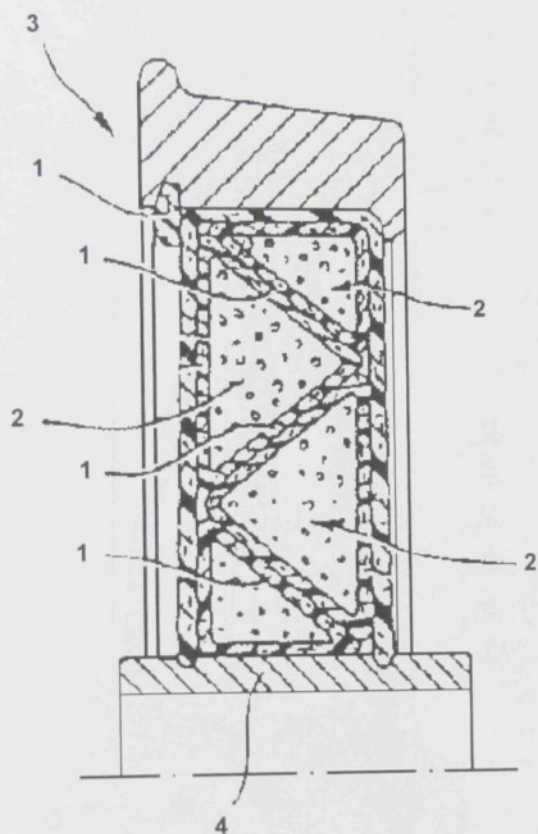
5.

PJ 1002

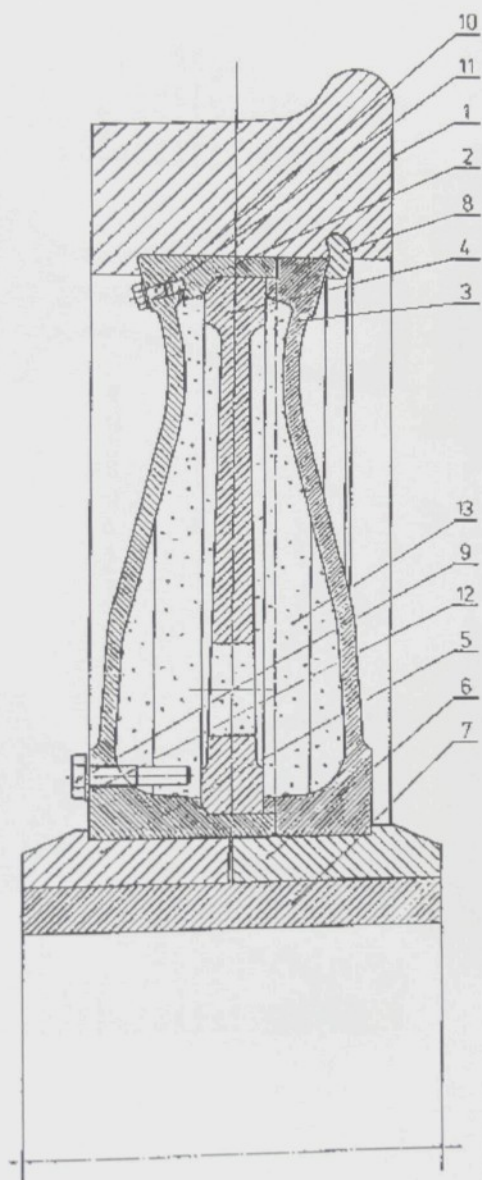


Obr. 8. - Kryt převodu (PJ1788)

Boční víko zadního diferenciálu (PJ1002)



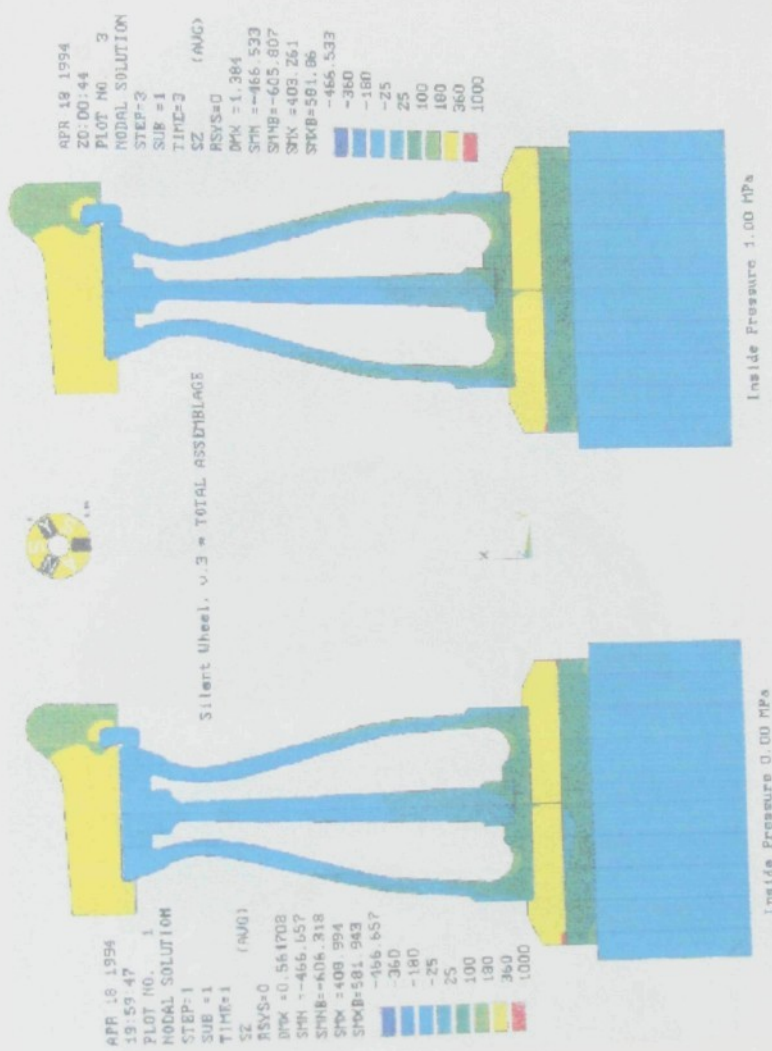
Obr. 9. Koncepce nového typu kola - laminátová segmentová soustava



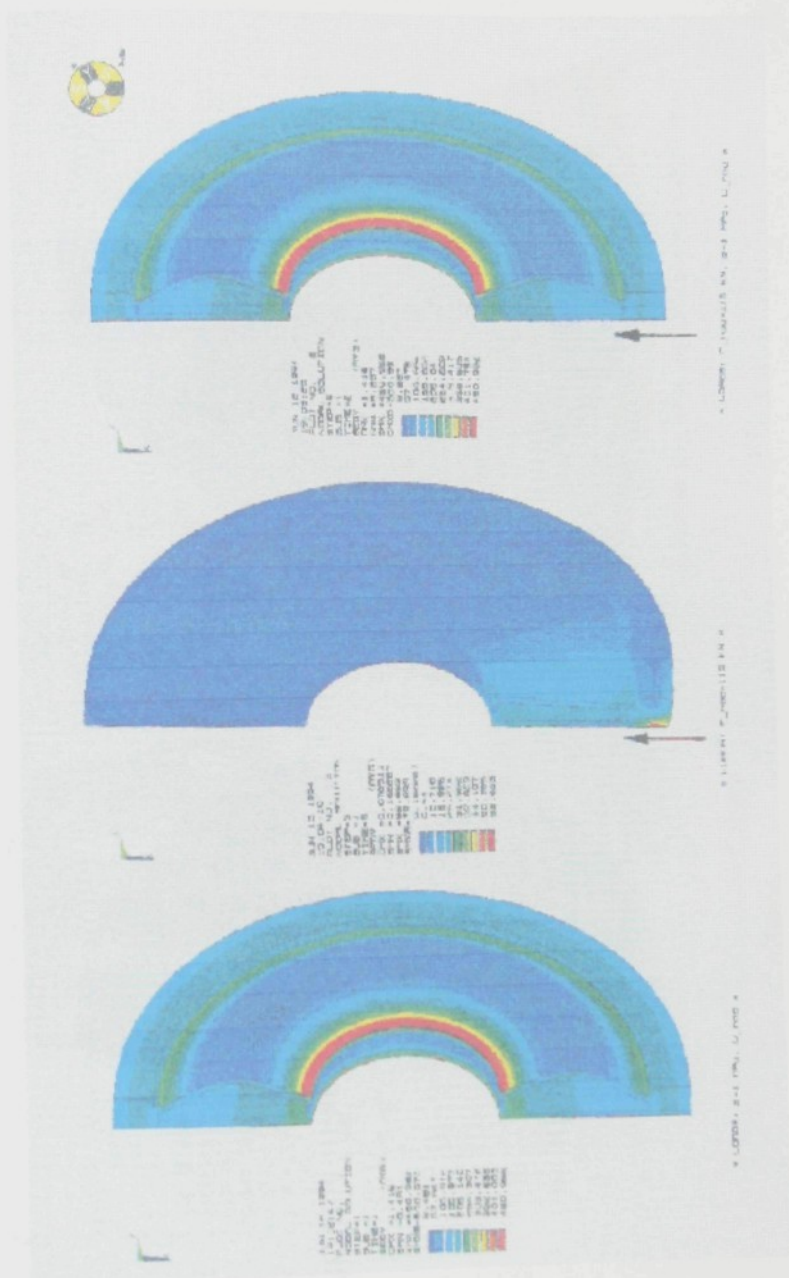
Obr. 10. - Sestava nového typu železničního kola z Mg-Al slitiny



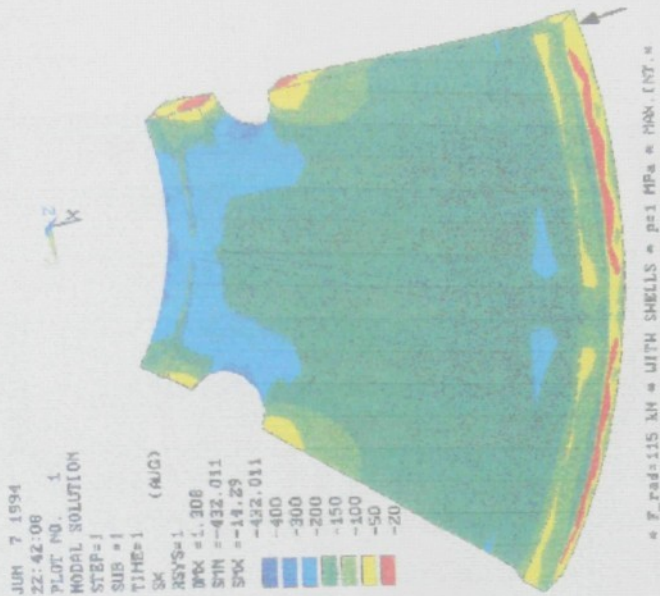
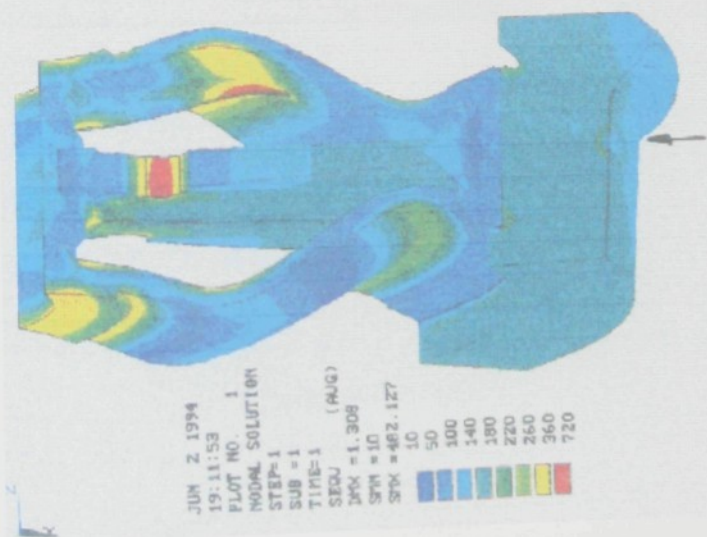
Obr. 11. - Rozložení radiálního napětí (σ_r)



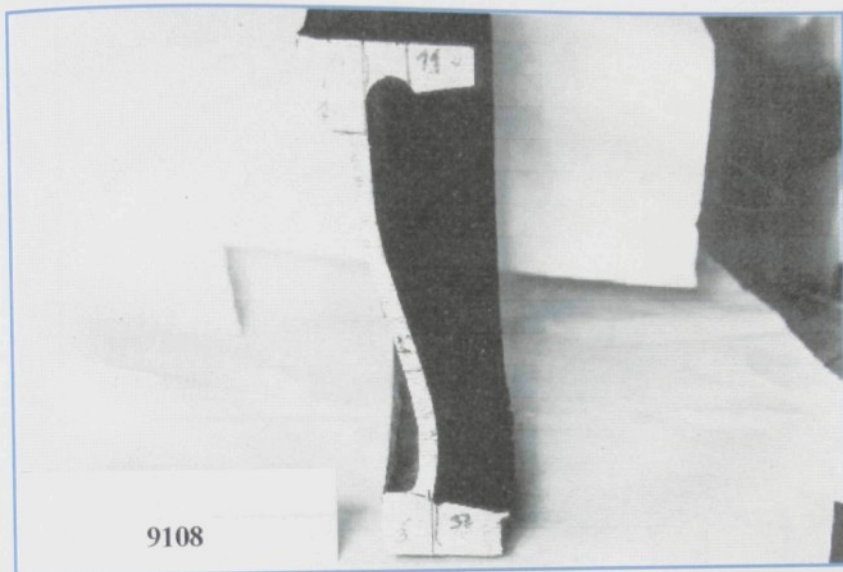
Obr. 12. - Rozložení obvodového napětí (σ_z)



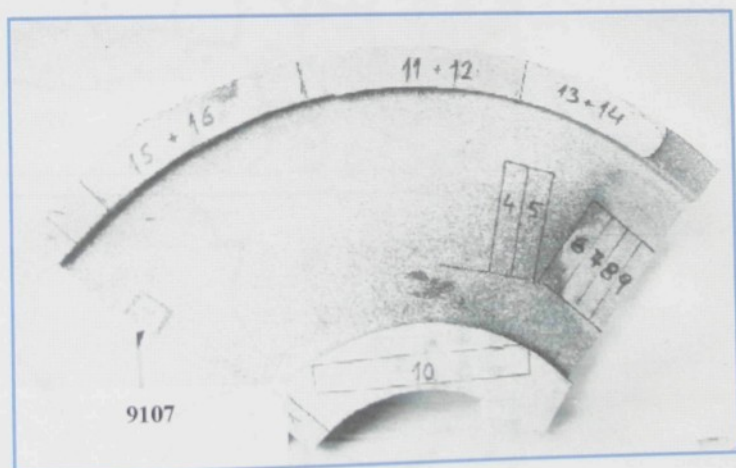
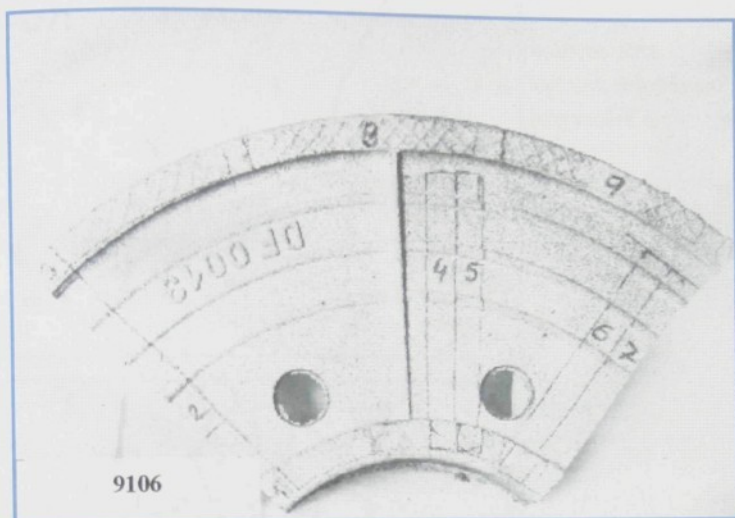
Obr. 13. - Znáznornění napjatosti vzniklé v kole za různých podmínek



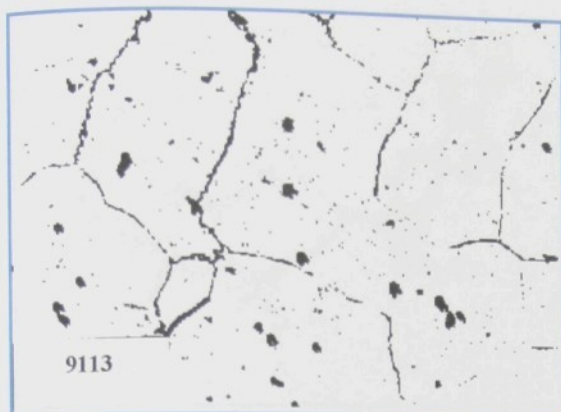
Obr. 14. - Vliv radiální kolové síly na napjatost v segmentu kola



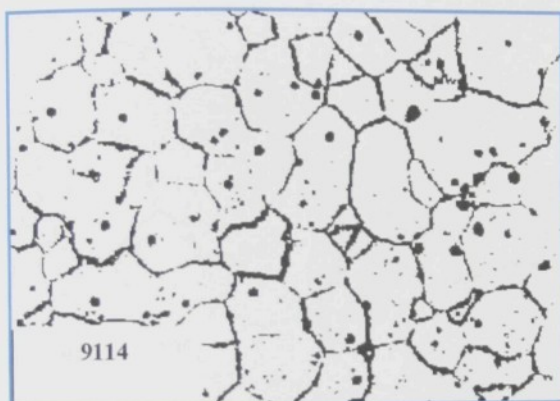
Obr. 15. - Postup řezů z odlitku železničního kola pro zkušební tyče na tahovou zkoušku



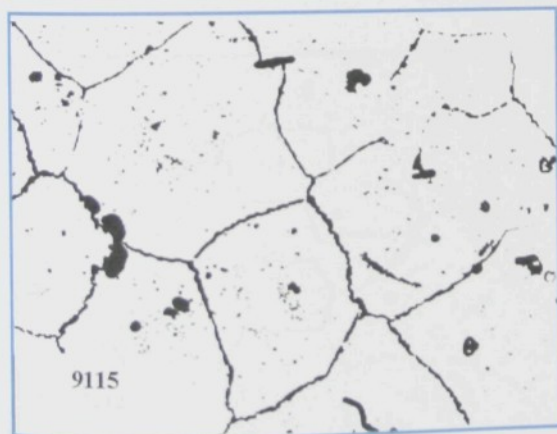
Obr. 16. - Postup řezů z odlitku železničního kola
pro zkušební tyče na tahovou zkoušku



zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α

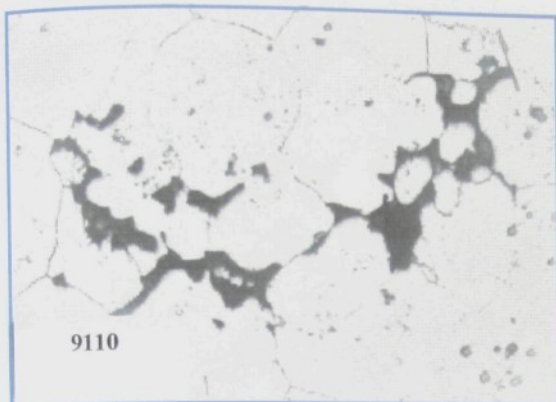


zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α

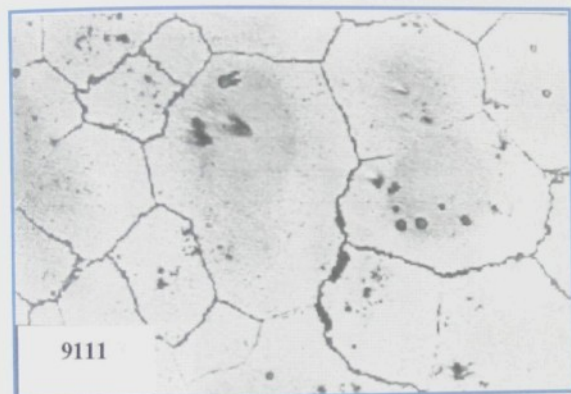


zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α

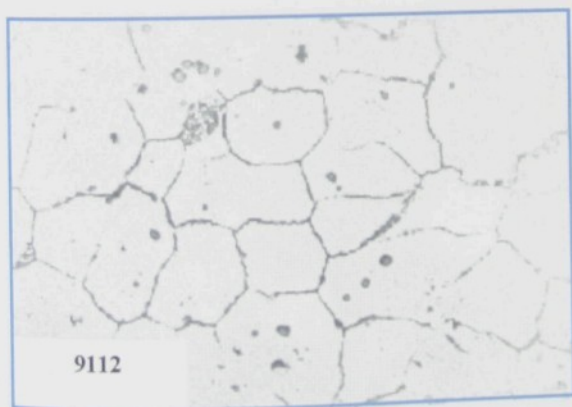
Obr. 17. - Struktury z metalografických výbrusů kol DF 0011



zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α a řediny po
hranicích zrn

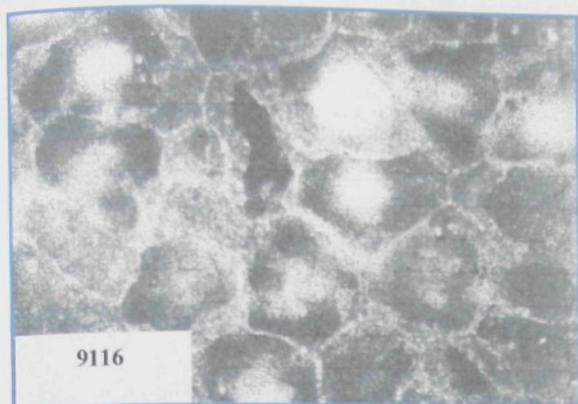


zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α



zvětšeno 100x
lept. kys. šťavelovou
tuhý roztok α

Obr. 18. - Struktura z metalografických výbrusů z kol DF 0013



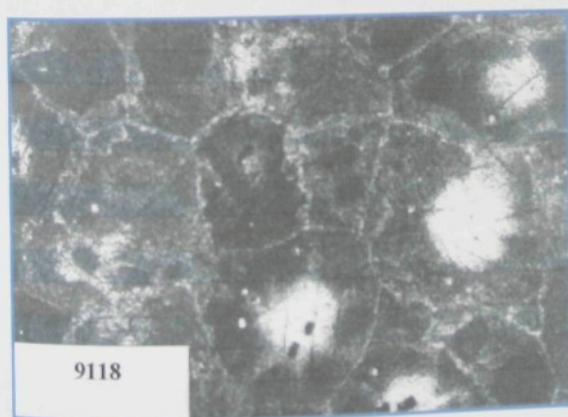
9116

zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelová



9117

zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelová



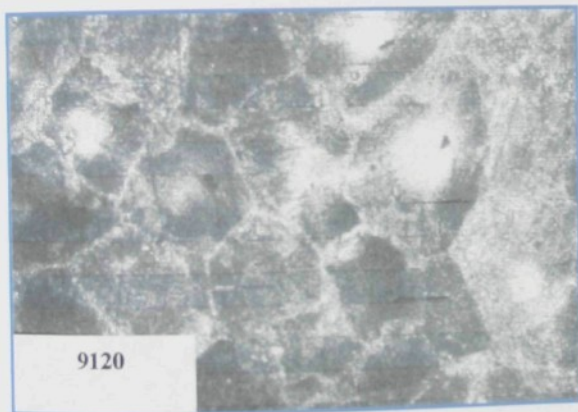
9118

zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelová

Obr. 19. - Struktura po tepelném zpracování T6 kol DF0013

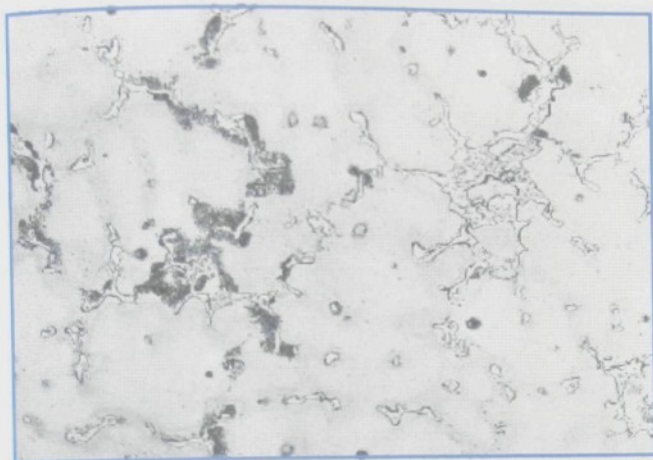


zvětšeno 100x - TZ T6
leptáno kys. šťavelová

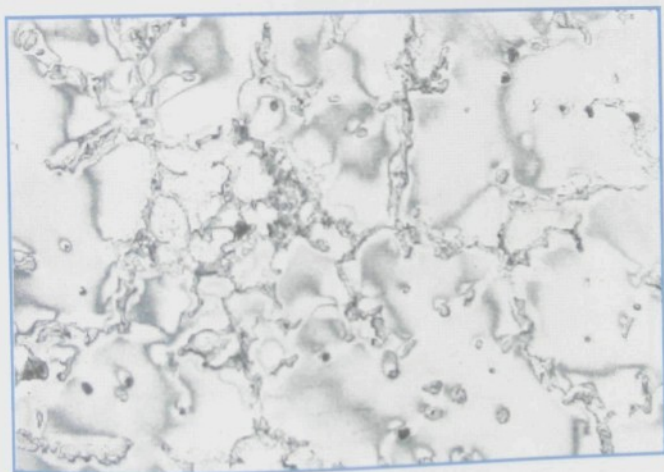


zvětšeno 100x - TZ T6
leptáno kys. šťavelová

Obr. 20. - Struktura po tepelném zpracování T6 kola DF 001

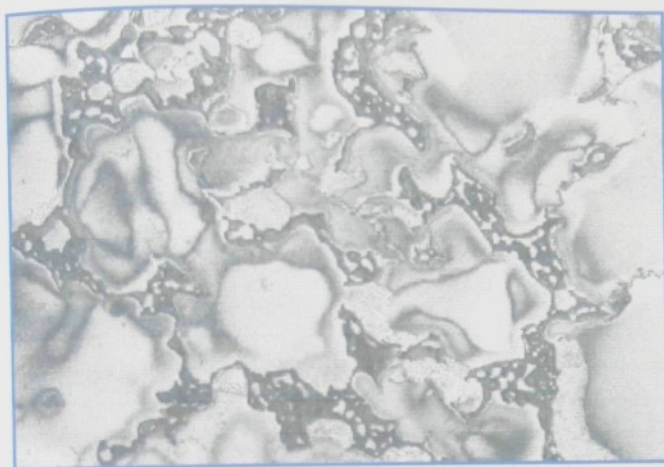


zvětšeno 250x
leptáno glykolem

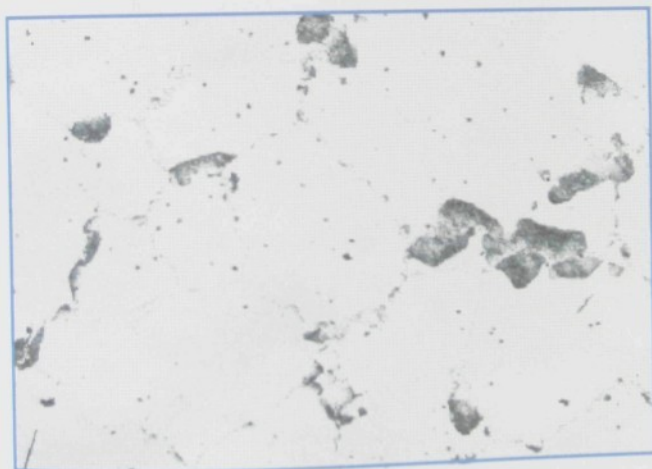


zvětšeno 250x
leptáno HF

Obr. 21. - Mikrostruktura v litém stavu

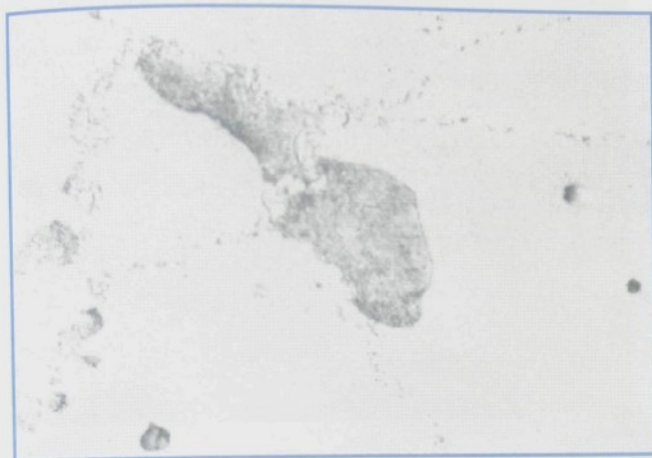


zvětšeno 500x
litý stav
leptáno HF

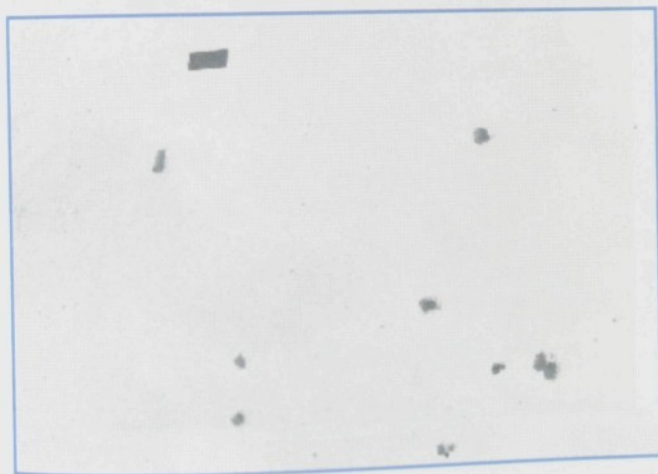


zvětšeno 100x
tep. zpracování T4
leptáno glykolem

Obr. 22. - Mikrostruktura v litém stavu a po tep. zpracování T4

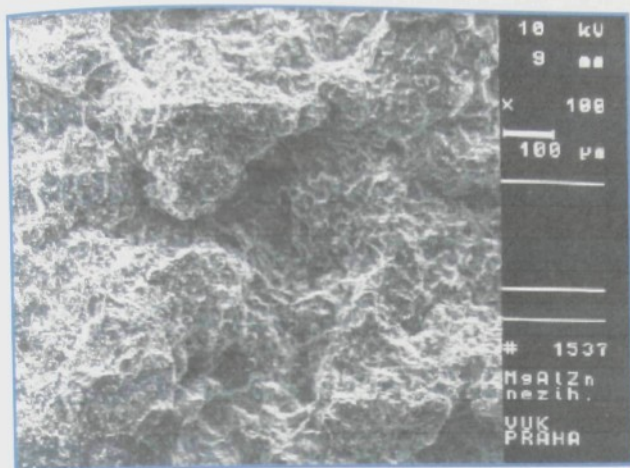


zvětšeno 500x
leptáno glykolem
mikrostruktury

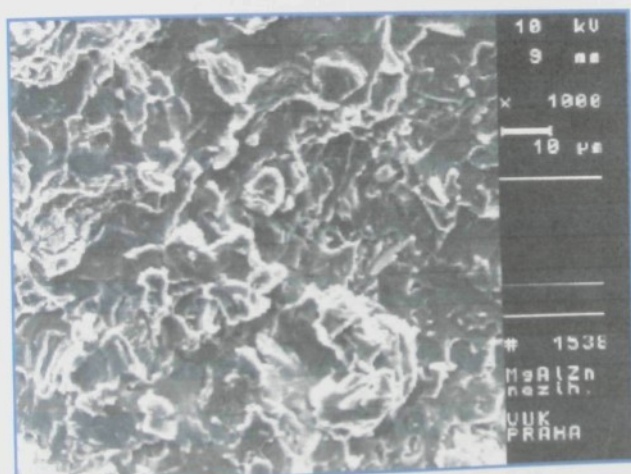


zvětšeno 100x
leptáno glykolem
drobné částice
uvnitř zrn

Obr. 23. - Mikrostruktura po tepelném zpracování T4

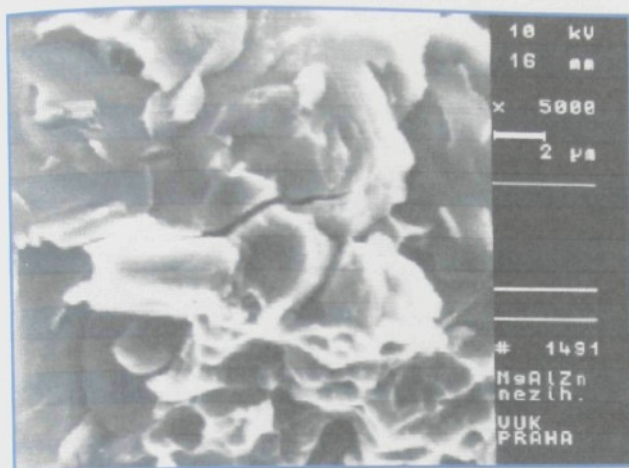


zvětšeno 100x
litý stav
lom po hranicích zrn

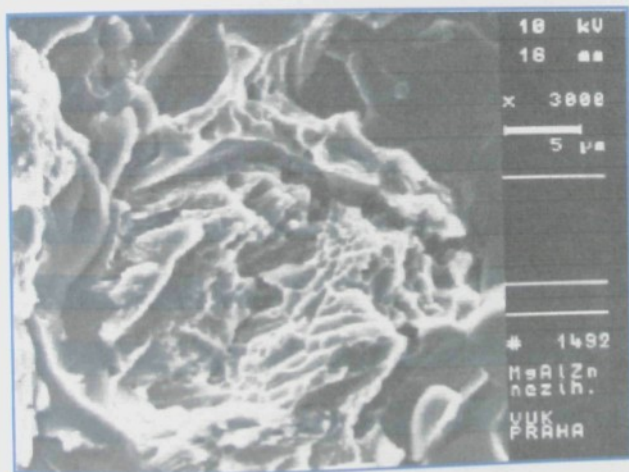


zvětšeno 1000x
litý stav
štěpný lom přes fáze
 $Mg_{17}Al_{12}$

Obr. 24. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu

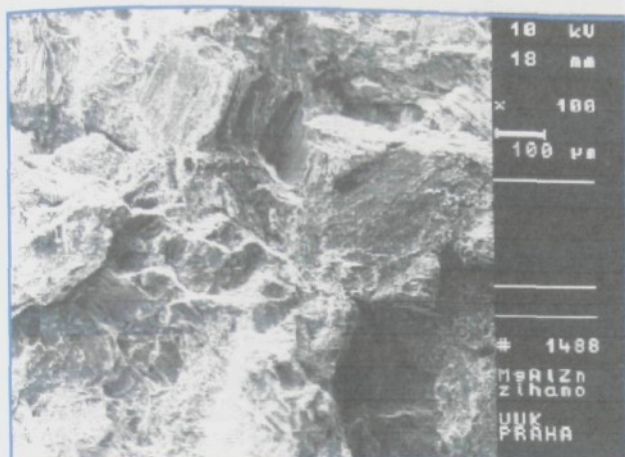


zvětšeno 5000x
štěpný lom fází
 $Mg_{17}Al_{12}$
litý stav

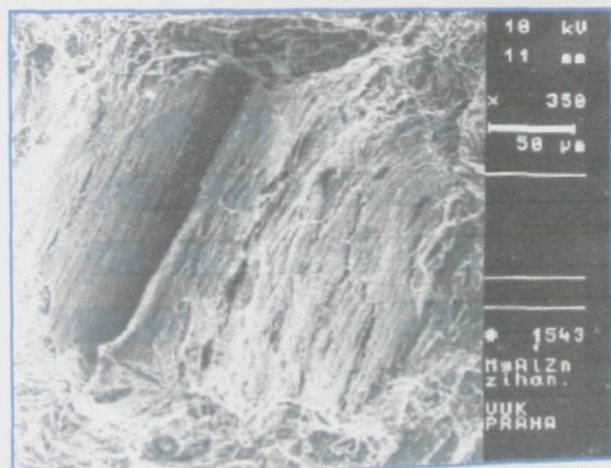


zvětšeno 3000x
litý stav
tvárný lom s
lamelární strukturou

Obr. 25. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu

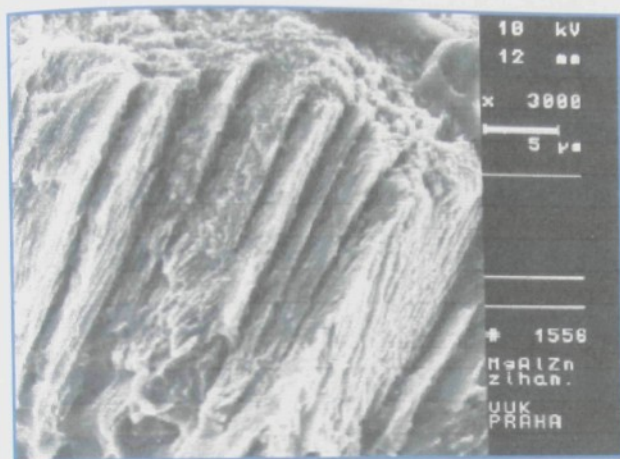


zvětšeno 100x
stav T4
transkrystalický a
interkrystalický lom

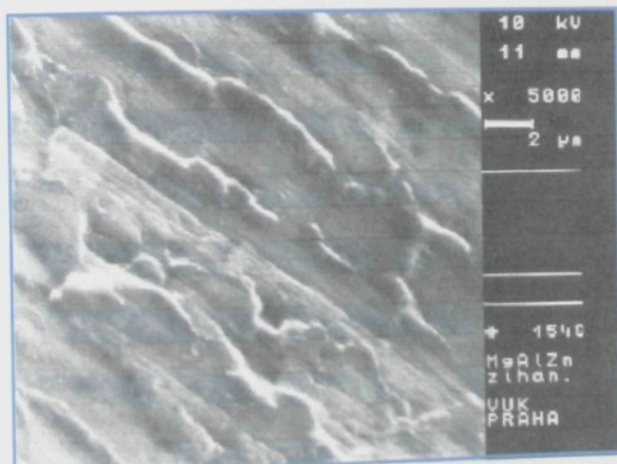


zvětšeno 350x
stav T4
rovinné
transkrystalické
fazety

Obr. 26. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu

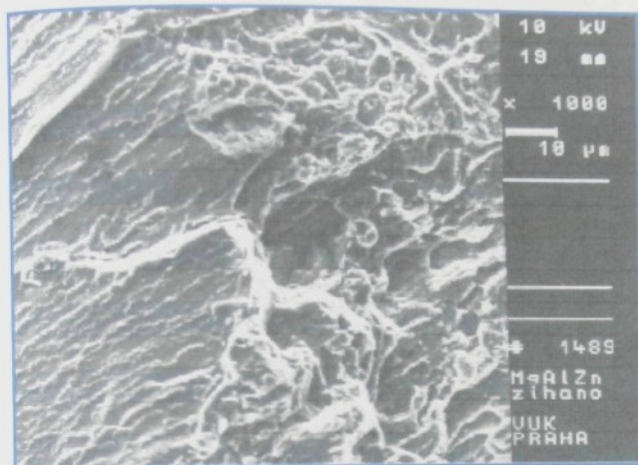


zvětšeno 3000x
stav T4
fazeta s normálou
kolmou k působící
síle

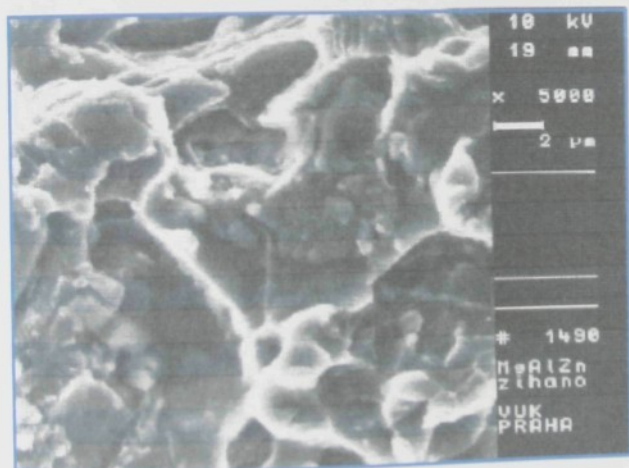


zvětšeno 5000x
stav po T4
rovinné fazety
transkrystalického
lomu

Obr. 27. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu

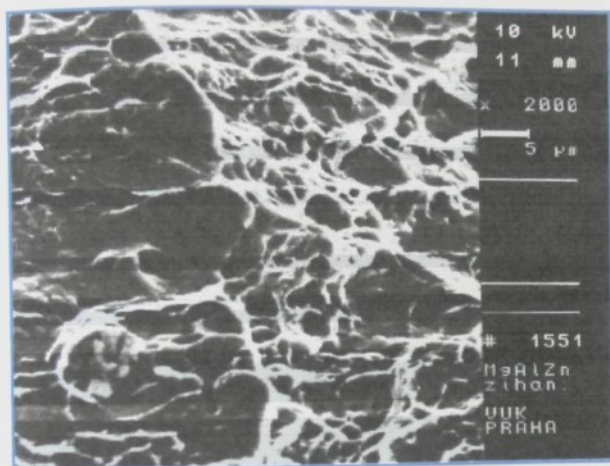


zvětšeno 1000x
stav T4
přechod mezi trans.
a interkrystalickým
lomem



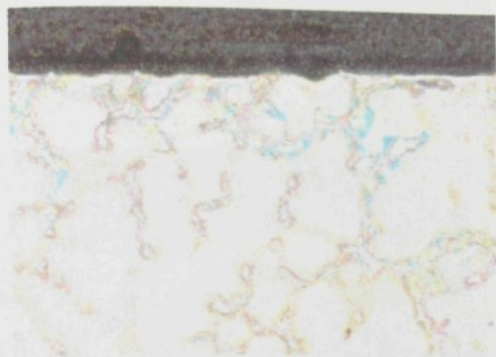
zvětšeno 5000x
stav T4
tvárné jamky
interkrystalického
lomu

Obr. 28. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu



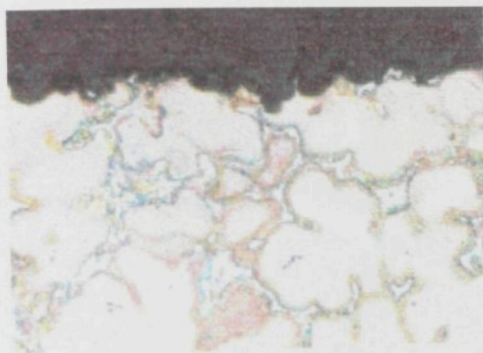
zvětšeno 2000x
stav T4
tvárný lom s jamkami

Obr. 29. - Lomové plochy zkušebních tyčí z rozboru na elektronovém mikroskopu



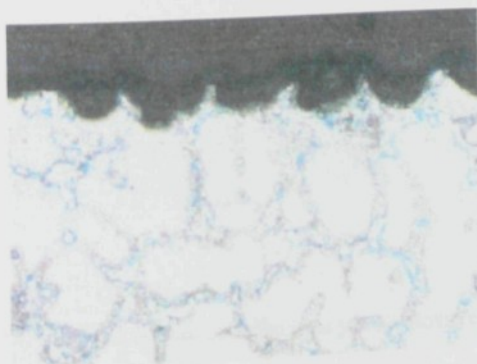
zvětšeno 50x
lept. 0,5% Nitalém

Obr. 30. Profil povrchu AZ63HP po 14 dnech v prostředí SO₂



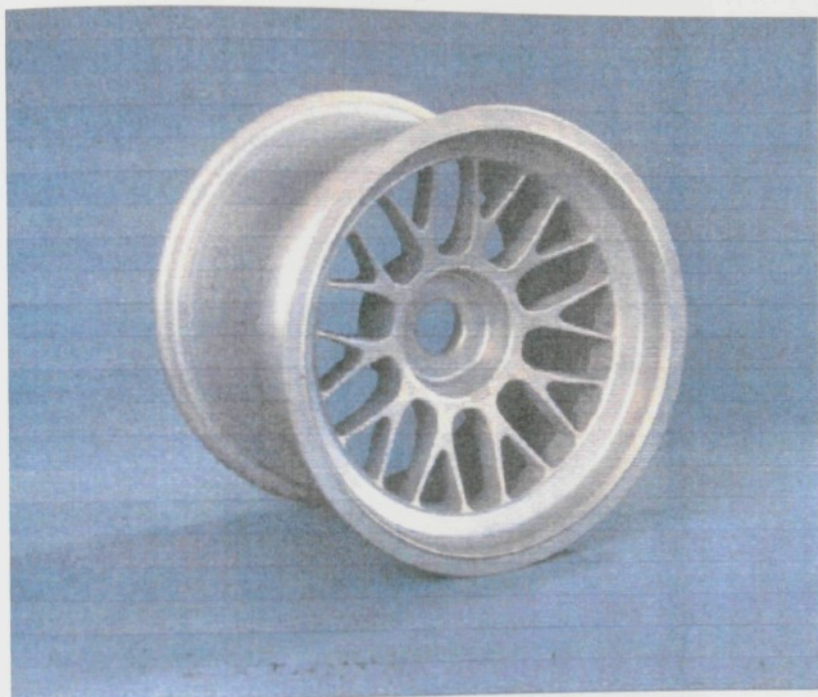
zvětšeno 50x
lept. 0,5% Nitalém

Obr. 31. Profil povrchu AZ63HP po 28 dnech v prostředí SO₂

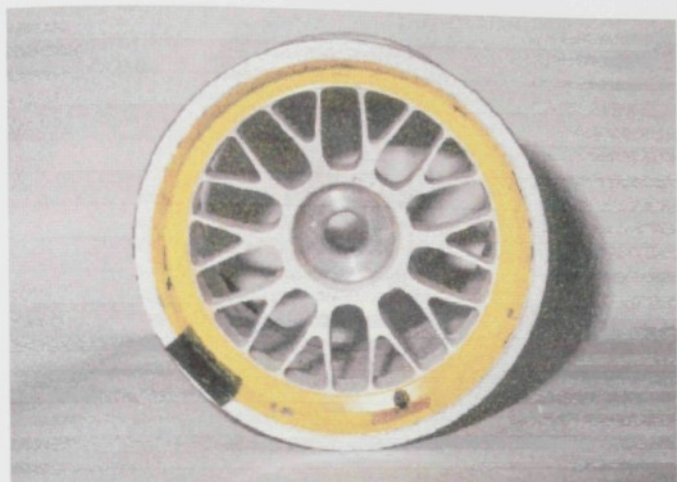


zvětšeno 50x
lept. 0,5% Nitalém

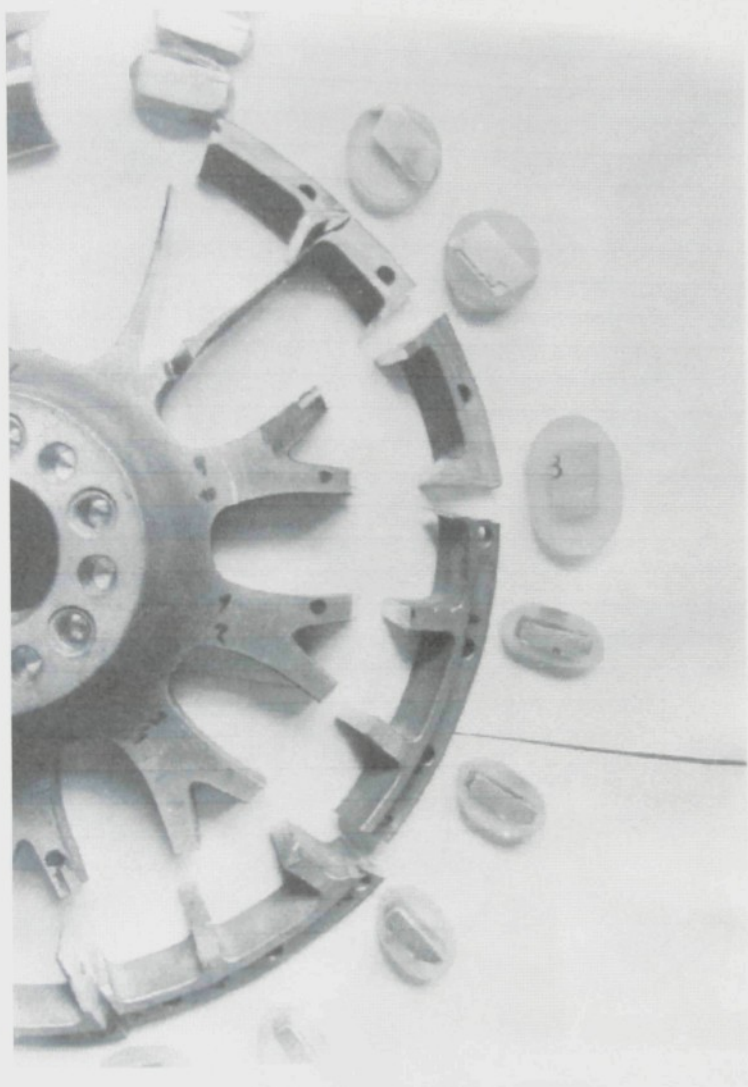
Obr. 32. Profil povrchu AZ63HP po 42 dnech v prostředí SO₂



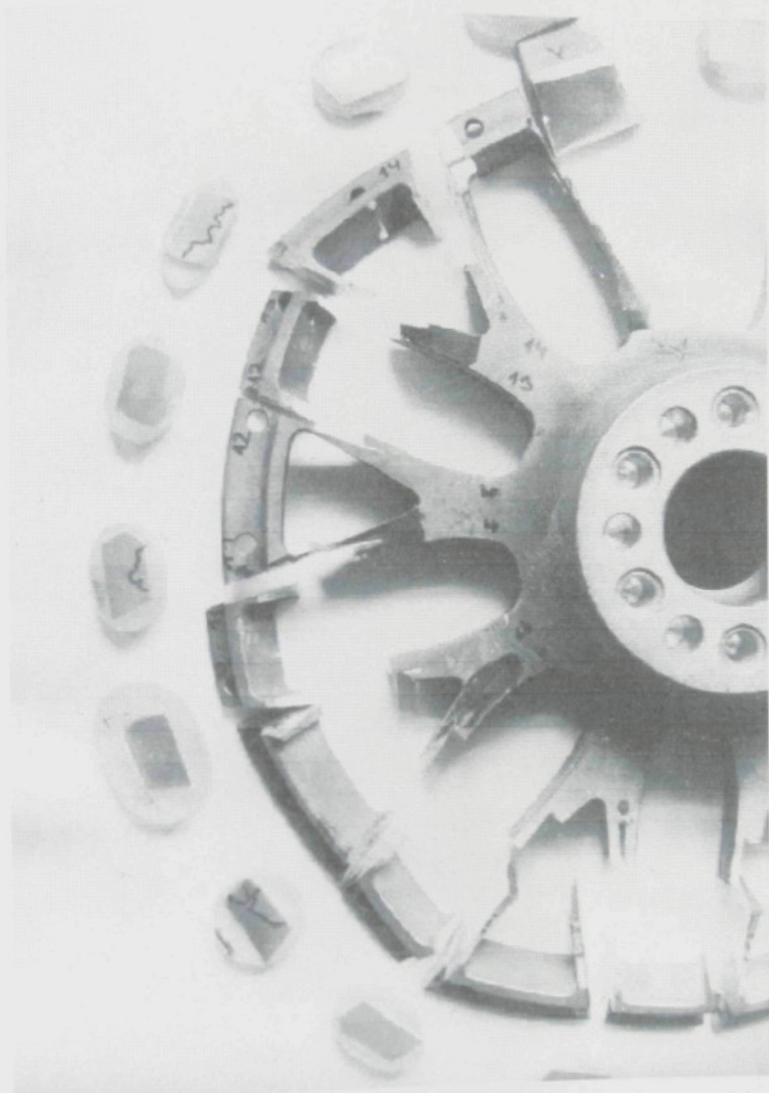
obr. 33. - Odlitek automobilového kola pro sportovní účely



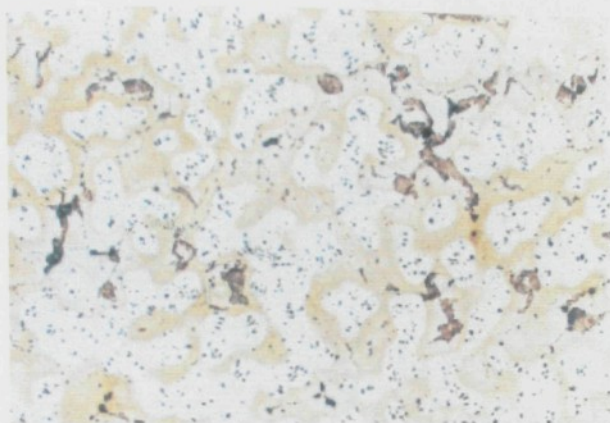
Obr. 34. - Netěsnosti na obvodě ráfku automobilového kola



Obr. 35. - Praskliny středů kol v místě vyústění žebra do ráfku



Obr. 36. - Praskliny středů kol v místě vyústění žebra do ráfku

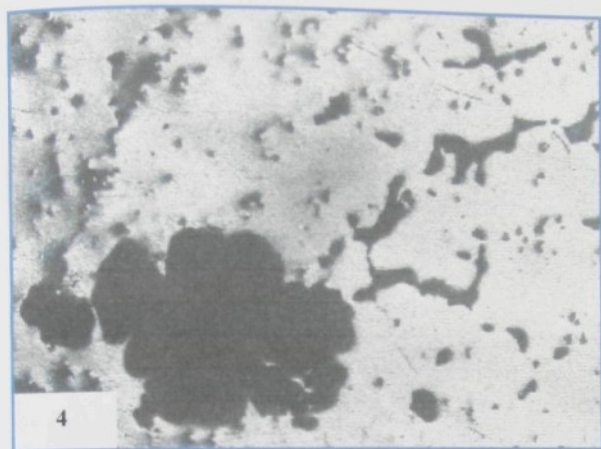


zvětšeno 25x
č. 1

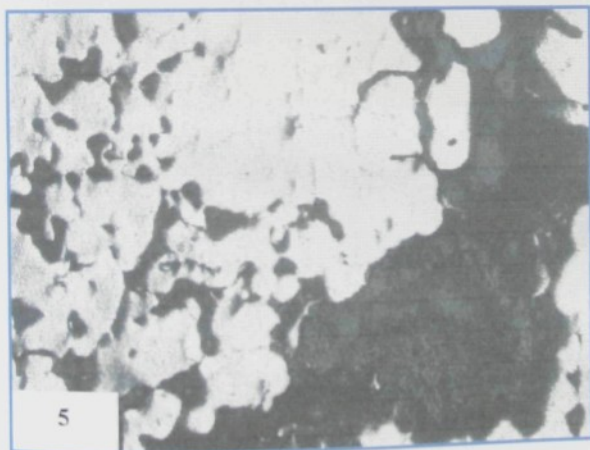


zvětšeno 100x
č. 2

Obr. 37. - Mikroporezita od naplynění v průběhu tuhnutí



zvětšeno 50x
leptáno kys.
šťavelovou

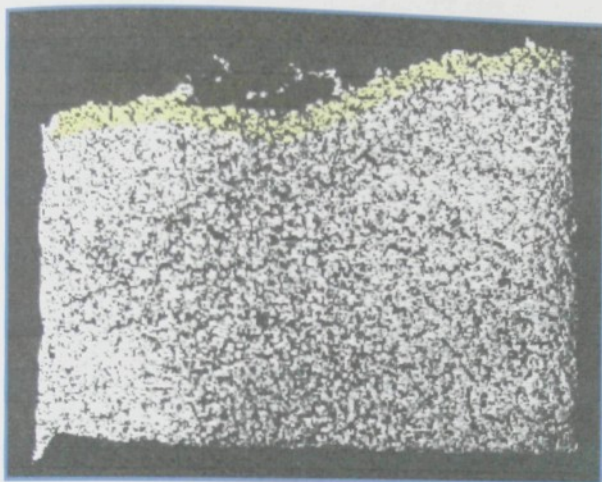


zvětšeno 50x
leptáno kys.
šťavelovou

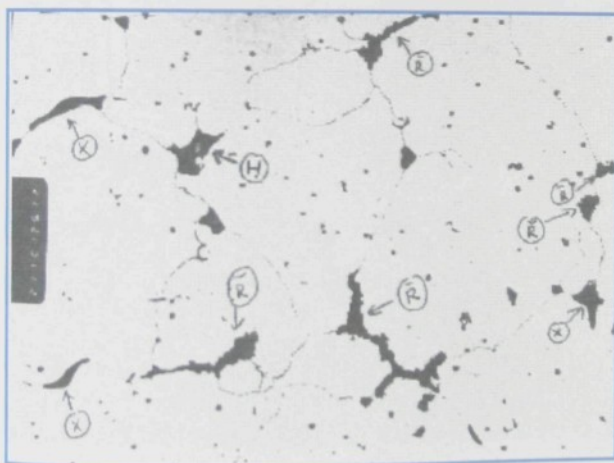
Obr. 38. - Mikroporezita vzniklá při tepelném zpracování



Obr. 39. - Vada ve stěně příruby odlitku středu kola mezi žebry

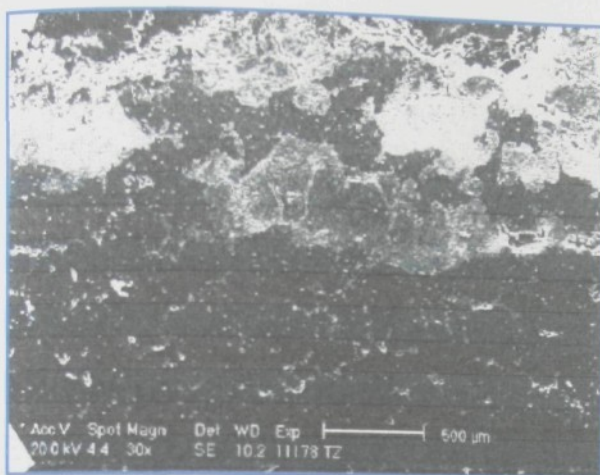


zvětšeno 6,3x
makrosnímek řezu
lomovou plochou

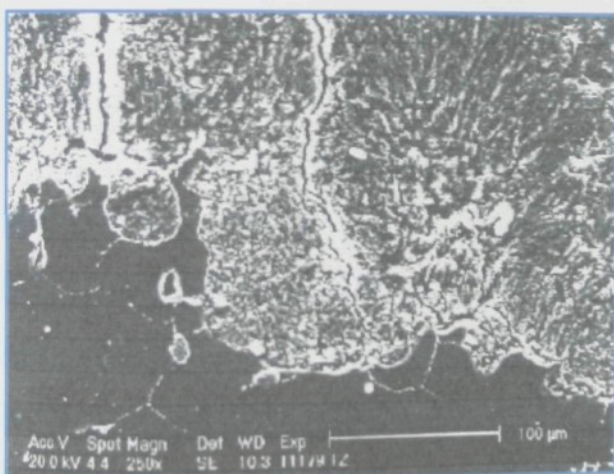


zvětšeno 125x
leptáno kys.
šťavelovou

Obr. 40. - Vzorek s ředinami vzniklými při tepelném zpracování

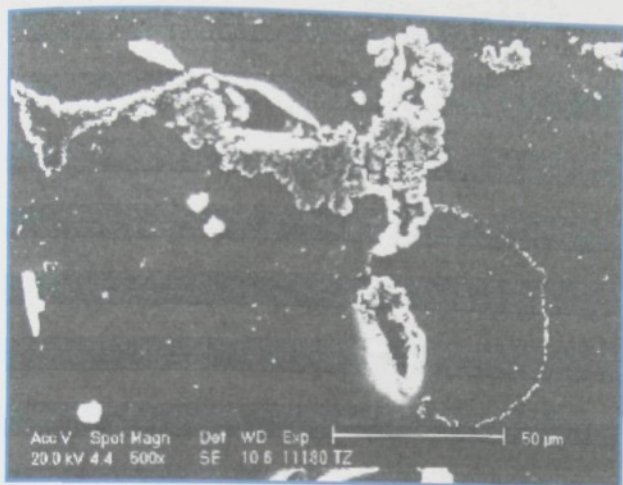


zvětšeno 30x
lomová plocha po TZ

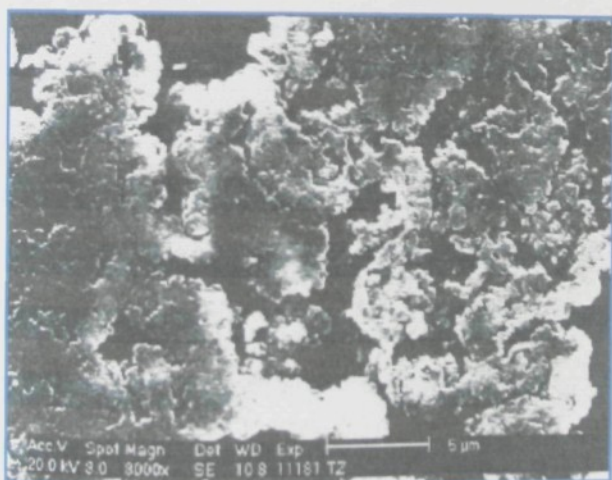


zvětšeno 250x
struktura při povrchu

Obr. 41. - Snímek z lomové plochy a struktury při povrchu

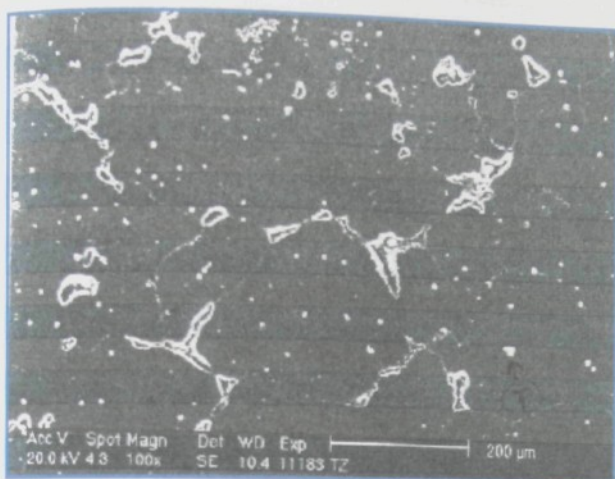


zvětšeno 500x

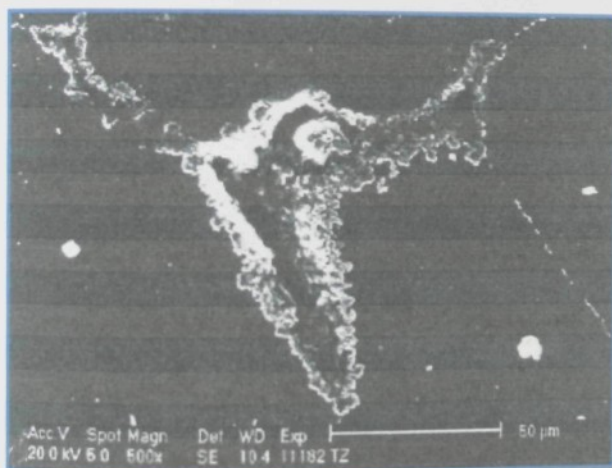


zvětšeno 3 000x

Obr. 42. - Mikroředina vzniklá při TZ při různých zvětšeníh



zvětšeno 100x
mikrořediny



zvětšeno 500x
kudrnatá staženina

Obr. 43 - Snímek ředin z elektronového mikroskopu
při různých zvětšeních

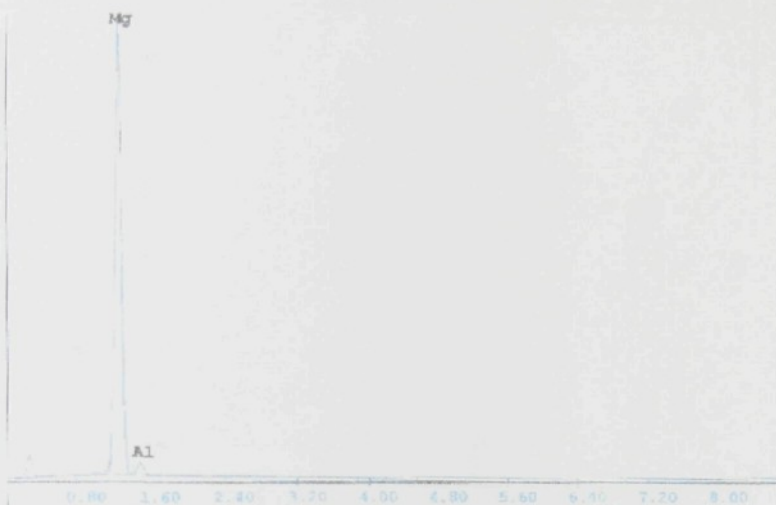
C:\users\janova\ingptack\elektron\vrtz5.spc

Label: vz.TE - obr.11183.pl.analyza

kv:20.0 Tilt:0.0 Take-off:35.3 Det Type:SUTW+ Res:134 To:50

FS : 10930 Lsec : 30

16-Nov-2001 15:07:50



EDAX EAF Quantification (Standardless)

Element Normalised

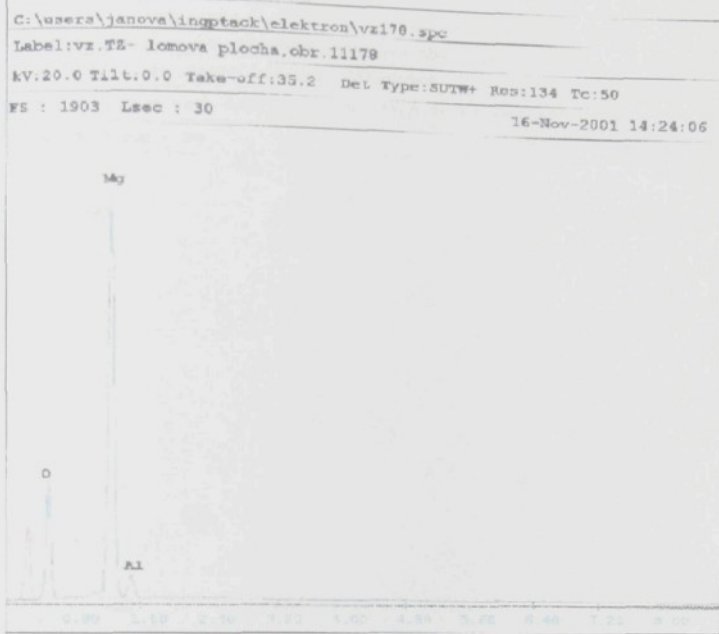
SEC Table : Default

Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
MgK	91.34	92.13	0.5104	1.0025	0.9530	1.0012
AlK	8.56	7.87	0.0237	0.9730	0.2800	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgrd Inte.	Inte. Error	F/B
MgK	2206.10	13.63	0.39	111.42
AlK	57.57	21.30	3.17	2.70

Obr. 44. - Plošná analýza vzorku s ředinami po TZ



EDAX EAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

SEC Table : Default

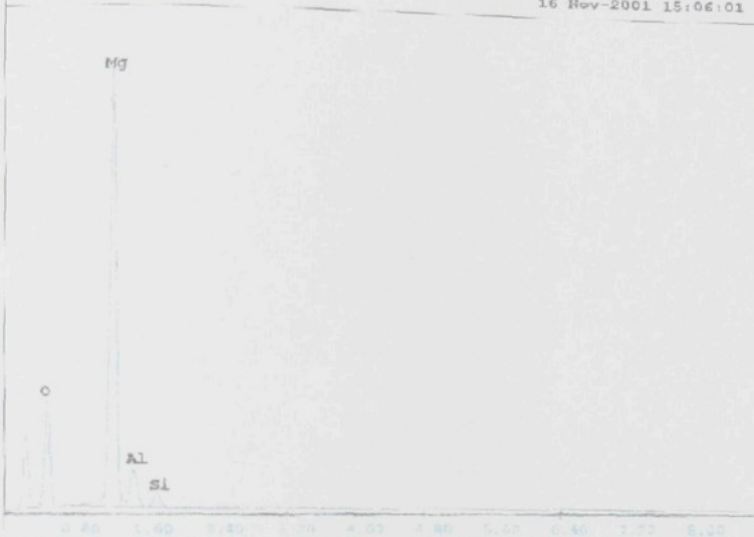
Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	42.31	52.98	0.1959	1.0254	0.4510	1.3011
MgK	51.74	42.63	0.8367	0.9859	0.6607	1.3010
AlK	5.95	4.42	0.0209	0.9550	0.3500	1.3000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Orgd Inte.	Inte. error	Z/A
O K	98.87	1.30	1.86	80.72
MgK	368.20	2.40	0.56	153.42
AlK	22.97	2.67	4.23	9.61

Obr. 45. - Rozbor z lomové plochy vzorku s ředinami po TZ

C:\users\janova\imgptack\elektron\vztz3.spc
 Label: vz.TE - obr.11182, kudrnata stazenina
 kV:20.0 Tilt:0.0 Take-off:35.3 Det Type:SUTW+ Res:134 Tc:50
 FS : 8162 Lacc : 30
 16 Nov-2001 15:06:01



EDAX EAF Quantification (Standardless)

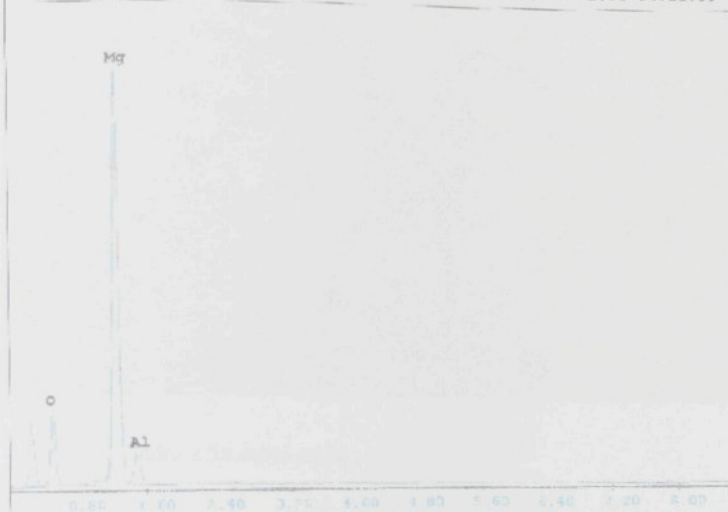
Element Normalized

SEC Table : Default

Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

Element	Wt %	At %	N Ra-Lo	Z	A	F
O K	28.17	48.87	0.1355	1.5280	0.4213	1.0012
MgK	50.95	42.93	0.3438	3.9864	0.6828	1.0017
AlK	8.57	6.50	0.0110	3.9574	0.3377	1.0005
SiK	2.32	1.69	0.0105	0.9854	0.4579	1.0000
Total	100.00	100.00				

C:\users\janova\ingptack\elektron\vr179.spc
 Label:VR.TE- obr.11179,kudrnata stazenina
 kV:20.0 Tilt:0.0 Take-off:35.5 Det Type:SUTW+ Res:134 Tc:50
 FS : 2414 Lsec : 30 16-Nov-2001 14:33:09



EDAX EAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

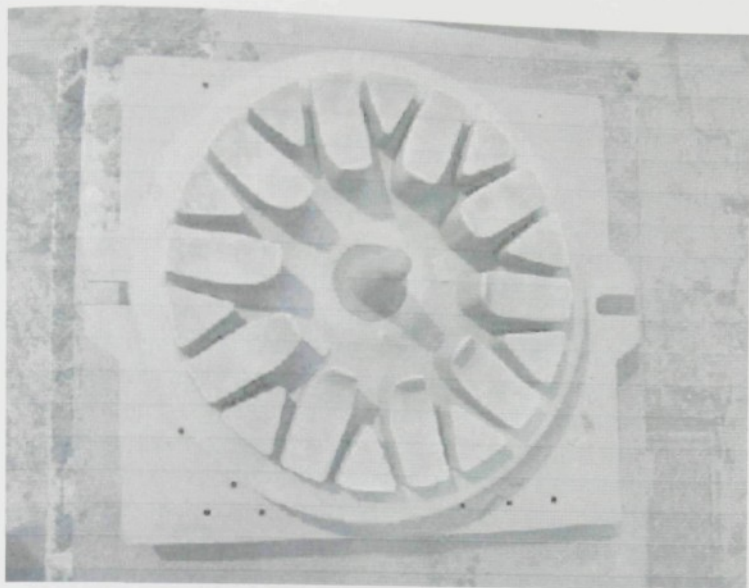
SEC Table : Default

Coating Correction Used : Element : C , Factor : 14.00

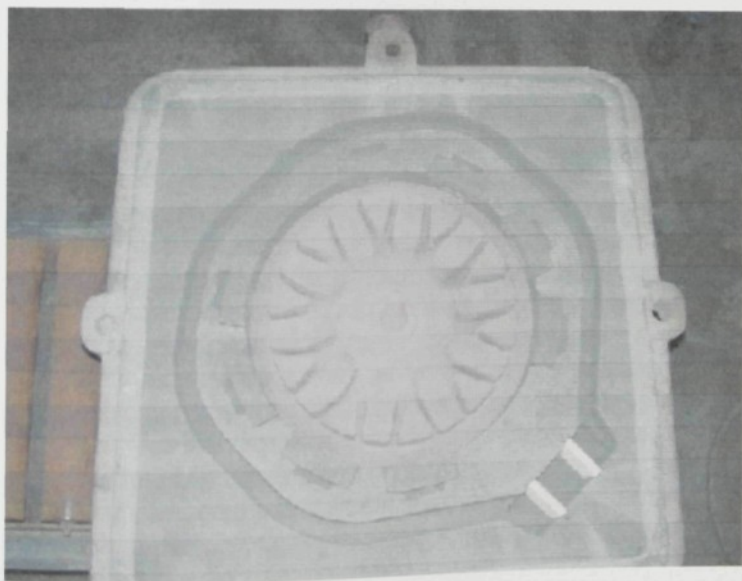
Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	33.54	43.75	0.1419	1.6803	0.4100	1.0013
MgK	56.93	48.87	3.4025	3.9685	3.7142	1.0015
AlK	9.53	7.38	3.3329	3.9593	0.3595	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Reqd Inte.	Inte. Error	P/B
O K	77.03	1.40	2.12	55.02
MgK	480.43	2.70	0.04	177.94
AlK	39.40	3.00	3.12	13.13

Obr. 47. - Rozbor z oblasti "kudrnaté stazeniny"



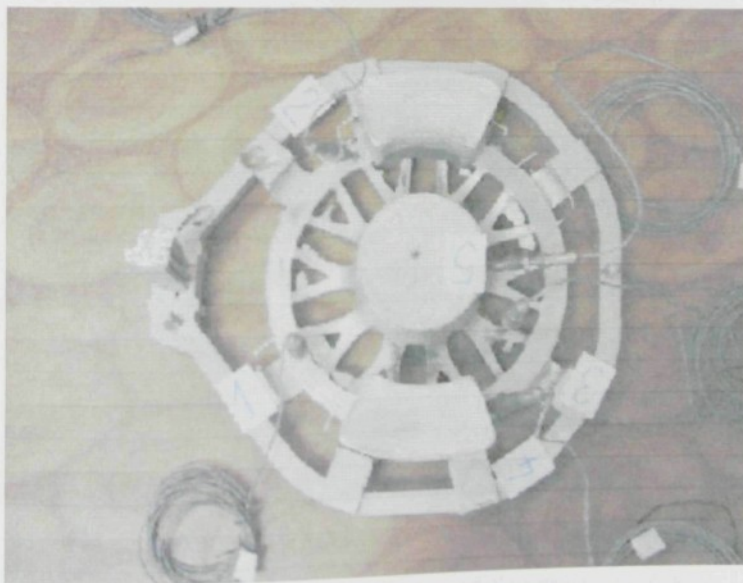
Obr. 48. - Jádru z furanové směsi



Obr. 49. - Spodní díl formy se založeným jádrem



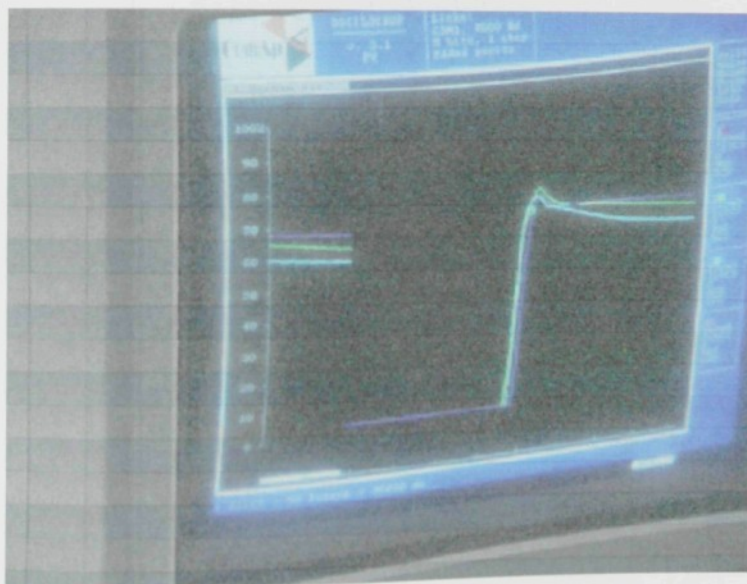
Obr. 50. - Odlévání zkušebního odlitku



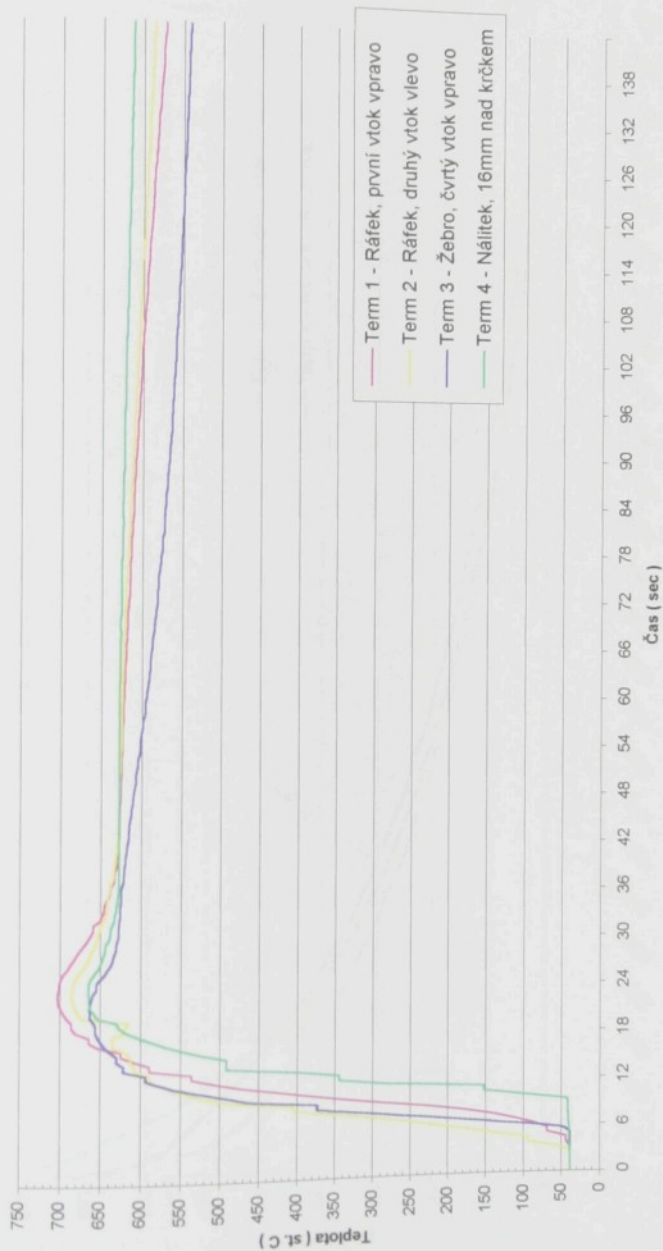
Obr. 51. - Vyklepaný odlitek s číselným označením umístění termočlánků



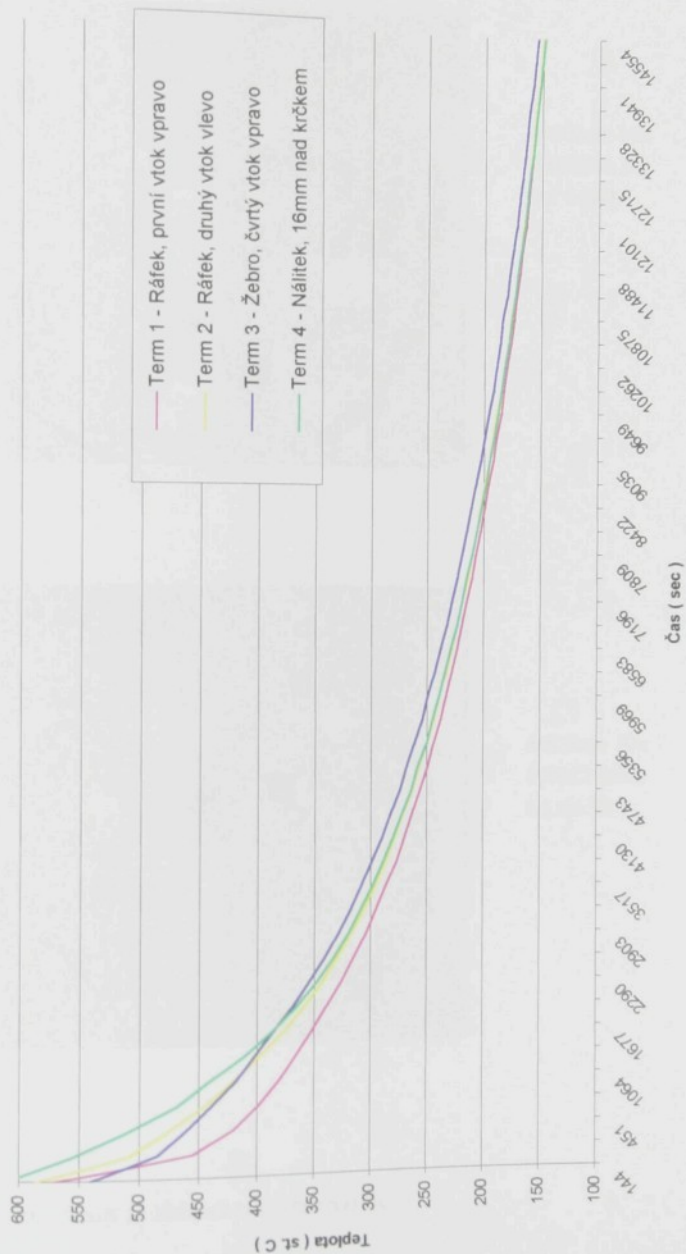
Obr. 52. - Uspořádání měřicích prvků



Obr. 53. - Zobrazení průběhu teplot krátce po odlití na monitoru počítače



Obr. 54. - Křivky chladnutí - interval 3sec

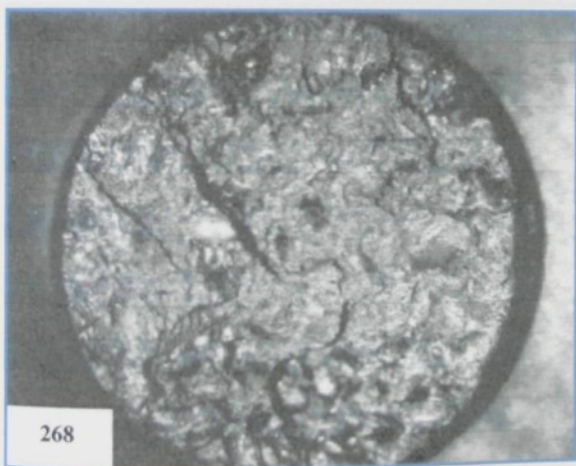


Obr. 55. - Pokračování křivek chlazení - interval 306sec



267

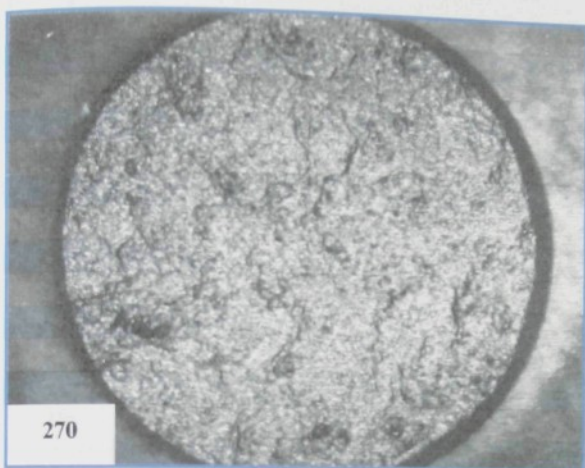
zvětšeno 10x
0,0022% Be
č.t. 661/1



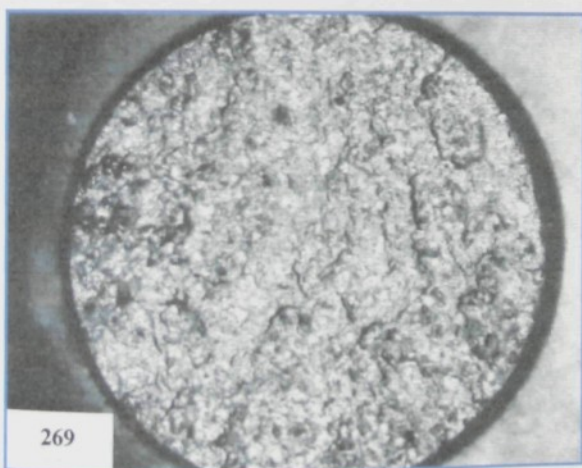
268

zvětšeno 10x
0,0012 %Be
č.t. 663/8

Obr. 56. - Lomy zkušebních tyčí s příměsí Be

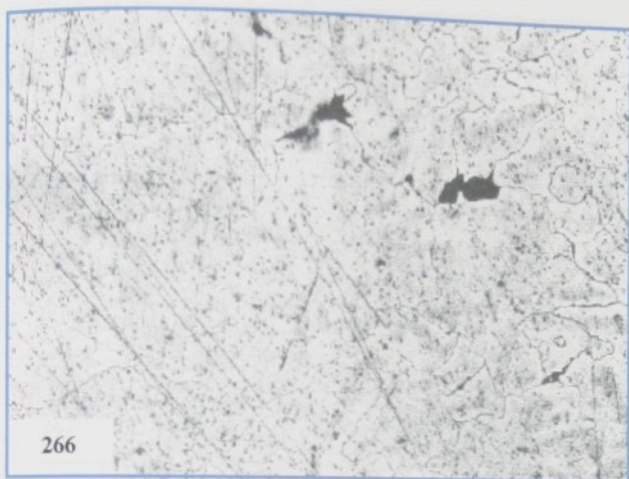


zvětšeno 10x
0,0007% Be
č.t. 667/7

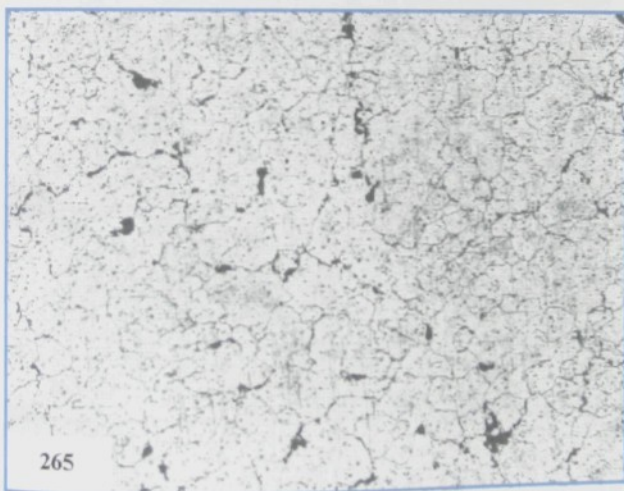


zvětšeno 10x
0,0003% Be
č.t. 667/7

Obr. 57. - Lomy zkušebních tyčí s příměsí Be

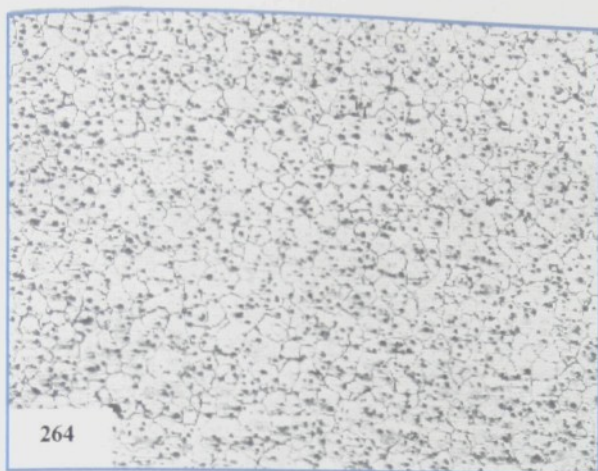


zvětšeno 20x
0,0022% Be
lept. kys. šťavelová

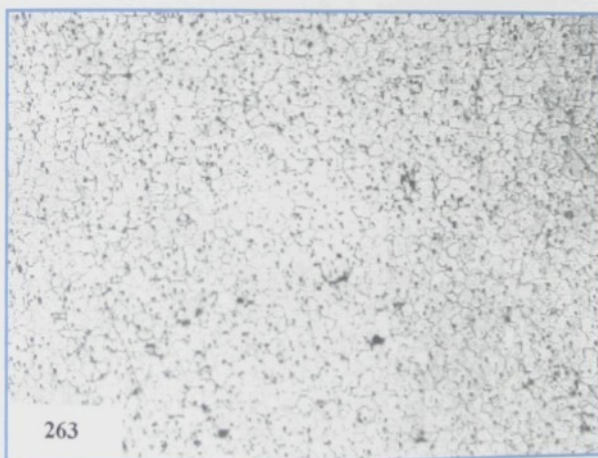


zvětšeno 20x
0,0012% Be
lept. kys. šťavelová

Obr. 58. - Struktura při různých obsazích Be

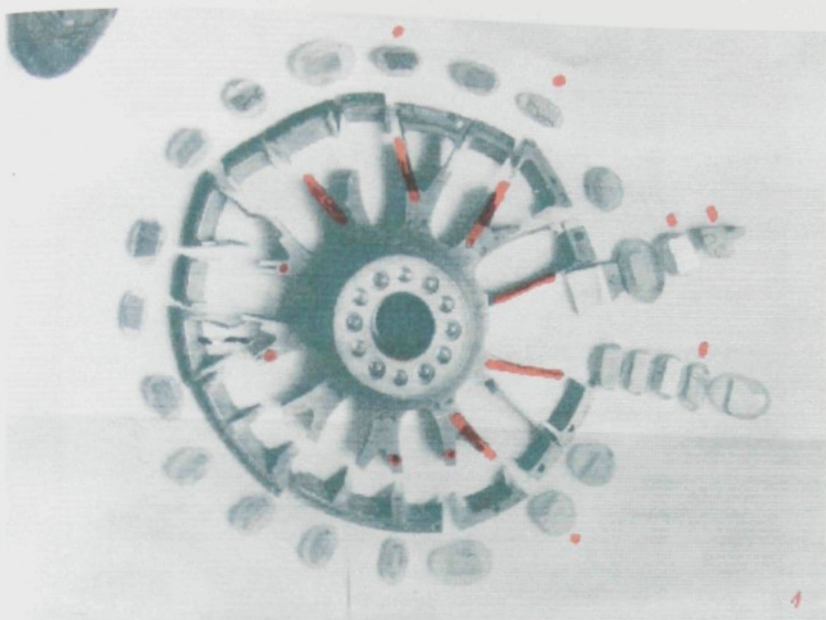


zvětšeno 20x
0,0007% Be

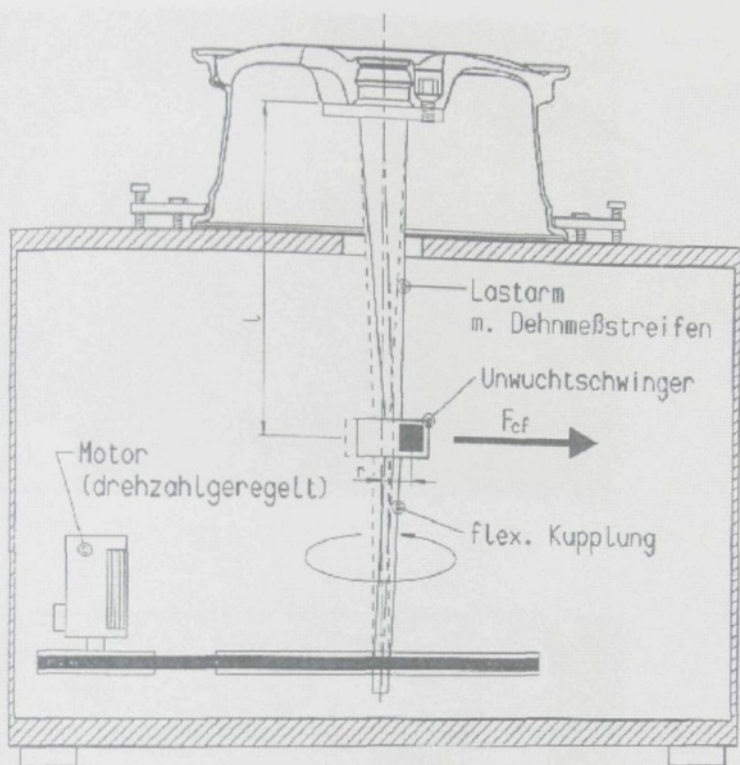


zvětšeno 20x
0,0003% Be

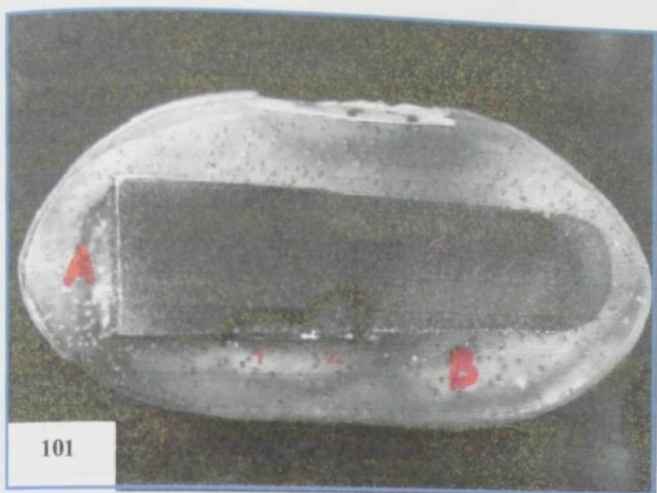
Obr. 59. - Struktura při různých obsazích Be po naleptání vzorku kys.
šťavelovou



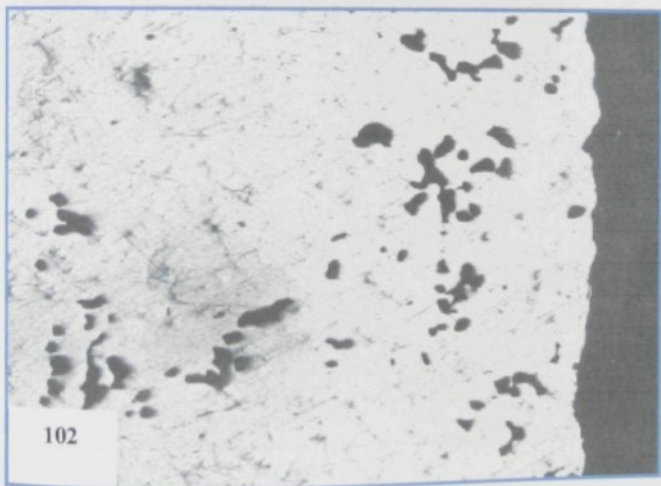
Obr.60. - Odběr vzorků z prasklého středu kola



Obr. 61. - Schema zkušebního zařízení pro únavové zkoušky opracovaných středů kol

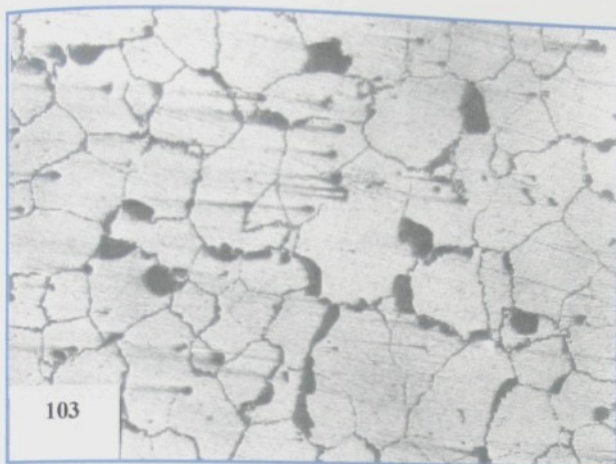


zvětšeno 2,1x
řez žebrem

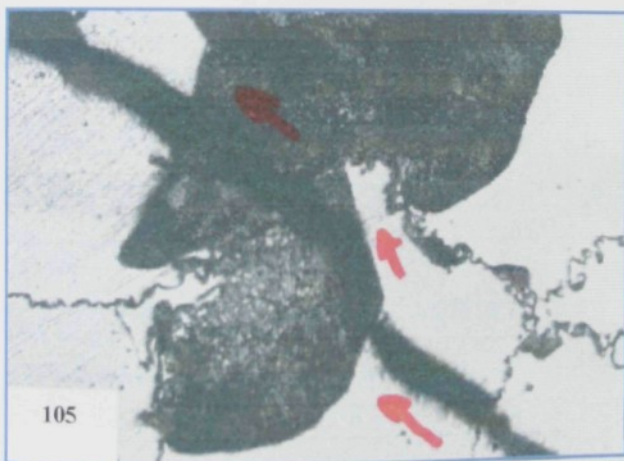


zvětšeno 50x
oblast povrchu

Obr. 62. - Metalografický výbrus z paprsku kola F6 s indikovanou vadou po zkoušce ultrazvukem

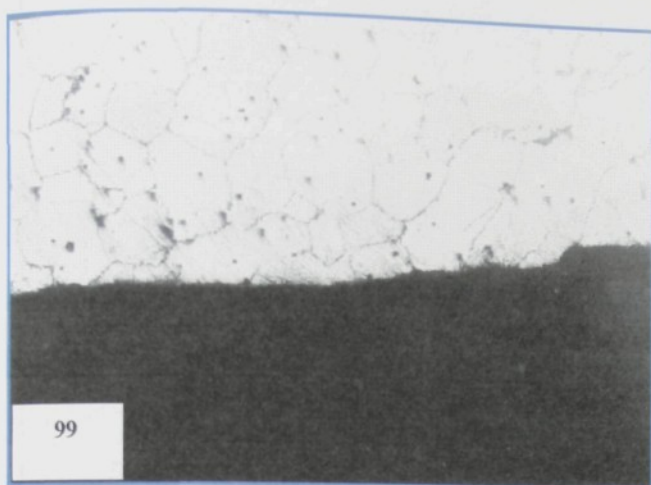


zvětšeno 100x
leptáno. kys.
šťavelovou

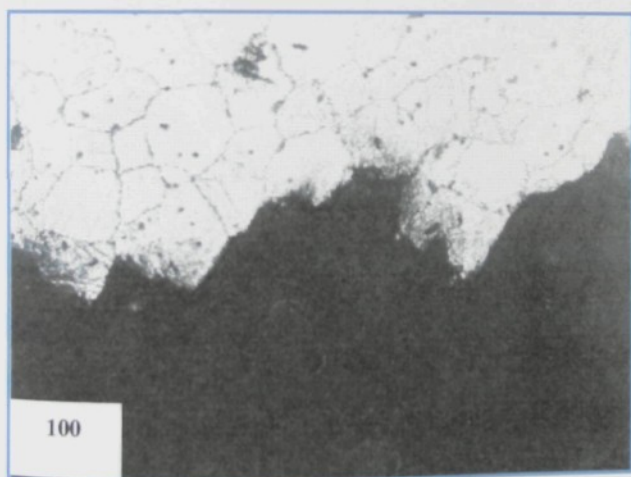


zvětšeno 400x
leptáno kys.
šťavelovou

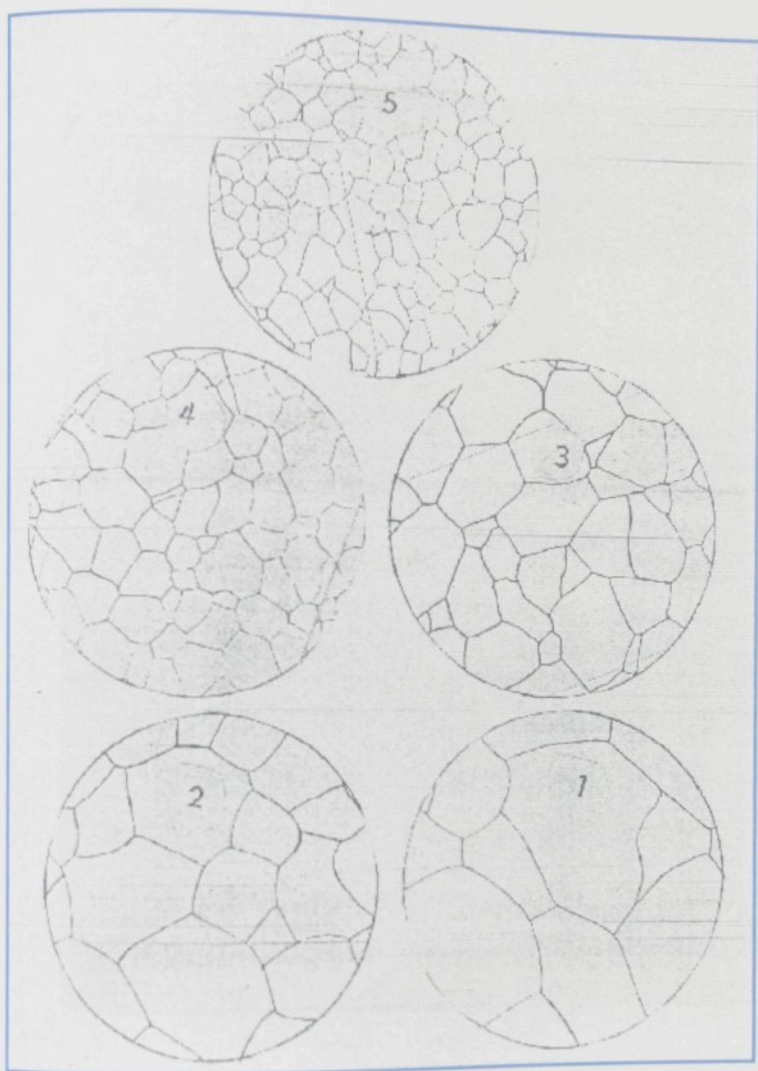
Obr. 63. - Mikrostruktura z kola č.3



zvětšeno 50x
leptáno kys.
šťávelovou
únavový lom



zvětšeno 50x
leptáno kys.
šťávelovou silový
lom

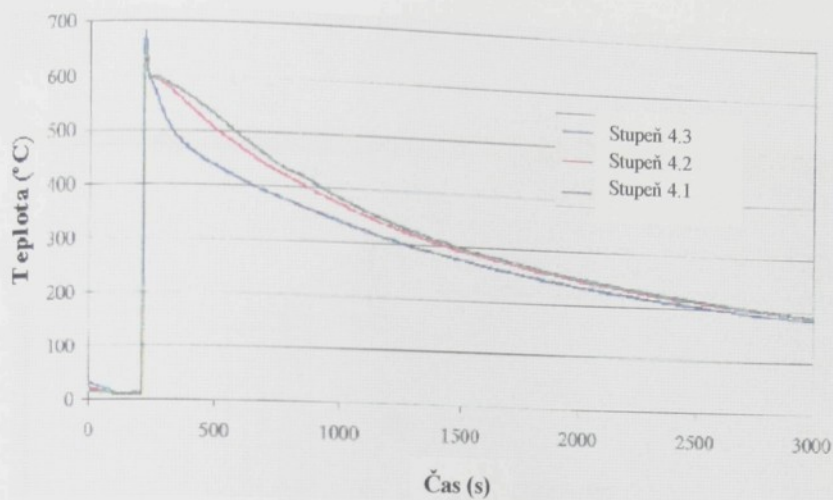


Obr. 65. - Hodnoceni velikosti zrn Mg slitin



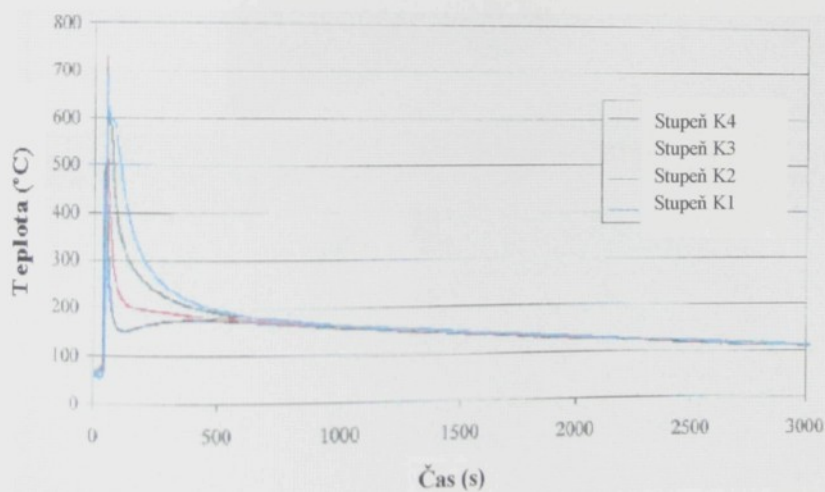
Obr.66. - Odezňování modifikace - vzorek č.1 až 6

Písková forma

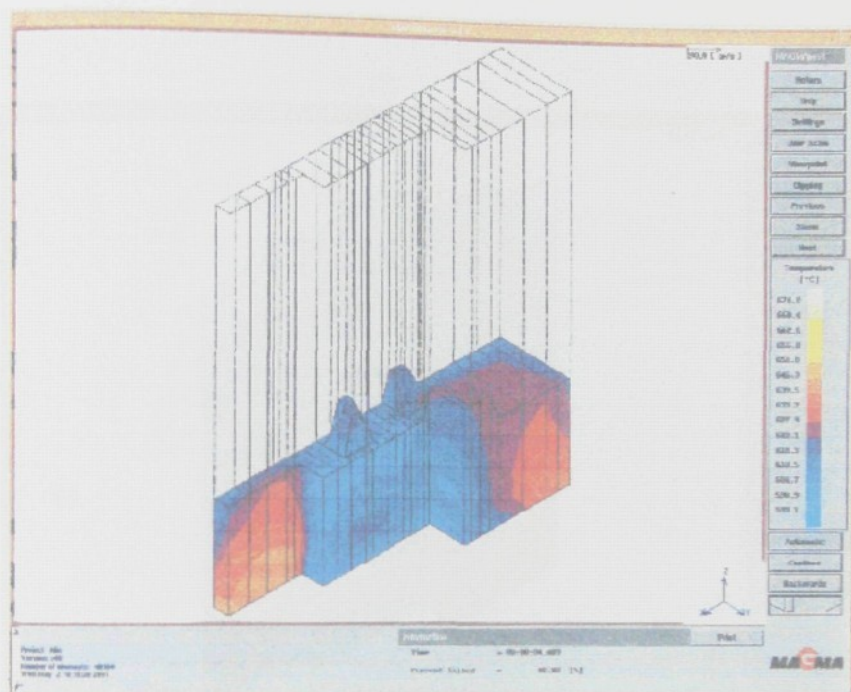


Teplota (°C)

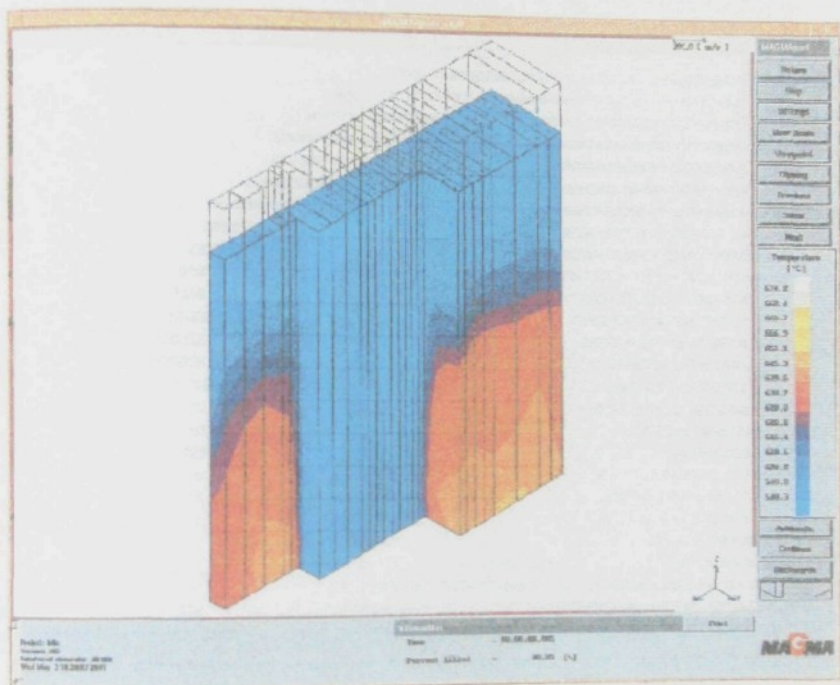
Kokila



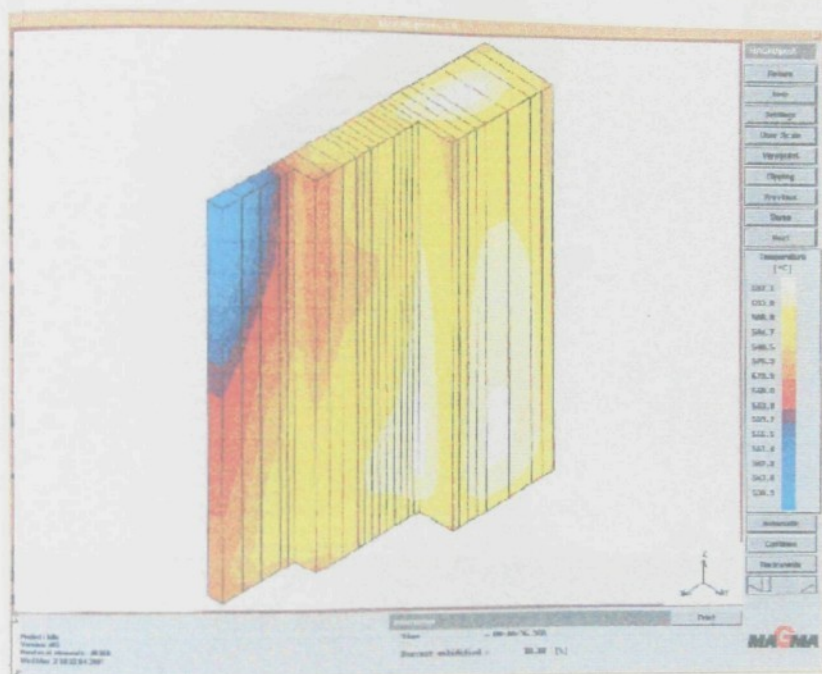
Obr. 67. - Diagram chladnutí odlitků klinů

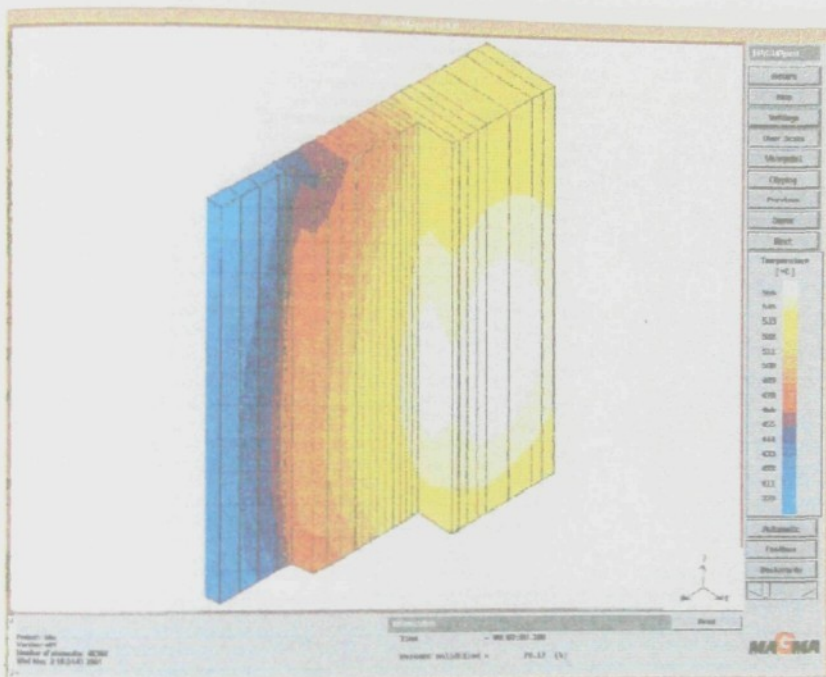


Obr. 68. - Plnění pískové formy po 4,5s

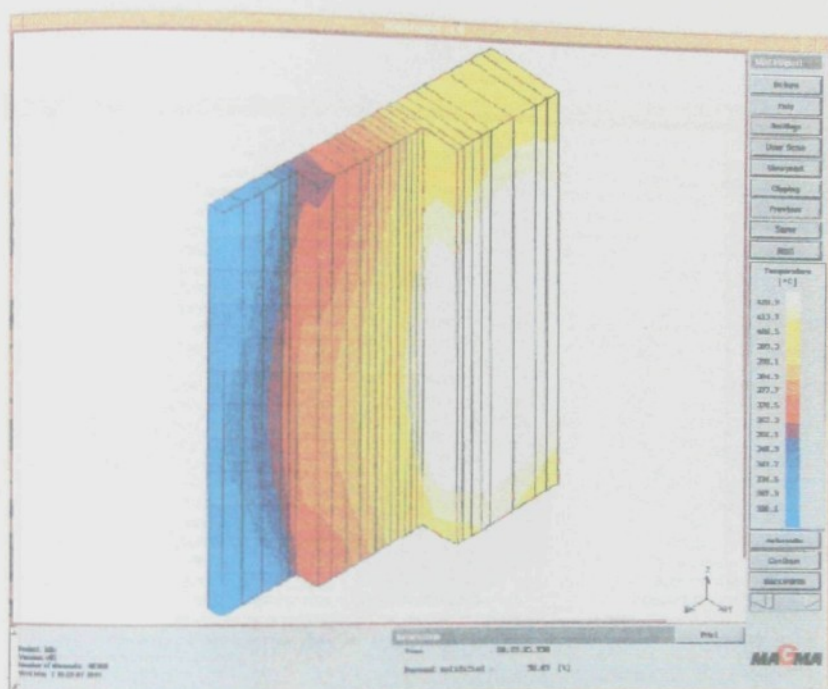


Obr. 69. - Plnění pískové formy po 9s

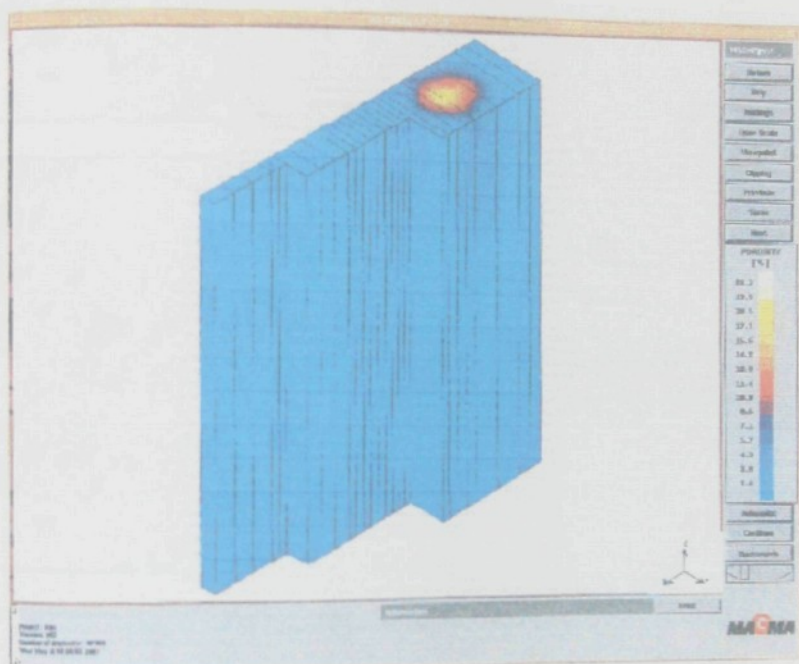




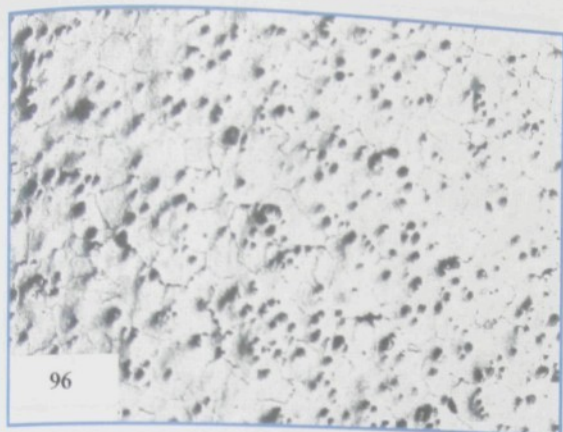
Obr. 71. - Chladnutí odlitku v pískové formě po 3 min.



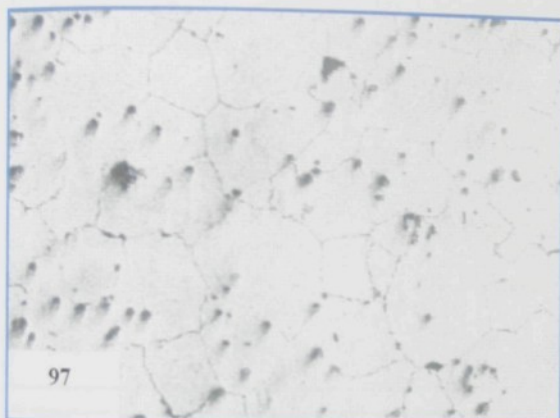
Obr. 72. - Chladnutí odlitku v pískové formě po 9,5 min.



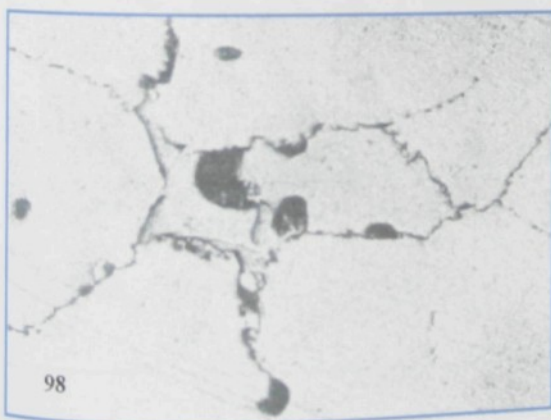
Obr. 73. - Pórovitosť v odlitku z piskovej formy



zvětšeno 50x
leptáno kys. šťavelovou

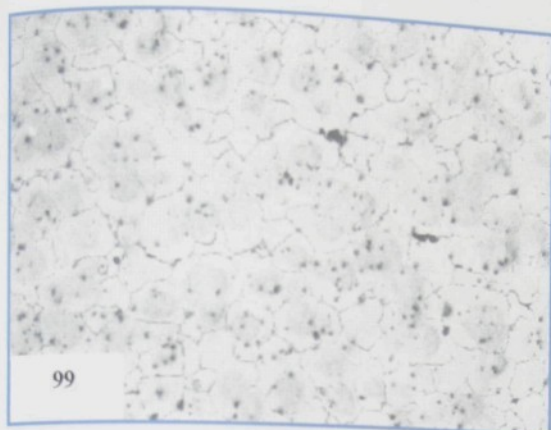


zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelovou

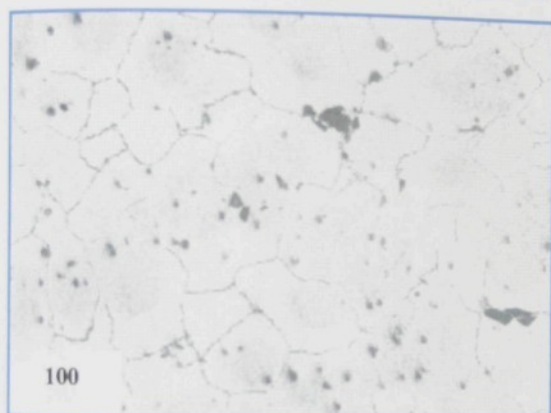


zvětšeno 400x
leptáno kys. šťavelovou

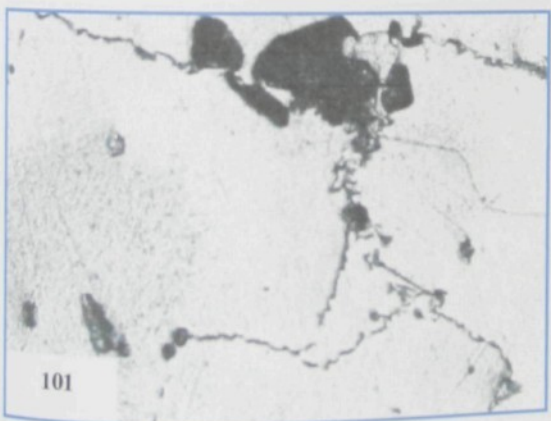
Obr. 74. - Vzorek 4.1 ze zkoušky rázem po T4



zvětšeno 50x
leptáno kys. šťavelovou

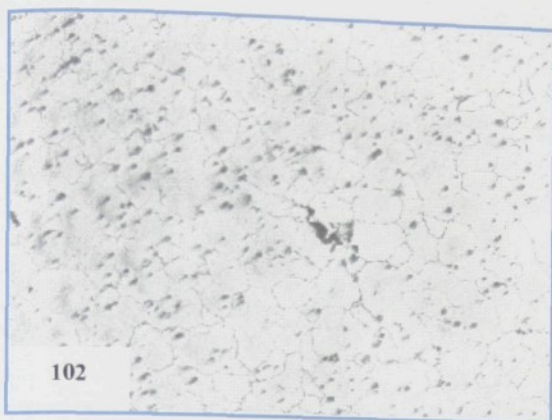


zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelovou

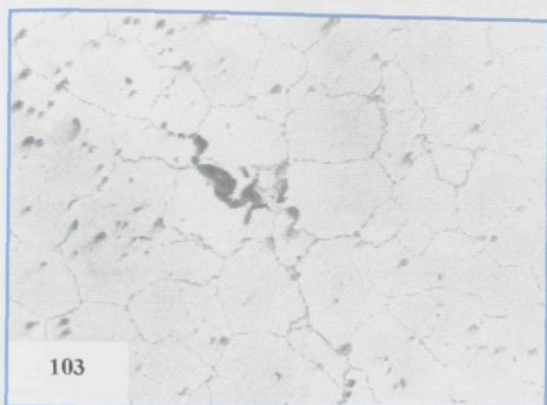


zvětšeno 400x
leptáno kys. šťavelovou

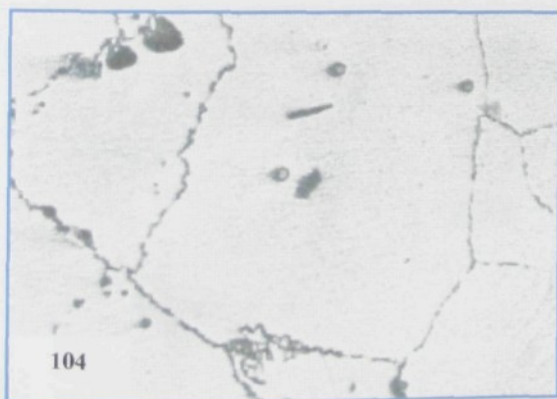
Obr. 75. - Vzorek 4.2 ze zkoušky rázem po tep. zpracování T4



zvětšeno 50x
leptáno kys. šťavelovou

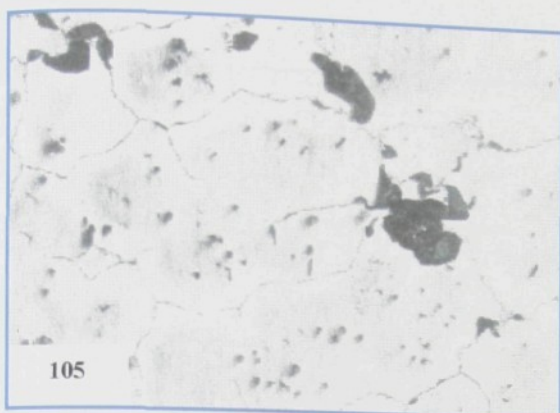


zvětšeno 100x
leptáno kys. šťavelovou

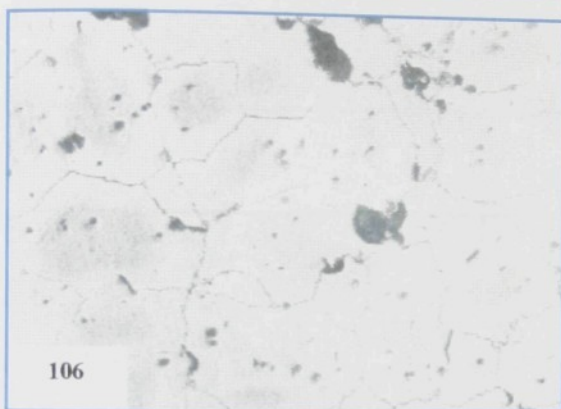


zvětšeno 400x
leptáno kys. šťavelovou

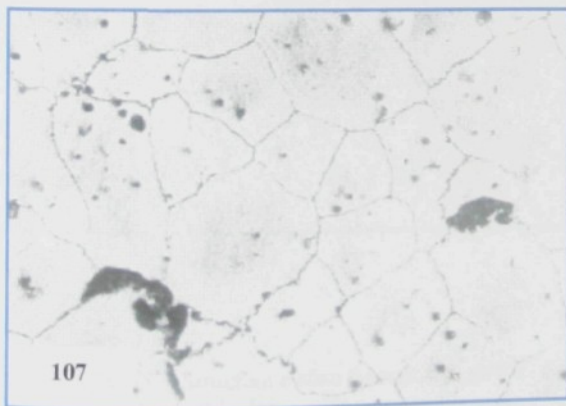
Obr. 76. - Vzorek 4.3 ze zkoušky rázem po tep. zpracování T4



zvětšeno 100x
vzorek 4.1

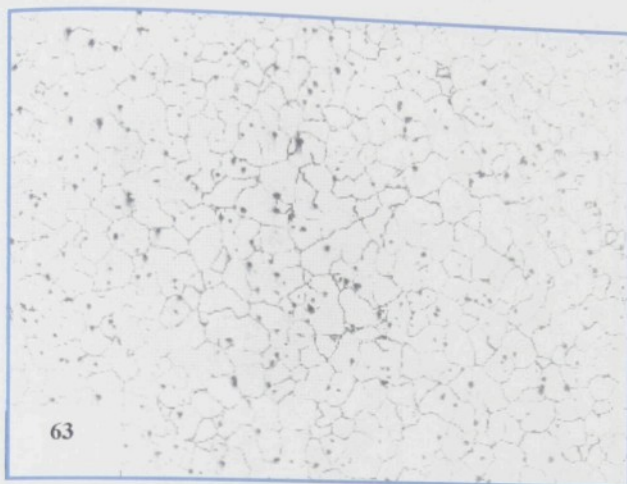


zvětšeno 100x
vzorek 4.2

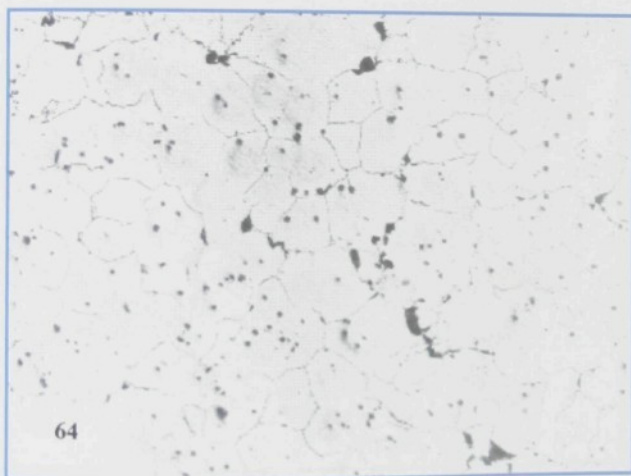


zvětšeno 100x
vzorek 4.3

Obr. 77. - Struktura z klinu po tep. zpracování T4

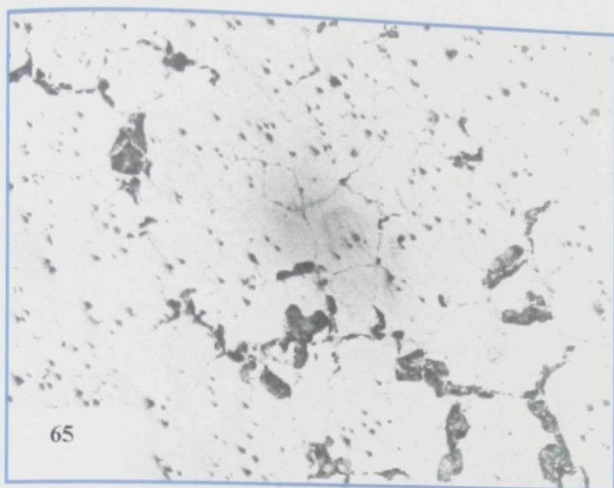


zvětšeno 50x
stěna 10mm

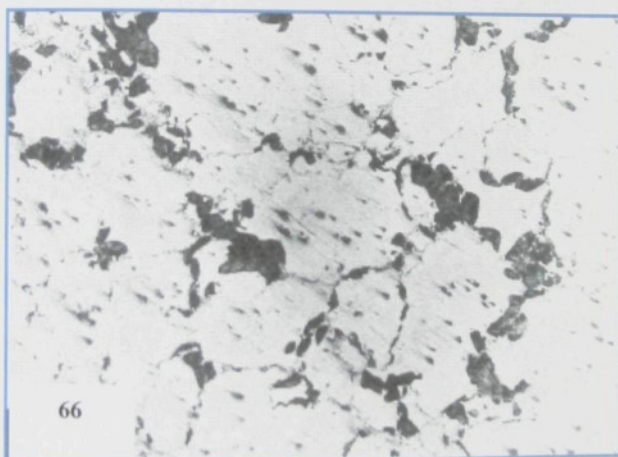


zvětšeno 50x
stěna 20mm

Obr. 78. - Struktura z klinu (vzorek č.4) po T4 - zpracováním
výřezu 10mm přes všechny stupně

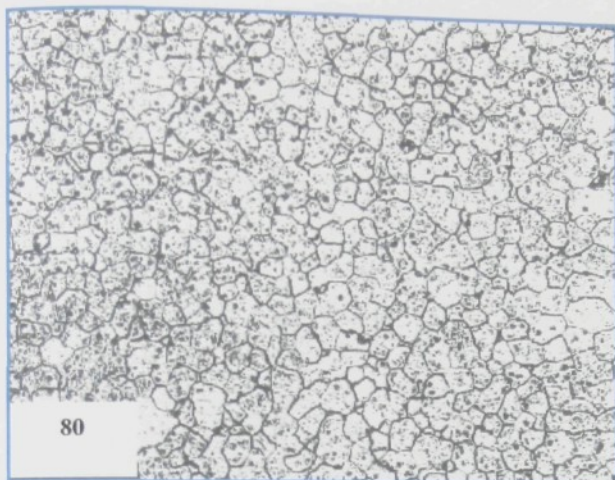


zvětšeno 50x
stěna 40mm

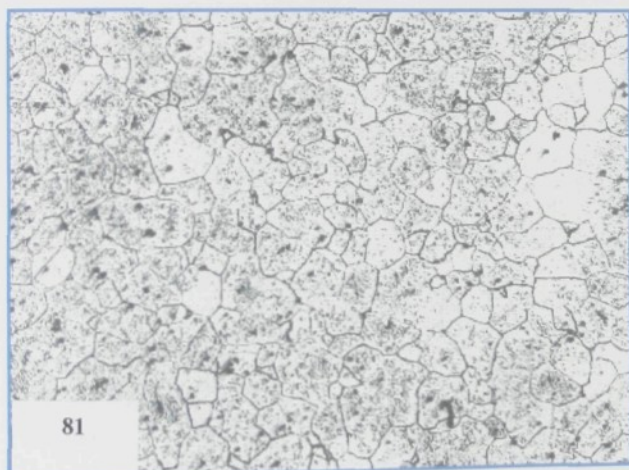


zvětšeno 50x
stěna 80 mm

Obr. 79. - Struktura z klinu (vzorek č.4) po T4 - zpracováním
výřezu 10mm přes všechny stupně

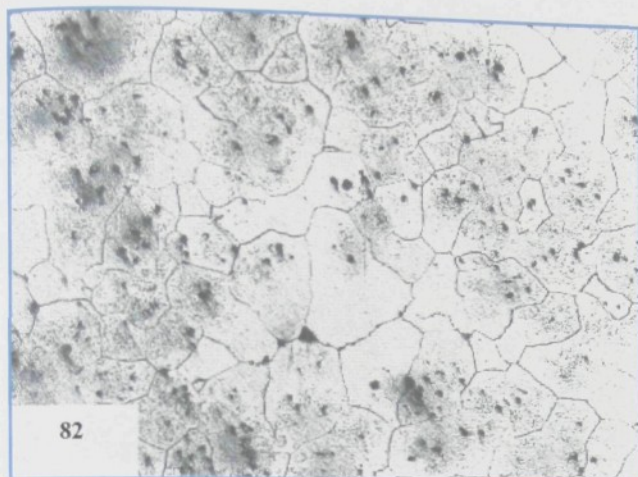


zvětšeno 50x
síla stěny 10 mm



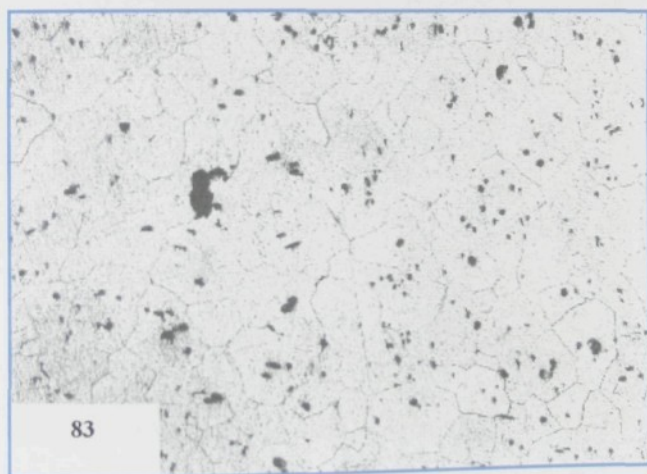
zvětšeno 50x
síla stěny 20 mm

Obr. 80. - Struktura z klínu (vzorek č.3) po 2x TZ T4



zvětšeno 50x
síla stěny 40 mm

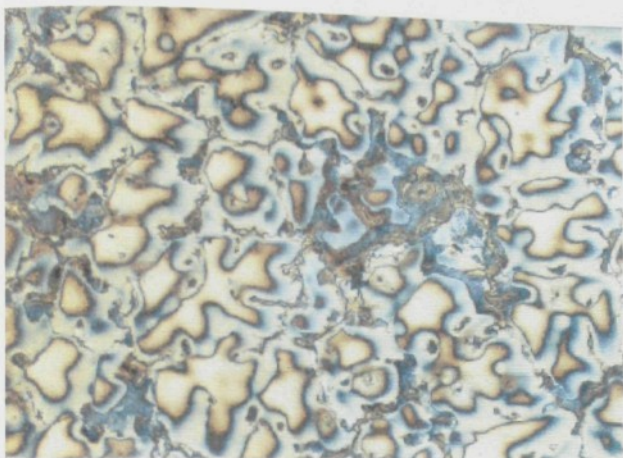
82



zvětšeno 50x
síla stěny 80 mm

83

Obr. 81. - Struktura z klinu (vzorek č.3) po 2x TZ T4

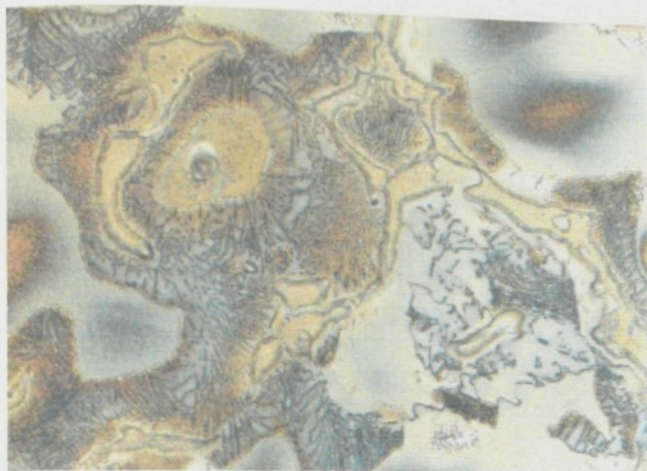


zvětšeno 100x
leptáno kys.
molybdenovou

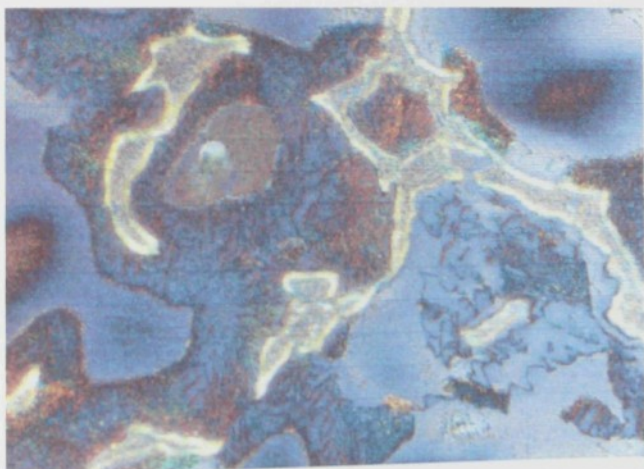


zvětšeno 800x
eutektikum+fáze
 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$

Obr. 82. - Struktura vzorků z odlitých desek 100x200x20mm
bez tepelného zpracování



zvětšeno 500x
eutektikum+tuhý
roztok+diskont.
precipitát



zvětšeno 500x
stejný obrázek v
polarizovaném
světle

Obr. 83. - Struktura vzorků z odlitých desek
bez tepelného zpracování

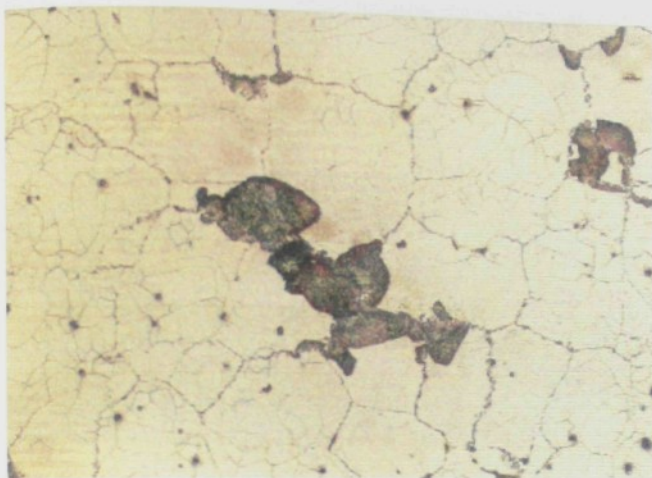


zvětšeno 1000x
eutektikum+
diskontinuální
precipitát



zvětšeno 1000x
stejný vzorek v
polarizovaném
světle

Obr. 84. - Struktura vzorků z odlitých desek
bez tepelného zpracování

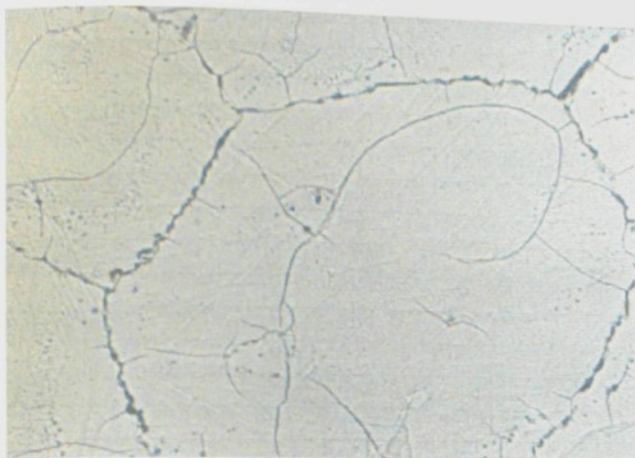


zvětšeno 100x
tuhý roztok +
precipitát hliníku

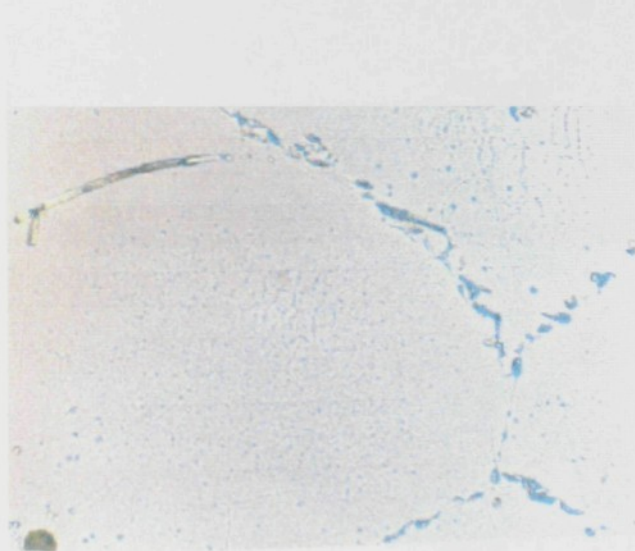


zvětšeno 500x
tuhý roztok +
precipitát hliníku

Obr.85. - Struktura vzorků z odlitých desek
po tepelném zpracování na T4

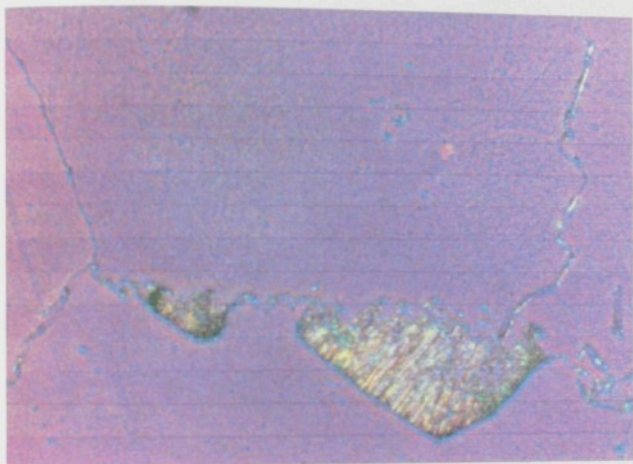


zvětšeno 500x
detail hranic zrn



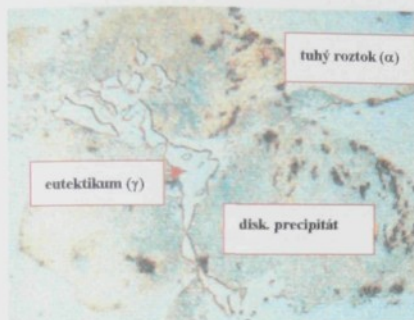
zvětšeno 1000x
detail hranic zrn

Obr.86. - Struktura vzorků z odlitých desek
tepelně zpracovaných na T4



zvětšeno 1000x
detail tuhého
roztoku a hranic zrn
v polarizovaném
světle

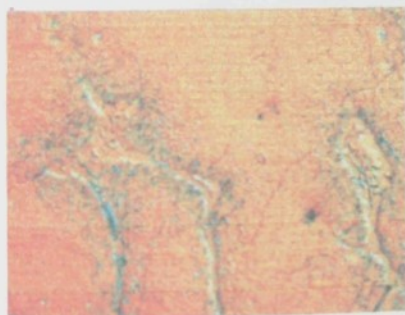
Obr. 87. - Struktura vzorků z odlitých desek
tepelně zpracovaných na T4



obr.č.1.



obr.č.2

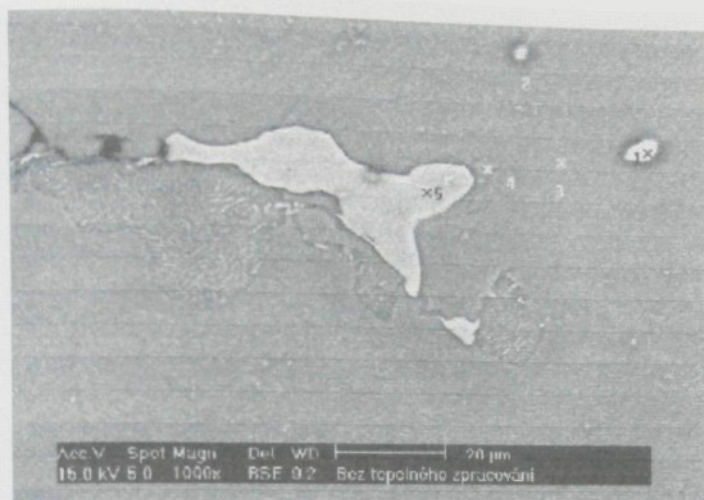


obr.č.3



obr.č.4

Obr.88. - Barevná struktura vzorku AZ91D



BTZ... vzorek bez
tep. zpracování

BTZ1

Element	Wt %	At %
O K	1,38	2,11
ZnL	1,78	0,67
MgK	91,69	92,72
AlK	4,94	4,49
Total	100	100

BTZ4

Element	Wt %	At %
O K	1,15	1,79
ZnL	2,6	0,99
MgK	66,18	67,96
AlK	10,07	9,26
Total	100	100

BTZ2

Element	Wt %	At %
O K	6,05	10,14
ZnL	4,13	1,69
MgK	67,37	63,3
AlK	17,82	17,71
MnK	14,64	7,15
Total	100	100

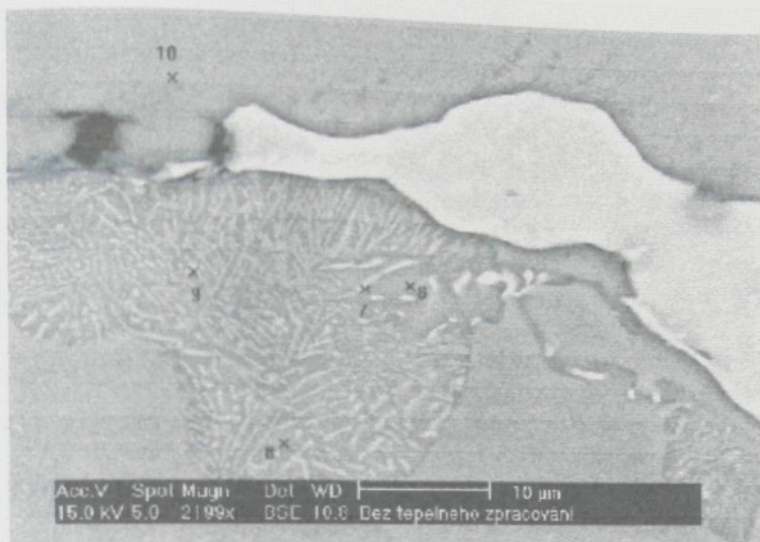
BTZ5

Element	Wt %	At %
O K	0,54	0,89
ZnL	4,89	1,95
MgK	55,72	59,68
AlK	38,85	37,49
Total	100	100

BTZ3

Element	Wt %	At %
O K	0,72	1,11
ZnL	1,85	0,62
MgK	90,88	92,1
AlK	8,76	5,17
Total	100	100

Obr. 89. - Struktura z desky bez TZ s oblastmi 1 až 5 pro fázovou analýzu


BTZ6

Element	Wt %	At %
O K	0,43	0,66
ZnL	1,98	0,75
MgK	84,81	86,79
AlK	12,78	11,79
Total	100	100

BTZ9

Element	Wt %	At %
O K	2,89	4,45
ZnL	2,72	1,02
MgK	84,63	85,63
AlK	9,76	8,9
Total	100	100

BTZ10
BTZ7

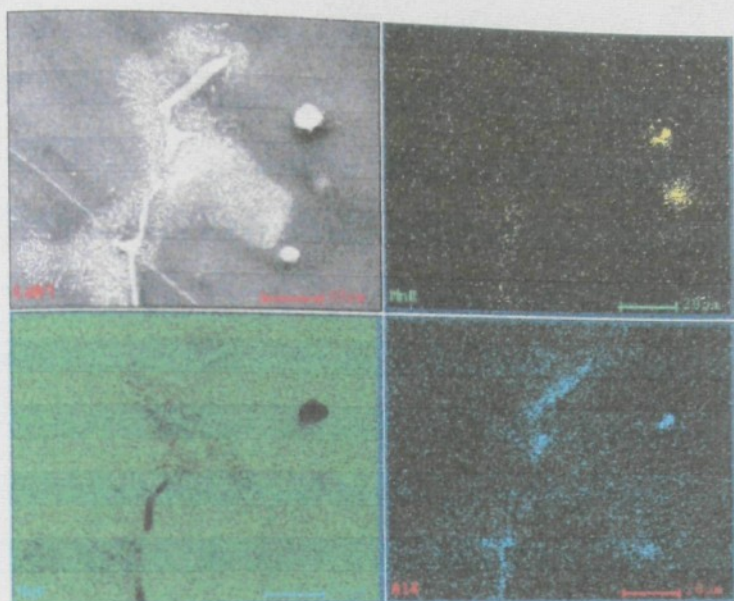
Element	Wt %	At %
O K	1,51	2,33
ZnL	2,06	0,78
MgK	83,74	85,24
AlK	12,69	11,64
Total	100	100

Element	Wt %	At %
O K	1,27	1,96
ZnL	1,74	0,66
MgK	87,65	88,85
AlK	9,34	8,53
Total	100	100

BTZ8

Element	Wt %	At %
O K	0,32	0,5
ZnL	1,77	0,67
MgK	88,96	90,62
AlK	8,96	8,22
Total	100	100

Obr. 90. - Struktura z desky bez TZ s oblastmi 6 až 10 pro fázovou analýzu



BTZA1.spc

Element	Wt %	At %
ZnL	1.83	0.69
MgK	93.19	94.74
AlK	4.98	4.57
Total	100	100

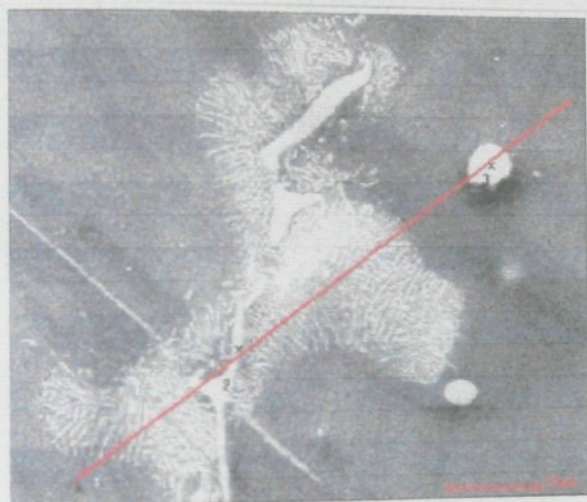
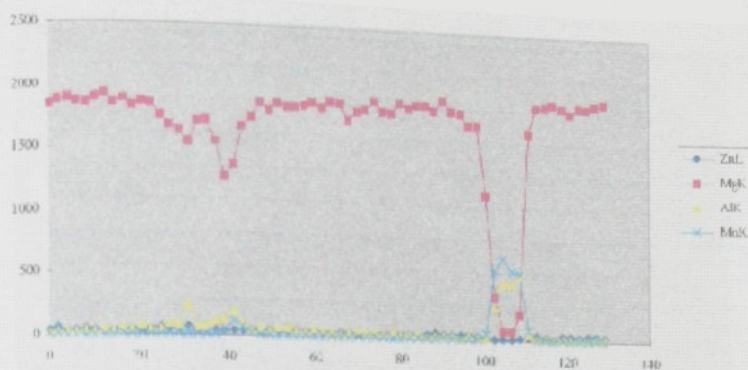
BTZA3.spc

Element	Wt %	At %
ZnL	1.63	0.86
MgK	14.48	20.58
AlK	39.56	50.67
MnK	44.34	27.89
Total	100	100

BTZA2.spc

Element	Wt %	At %
ZnL	3.28	1.34
MgK	68.4	75.28
AlK	19	18.84
MnK	9.32	4.54
Total	100	100

Obr. 91. - Plošná analýza eutektika se zaměřením na stanovení rozložení prvků Al, Mg, Mn

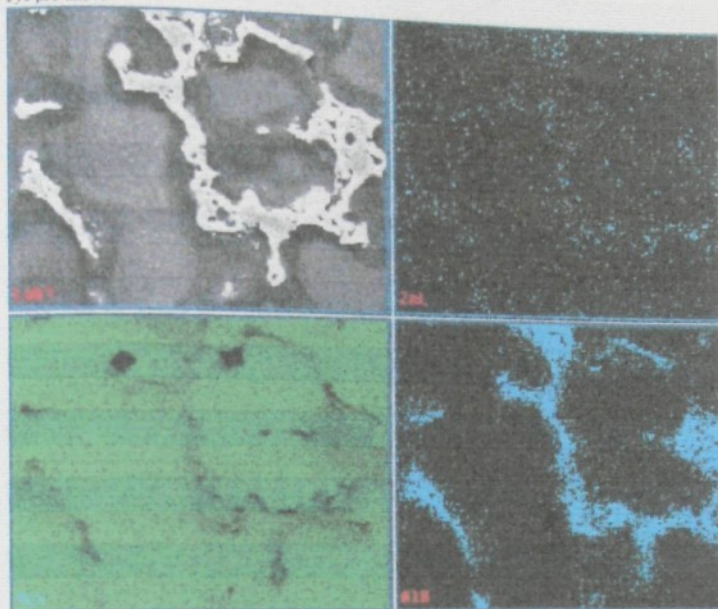


BTZA1.spe		
Element	Wt %	At %
ZnL	1,83	0,69
MgK	93,19	94,74
AlK	4,98	4,57
Total	100	100

BTZA3.spe		
Element	Wt %	At %
ZnL	1,63	0,86
MgK	14,48	20,58
AlK	19,56	50,67
MnK	44,24	27,89
Total	100	100

BTZA2.spe		
Element	Wt %	At %
ZnL	3,28	1,34
MgK	68,4	75,28
AlK	19	18,84
MnK	9,32	4,54
Total	100	100

Obr.92. - Liniová mikroanalýza fázi $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$,
vměšku a tuhého roztoku



KRL1A1.SPC

EDAX ZAF
Quantification
Element Normalized

Element	Wt %	At %
ZnL	2,69	1,02
MgK	93,4	95,38
AlK	3,91	3,6
Total	100	100

KRL1A3.SPC

EDAX ZAF
Quantification
Element Normalized

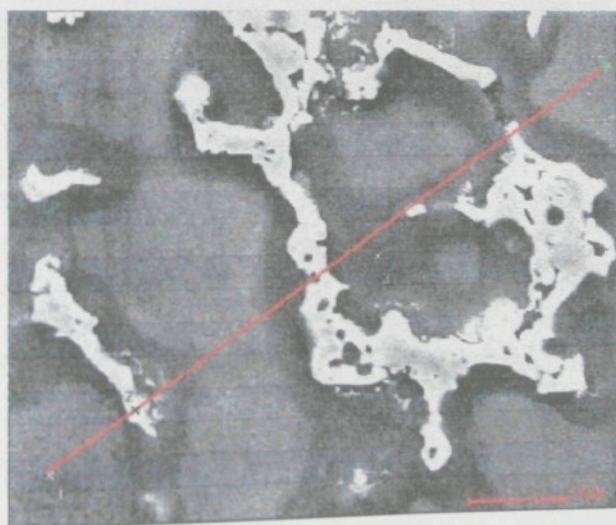
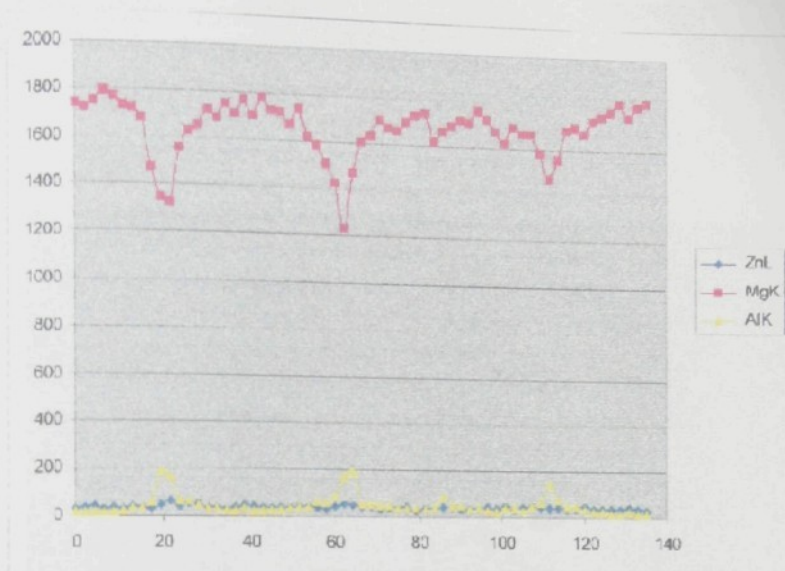
Element	Wt %	At %
ZnL	2,87	1,1
MgK	88,21	90,64
AlK	8,93	8,26
Total	100	100

KRL1A2.SPC

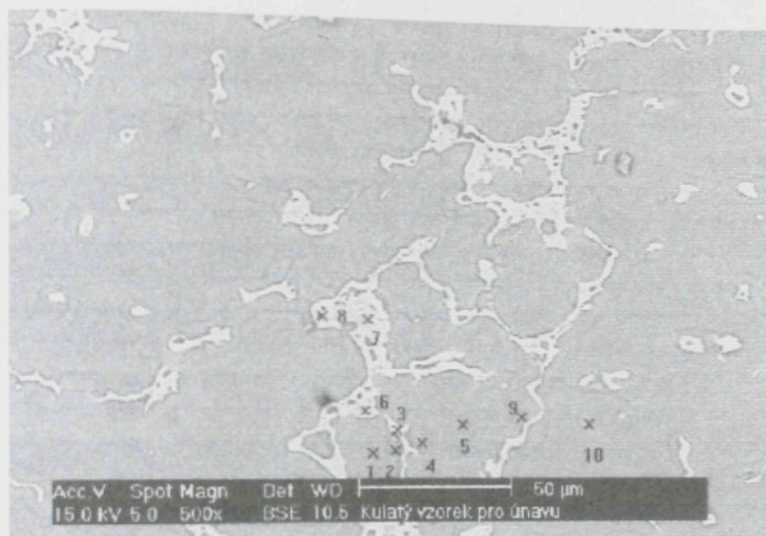
EDAX ZAF
Quantification
Element Normalized

Element	Wt %	At %
ZnL	4,92	1,93
MgK	63,68	67,88
AlK	31,41	30,17
Total	100	100

Obr. 93. - Plošná analýza eutektika po vybrušení vzorku
s použitím diamantové pasty



Obr. 94. - Liniová mikroanalýza vzorku z obr. 91
vedená přes fázi $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$



Obr. 95. Fázová mikroanalýza strukturních složek
 z tyče pro únavu bez TZ

K... kruhový vzorek pro úngvu

EDAX ZAF Quantification Standardless
Element Normalized

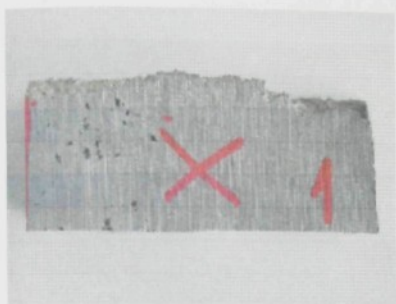
K1			K6		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
O K	0,84	1,29	O K	0,68	1,11
ZnL	1,4	0,53	ZnL	5,54	2,21
MgK	92,11	93,04	MgK	59,69	63,84
AlK	5,65	5,14	AlK	34,09	32,85
Total	100	100	Total	100	100

K2			K7		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
O K	1,24	2,01	O K	0,68	1,07
ZnL	5,42	2,15	ZnL	5,01	1,99
MgK	59,7	63,56	MgK	58,95	62,92
AlK	33,65	32,28	AlK	35,38	34,03
Total	100	100	Total	100	100

K3			K8		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
O K	1,8	2,8	O K	1,08	1,76
ZnL	2,49	0,95	ZnL	6,27	2,51
MgK	80,36	82,12	MgK	55,36	59,57
AlK	15,36	14,14	AlK	37,3	36,16
Total	100	100	Total	100	100

K4			K9		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
O K	1,25	1,94	O K	1,3	2,08
ZnL	2,2	0,83	ZnL	4,74	1,85
MgK	85,21	86,82	MgK	71,99	75,36
AlK	11,33	10,4	AlK	21,97	20,72
Total	100	100	Total	100	100

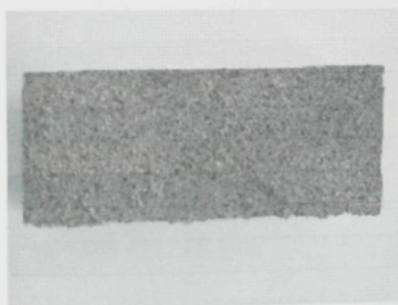
K5			K10		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
O K	0,63	0,97	O K	0,69	1,07
ZnL	2,17	0,82	ZnL	2,42	0,92
MgK	92,12	93,56	MgK	89,98	91,57
AlK	5,08	4,65	AlK	6,91	6,34
Total	100	100	Total	100	100



obr.č.22 povrchová vada



obr.č.23 detail z obr. 22

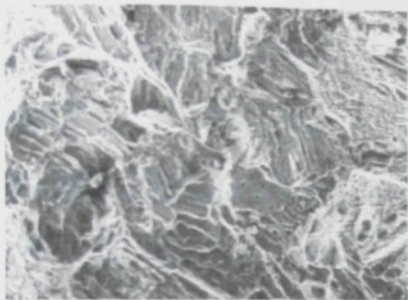


obr.č.24 mikroporezita

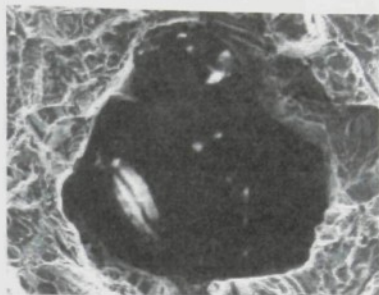


obr.č.25 detail z obr 24

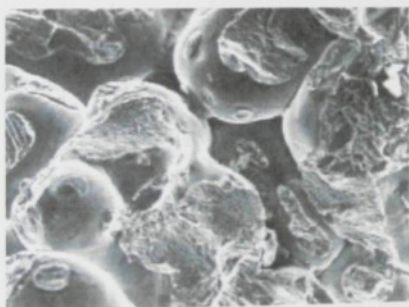
Obr. 97. - Vzorek s povrchovou vadou a vzorek s mikroporezitou



obr. č.26 křehký lom přes zrna zv..100x

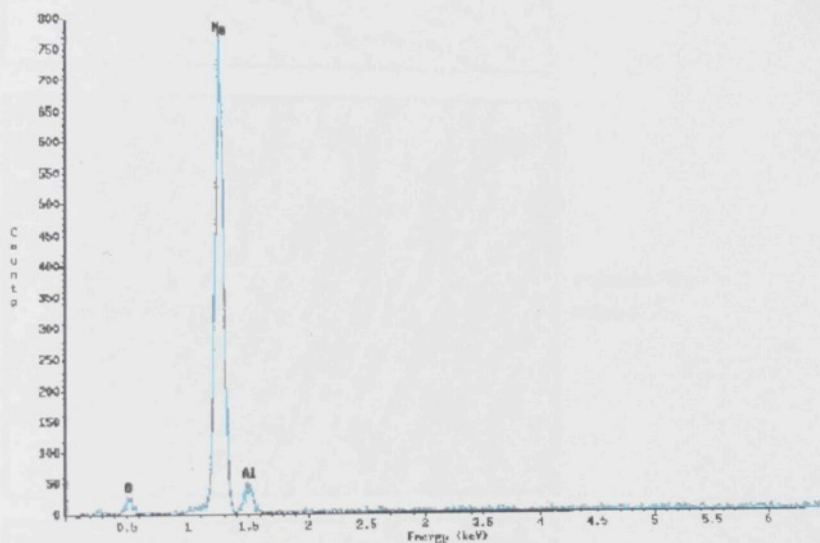


obr.č.27 čistý hořík v rozt. MgAl zv.100x



obr.č.28 mezidendritický lom zv. 100x

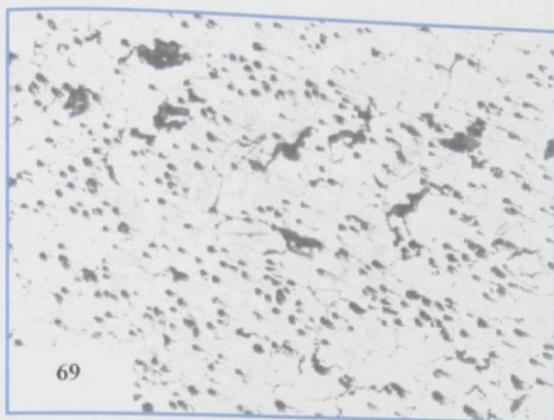
oblast "1" 86,28%Mg, 13,72%Al



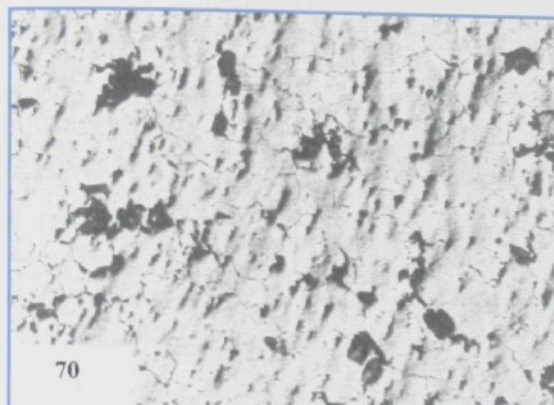
oblast "2" 100% Mg

oblast "3" 83%Mg, 17%Al

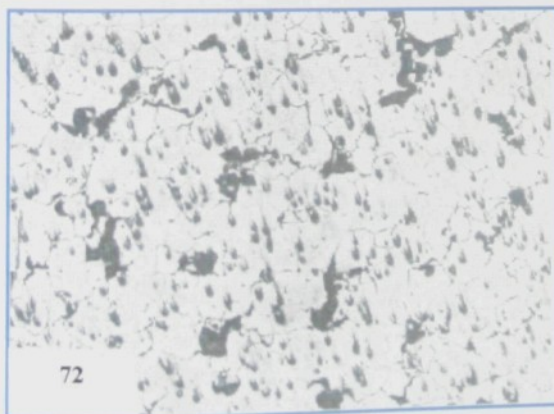
Obr. 99. - Mikroanalýza v oblasti 1,2,3 dle obr. 96



zvětšeno 50x
žebro č. 2

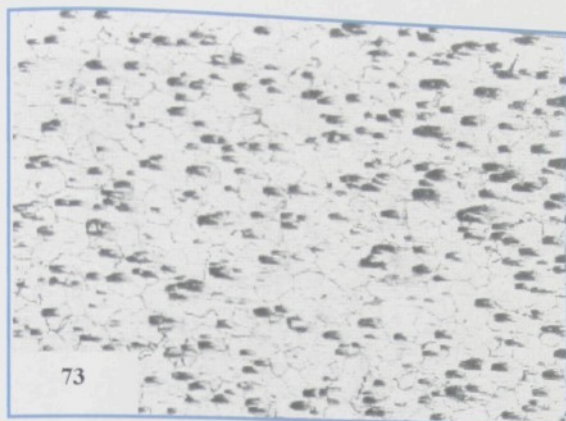


zvětšeno 50x
žebro č. 3



zvětšeno 50x
ráfek

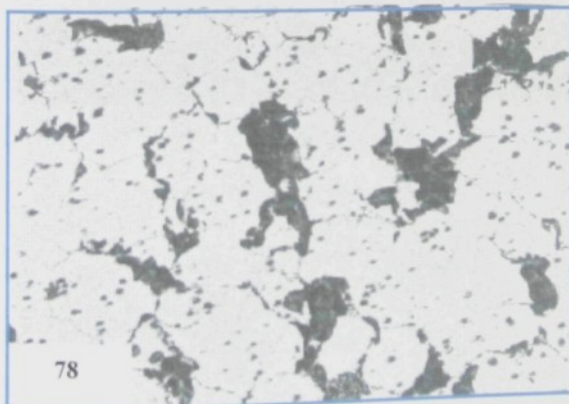
Obr. 100. - Struktury z kola č. 15 var. A
závěrečné únavové zkoušky



zvětšeno 50x
žebro č.2



zvětšeno 50x
žebro č.3

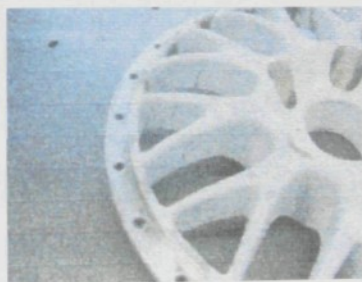


zvětšeno 50x
ráfek

Obr. 101. - Struktury kola č.9 var. B
závěrečné únavové zkoušky



Obr. 102. - Celkový pohled na střed kola č.3 po zkoušce únavy



Obr. 103. - Středý kol č.3 a č.4 vrácené po zkouškách únavy



Obr. 104. - Charakteristické praskliny po zkoušce únavy kola č.4



Obr. 105. - Praskliny po zkoušce únavy kola č.3



Obr. 106. - Detail průběhu praskliny po zkoušce únavy kola
varianta A - atypický průběh



Obr. 107. - Praskliny po zkoušce únavy kola
varianta A - atypický průběh



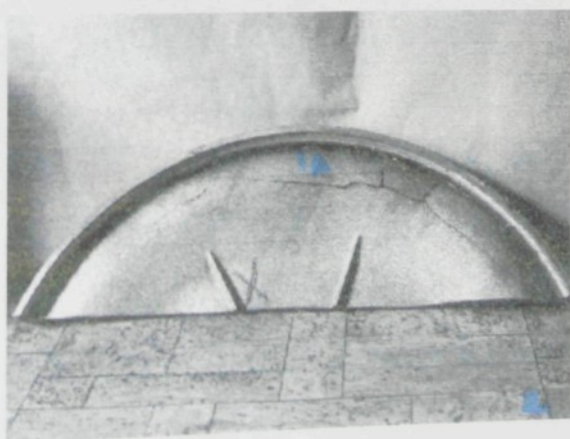
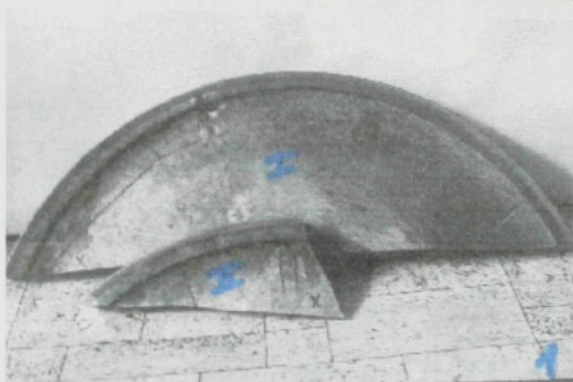
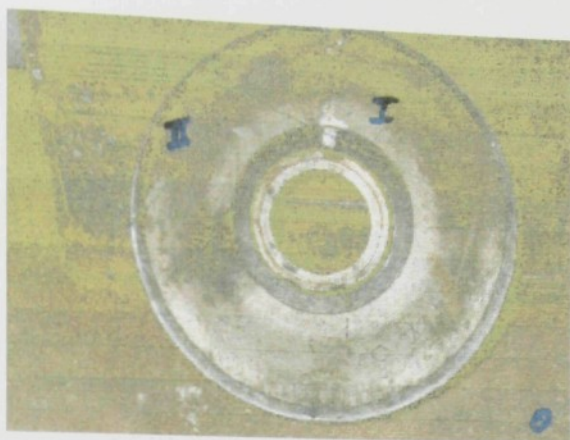
Obr. 108. - Železniční kolo po zkoušce únavy



Obr. 109. - Železniční kolo po zkoušce únavy



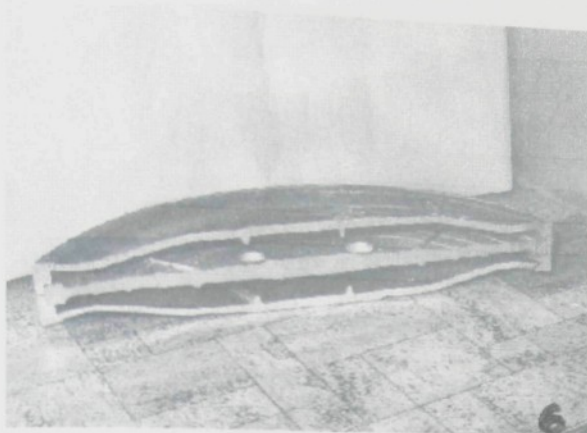
Obr. 110. - Detail železničnega kola - prasklina



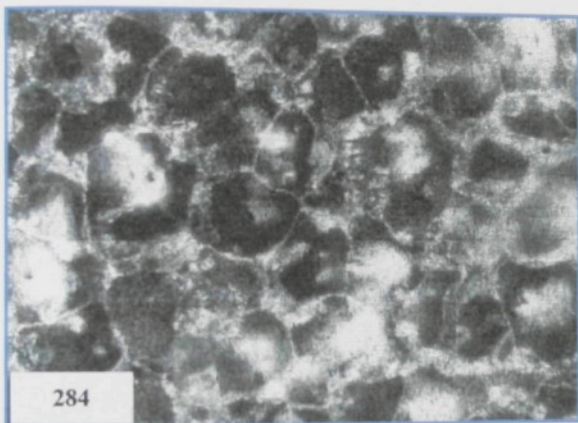
Obr. 111. - Odběr vzorků z železničního kola po zkoušce únavy



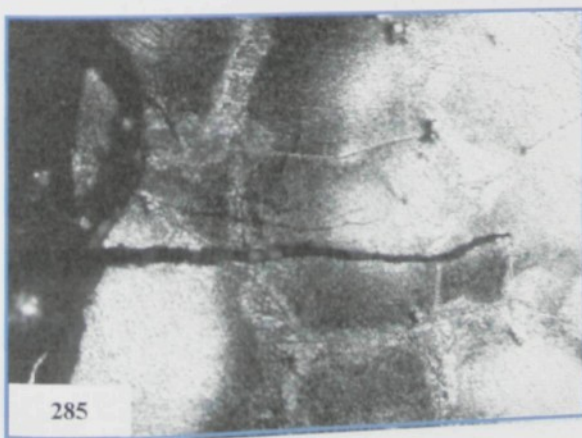
Obr. 112. - Únavová zkouška železničního kola



vyříznutá část kola I -
detail sestavy (střední díl
a dva pláště)

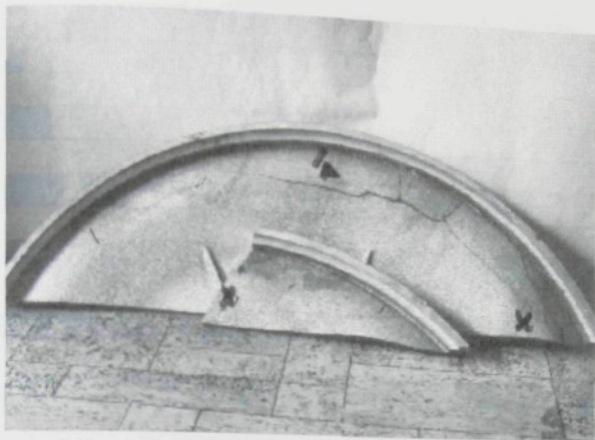


zvětšeno 100x
struktura v oblasti
iniciace únavového lomu

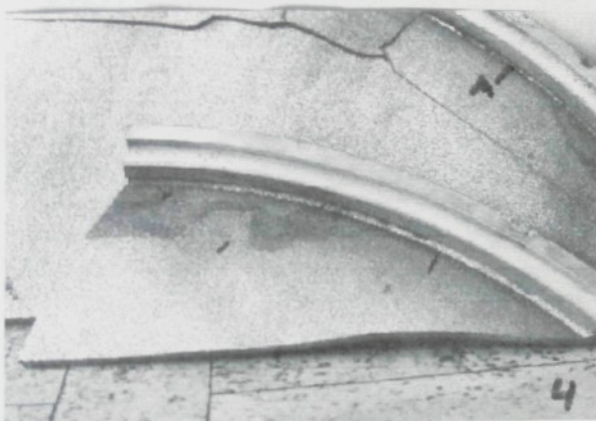


zvětšeno 200x
prasklina na vnitřním
povrchu pláště (prochází
přes zákl. zrno materiálu)

Obr. 113. - Železniční kolo v řezu a mikrostruktura s lomem



celkový pohled

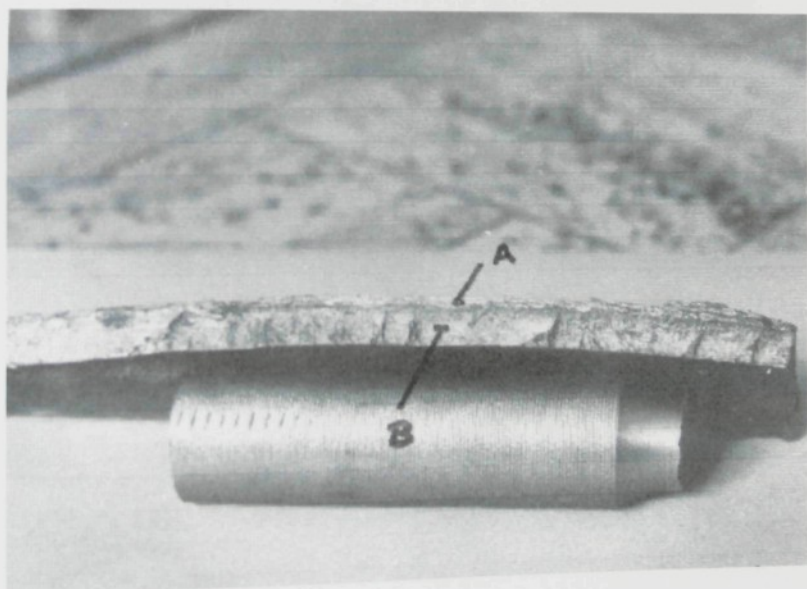
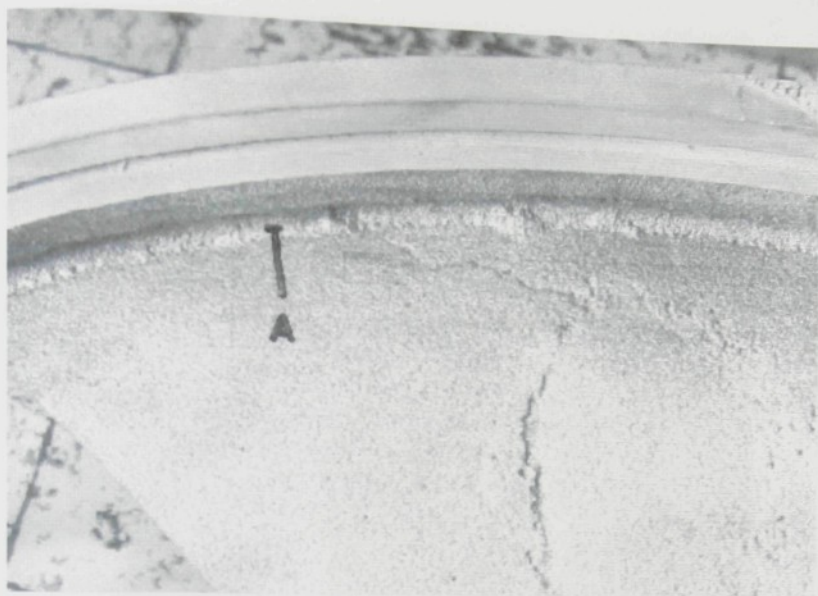


detail průběhu lomu

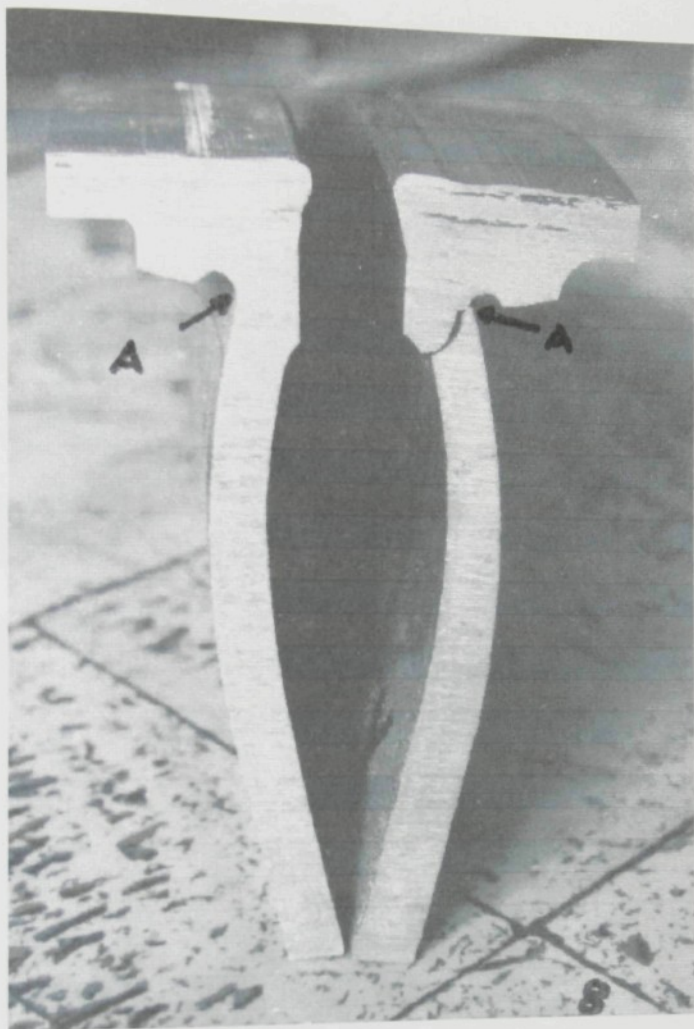


celkový pohled

Obr. 114. - Čelní pohled na vnější plochu pláště s prasklinami



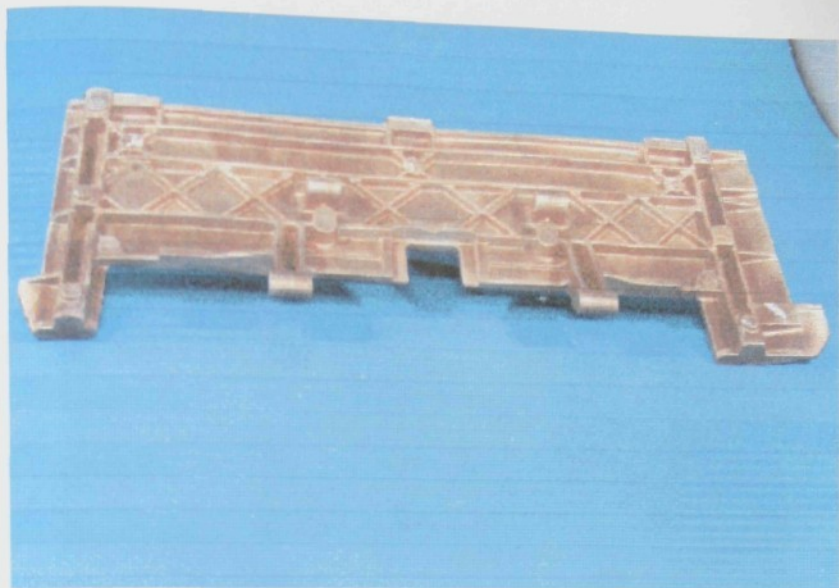
Obr. 115. - Iniciační centrum lomu v místě A a detail prvotní praskliny



Obr. 116. - Plášť železničního kola s prasklinou v místě A



Obr. 117. - Automobilové kolo po nesprávném režimu TZ



Obr. 118. - Vodicí deska pily



Obr. 119. - Posuvný kryt pily



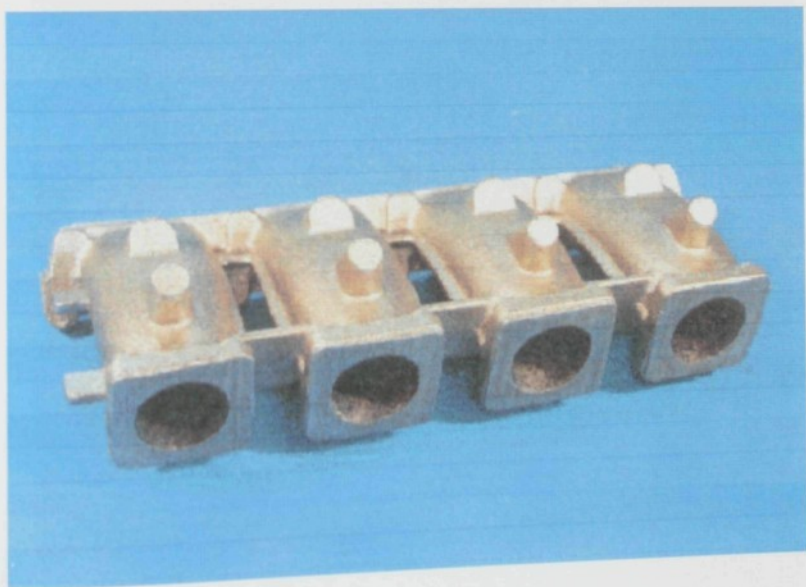
Obr. 120. - Viko



Obr. 121. - Paka



Obr. 122. - Víko



Obr. 123. - Sací potrubí



Obr. 124. - Polovina skříně motoru



Obr. 125. - Těhlice (závěs kola)



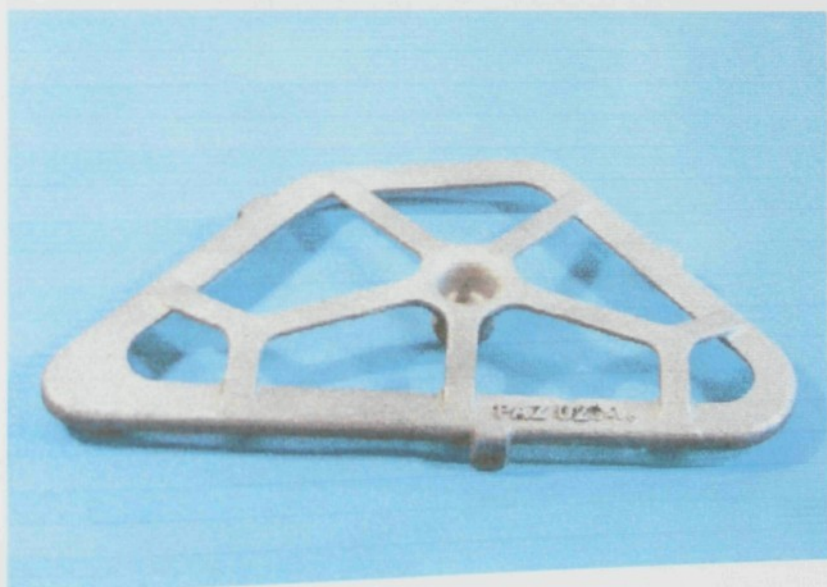
Obr. 126. - Náboj kola zadní a přední



Obr. 127. - Těhlice (závěs kola)



Obr. 128. - Rám spodní



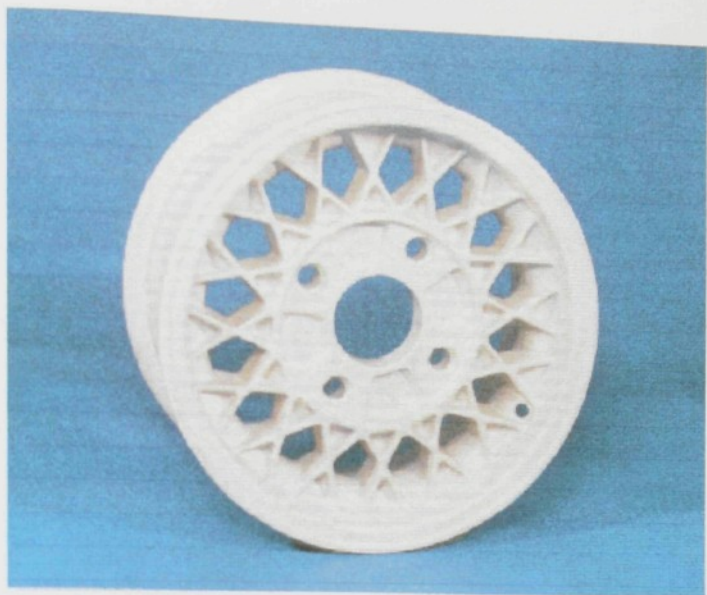
Obr. 129. - Kryt řemenu



Obr. 130. - Brzdová čelist



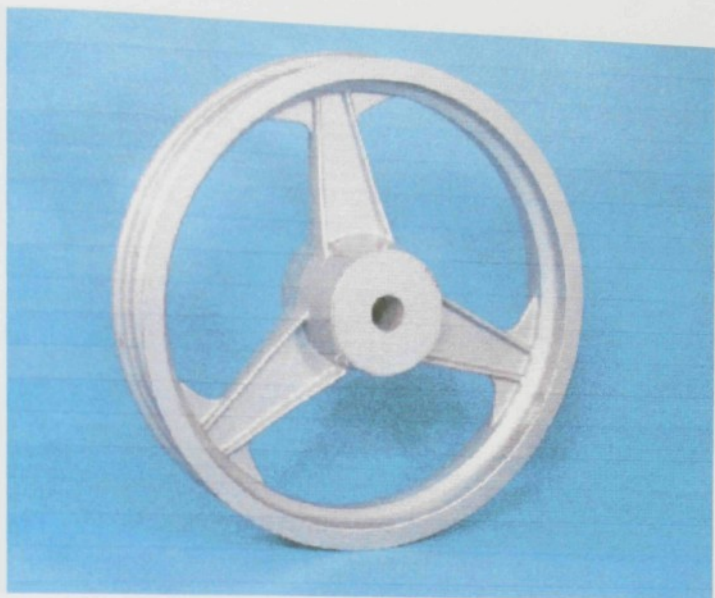
Obr. 131. - Viko ložiska



Obr. 132. - Automobilové kolo



Obr. 133. - Kolo veterán Rolls-Royce



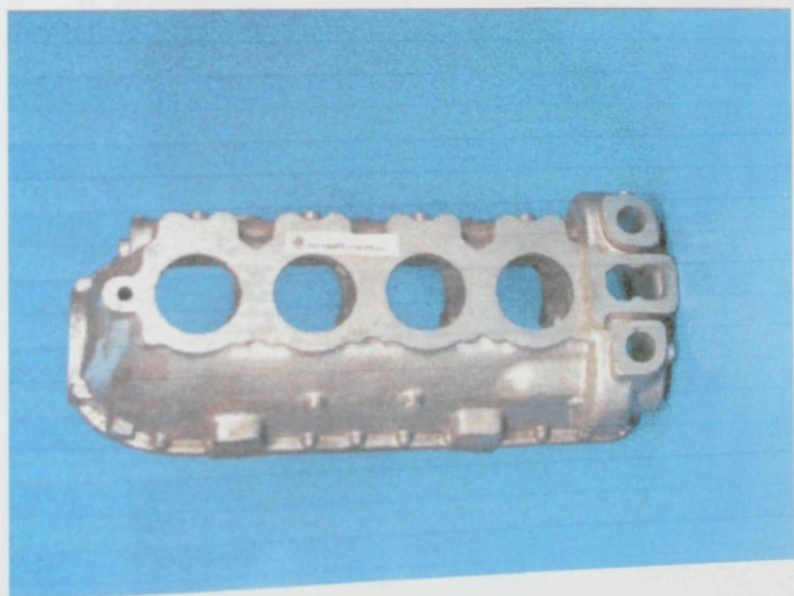
Obr. 134. - Motocyklové kolo 18x2,5-3"



Obr. 135. - Motocyklové kolo s dutými loukotěmi



Obr. 136. - Motocyklové kolo 16"



Obr. 137. - Skříň leteckého motoru



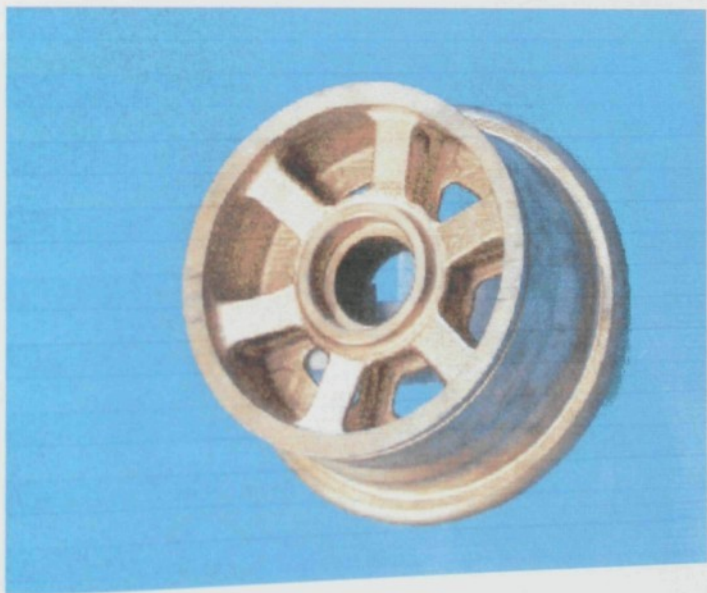
Obr. 138. - Skříň leteckého motoru



Obr. 139. - Skříň pohonu



Obr. 140. - Skříň pohonu



Obr. 141. - Ráfek kola letounu



Obr. 142. - Ráfek kola letounu



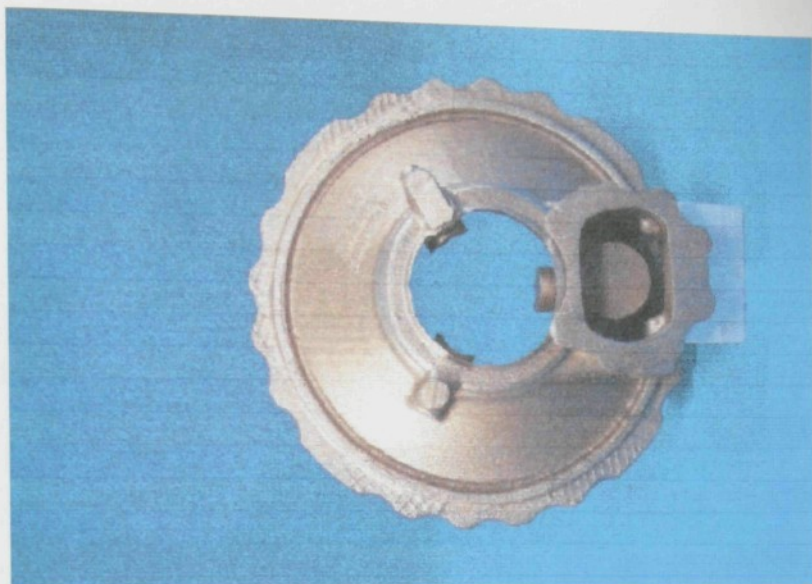
Obr. 143. - Lopatka



Obr. 144. - Skříň vačkového hřídele



Obr. 145. - Vstupní skříň kompresoru



Obr. 146. - Těleso středních převodů



Obr. 147. - Svařenec - 3ks odlitků z MgAl slitiny (celková hmotnost 400kg)