



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ANALÝZA PŘÍČIN VZNIKU TRHLIN V RÁFCÍCH KOL

ANALYSIS OF THE CAUSES OF CRAKS ON THE WHEEL RIMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DAVID PLUNDRÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. RUDOLF FORET, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Plundrák

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

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

Analýza příčin vzniku trhlin v ráfcích kol

v anglickém jazyce:

Analysis of the causes of cracks on the wheel rims

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Základní informace o ráfcích kol (typy ráfků a jejich profil, používané materiály, silové působení, napětově-deformační analýza)
3. Slitiny hliníku používané k výrobě ráfků kol (dělení, chemické složení, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti – přehled, detailní informace o předmětných slitinách)
4. Experimentální práce
 - 4.1 Použité experimentální metody (popis metod)
 - 4.2 Chemické složení
 - 4.3 Mikrostruktura a tvrdost
 - 4.4 Fraktografický rozbor
5. Rozbor dosažených výsledků a návrh opatření směřujících k zabránění vzniku trhlin
6. Závěr
7. Použitá literatura (zdroje)

Cíle diplomové práce:

Objasnění příčin praskání poskytnutých ráfků silničních kol na základě zejména fraktografických a strukturních rozborů

Seznam odborné literatury:

1. VLK, M., FLORIÁN, Z. : Mezní stavy a spolehlivost (učební texty) VUT FSI: Brno 2007.
2. MICHNA, Š., LUKÁČ, I., LOUDA, P. OČENÁŠEK, V. a kol. Encyklopedie hliníku, 701 s, ISBN 80-89041-88-4
3. MONDOLFO, L.F.: Aluminum Alloys: Structure and Properties Nonferrous Alloys, Butterworth, LONDON, 1976, p.660
4. KLESNIL, M. a kol., Cyklická deformácia a únava kovov, Veda : Bratislava 1987, 383 s.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 28.1.2013



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce hledá příčiny vzniku trhlin u ráfků jízdních kol v nejvíce zatěžovaných místech (v místech otvorů pro dráty). Z tohoto důvodu je v této práci uvedena napětově deformační analýza jednoduchého modelu ráfku pro provozní zatížení a dále popsán kompletní výrobní proces ráfku.

Jako experimentální materiál sloužily ráfky různých výrobců z hliníkových slitin EN AW-6061 a EN AW-6082 ve stavu T6, ve kterých se trhliny začali šířit. K posouzení materiálů ráfků byly využity metody optické spektrometrie, světelné mikroskopie, rastrovací elektronové mikroskopie, měření tvrdosti dle Vickerse a pro nalezení dalších trhlin byla provedena penetrační zkouška.

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno u ráfku 1 špatné konstrukční řešení nýtů. Nýty byly u všech vzniklých trhlin rozlomené, čímž vznikly ostré vruby, které iniciovaly únavové trhliny. Materiál ráfku 1 byl v pořádku. U ostatních dvou ráfků byly zjištěny nedostatky v materiálech. U ráfku 2 byl problém s hrubozrnnou rekrytalizovanou strukturou, která nedisponovala dostatkem tažnosti pro operaci zakružování profilu. Zakroužením vznikly trhliny, které se při provozu začaly propojovat. Nedostatečně rychlé ochlazování u ráfku 3 způsobilo vyloučení vytvrzující fáze (zejména fáze mědi) na hranice zrn. Navíc nebyl ráfek vytvrzen na požadované parametry, což mělo za následek praskání koroze za napětí.

Hliníkové slitiny jsou ideálním materiálem na ráfky jízdních kol. Vyžadují však spolehlivé konstrukční řešení a dodržování fyzikální metalurgie, která spočívá ve znalosti a využití množství vlivů chemického složení, tváření a tepelného zpracování na mechanické, chemické, fyzikální a technologické vlastnosti.

Klíčová slova

trhlina, ráfek, hliníková slitina pro tváření, mikrostruktura, tepelné zpracování, mechanické vlastnosti, únava, koroze

ABSTRACT

This thesis looks for the causes of cracks in bicycle rims in the most stressed areas (in places holes for wires). For this reason, in this work is the stress and strain analysis of a simple model of the rim to the working load is given and further the complete production process of the rim is described.

As an experimental material were used rims from different producers of aluminum alloy EN AW 6061 and EN AW 6082 T6 temper, in which a crack started to spread. For assessment of rims materials the methods of optical spectroscopy, optical microscopy, scanning electron microscopy, Vickers hardness test were used and for finding another crack penetration test was performed.

Based on the performed experiments bad design solution of rivets was found in the rim 1. Broken rivets initiated fatigue cracks. Material of rim 1 was alright. The other two rims were deficiencies in materials. For the rim 2 was a problem with coarse-grained recrystallized structure. The insufficiently rapid cooling for the rim 3 caused exclusion hardening phase (particularly copper phase) at grain boundaries. Moreover, the rim 3 is not cured to the required parameters.

Aluminium alloys are an ideal material for bicycle rims. However, they require reliable design solutions and meeting the physical metallurgy, which lies in the knowledge and use of influences of chemical composition, forming and heat treatment on mechanical, chemical, physical and technological properties.

Keywords

crack, rim, aluminum alloy for forming, microstructure, heat treatment, mechanical properties, fatigue, corrosion

Bibliografická citace

PLUNDRÁK, D. Analýza příčin vzniku trhlin v ráfcích kol. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza příčin vzniku trhlin v ráfcích kol* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou citovány v seznamu použitých zdrojů této práce

V Brně dne 23. 5. 2013

.....
David Plundrák

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rudolfu Foretovi, CSc. za obětavou spolupráci, cenné rady.

Rovněž děkuji ostatním pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství, jmenovitě paní Ing. Drahomíře Janové, panu Ing. Martinu Julišovi, Ph.D., paní Ivě Davidové a panu Borisi Zítkovi za pomoc při realizaci experimentů. Dále děkuji firmám Remerx a Constellium za exkurze, které mi pomohly pochopit problematiku výroby ráfků. Děkuji i Ing. Vladivoji Otčenáškoví, CSc. za emailové konzultace v otázkách nehomogenit hliníkových slitin.

V neposlední řadě patří můj velký dík rodině a přátelům za morální a psychickou podporu.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Základní informace o ráfcích kol.....	2
2.1	Typy ráfků a jejich profil (rozměry, profily, použití)	2
2.2	Druhy výpletů.....	4
2.3	Používané materiály na ráfky.....	5
2.4	Silové působení při jízdě.....	6
3	Slitiny hliníku používané k výrobě ráfků kol	7
3.1	Hliník a jeho slitiny.....	7
3.2	Slitiny hliníku používané k výrobě ráfků.....	8
4	Výroba ráfků a možnosti vzniku nehomogenit při výrobě	10
4.1	Postup výroby profilu pro ráfek jízdního kola	10
4.1.1	Příprava vsázky.....	11
4.1.2	Tavení	11
4.1.3	Odlévání.....	11
4.1.4	Homogenizační žíhání čepů.....	12
4.1.5	Příprava a ohřev na teplotu lisování	12
4.1.6	Průtlačné lisování hliníku a hliníkových slitin za tepla	13
4.1.6.1	Teorie tváření hliníku a jeho slitin.....	13
4.1.6.2	Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla	13
4.1.6.3	Přímé lisování	14
4.1.6.4	Nepřímé lisování	14
4.1.6.5	Vady výlisků.....	16
4.1.6.6	Anizotropie a nehomogenita struktury a vlastnosti výlisků	17
4.1.7	Ochlazování za matricí	19
4.1.8	Vytvrzování	20

4.2	Postup výroby ráfku z profilu	23
4.2.1	Zakružování	23
4.2.2	Spojování ráfků.....	23
4.2.3	Anodická oxidace	24
4.2.4	Soustružení brzdných ploch.....	25
4.2.5	Vytvoření otvorů pro niple	25
4.2.6	Nýtování.....	27
5	Degradace materiálu při provozu ráfku	28
5.1	Koroze hliníku a jeho slitin	28
5.1.1	Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin	28
5.1.2	Vliv chemického složení slitin na odolnost proti korozi“	29
5.1.3	Druhy koroze u hliníku a jeho slitin	30
5.2	Únava hliníku a jeho slitin	33
5.2.1	Lomové vlastnosti.....	34
5.2.2	Šíření únavové trhliny.....	34
5.3	Prevence degradace ráfku při provozu	35
5.3.1	Správné napětí paprsků výpletu	35
5.3.2	Konstrukční řešení pro zvýšení životnosti ráfku	36
6	Cíle práce	37
7	Experimentální práce	38
7.1	Napěťově deformační analýza v ANSYS 14.5	38
7.2	Experimentální materiál	39
7.3	Chemické složení	44
7.4	Tvrdost	44
7.5	Mikrostruktura.....	46
7.6	Fraktografický rozbor.....	54

8	Rozbor dosažených výsledků a návrh opatření k zabránění vzniku trhlin	57
9	Závěr	59
10	Seznam použitých zdrojů.....	60
11	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	62
12	Přílohy.....	63

1 Úvod

Cyklistický ráfek je nedílnou součástí jízdního kola. Slouží pro usazení galusky, pláštěvky či pláště (s duší i bez duše). Je nosným prvkem celého kola a umožňuje přenos energie mezi jezdce a zemí.

Pro cyklisty, kterým jde hlavně o rychlost je nejdůležitější, aby jejich ráfek vážil co nejméně. Místo těžké oceli si proto vybírají materiály jako hliníkové slitiny nebo uhlíková vlákna. Vyspělejší kola mají co nejaerodynamičtější tvar profilu i paprsků, aby při jízdě kladly co nejmenší aerodynamický odpor.

Klasický výplet, jak ho znají cyklisté, vynalezl v roce 1808 George Cayley. Cayley byl průkopníkem v konstrukci kluzáků a požadoval, aby byla kola jeho kluzáku lehká a pro přistání dostatečně pevná. Místo vystavování paprsků tlakem se rozhodl je namáhat na tah. Rovnoměrně utažené dráty stahují kolo dohromady a díky tomu se po nárazu nepoláme. Tento Cayleyho vynález se osvědčil i v mnoha jiných lidských činnostech. Krásným příkladem je moderní stadion Wembley. Oblouk stadionu Wembley má rozpětí 317 m a klane se přes celý stadion. Mimo to nese střechu vážící 7000 tun, takže už není potřeba sloupů a každý z 90000 návštěvníků má dokonalý výhled. Je tedy možno si oblouk stadionu představit jako ráfek a lana jako paprsky výpletu [22,23].

Tato práce se bude zabývat příčinami vzniku trhlin v ráfcích z hliníkových slitin. Pro pochopení příčin vzniku těchto trhlin bude rozebrána kompletní výroba a faktory působící na ráfek během provozu.



Obr. 1.1 Cayleyho kluzák [23]



Obr. 1.2 Stadion Wembley [22]

2 Základní informace o ráfcích kol

2.1 Typy ráfků a jejich profil (rozměry, profily, použití)

Ráfký lze v dnešní době rozdělit podle několika kritérií. Prakticky každá jízdní disciplína vyžaduje jiný profil ráfku. Základní odlišnost je však v galuskovém nebo plášťovém profilu ráfku. Geometrický rozdíl mezi galuskovým a plášťovým ráfkem je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.1 a) galuskový profil ráfku, b) plášťový profil ráfku [28]

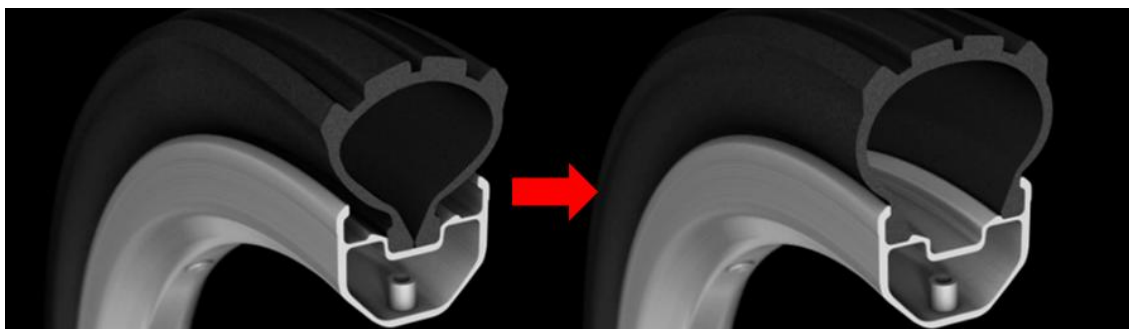
Galuskový profil ráfku

Galuskový ráfek má výhodu ve své jednoduché konstrukci (v porovnání s plášťovým ráfkem je lehčí). Na vnitřní plochu ráfku se lepí galuska. Dříve byla galuska záležitostí pouze silničních kol. Dnes galusek využívají i horská kola. Výhodou galusky je možnost vyšších tlaků. Dále odpadají třecí ztráty mezi pláštěm a duší. Nevýhoda pak vzniká při defektu. Při menším defektu se galuska dá zalepit tmelem (tmel může být do galusky aplikován již před defektem), ovšem větší defekt znamená konec jízdy a znehodnocení celé galusky. Z tohoto důvodu se galusky používají zejména na závody.

Plášťový profil ráfku

Na plášťový ráfek se nasazuje plášť, který se zahákne o hák ráfku. Obvykle se do pláště vkládá duše. Výhodou tohoto systému je bezproblémová oprava i v případě většího defektu pomocí klasického lepení.

V dnešní době probíhá velká expanze bezdušových plášťů (TUBELESS). Tohoto systému využívají především horská kola. Zapletená kola bez duše jsou lehčí a umožňují nižší huštění bez rizika procvaknutí duše. Navíc je možno do pláště aplikovat tmel, který v průběhu jízdy lepí menší defekty, aniž by cyklista musel sesednout z kola. Při větším defektu je třeba do pláště vložit duši. Problém bývá s nafukováním těchto TUBELESS plášťů menší pumpou. Plášť nedoléhá na strany ráfku a při nafukování vzduch uniká. Tento problém dokáže vyřešit speciální konstrukce ráfků, která je zachycena na obr. 2.2. Ráfek má uprostřed profilu žlábek, do kterého se plášť vloží. Při větším tlaku se plášť roztáhne a přeskočí na hák [15].



Obr. 2.2 Konstrukce UST TUBELESS ráfku v podání firmy Mavic [15]

Další možností je na ráfek obout plášťovku. Je to vlastně galuska, která se dá použít na plášťový ráfek. Výhodou je možnost vysokého huštění (až 15 bar) bez nebezpečí poškození ráfku (tlak vzduchu je soustředěn uvnitř plášťovky bez dalšího účinku na stěny ráfku). V jízdních vlastnostech se vyrovnají galuskám. Na rozdíl od galusek je možno nouzové jízdy bez tlaku. Princip plášťovky je na obr. 2.3 [27].



Obr. 2.3 Princip plášťovky TUFO [27]

Dále je možno dělit ráfky podle druhu jízdních kol na silniční/městské/trekingové, horské a jiné (ráfky BMX kol, skládací kola, dětská).

Silniční ráfky

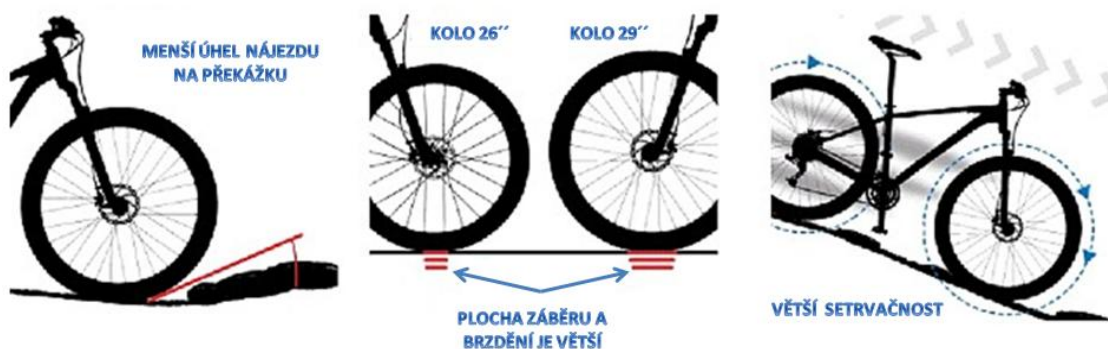
Průměr silničního ráfku je 28". Silniční ráfky lze dělit podle výšky ráfku. **Vysoký ráfek** (od 40mm) má dobrou aerodynamiku a setrvačnost, takže je dobrý v udržování vysoké rychlosti po rovině. Z tohoto důvodu se používají do rovinatých závodů a na časovky či triatlony. **Nízké ráfky** (od 20 mm) jsou lehké a používají se zejména do kopců. **Střední profil ráfku** (od 20 mm do 40) je jakýmsi kompromisem mezi vysokým a nízkým ráfkem.



Obr. 2.4 Srovnání výšky profilu ráfku v podání firmy Zipp [29]

Horské ráfky

Horské ráfky lze dělit dle druhu brzd na klasické (s brzdou plochou) nebo diskové (bez brzdové plochy, brzdění probíhá pomocí kotouče na náboji). Dále je možno dělit dle rozměru na 26'', 27,5'' a 29''. Výhoda 26 palcových kol je v jejich nízké hmotnosti, menším valivém odporu a ve větší stabilitě při malých rychlostech. 29 palcová kola mají naopak výhodu ve větších rychlostech díky větší setrvačnosti. Dále tato velká kola umožňují přejet větší překážky. Mají lepší záběr a lepší brzdění (větší plocha pláště v kontaktu s podložkou). 27,5'' kola jsou pak kompromisem mezi šestadvacítkou a devěťadvacítkou [30].



Obr. 2.5 Výhody 29'' kola ve srovnání s 26'' [30]

Jiné ráfky

Kromě výše uvedených základních druhů jsou ještě další druhy ráfků, od historických vysokých kol přes kola BMX až po kola pro děti. Tyto ráfky se pak značně liší v rozměrech a tvaru profilu.

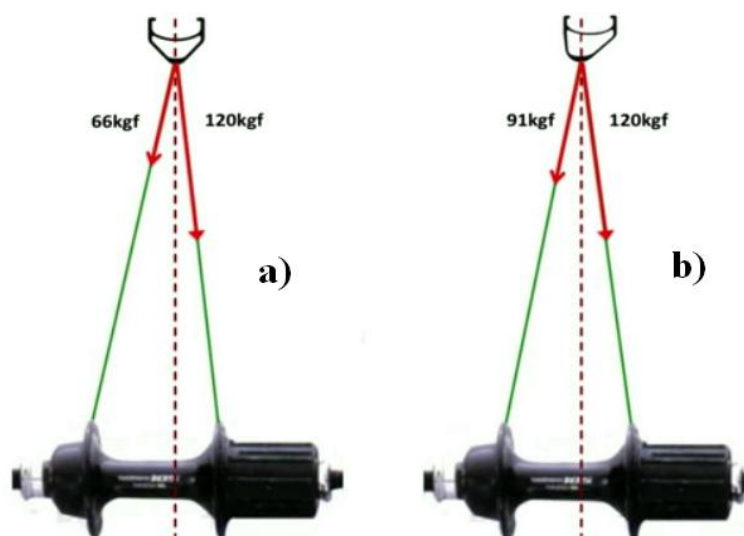
2.2 Druhy výpletů

Ráfky je možno naplést tangenciálně nebo radiálně. O druhu výpletu rozhoduje konstrukce ráfku a tělo náboje. **Radiální výplet** se používá takřka jen u předních silničních kol, protože na ně nepůsobí značné torzní zatížení. Pro větší torzní zatížení (zadní kolo nebo přední kolo s kotoučem) je nutno použít **tangenciální výplet**. U dražších výpletů lze nalézt kombinaci radiálního a tangenciálního výpletu. Často se na straně pohonu nebo na straně kotouče nachází tangenciální výplet a na straně druhé výplet radiální. Je to z důvodu zatížení, protože na straně pohonu a kotouče dochází k většímu torznímu namáhání. Některé značky (Campagnolo, Fulcrum, American Classic) dokonce používají poloviční počet paprsků na levé straně zadního kola, čímž uspoří další drahocenné gramy. Tato kombinace radiálního a tangenciálního výpletu je na obr. 2.6 [3, 17].



Obr. 2.6 Radiální přední kolo a kombinace tangenciálního a radiálního výpletu na zadním kole v podání značky Campagnolo [17]

Dalším důvod proč u zadního kola zvyšovat množství drátů na straně pohonu plyne ze samotné geometrie zadního kola. Jak naznačuje obr. 2.7, zadní kolo je asymetrické. Tento problém může také částečně vyřešit zadní asymetrický ráfek (obr. 2.7 b), který dokáže přerozdělit zatížení na levou stranu výpletu. [9]



Obr. 2.7 Asymetrie zadního výpletu, b) pozitivní dopad asymetrického ráfku na zatížení zadního výpletu [9]

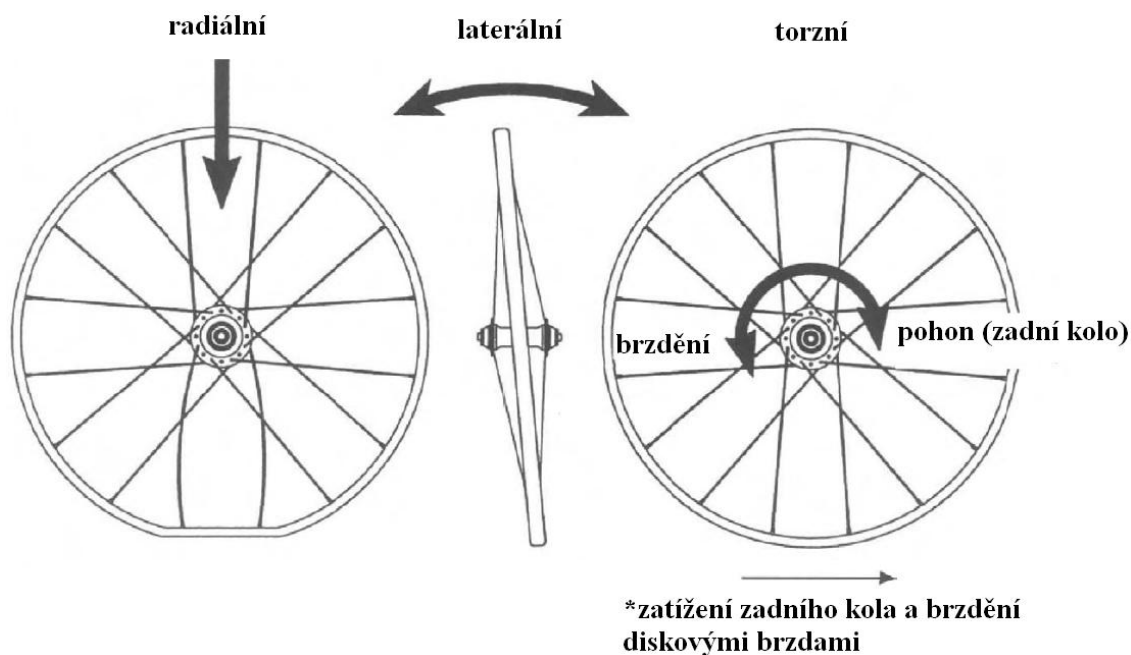
2.3 Používané materiály na ráfky

Od prvních ráfků ze **dřeva** se rychle přešlo ke konstrukci z kovu. První kovové ráfky byly **ocelové** a tedy velice těžké. Pro lepší vlastnosti se začalo využívat slitin hliníku. Současným trendem jsou **uhlíková vlákna (karbon)**. Ačkoli se karbon jeví jako lepší materiál díky své nízké hmotnosti a vysoké pevnosti, slitinám hliníku vyhynutí nehrozí. Zaběhnutá technologie výroby ráfků z **hliníkových slitin** dovoluje udržet nízkou cenu. Navíc jsou kovové brzdné plochy stále nepřekonané, pokud jde o dávkování brzdné síly. Modely s hliníkovými ráfky mohou být povzneseny mnoha novými nápady (viz. kapitola 5.3.2), které dokáží ráfek z hliníkové slitiny dostat na úroveň karbonových. Například pár zapletených kol R-Sys od značky Mavic váží pouhých 1295g, což tento set dostává do kategorie lepších karbonových setů[26].

Současná móda však velí koupit karbon. Levnější zapletené sety méně prestižních značek začínají na částce 10 000 Kč, ovšem najdou se i sety prestižních značek, jejíž cena překračuje i 100 000 Kč. Váha takových kol se může dostat pod magický 1 kg. Cena ráfků se odvíjí od kvality materiálu, výrobních nákladů (velký podíl ruční práce) a v neposlední řadě je to hlavně u dražších značek vývoj.

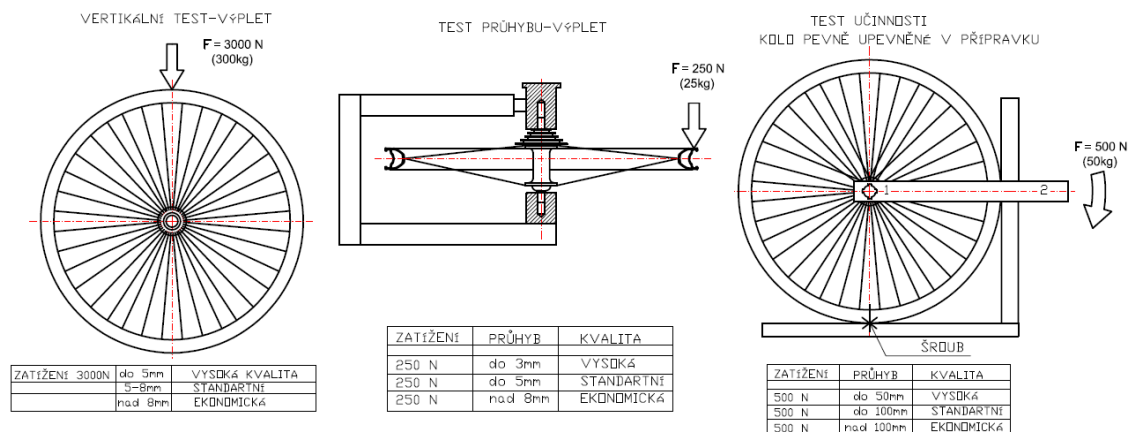
Jak už bylo dříve poznamenáno, karbonové ráfky mají problémy s dávkováním brzdné síly. Z tohoto důvodu se začaly vyrábět ráfky, které kombinují karbon s hliníkovou brzdou plochou. Tyto modely však bývají hmotnostně na úrovni duralových ráfků. Dá se však předpokládat, že s vývojem kompozitních materiálů a hlavně vývojem povlaků tyto hybridní konstrukce (karbon/hliník) po čase vymizí [26].

2.4 Silové působení při jízdě



Obr. 2.1 Druhy zatížení výpletu při jízdě [3]

Napětíově deformační analýzy pro tyto zatížení jsou rozebrány v experimentální části práce. Výrobci ráfků mají ve svých výrobních halách zátěžové stolice, na kterých provádějí zátěžové testy jak výpletů, tak i samotných ráfků. Jsou dva druhy stolic. První typ vyžaduje norma a bez úspěšného projití přes tuto stolic nesmí ráfek do prodeje. Druhým typem, jsou stolice, které slouží jako zpětná vazba pro vývoj ráfků. Příklad druhého typu zátěžové stolice je znázorněna na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Příklad testovacích stolic pro všechna tři zatížení výpletu [19]

3 Slitiny hliníku používané k výrobě ráfků kol

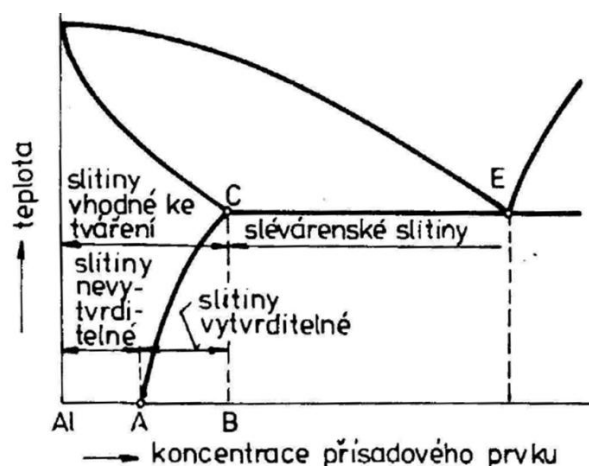
3.1 Hliník a jeho slitiny

Hliník je nepolymorfní kov, bílé barvy o měrné hmotnosti $2,69 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Krystalizuje v soustavě krychlové, plošně středěné. Teplota tavení hliníku je 660°C , teplota varu pak 2060°C . Tepelná vodivost za teploty 20°C je $222 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$. Mechanické vlastnosti hliníku závisí na jeho čistotě a zpracování. Čistý hliník ve vyžíhaném stavu má pevnost v tahu 60 MPa a tažnost 25% . Tvářením zastudena ho lze zpevnit až na 200 MPa . Na vzduchu se hliník povléká pasivační vrstvičkou Al_2O_3 , která jej chrání před další oxidací. Čistý hliník je velmi špatně slévateľný, avšak velmi dobře tvárný za tepla i za studena [1, 24].

Vlastnosti hliníku je možné zlepšit přísadami dalších prvků. Nejvýznamnější z přísad, které se vyskytují ve slitinách hliníku jsou zejména Cu, Mg, Mn, Si a Zn.

- **Cu** – zvyšuje pevnost a tvrdost - vytvrzováním, zhoršuje tvárnost a odolnost proti korozi. V technické praxi je nejčastěji legován společně s Mg.
- **Mg** – zlepšuje pevnost slitin – vytvrzováním a odolnost proti korozi. Když dojde k vyloučení precipitátu typu Mg_5Al_3 respektive Mg_5Al_8 na hranice zrn, slitina se stává náchylnou k interkrystalickému porušení a interkrystalické korozi.
- **Mn** – je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností, zjemnění zrna, zvýšení teploty rekrytalizace, zvýšení citlivosti ke kalení
- **Si** – hlavní legující prvek pro slévářenské slitiny Al-Si (siluminy). Slitiny série 6xxx jsou díky přítomnosti Mg_2Si schopny vytvrzení.
- **Fe** – je běžnou nečistotou v Al. Blokuje růst zrna v případě disperzně vyloučených bohatých částic.
- **Cr** – je aplikován za účelem snížení náchylnosti na růst zrn u Al – Mg slitin. U vytvrditelných slitin zvyšuje kalitelnost. Ztěžuje proces rekrytalizace u slitin Al – Mg – Si a Al-Zn.
- **Ti** – je legován spolu s B za účelem zjemnění struktury. Tvoří jemné intermetalické částice TiB_2 už při krystalizaci.
- **Pb** – je toxickým prvkem. Je aplikován pro zvýšení mechanické obrobiteľnosti. U slitin Al – Cu – Mg může být příčinou tvorby trhlin za tepla v důsledku segregace prvku v průběhu krystalizace.
- **Zn** – je hlavní legující prvek pro slitiny 7xxx. V součinnosti s Mg vytváří intermetalickou fázi MgZn_2 .
- **Sn** – je legován za účelem změny morfologie a jemnění zrna. U lité slitiny Al – Mg – Si – Mn dojde s legováním $0,4\%$ Sn k zvýšení pevnosti v tahu o více než 30% .

Slitiny hliníku se používají ve stavu litém nebo tvářeném, tepelně zpracovaném či tepelně nezpracovaném. Základní rozdělení slitin hliníku z hlediska jejich vhodnosti ke slévání, tváření a tepelnému zpracování vytvrzením ukazuje rovnovážný diagram na obr. 3.1 [1, 24, 25].



Obr. 3.1 Schéma rovnovážného diagramu slitin hliníku [24]

3.2 Slitiny hliníku používané k výrobě ráfků

Nejčastěji se ráfky vyrábějí z hliníkových slitin třídy 6xxx ve stavu T6. Tato třída s hlavními slitinovými prvky AlMgSi je na ráfky ideální. Charakteristickou vlastností těchto slitin je jejich výborná schopnost ke tváření, svařitelnost, odolnost vůči korozi a dobrá obrobitelnost. Z hlediska pevnostních vlastností je důležité množství intermetalické fáze Mg_2Si , díky které jsou slitiny tepelně zpracovatelné a jsou samokalitelné.

Nejčastěji používané slitiny hliníku jsou uvedené níže:

EN AW-6060

Tab. 3.1 Chemické složení slitiny hliníku EN AW-6060 [hm. %] [20]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,3 - 0,6	0,1 - 0,3	max. 0,1	max. 0,1	0,35 - 0,6	max. 0,05	max. 0,15	max. 0,1	0,05	0,15	zbytek

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW-6060 [20]

Tepelné zpracování	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	A_{50mm} [%]	Tvrdost [HB]
T6	150	190	8	6	65

Toto je základní slitina o nižší pevnosti, z které se vyrábí levnější ráfky [8].

EN AW-6063

Tab. 3.3 Chemické složení slitiny hliníku EN AW-6063 [hm. %] [20]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,2 - 0,6	max. 0,35	max. 0,1	max. 0,1	0,45 - 0,9	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,1	0,05	0,15	zbytek

Tab. 3.4 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW-6063 [20]

Tepelné zpracování	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	A_{50mm} [%]	Tvrdost [HB]
T6	170	215	8	6	65

Slitina EN AW-6063 má vylepšené vlastnosti oproti EN AW-6060. Toto zlepšení se projevuje zejména zvýšením mechanických vlastností [8].

EN AW-6005A

Tab. 3.5. Chemické složení slitiny hliníku EN AW-6005A [hm. %] [20]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,5 - 0,9	max. 0,35	max. 0,3	max. 0,5	0,4 - 0,7	max. 0,3	max. 0,2	max. 0,1	0,05	0,15	zbytek

Tab. 3.6 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW-6005A [20]

Tepelné zpracování	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	A _{50mm} [%]	Tvrdość [HB]
T6	215	255	8	6	85

Slitina EN AW-6005A má zvýšenou pevnost. Zejména zvýšenou odolnost proti únavovému lomu. S těchto důvodů se ráfky z těchto slitin uplatňují i závody [8].

EN AW-6061

Tab. 3.7 Chemické složení slitiny hliníku EN AW-6061 [hm. %] [20]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,40 - 0,8	max. 0,7	0,15 - 0,40	max. 0,15	0,8 - 1,2	0,04 - 0,35	max. 0,25	max. 0,15	0,05	0,15	zbytek

Tab. 3.8. Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW-6061 [20]

Tepelné zpracování	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	A _{50mm} [%]	Tvrdość [HB]
T6	240	260	9	7	85

Ráfek ze slitiny EN AW-6061 je také hojně využíván pro závody díky jeho vysoké pevnosti, ovšem zvýšený obsah mědi může způsobovat vnitřní korozi a rychlejší stárnutí materiálu [8].

EN AW-6082

Tab. 3.9 Chemické složení slitiny hliníku EN AW-6082 [hm. %] [20]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ostatní		Al
								jednotl.	celkem	
0,7 - 1,3	max. 0,5	max. 0,1	0,4 - 1	0,6 - 1,2	max. 0,25	max. 0,20	max. 0,10	0,05	0,15	zbytek

Tab. 3.10 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku EN AW-6082 [20]

Tepelné zpracování	Rp _{0,2} [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	A _{50mm} [%]	Tvrdość [HB]
T6	250	290	8	6	95

EN AW-6082 je nejpevnější slitinou na ráfky. Ráfky z těchto slitin jsou určeny výhradně pro vrcholový sport [8].

Poznámka: Výše uvedené normy pro jednotlivé slitiny platí obecně pro tenkostěnné profily vyráběné průtlačným lisováním. Pro různé tloušťky stěn v jednom profilu, se nejnižší specifikované vlastnosti považují za platné pro celý profil. Je dobré si také uvědomit, že zakroužením tohoto profilu (plastickou deformací) hodnoty pevnosti ještě narostou [20].

Většina výrobců ráfků přesnou normu neuvádí a používá své obchodní označení. Většinou tyto obchodní názvy znamenají výše uvedené slitiny. Jsou ale i vyspělejší slitiny, například legované vzácným Skandiem. Na skandiové ráfky sází hlavně firma Bontrager u svých vrcholných duralových modelů.

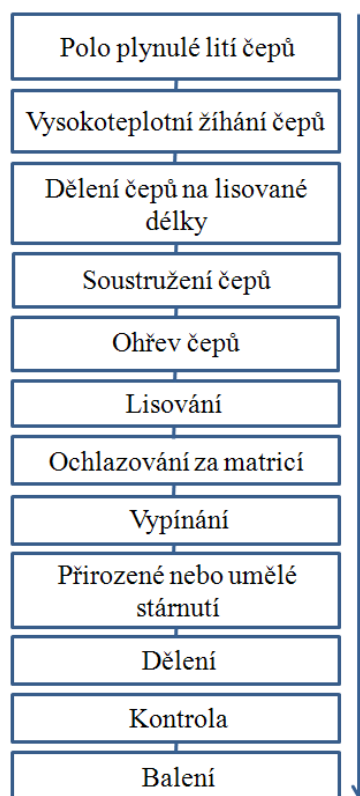
4 Výroba ráfků a možnosti vzniku nehomogenit při výrobě

Tato kapitola je věnována popisu výroby ráfků z hliníkových slitin. Bude zde upozorněno na možné chyby, které mohou mít zásadní dopad na vlastnosti ráfku. Ráfky jízdních kol z hliníkových slitin se vyrábí z profilů vzniklých průtlačným lisováním za tepla. Tato operace se uskutečňuje u dodavatele výrobce ráfků. Výrobce ráfků pak přetvoří profil (polotovar) v ráfek pomocí dalších technologických operací, které budou v této práci také podrobně popsány.

Už na začátku je dobré upozornit na dvě možnosti výrobců ráfků spojené se zakružováním a vytvrzováním. Některé značky přebírají profil od dodavatele v nevytvrzeném stavu. Vytvrzení se provede ve výrobním závodě výrobce ráfků až po zakroužení. Druhou možností je odběr profilu od dodavatele ve vytvrzeném stavu T6. Druhá varianta však vyžaduje těsnou spolupráci mezi výrobcem ráfku a dodavatelem profilu. Musíme si uvědomit, že zakružování je tváření zastudena, která vyžaduje dostatek tažnosti. Pokud má dodaný profil ve stavu T6 malou tažnost může dojít k vzniku trhlin.

4.1 Postup výroby profilu pro ráfek jízdního kola

Zjednodušené schéma technologického postupu toku materiálu při průtlačném lisování je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Hrubé schéma toku materiálu při průtlačném lisování [1]

Výše uvedené schéma je obecné a může být obohaceno i o další operace (např. kontrolní apod.). Dále se schéma odlišuje pro různé materiály a pro různé požadavky zákazníka, který stanoví, zda se vysokoteplotní žíhání čepů, obrábění čepů nebo mezioperační žíhání musí nebo nemusí provádět [1].

4.1.1 Příprava vsázky

Výrobní proces začíná přípravou vsázky. Ta se skládá z vratného odpadu (hliníkového šrotu), hliníkových housek (je možná i kapalná vsázka, v této práci se však omezíme na vsázku tuhou) o dané čistotě a z přesného množství legur. Všechny tyto suroviny vsázky se suší nad 100°C, případně se vyžihají i na vyšší teploty. Je to z důvodu existence různých vrstev, které obsahují zbytky anorganických a organických sloučenin a také vlhkost. Vodík v atomární nebo molekulární formě je hlavní příčinou naplynění roztaveného kovů a slitin. Sušený musí být proto i další materiály (tavidla, očkovací a modifikační přísady apod.) [1].

4.1.2 Tavení

Čistý hliník patří mezi kovy se střední teplotou tání. Obecně se uvádí teplota 660°C. Základem pro design slitin jsou příslušně binární diagramy. Zpravidla platí, že s rostoucím obsahem hlavního legujícího prvku v hliníku klesá teplota likvidu jednotlivých slitin. Teplota přehřátí je definovaná jako nejvyšší teplota taveniny, dosažená v průběhu tavení kovů a slitin. Maximální teplota přehřátí Al slitin (kromě výjimečných případů) je 800°C [1].

V průběhu tavení dochází ke změnám chemických, fyzikálních, mechanických i dalších vlastností tavených materiálů. Těmto změnám se věnuje teorie metalurgických pochodů. Nejdůležitějšími pochody při tavení Al-slitin jsou pochody oxidace, desoxidace, naplynění, odplynění, vypařování komponent vsázky a v konečné fázi také legování taveniny na požadované chemické složení. Patří sem i očkování, modifikace a rafinace, které zajišťují vysokou metalurgickou kvalitu. Tavení kovů se provádí v tavicích pecích s dostatečným příkonem, aby tavba byla časově co nejkratší, tavení probíhalo intenzivně a přehřátí bylo minimální [1].

Na závěr je nutno zdůraznit, že cílem připravit taveninu dané slitiny s chemickým složením v rozmezí předepsaného složení legujících prvků a s minimálním obsahem plynů (zejména vodíku). Připravená naočkovaná a modifikovaná Al-slitina, musí mít požadovanou lící teplotu. Tavenina musí být zbavena v maximální míře oxidů a při vlastním odlévání je nutno zachytit kovové i nekovové vměstky [1].

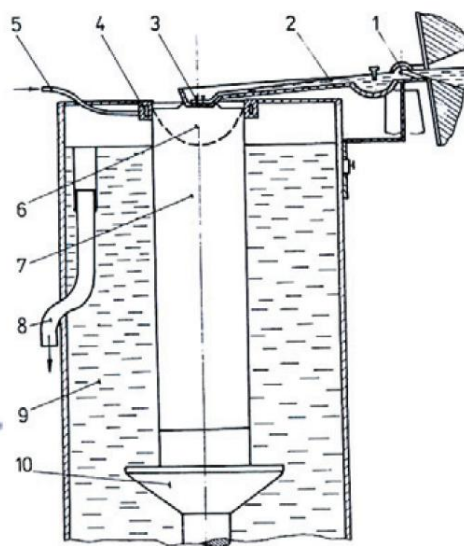
4.1.3 Odlévání

Jako polotovary pro lisování hliníkových slitin slouží dlouhý čep, který je vhodný odlít polo kontinuálně do krystalizátoru.

Polo kontinuální odlévání do krystalizátorů nepřímo chlazených vodou

Kontinuální pochody jsou velice efektivní, protože je možno co nejvíce technologických operací provádět s účinkem akumulovaného tepla získaného z polo kontinuálního odlévání do krystalizátoru. Vysoká tepelná vodivost krystalizátorů umožňuje intenzivní ochlazování krystalizátoru a tím i odlitého slitku, což příznivě působí na strukturu a tím i na mechanické vlastnosti vyrobených polotovarů. [1]

Schéma zařízení pro klasické polo kontinuální odlévání slitků je znázorněno na obr. 4.2. Celý proces odlévání může probíhat přes sifonové uspořádání odpichového otvoru tavicího zařízení nebo udržovací pece s možností regulace množství taveniny, která přitéká do mezipánve. To zajišťuje rovnoměrné rozdělení taveniny v krystalizátoru. Intenzivním ochlazováním proudící vody v krystalizátoru dochází k tuhnutí slitku od povrchu směrem do středu slitku [1].



Obr. 4.2 Princip zařízení pro plynulé odlévání slitin hliníku: 1-osa naklonění tavící pece, 2-žlábek, 3-rozdělovač slitiny, 4-krystalizátor, 5-přívod a odvod chladicí vody, 6-tavenina, 7-slitek, 8-přepad chladicí vody, 9-chladicí voda, 10-dno krystalizátoru [1]

4.1.4 Homogenizační žíhání čepů

V současné době je převážná část polo kontinuálně odlitých čepů podrobena vysokoteplotnímu žíhání. Hlavním cílem tohoto žíhání je získat vhodnou strukturu při lisování. Při dlouhodobé výdrži materiálu na relativně vysoké teplotě dochází k odstranění důsledků nerovnovázné krystalizace (vyrovnání koncentrace prvků v tuhém roztoku, nebo rozpuštění eutektických fází na hranicích zrn). Parametry homogenizačního žíhání, které zlepšuje lisovatelnost je nutno volit v závislosti na typu slitiny. Rychlost ohřevu, výška teploty, doba ohřevu a následný způsob ochlazení čepu jsou závislé na chemickém složení slitiny a požadavcích, které jsou na slitiny kladeny.

Příklad parametrů homogenizačního žíhání:

- slitina Al-Mg-Si: teplota 535°C, výdrž na teplotě po dobu 4-12 hod. (tato slitina se často používá na ráfky jízdních kol) [1].

4.1.5 Příprava a ohřev na teplotu lisování

Polo plynule odlité čepy jsou po možném homogenizačním žíhání naděleny na pile nebo nůžkách na lisované délky. Dle požadavků na kvalitu povrchu se čepy soustruží.

Ohřev osoustružených čepů pak probíhá v průběžných několika zónových pecích. Tyto pece mohou být plynové, elektrické obloukové, olejové, elektrické odporové nebo i indukční. V případě využití homogenizačního žíhání je nutné před vložením do recipientu materiál ochladit na teplotu lisování. Příliš vysoká teplota lisování by totiž vedla k vzniku trhlin zatepla z důvodu zvýšeného tření v recipientu. Zvýšená teplota by také mohla způsobit nežádoucí strukturní změny jako je např. natavení fází [1].

Příklad parametrů ohřevu pro lisování:

- slitina AlMgSi1: teplota recipientu 430°C, teplota čepu 450 až 500°C
- slitina AlMgSi0,5: teplota recipientu 410°C, teplota čepu 460 až 480°C [1]

Z příkladů lze snadno vypožorovat, že i pro velmi podobné slitiny se hodnoty výtokových rychlostí mohou značně měnit. Navíc jsou hodnoty orientační. Přesné hodnoty pro konkrétní slitiny závisí na lisovací metodě, typu lisu, lisovacím poměru, složitosti profilu apod [1].

4.1.6 Průtlačné lisování hliníku a hliníkových slitin za tepla

4.1.6.1 Teorie tváření hliníku a jeho slitin

Základem tvářecích pochodů jsou velké plastické deformace, při kterých se trvale mění tvar a rozměry tělesa. Dle podmínek tváření mohou kromě tvarových změn nastávat i změny v deformovaném objemu i různé chemické a fyzikální děje. Mezi technologické tvářecí pochody řadíme průtlačné lisování, kování, válcování, tažení a tvarování. Změny tvaru a rozměrů jsou způsobeny vnějšími silami, které na materiál působí prostřednictvím pracovních nástrojů (lisovacích matic, kovadel, zápustek, válců, tažných matic a trnů). Při tvářecích pochodech je důležité, aby nebyl překročen mezní stav napjatosti. Překročením mezního stavu napjatosti totiž dojde k porušení soudržnosti materiálu. Stav napjatosti přímo souvisí s velikostí přetvoření, které lze pro daný materiál a za daných deformačních podmínek dosáhnout. Největšího přetvoření lze dosáhnout zejména při tlakových napětích a nejmenšího za převládajících tahových napětí [1].

Přetvárný odpor charakterizuje odpor kovu proti plastické deformaci a závisí na řadě faktorů. Hlavními faktory jsou teplota a rychlosti deformace, dále stav napjatosti, chemické složení materiálu, stupeň deformace a tření mezi materiálem a nástrojem. Hodnoty přetvárného odporu můžeme stanovit tahovou zkouškou, ovšem pro hodnocení průmyslových tvářecích pochodů jsou výhodnější modelové pěchovací zkoušky, nebo zkouška krutem. Z těchto zkoušek prováděných při různých teplotách a rychlostech deformace dostaneme deformační křivky, které slouží jako zdroj informací pro modelování deformačních procesů. Modelování deformačních procesů probíhá v metodě konečných prvků (MKP). MKP je v dnešní době nepostradatelným pomocníkem pro modelování procesů toku materiálu [1].

4.1.6.2 Průtlačné lisování hliníku a jeho slitin za tepla

Průtlačné lisování za tepla je spolu s válcováním nejpoužívanější metodou tváření hliníku a jeho slitin. Výhoda metody spočívá v tom, že můžeme při malém počtu operací vyrábět výlisky s jednoduchým nebo složitým průřezem, s vysokou přesností a kvalitou povrchu. Dále je možná rychlá změna výrobního sortimentu jednoduchou výměnou tvářecí matrice. V matici může být více otvorů, což závisí na velikosti výlisku. Příklad matrice je na obr. 4.3. Nevýhodou je relativně krátká životnost matrice a omezení v délce výlisku daná výrobní halou [1].



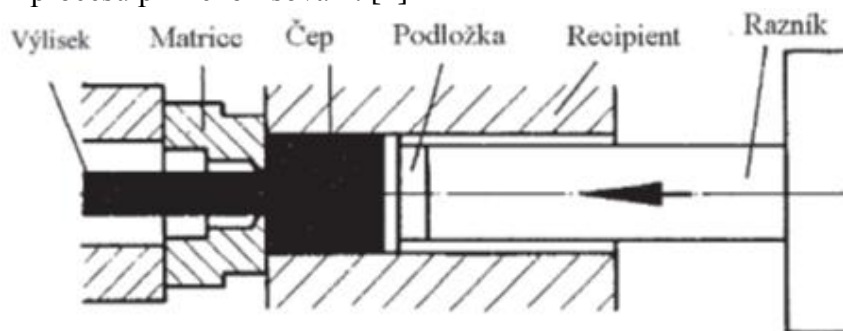
Obr. 4.3 Matrice pro průtlačné lisování [1]

Mezi jednotlivými slitinami hliníku jsou poměrně velké rozdíly v jejich deformačním chování, rozdílných způsobech zpevňování a v různých požadavcích na tvar. Z toho plyne, že nelze lisovat jednou univerzální metodou a je využívána řada variant lisování [1].

Lisovací teplota musí být volena s určitým kompromisem, aby byl zajištěn co nejmenší přetvárný odpor, ale zároveň, aby nedocházelo k povrchovým vadám a trhlinám v důsledku příliš vysoké teploty. Čep je zasouván do recipientu lisu, který je také předehřátý na určitou teplotu. Razník nám poté protlačí kulový čep přes lisovací matrici s příslušným tvarovým otvorem. Velikost deformace charakterizuje lisovací poměr λ , který je dán vztahem $\lambda = S_0/S_1$, kde je S_0 výchozí průměr čepu a S_1 průřez výlisku. Zbytek čepu, tzv. nedolisek, je odštípen a z lisu odstraněn. Podle vzájemného pohybu razníku a podle uspořádání dělíme tyto nástroje na přímé a nepřímé lisování [1].

4.1.6.3 Přímé lisování

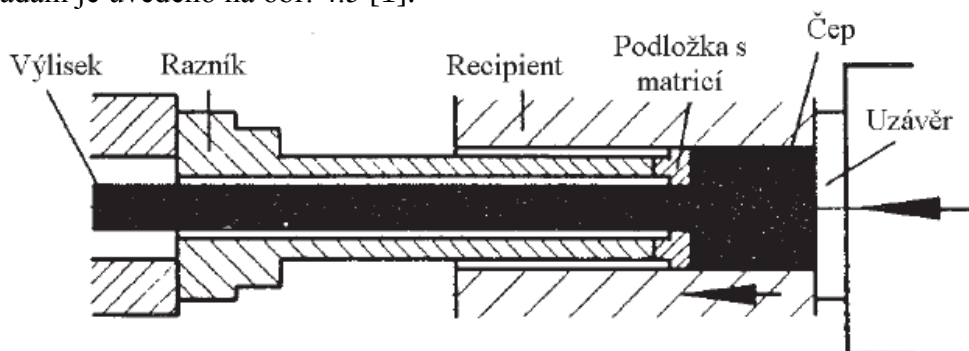
Tento způsob je pro lisování hliníku a jeho slitin nejběžnější díky jednoduchému uspořádání. Schéma uspořádání je uvedeno na obr. 4.4. Při přímém lisování se obvykle neprovádí mazání čepu ale pouze mazání matrice. Tímto způsobem lze lisovat tzv. „na košili“. To znamená, že kruhová podložka má o 1 až 2 milimetry menší průměr, než je průměr recipientu. Tím se po obvodu odřízne nekvalitní povrchová vrstva čepu tzv. košile. Nevýhodou je, že se zvyšuje podíl odpadu o objem materiálu v košili, který se musí společně s podložkou po lisování odstranit. V současné době se používá přímého lisování „bez košile“, což je umožněno soustružením povrchu čepu před lisováním, nebo zvýšením kvality povrchu odlitých čepů. To má příznivý vliv na povrch výlisků a na zrychlení procesu přímého lisování. [1]



Obr. 4.4 Schéma přímého způsobu lisování [1]

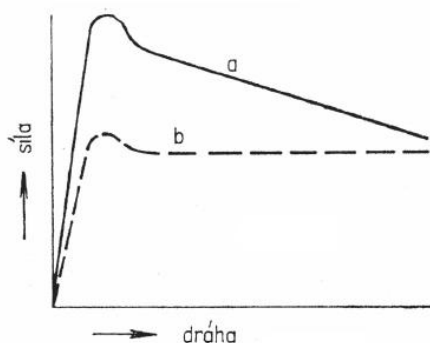
4.1.6.4 Nepřímé lisování

Na rozdíl od přímého lisování je směr pohybu výlisku vůči razníku opačný. Schéma uspořádání je uvedeno na obr. 4.5 [1].



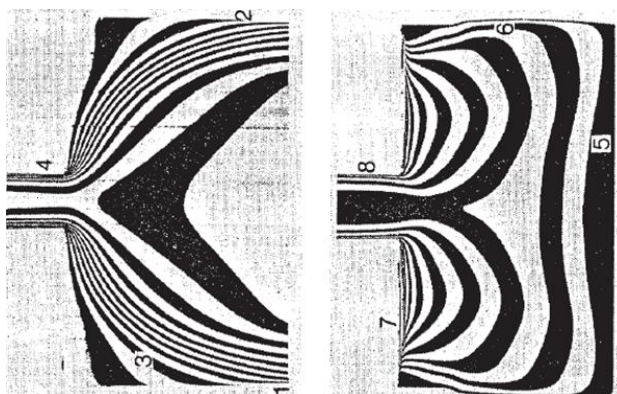
Obr. 4.5 Schéma nepřímého způsobu lisování [1]

Nepřímým lisováním se oproti přímému způsobu výrazně snižuje tření mezi kontejnerem a tvářeným materiálem. Tím se výrazně sníží požadavky na lisovací sílu. Toto snížení lisovací síly je znázorněno na obr. 4.6 a činí od 20 do 30%. Specifický tlak se pak sníží až o 70%. Toto snížení lisovací síly lze využít například k vylisování výlisků menšího průřezu, zvětšením průměru čepu, snížení teploty čepu a tím dosáhnout vyšších lisovacích rychlostí [1].



Obr. 4.6 Závislost lisovacího tlaku na pohybu razníku a)při přímém b)při nepřímém způsobu lisování [1]

Při nepřímém lisování je materiál lépe protvářený, což vede k menšímu výskytu vad a výskytu povrchových rekrystalizovaných vrstev. Pro nepřímé lisování je vyšší využití materiálu, což plyne ze zhruba poloviční tloušťky nedolisku. Největší nevýhodou nepřímého lisování je přenos vad z lisovaného čepu na výlisek z důvodu odlišného toku tvářeného materiálu před matricí. Tento tok ukazuje Obr. 4.7. Proto se pro nepřímé lisování používá výhradně u obrobených čepů. Další nevýhodou je omezení vnitřního průměru razníku, kterým musí procházet výlisek, což omezuje využití lisu pro lisování širokého rozměrového sortimentu výlisků. Výhod a nevýhod metod přímého a nepřímého lisování je značné množství, proto jsou některé lisy konstruovány tak, že je lze použít, jak pro přímý způsob, tak pro způsob nepřímý. [1]



Obr. 4.7 Pohyb materiálu v čepu před matricí pro a)přímé a b)nepřímé lisování [1]

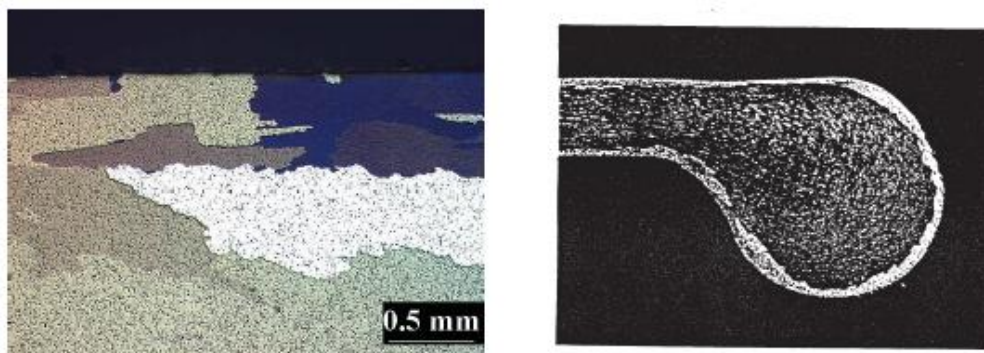
4.1.6.5 Vady výlisků

Vady výlisků vznikají nedodržením lisovacích parametrů, nevhodnou manipulací s výlisky, dále od strukturních, povrchových nebo vnitřních vad z lití nebo soustružením čepů. Jedná se zejména o vady typu trhlin za tepla, zvýšené drsnosti povrchu, podélné rýhy, zalisované nečistoty, puchýře, pleny apod. [1].

Na zkušebních lomech se vyskytují vady z lití, jako jsou tmavé oxidické vměstky nebo vláknitý dřevitý lom. S vláknitým dřevitým lomem se setkáváme při zvýšeném výskytu intermetalických fází, které zvýrazňují vláknitou strukturu při lisování. **Dřevitý lom** je často doprovázen zhoršenými plastickými vlastnostmi, zejména ve směru kolmo na vlákna [1].

Další vadou výlisku bývá tzv. **zatažený kužel**. Tato vada se vyskytuje zejména u přímého způsobu lisování a je zapříčiněna tokem materiálu v čepu těsně před koncem lisování. Takto znehodnocená část se musí odříznout a vyhodit [1].

Častou vadou výlisku je výskyt **hrubozrnných rekrystalizovaných vrstev**. Tato vrstva souvisí s parametry lisování, s chemickým složením a vyskytuje se v objemu, nebo častěji v povrchových vrstvách. K těmto hrubozrnným rekrystalizovaným vrstvám jsou náchylné zejména slitiny AlMgSi a slitiny duralového typu. Tyto rekrystalizované vrstvy mohou vznikat jak při lisování tak při následném tepelném zpracování. Při lisování není výskyt těchto vrstev podél výlisku obvykle konstantní. Zpravidla se tyto vrstvy tvoří na začátku výlisku a často po několika metrech zcela zmizí. Dalším tepelným zpracováním už tuto hrubozrnnou strukturu nelze odstranit. Tato hrubozrnné vrstvy mají dále dopad na vzhled povrchu, ale zhoršují výrazně i mechanické vlastnosti, korozní odolnost a únavu. U některých slitin a u tenkostěnných výrobků se lze těmto vrstvám jen těžko vyhnout a proto bývá součástí přejímacích podmínek mezi dodavatelem a zákazníkem dohoda o maximální přípustné hloubce těchto vrstev. Na obr. 4.8 je znázorněn typický příklad hrubozrnné rekrystalizované vrstvy [1].



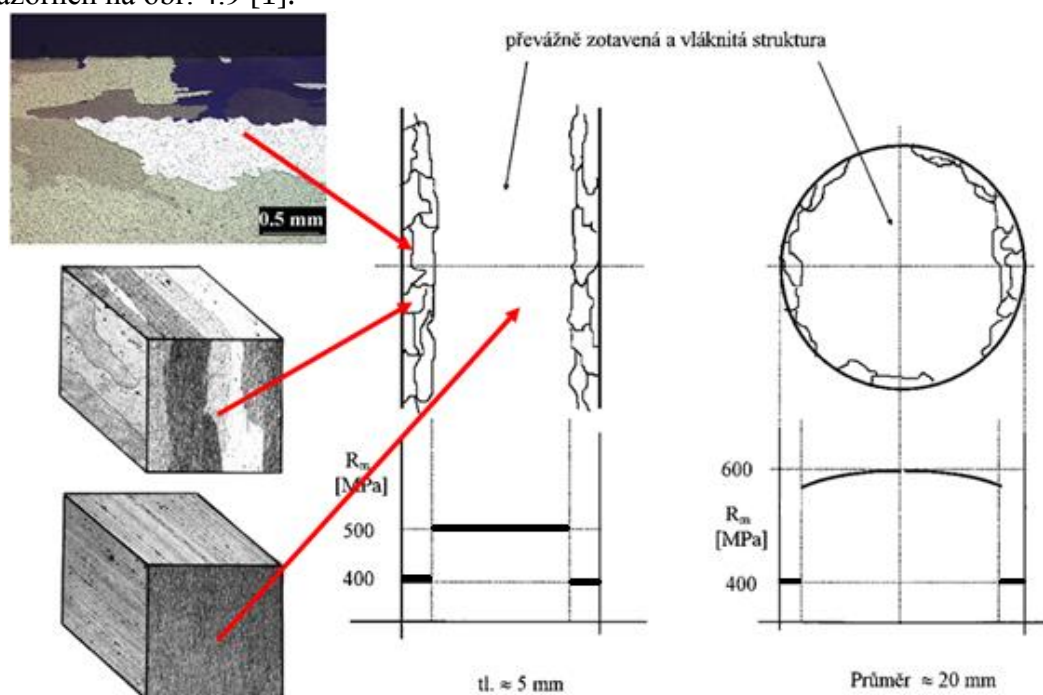
Obr. 4.8 Ukázka hrubozrnné rekrystalizované vrstvy u tenkostěnného výlisku ze slitiny AlCu4Mg1 [1]

Vznik těchto hrubých rekrystalizovaných vrstev je výsledkem vzájemného působení mnoha faktorů pro danou slitinu. Při volbě parametrů je proto nezbytné vzít v úvahu typ slitiny, tvar profilu, metodu lisování, způsob ochlazení a jeho další tepelné a mechanické zpracování. Výskytu těchto vrstev se dá zabránit legováním tzv. antirekrystalizačními prvky jako jsou Mn, Fe, Cr, Ti a Zr. Nejběžnější je použití Mn, který se v závislosti na druhu slitiny pohybuje v rozmezích 0,3 až 0,6 hm. % [1].

4.1.6.6 Anizotropie a nehomogenita struktury a vlastnosti výlisků

Z pohledu anizotropie a nehomogenity vlastností je třeba slitiny hliníku rozdělit na slitiny vytvrzované a nevytvrzované. U nevytvrzovaných slitin je anizotropie a nehomogenita malá a je způsobena pouze tzv. tvářecí texturou. U těchto nevytvrzovaných slitin pak činí směrový rozdíl v mechanických vlastnostech do 10%, protože vliv textury a velikosti zrn není u hliníkových slitin tak významný. U vytvrzovaných slitin je výsledná anizotropie a nehomogenita vlastností dána vzájemným působením textury a stupněm vytvrzení [1].

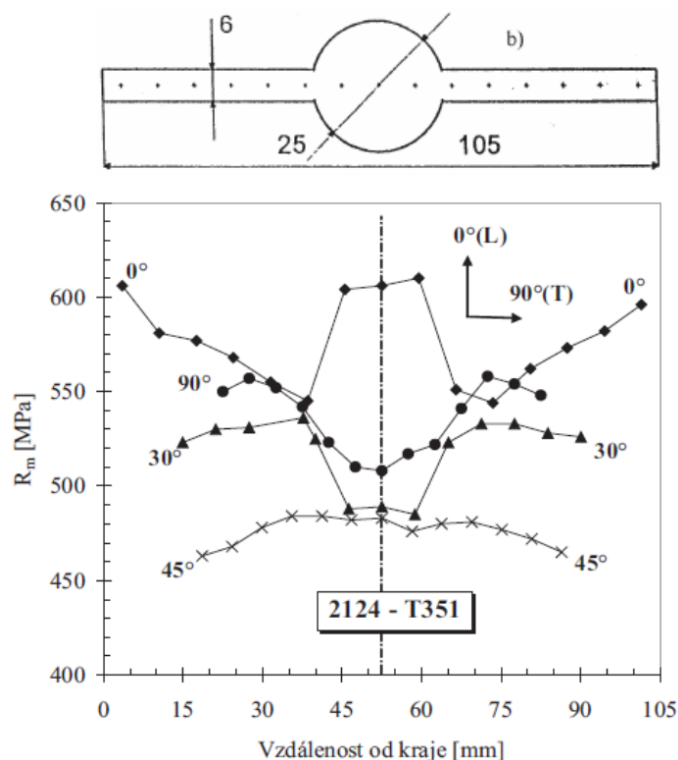
Pokud je u vytvrzovaných výlisků po tepelném zpracování zachována vláknitá nerekrystalizovaná struktura, hovoříme o tzv. lisovacím efektu. Pokud dojde během lisování nebo následnému rozpouštěcímu žihání k rekrystalizaci, hovoříme o ztrátě lisovacího efektu, která vede k velkému poklesu mechanických vlastností. Při tomto poklesu můžeme naměřit rozdíly až 200 MPa. Tento vliv ztráty lisovacího efektu je znázorněn na obr. 4.9 [1].



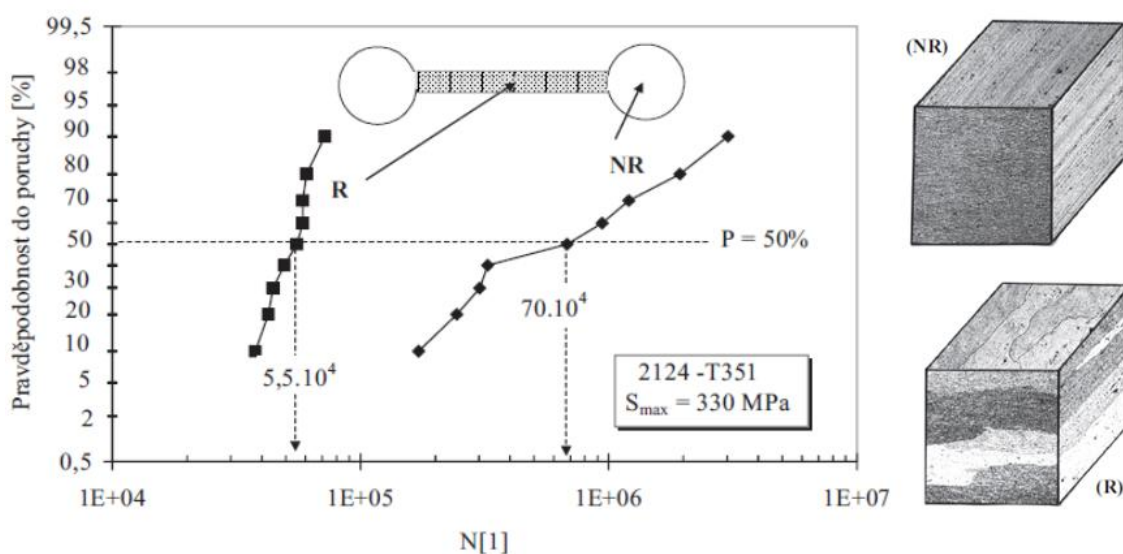
Obr. 4.9 Vliv povrchové rekrystalizované vrstvy na změnu pevnosti u kruhového výlisku ze slitiny AlCu4Mg1 [1]

I když nedojde k rekrystalizaci struktury je rozdíl mezi strukturou plochého a kruhového výlisku značný. Zatímco u lisované tyče se tvoří dvojité vláknité textury, u plochého výlisku dostaneme texturu válcovaného typu. Tento vliv textury na mez pevnosti R_m je znázorněn na obr. 4.10 [1].

Z obr. 4.10 pak vyplývá, že na jednom profilu můžeme v závislosti na místě a směru odběru zkušebního nalézt hodnoty lišící se až o 150 MPa. Na obr. 4.11 je pak uveden vliv rekrystalizace na únavové vlastnosti[1].



Obr. 4.10 Znárodnění změny pevnosti u lisovaného profilu ze slitiny 2124-T351 v závislosti na místě po průřezu a směru. (Směr odběru zkušební tělesa vzhledem ke směru lisování je znázorněn úhly, kde L= podélný směr T= příčný směr) [1]



Obr. 4.11 Vliv ztráty lisovacího efektu na únavové vlastnosti lisovaného profilu ze slitiny 2124-T351, R= rekrytalizovaná struktura, NR= nerekrytalizovaná vláknitá struktura [1]

Z obr. 4.11 vyplývá, že ve střední části profilu došlo ke ztrátě lisovacího efektu tj. k rekrytalizaci. Hrubá rekrytalizovaná struktura pak vede ke snížení únavové životnosti (pro pravděpodobnost do poruchy $P=50\%$) o více než jeden řád [1].

Uvedené příklady anizotropie a nehomogenity vlastností výlisku z vytvrzovaných slitin ukazují velký rozptyl vlastností. Z toho plyne, že v konstrukční praxi je nutno počítat s minimálními hodnotami [1].

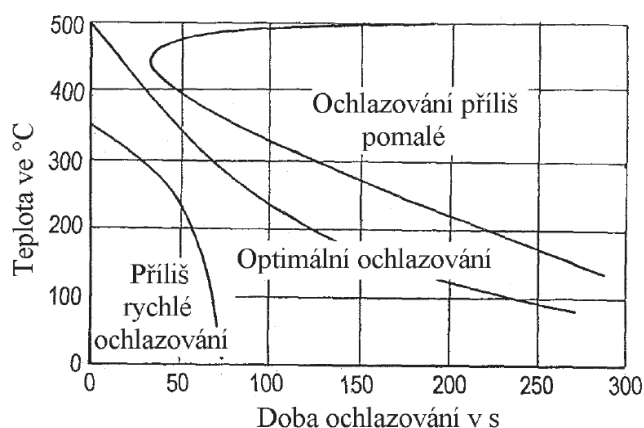
4.1.7 Ochlazování za matricí

Po průchodu matricí mají výlisky relativně vysokou teplotu. Pokud se nachází tato teplota u vytvrzovaných slitin v oblasti teplot, kdy jsou ještě legující prvky v tuhém roztoku, lze při dostatečně rychlém ochlazení zachovat legující prvky v tuhém roztoku (kalení) a výlisek následně už jen vytvrdit. (Ideální je, pokud se tam teplota nachází, jinak musíme provádět další separátní **rozpouštěcí žíhání**, kterým se prodraží celý výrobní proces). Ochlazování přímo za matricí je možno provádět jen u některých vybraných druhů slitin navíc závislých na rozměrech výlisku. Pro vybrané slitiny a malé průřezy postačuje vychladnutí na volném vzduchu nebo pomocí ventilátorů. Některé slitiny je nutné ochlazovat přímo do vody nebo pomocí vodní mlhy či sprchy.

Příklady parametrů ochlazování:

- slitina $AlMgSi0,5$: volný vzduch nebo ventilátor, $50^{\circ}C/min$.
- slitina $AlMgSi1$: sprcha, vodní vlna
- slitina $AlCuMg$ (vysoce legovaná): požadavky na rychlost ochlazování jsou tak velké, že kalení za matricí není možné [1]

Nevhodné rychlosti ochlazování pro slitinu $AlMgSi$ z pohledu nepříznivého dopadu na strukturu (pomale ochlazení zapříčiní vyloučení legujících prvků z tuhého roztoku a naopak příliš rychlé ochlazení může způsobit velké deformace výlisku) je znázorněno na obr. 4.12 [1].

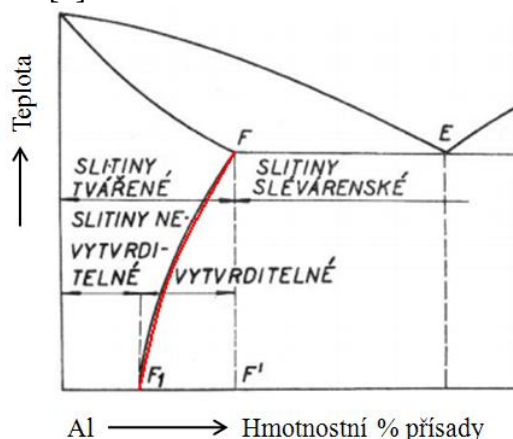


Obr. 4.12 Ochlazování výlisku ze slitiny $AlMgSi$ [1]

Po ochlazování na výběhovém poli jsou výlisky zdeformované. Tato deformace se musí odstranit vypínáním a rovnáním [1].

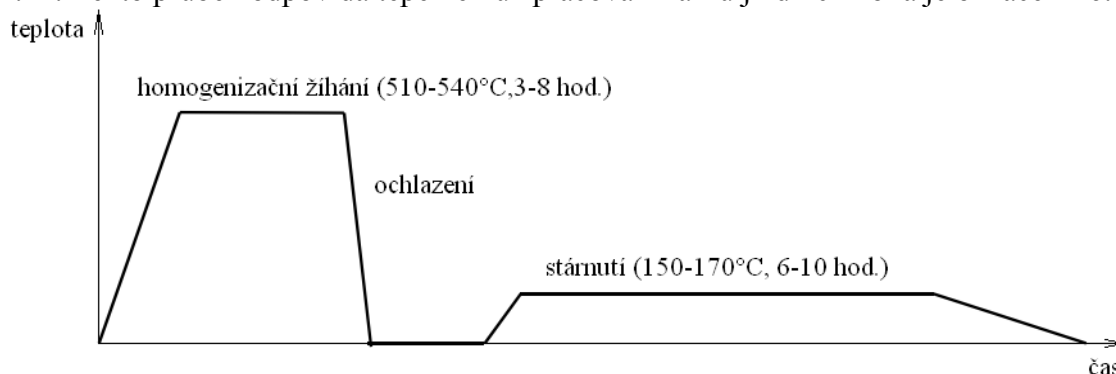
4.1.8 Vytvrzování

Touto technologií lze do značné míry měnit fyzikální a mechanické vlastnosti slitin, které mají v rovnovážném diagramu výraznou změnu rozpustnosti obr. 4.13. Ta je základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku, jehož další změna vede k ovlivnění vlastností [6].



Obr. 4.13 Oblast vytvrditelných slitin (červeně je vyznačena křivka změny rozpustnosti) [6]

Průběh tepelného zpracování hliníkových vytvrditelných slitin je znázorněn na obr. 4.14. Tento průběh odpovídá tepelnému zpracování ráfků jízdních kol a je označen T6.



Obr. 4.14 Teoretický průběhu vytvrzování T6 [7]

Doporučené parametry tepelného zpracování slitin hliníku pro ráfky, které budou rozebírány v experimentální části jsou uvedeny v tabulce. 4.1.

Tab. 4.1 Doporučené parametry tepelného zpracování pro slitiny hliníku EN AW-6061A a EN AW-6082 [1]

EN AW-6061A	AlMg1SiCu(A)	Žihání na měkko	415 °C/2 – 3 hod. → ochlazovat rychlostí max. 30 °C/hod. do 260 °C → vzduch
		Rozpouštěcí žihání	530 °C/1 hod. → voda (20 – 40 °C)
		Umělé stárnutí	160 °C/16 hod. → vzduch 175 °C/8 hod. → vzduch
EN AW-6082	AlSi1MgMn(A)	Žihání na měkko	350 °C/4 hod. → ochlazovat rychlostí max. 100 °C/hod. do 200 °C → vzduch
		Rozpouštěcí žihání	510 °C/1 hod. → voda (20 – 40 °C)
		Umělé stárnutí	170 °C/6 hod. → vzduch

Technologie tepelného zpracování ráfku se tedy skládá z následujících úkonů:

- rozpouštěcí žihání** „Homogenizační“ (detailně rozebráno v kapitole 4.1.4.)
- ochlazení** (detailněji rozebráno v kapitole 4.1.7.)
- stárnutí**

Stárnutí=rozpad přesyceného tuhého roztoku:

- při normální teplotě = přirozené stárnutí
- při zvýšené teplotě = umělé stárnutí

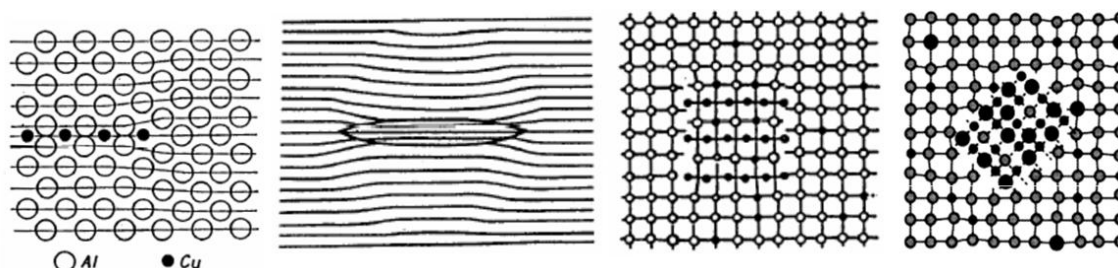
Vysvětlení stárnutí na slitině Al-4Cu

Při ponechání na normální teplotě dochází v první fázi k difúzi atomů mědi, čímž vznikají oblasti s vyšší koncentrací mědi. V těchto oblastech s vyšší koncentrací mědi dochází již po krátkém časovém období po ochlazení ke koherentní precipitaci monoatomárních pásem mědi. Průměr těchto pásem je 5nm. Tato pásma jsou označována jako Guinier-Prestonova pásma I (GPI) a jsou znázorněna na obr. 4.15a [6].

V další fázi stárnutí vznikají vícevrstvé destičkové útvary tvořené několika monoatomovými, pravidelně se střídajícími vrstvami mědi. Tato pásma jsou označena jako Guinier-Prestonova pásma II (GP II) a jsou znázorněna na obr. 4.15b. Vznikem koherentních zón GP I a GP II je přirozené stárnutí ukončeno [6].

Jestliže stárne stejná slitina za zvýšených teplot, pásma se začnou rozrůstat a jejich průměr může dosáhnout až 10nm. Přibližně po 10 hod., při teplotě 130°C se začnou ve struktuře objevovat vedle pásem GP II částečně koherentní fáze Θ' (obr. 4.15c) [6].

Při zvětšení objemu a snížení disperznosti této fáze dojde k poklesu tvrdosti. Tento pokles tvrdosti označujeme jako přestárnutí slitiny. Při dlouhé době stárnutí při teplotě 300°C se fáze Θ' mění na stabilní fázi Θ (obr. 4.15d). Tato fáze je zcela nekoherentní a způsobí snížení pevnosti a tvrdosti, přičemž se současně zvyšuje houževnatost a tažnost [6].

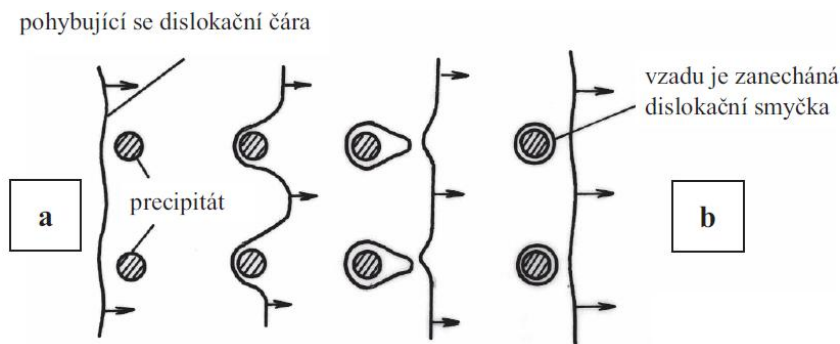


Obr. 4.15 Sekvence precipitačních reakcí: a) pásma GP I, b) pásma GP II, c) částečně koherentní precipitát Θ' , d) nekoherentní precipitát Θ [6, 7]

Vlivu substrukтуры na pevnostní vlastnosti Al slitin schopných precipitačního vytvrzování

Jsou-li ve slitině částice precipitující fáze, budou se dislokace při svém pohybu protínat, nebo je obcházet podle povahy těchto částic vůči mateční fázi. Na základě toho rozlišujeme tři formy vytvrzování:

- přítomnost koherentních a částečně koherentních částic jako překážek pohybu dislokací je obvykle vyznačena napětovým polem kolem každé částice (koherentní pnutí). V tomto případě říkáme, že důležitým činitelem precipitačního vytvrzení je *vnitřní pnutí*. Na obr. 4.16 je schematicky znázorněna interakce dislokace a precipitátu [1].



Obr. 4.16 Schématické znázornění interakce dislokace a precipitátu, a) Dislokace zakřivené polem pnutí v okolí částice precipitátu, b) Dislokace procházející mezi vzdálenými částicemi precipitátu [1]

- Při průchodu dislokace precipitátem dojde k interakci vnitřní struktury precipitátu s dislokací. To má za následek zvyšování počtu vazeb mezi atomy základního a legujícího kovu slitiny. To znamená, že dislokace bude působit na změnu uspořádanosti atomů uvnitř částice, kterou prochází. Toto je významnou překážkou pohybu dislokací a podstatou *chemického vytvrzování*. Dislokace tedy prošla kulovým precipitátem a vytvořila na něm nový povrch, což vede k dalšímu zvyšování energetické bariéry [1].
- S klesajícím stupněm disperze, tj. růst vzdáleností mezi částicemi precipitátu v matriční fázi. K tomu dochází v pozdních stádiích stárnutí, kdy se vytváří hrubý nekoherentní precipitát. V tomto případě mluvíme o *disperzním vytvrzování* [1].

Intermetalické částice, které se podílejí na procesu vytvrzování tedy zvyšují pevnostní vlastnosti Al slitin. Některé běžné soustavy schopné precipitačního vytvrzování u Al-slitin jsou uvedeny v tabulce 4.2 [1].

Tabulka 4.2 Některé údaje soustav na bázi Al schopných vytvrzování [1]

Základní kov	Legující kov	Přechodný precipitát	Rovnovážný precipitát
Al	Cu	1. Destičkovité zóny GP I. bohaté na Cu na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Uspořádané zóny GP II. 3. Fáze θ'	$\Theta - Al_2Cu$
	Ag	1. Kulovité zóny bohaté na Ag 2. Destičky hexagonální γ' na rovinách $\{111\}_{Al}$	$\gamma - Ag_2Al$
	Mg, Si	1. GP zóny bohaté Mg a Si na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Destičky hexagonální γ' na rovinách $\{111\}_{Al}$	$\beta - Mg_2Si$
	Mg, Cu	1. Zóny GP bohaté na Cu a Mg na rovinách $\{100\}_{Al}$ 2. Destičky fáze S' na rovinách $\{021\}_{Al}$	$S - Al_2CuMg$
	Mg, Zn	1. Kulovité zóny bohaté Mg a Zn 2. Destičky hexagonální fáze M' na rovinách $\{111\}_{Al}$	$M - Mg_2Zn$

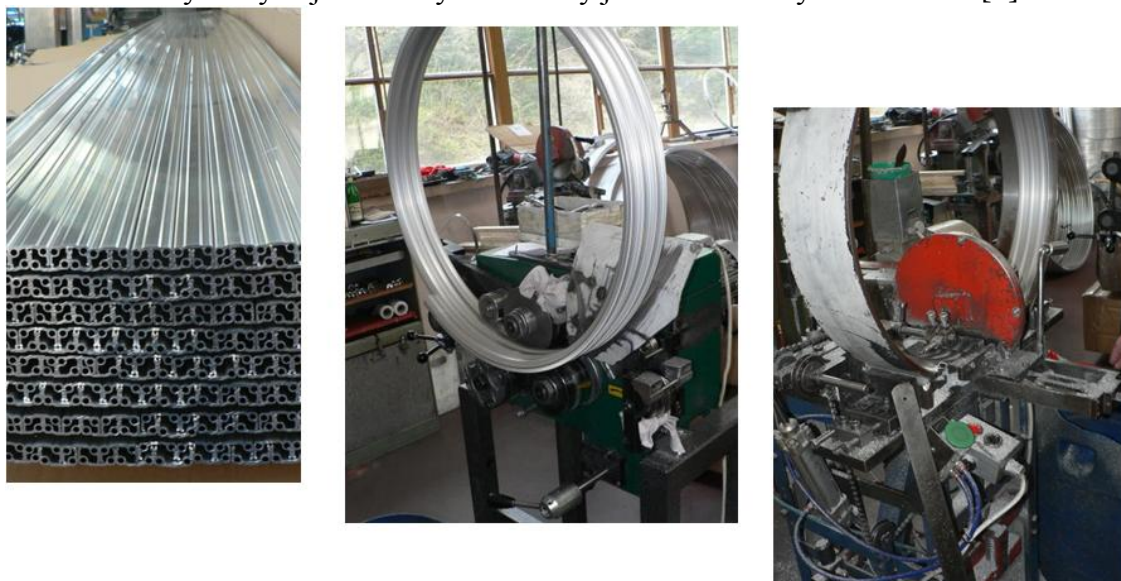
U ráfků, které se vyrábí z hliníkových slitin třídy 6xxx bude soustava na bázi legujících kovů Mg, Si.

4.2 Postup výroby ráfku z profilu

Do výroby přijdou zabalené šestimetrové hliníkové profily, vyrobené podle materiálové specifikace odběratele, na průvlacích, které jim dají tvar podle zadání a výkresů výrobce ráfků. Tento profil je dodáván ve stavu T6 [2].

4.2.1 Zakružování

Z profilových tyčí musí vzniknout obruč, která vznikne na zakružovačce. Obsluha stroje zasouvá profily do zakružovačky, kde vznikne spirála. Tato spirála má počet stoupání podle rozměrů ráfku. Poté se spirála zavede do řezačky. Ta jedním řezem oddělí všechny ráfky najednou. Tyto tři kroky jsou znázorněny na obr. 4.17 [2].



Obr. 4.17 Postup výroby ráfku [2]

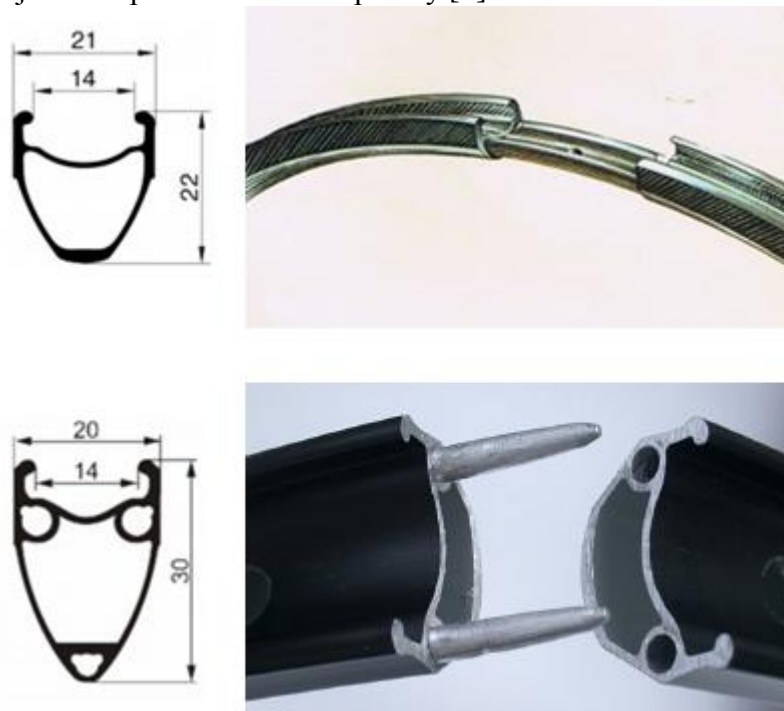
Po tomto procesu se výroba u různých výrobců rozchází. U nějakých firem, které nedostanou profily ve stavu T6 následuje očištění v kyselině pro snadnější přilnutí antikoroziční vrstvy a následné tepelné zpracování T6. Většinou se ale z ekonomických důvodů provádí tepelné zpracování T6 u dodavatele profilu. Zakružování profilu se tedy provádí ve vytvrzeném stavu T6. Z hlediska dopadu na vnitřní pnutí materiálu při tváření za studena je lepší ráfek tepelně zpracovat až po jeho zakroužení [2].

4.2.2 Spojování ráfků

Po tomto zpracování následuje spojování ráfku. Možností spojování ráfku je více:

- *vložením spojky a následným svařením.* Díky rychlému odvodu tepla z místa svaru nebývají s těmito svarovými spoji žádné problémy. Po tomto svařování však musí následovat obrábění, které odstraní přebytečný kov od svařování. Většinou jde o CNC vibrační stroj, který dokonale vyhladí povrch svařovaného spoje [5]
- *vložením spojky a následným lepením.* Toto je také spolehlivý způsob spojení ráfku. Bývají dva základní typy spojek. První typ kopíruje tvarem vnitřní stěny ráfku pro přesné a snadné zasunutí. Druhý typ spojování spojkami je založen na speciální konstrukci ráfků, kde jsou v místech dva otvory, do kterých se nalisují

kolíky. Oba dva typy vložek se po nalisování zalijí lepidlem skrze pomocné otvory v ráfku. Toto lepidlo se nechá vytvrdnout v peci při zvýšené teplotě. Dva základní typy spojování spojkami je schematicky naznačeno na obr. 4.18. Pomocný otvor pro transfer lepidla se následně uplatňuje při provozu ráfku. Indikuje totiž opotřebení brzdné plochy [8].



Obr. 4.18 Schéma vkládání spojky do ráfku [5]

4.2.3 Anodická oxidace

Po spojení ráfku následuje úprava povrchu anodickou oxidací. Touto úpravou můžeme udělat nespočet různých barevných variant s výjimkou bílé barvy, která anodickou oxidací nikdy nevznikne. Vedle vzhledu slouží anodická oxidace především jako ochrana proti opotřebení a korozi. [2]



Obr. 4.19 Ukázka různých barevných variant vytvořených anodickou oxidací [2]

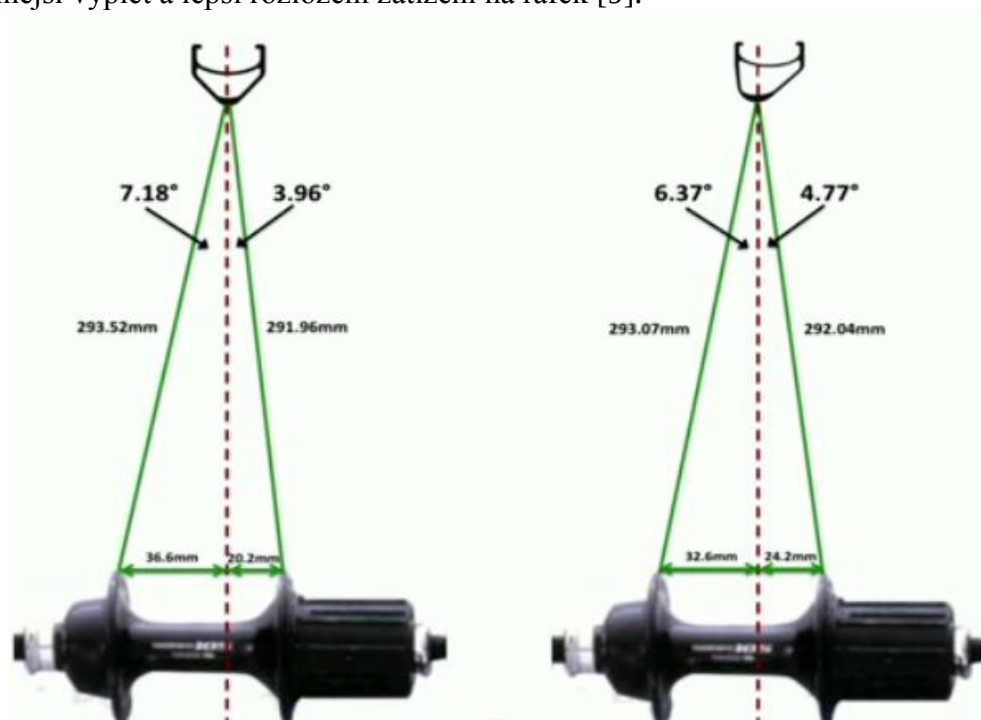
4.2.4 Soustružení brzdných ploch

Po anodické oxidaci následuje obrábění brzdných ploch soustružením. Zde je jedno jestli tato operace bude provedena před vrtáním otvorů pro niple nebo až poté.

Soustružením ráfků se odebere anodická ochranná vrstva a tím vznikne hladký plochý povrch, na kterém mohou zabírat (V) brzdy. Vytvrzené hliníkové slitiny se velice dobře obrábí [1].

4.2.5 Vytvoření otvorů pro niple

Otvory pro dráty jsou „vrtány“ pod dvěma úhly, v závislosti na geometrii kola (symetrický nebo nesymetrický výplet – ráfek ukazuje schematicky obr. 4.20). Je nutné si uvědomit, že dráty nesměřují kolmo k zemi, ale jedna strana směřuje do děr v náboji k unašeci pastorků a druhý úhel směřuje na druhou stranu. Je nutno zvolit takový úhel vrtání otvorů aby bylo zajištěno ideální dosednutí niplu do ráfku. Výsledkem pak bude stabilnější výplet a lepší rozložení zatížení na ráfek [9].



Obr. 4.20 Vliv různé geometrie zadního výpletu na úhel vrtání děr [9]

Otvory pro dráty se mohou vyrobit více způsoby:

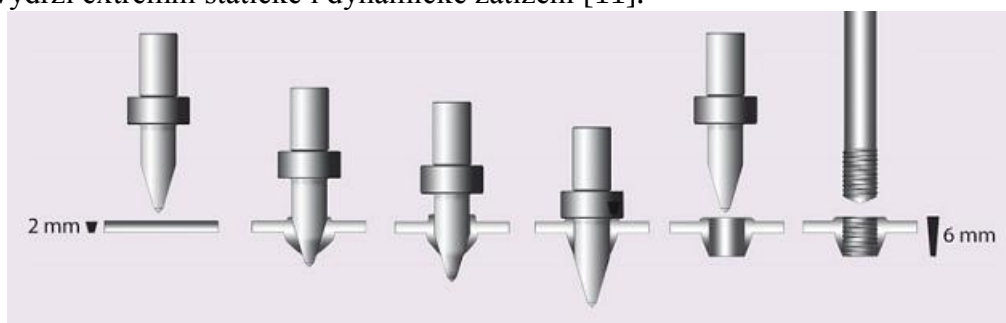
- *klasickým vrtáním*
- *frézováním*
- *prostřelováním*

Provádí se na automatickém stroji. Tento stroj je velice produktivní, umožňuje v jednom okamžiku vyrobit 16 až 36 děr.

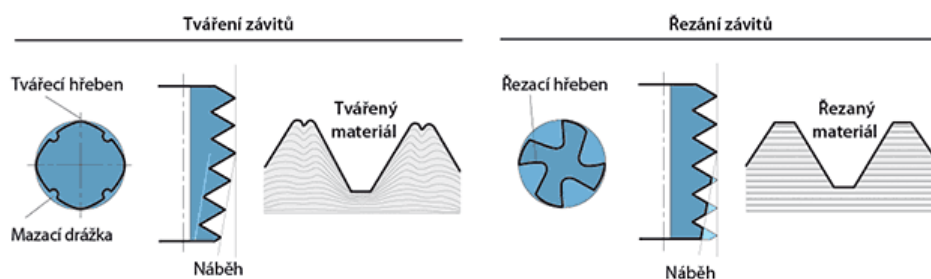
- *tepelným tvářením*

Kombinací tváření a vrtání za použití speciálního nástroje (termovrtáku) se vytvoří přesný otvor a nadbytečný materiál se použije pro vytvoření lemu otvoru – zcela bez přidání dalších materiálů. V místě takto vzniklého zesílení lze pak vyřezat závit [11].

Tvářecí proces má mimořádný zpevňující účinek na materiál a nenarušuje takzvaný vlákenný směr materiálu. Oproti řezání závitů není při tváření závitů materiál oddělován, ale nástroj se speciální geometrií materiál vtlačuje do oblasti profilu závitu. Při tomto procesu je materiál zpevněn natolik, že vzniklý závit vydrží extrémní statické i dynamické zatížení [11].



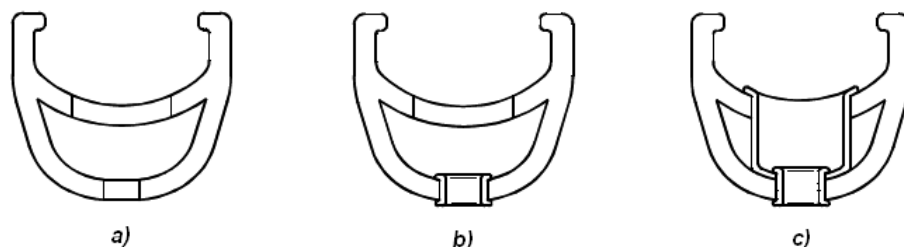
Obr. 4.21 Princip tvorby otvoru tepelným tvářením [11]



Obr. 4.22 Srovnání geometrie vlákenné struktury závitu po tepelném tváření a po konvenčním vrtáním [11]

4.2.6 Nýtování

Některé ráfky se opatřují nýty. Nýty zpevňují ráfek a zvyšují odolnost otvorů pro niple. Pro klasická kola do lehčího terénu se často používá nýtování jednoduché. Pro náročné sjezdy a překážky je nutno použít dvoj nýt [5].



Obr. 4.23 Druhy nýtování: a) bez nýtu, b) jednoduchý nýt, c) dvoj nýt [5]

Nýtování je tváření zastudena (pod rekrystalizační teplotou), kdy dochází ke zpevňování materiálu a vytváří se textura. Zpevněním se zvyšují mechanické vlastnosti (mez pevnosti a mez kluzu) a klesá tažnost. Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch a zlepšování vlastností zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat větší tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu [12].

Otvor pro nýt musí být dokonale vyplněn jinak dojde ke zmenšení pevnosti spoje. Nýt a spojovaný materiál mají mít stejný nebo málo rozdílný elektrochemický potenciál, aby se zabránilo korozi [1].



Obr. 4.24 Ukázka stroje na nýtování ráfku [2]



Obr. 4.25 Ukázka správného nýtování ráfku

Po výrobě ráfku se provede kontrola hmotnosti a kulatosti. Následuje lepení loga výrobce a vyplétání popř. export ráfku k zákazníkovi.

5 Degradace materiálu při provozu ráfku

Materiál ráfku je během provozu namáhán nejen mechanicky ale i chemicky. V této kapitole budou tyto vlivy podrobně popsány. Na závěr pak bude zmíněna i prevence proti těmto degradačním mechanismům.

5.1 Koroze hliníku a jeho slitin

5.1.1 Korozní vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník má obecně vysokou odolnost proti korozi a to zejména v atmosférických podmínkách. Vysoká odolnost má ale řadu omezení, při jejichž překročení nastává výrazná koroze hliníku. Jedná se o neušlechtilý kov. V elektrolytu dochází k anodovému rozpouštění Al a vzniku Al^{3+} podle následující reakce:

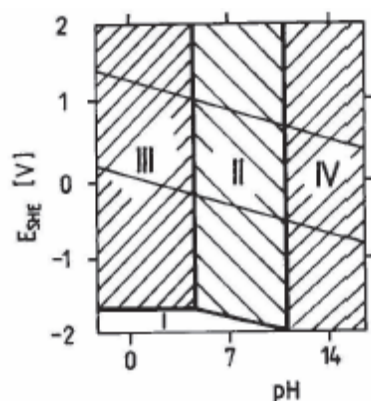


Současně vzniká i Al^+ , který vzápětí reaguje s vodou dle reakce:



Z těchto rovnic vyplývá, že příčinou koroze jsou samovolně probíhající děje mezi materiálem a prostředím[1].

Principem koroze z pohledu termodynamiky je nestálost kovů v různých prostředích. K tomuto posouzení slouží diagramy potenciál – pH podle Pourbaixa. Pourbaixův diagram pro systém Al – H_2O je znázorněn na obr 5.1 [1].



Obr. 5.1 Pourbaix diagram pro systém Al – H_2O , kde I-oblast imunity, II-oblast pasivity, III-oblast aktivity, IV-oblast transpasivity

Tyto diagramy se obecně dělí do tří základních oblastí:

oblast imunity

- v této oblasti je koroze termodynamicky vyloučena.

oblast pasivity

- na povrchu hliníku se vytvoří nerozpustná vrstva Al_2O_3 , která je stabilní a málo rozpustná. Tím se pasivuje povrch Al, což má za následek zpomalení koroze.

oblast aktivity a transpasivity

- při těchto podmínkách dochází k intenzivnímu koroznímu narušování materiálu

Termodynamika může předpovědět, zda v systému bude docházet ke korozi, neurčuje ale rychlost korozního napadení. Mezi rychlostí koroze a termodynamickou

pravděpodobností není téměř žádná souvislost. Zákonitosti kinetiky totiž nejsou dosud známé pro dlouhodobé aplikace. Kinetika se zatím opírá o dlouhodobé zkoušky konkrétních materiálů v konkrétním prostředí nebo o empirické zkušenosti [1].

Odolnost hliníku a jeho slitin je tedy dána fyzikálně chemickou stabilitou ochranné oxidační vrstvy, která závisí na řadě faktorů. Rušivé je zejména napadení aniontových halogenidů Cl^- , protože porušují celistvost ochranné vrstvy. Nepříznivě také působí kationty, které podporují vznik mikročlánku jako např. Cu^{2+} . Další faktory ovlivňující kinetiku jsou teplota a proudění elektrolytu. Nepříznivé je též velké napětí, které často vede k porušení pasivační vrstvy [1].

5.1.2 Vliv chemického složení slitin na odolnost proti korozi

Obecně má nejvyšší odolnost proti korozi čistý Al. Příměsi v čistém hliníku (Na, Ce, Co, Pt, Ag, Th, V, Hg, Ca, někdy i Cr, Sn a Cd) snižují korozní odolnost, protože jsou vůči Al katodou (kromě Mn) [1].

Vliv nečistot na korozi Al závisí také na daném elektrolytu. Z tohoto prostého důvodu se nedají příměsi seřadit podle škodlivosti do obecně platného pořadí. Další vliv nečistot na Al také závisí na tom, zda jsou ve formě heterogenních částic nebo v tuhém roztoku. **Fáze, vyloučené na hranicích zrn jsou obzvláště nebezpečné. Jsou ušlechtilejší než hliníková matrice. V elektrolytu se tím pádem vyvolá anodické rozpouštění hliníkové méně ušlechtilé matrice** [1].

Z technického pohledu je pro odolnost materiálu proti korozi rozhodující, zda se jedná o slitiny s Cu nebo bez Cu. Slitiny Al bez mědi mají korozní odolnost vysokou přibližně jako čistý hliník Al 99,5 [1].

Intermetalické sloučeniny přítomné v Al slitinách se na korozní odolnosti odrazí podle toho, jaký elektrodový vůči tuhým roztokům Al mají. V tab. 5.1 jsou vybrané hodnoty korozních potenciálů intermetalických fází v Al slitinách v 3% NaCl [1].

Tab. 5.1 Hodnoty korozních potenciálů pro vybrané intermetalické fáze v Al v 3 % NaCl [1]

	$E_{\text{kor SHE}}$ [mV]
Al 99,99	-750
Mg_2Si	-1250
Mg_2Al_3	-930 -1000
MgZn_2	-790 -850
MnAl_6	-607
CuAl_2	-370 až 420
NiAl_3	-210 až -490
FeAl_3	-140 až -330

Intermetalické fáze jako CuAl_2 , FeAl_3 , MgAl_6 , Al_2CuMg jsou v 3 % NaCl katodami, narušují pasivační vrstvu a tím vytváří podmínky pro vznik lokální bodové koroze. Intermetalické fáze jak Mg_2Si , Al_2MgSi , MgZn_2 které jsou anodického charakteru také narušují pasivační vrstvu Al slitin. V případě vyloučení těchto fází na hranice zrna tuhého roztoku jejich negativní vliv končí korozním rozpouštěním [1].

5.1.3 Druhy koroze u hliníku a jeho slitin

Korozní odolnost Al slitin je ovlivňována fyzikálně-chemickou stabilitou ochranné oxidické vrstvy, která se vytváří na povrchu. Tři základní způsoby jak korozní prostředí působí na hliníkové slitiny:[1]

- při nevýrazném napadení je pasivační vrstva rovnoměrná a brání korozi
- v místech porušení pasivační vrstvy nebo na hranicích zrn vznikne lokální napadení, které se dále může šířit do materiálu
- působením prostředí se pasivační vrstva rozpouští

Narušení ochranné oxidické vrstvy může být způsobeno heterogenitou struktury pasivační vrstvy, přítomností některých aniontů v korozním prostředí a přítomností napětí. Při těchto podmínkách dochází k znehodnocování materiálu některou ze specifických forem koroze. Mezi tyto specifické formy, které jsou zapříčiněny přítomností specifických aniontů v elektrolytu a strukturální stavbou materiálu patří:

- bodová koroze
- mezikrystalická koroze
- praskání korozi pod napětím (korozní praskání, korozní únava)
- vibrační koroze
- kontaktní koroze [1]

5.1.3.1 Bodová koroze

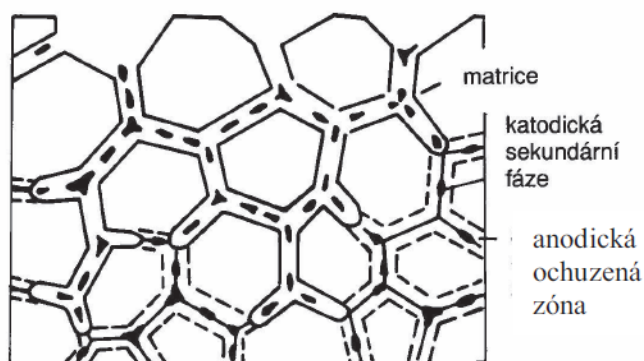
Bodová koroze je u hliníkových slitin nejrozšířenějším typem s nepříznivými důsledky na mechanické vlastnosti a navíc rozvíjí i další specifické formy koroze, které budou zmiňovány dále. [1]

Její mechanismus souvisí s lokálním narušením ochranné oxidické vrstvy při dosažení potenciálu jejího průrazu. Mezi technickými kovy má hliník nejzápornější hodnotu potenciálu ($-0,45 \text{ V}$ v $0,1 \text{ mol.l}^{-1} \text{ NaCl}$). Odolnost proti bodové korozi u hliníkových slitin tedy závisí na stabilitě jejich pasivního stavu. Tento stav přímo souvisí s jejich složením a obsahem aniontů v elektrolytu, které vyvolávají tuto specifickou formu koroze. Jsou to nejčastěji anionty halogenidů Br^- , Cl^- a I^- , které pronikají vrstvou přes defektní místa (např. i podél hranic zrn) a porušují elektrochemickou homogenitu na povrchu [1].

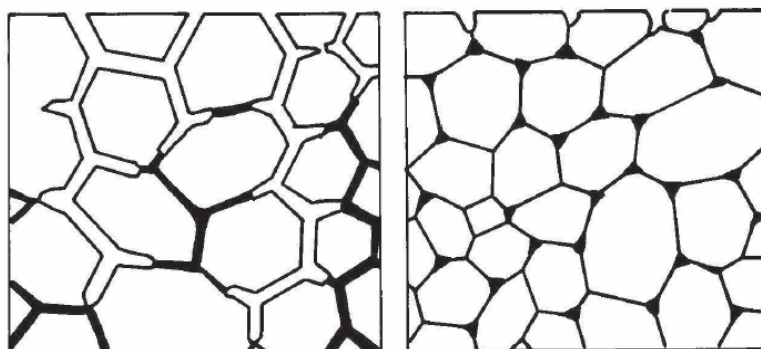
5.1.3.2 Mezikrystalická koroze

Na rozdíl od bodové koroze je souvislost se strukturou jednoznačná. Pojem mezikrystalická koroze se u hliníkových slitin uplatňuje jen pro rekrystalizované struktury. U nerekrystalizovaných struktur probíhá koroze po malouhlových hranicích subzrn s vysokou koncentrací dislokací. Mezikrystalická koroze je často iniciována korozi bodovou [1].

Její elektrochemický výklad se opírá o pasivaci zrn tuhého roztoku a aktivní stav jejich hranic, který souvisí s existencí anodických sekundárních fází. V případě vyloučení katodických fází, obr. 5.2 se u slitin bude rozpouštět anodicky ochuzený tuhý roztok v úzké zóně hranic zrn nezávisle na tom, zda katodické fáze jsou vyloučené souvisle anebo nesouvisle. Nejvyšší předpoklad korozního napadení je při souvislém vyloučení anodické sekundární fáze, obr. 5.3 [1].



Obr. 5.2 Katodická sekundární fáze (spojité a nespojitě vyloučení sekundární fáze) [1]



Obr. 5.3 Anodická sekundární fáze (spojité a nespojitě vyloučení sekundární fáze) [1]

5.1.3.3 Praskání korozi za napětí

Nejznámější jsou dva případy praskání konstrukčních materiálů za napětí, které se vyznačují vznikem a vývojem korozních trhliny jsou:

- *korozní praskání*, což je složitý proces rozrušení kovů a slitin, probíhající za současného působení *statických tahových napětí a korozního pochodu*.
- *korozní únava*. K té dochází za současného působení *cyklických zatížení a agresivního prostředí* [13].

Důlky při cyklické únavě jsou hluboké a ostré zatímco u korozního praskání mají důlky příznivý talířkovitý vzhled. Korozní únava zde tedy působí jako iniciátor koncentrace napětí, přičemž jeho velikost může být dostatečná pro další vývoj trhliny pouze mechanickým zatěžováním. S tímto jevem se nesetkáme v případech korozního praskání [13].

Trhliny z korozní únavy jsou většinou transkrystalické a trhliny za podmínek korozního praskání jsou interkrystalické. Provozní lomy jsou často způsobeny korozním praskáním i korozní únavou současně. U ráfku je to velmi časté. Při jízdě je to korozní únava a po odstavení kola korozní praskání. Dráty jsou totiž předepjaté a ráfek je zatěžován i ve statické poloze [13].

Může se tedy jednat o smíšený mechanismus, který se dá určit ze znalosti zatížení, charakteru lomu a metalografické analýzy [13].

Korozní praskání

Je to korozní jev, který představuje silnou souhru metalurgických, mechanických a chemických faktorů [13].

Výsledkem působení korozního praskání je vznik trhlin, které se rozkládají kolmo na směr působícího tahového pnutí a mají interkrystalický, transkrystalický nebo smíšený charakter [13].

Dříve bylo řečeno, že pnutí je příčinou anodického děje. V praxi ale nelze akceptovat, že je to hlavní faktor pro rychlý vývoj korozních trhlin. Ze systematického shrnutí poznatků o korozním praskání lze uvažovat následující závěry:

- I. korozní praskání vyvolá křehký typ lomu, ke kterému může dojít i u velmi tažného materiálu.
- II. rychlost korozního praskání je nižší, než je obvyklé u křehkých lomů, ale je vysoká ve srovnání s běžným korozním napadením
- III. průběh korozního praskání může být transkrystalický, mezi krystalický popř. smíšený, což závisí na typu slitiny. Interkrystalické praskání je často spojováno s určitým stádiem precipitačního děje ve struktuře a je pak dosti *závislé na tepelném zpracování a stabilitě slitiny*.
- IV. podmínky vedoucí ke koroznímu praskání jsou značně specifické a souvisí jak se systémem slitiny, tak i s korozním prostředím [13].

Jak už bylo řečeno, korozní praskání může nastat jen za působení tahových napětí. Mezní napětí závisí na povaze slitiny, korozním prostředí, ale i na způsobu tepelného zpracování a stavu povrchu kovu. I když máme dostatek znalostí o charakteru křivek korozního praskání. Lze jen těžko přesně stanovit hodnotu mezního napětí pro všechny technické kovy a slitiny v různých prostředích vyvolávajících citlivost ke koroznímu praskání [13].

Korozní únava

Tento typ rozrušení kovu vzniká současně za působení korozního prostředí a cyklických zatížení, které se projevuje tvorbou transkrystalických i mezikrystalových trhlin, jejíž vývoj spadá především do periody tahových napětí. Toto napětí je menší než mez průtažnosti a mez kluzu. Čím menší je napětí, tím větší musí být počet cyklů, aby došlo k rozrušení materiálu. Tuto závislost napětí na počtu cyklů, které způsobí rozrušení materiálu, vyjadřuje křivku únavy (Wöhlerova křivka). Pro každý kov nebo slitinu existuje určité největší napětí, které nezpůsobí porušení vzorku ani při velkém množství cyklů a nazývá se *mez únavy*. Z toho plyne důležitý závěr, který říká, že snese-li zkušební vzorek určitý počet cyklů aniž by se objevily trhlinky, vydrží bez porušení nekonečně velký počet cyklů. Jestliže ve vzorek přesto zlomí, znamená to, že se objevily příčiny nové, které buď zvýšily provozní napětí nebo snížily mez únavy kovu. Jednou z těchto příčin je současné působení agresivního prostředí při únavě, která snižuje cyklickou pevnost [13].

Vliv koroze na únavu materiálu se projevuje v určité míře. Například koroze měkkou vodou snižuje mez únavy méně, než koroze slanou vodou. Současný účinek střídavého napětí a koroze silně snižuje Wöhlerovu křivku a je charakteristické, že materiál už nemá určitou skutečnou mez únavy, protože křivka stále klesá a můžeme přibližně zjistit pouze časovou mez korozní únavy, což je nějaká smluvená hodnota pro určitý počet cyklů [13].

Podobně jako u korozního praskání lze korozní únavu vysvětlit účinkem vrubů vyvolaných korozí za napětí a obecně energetickými procesy na povrchu kovu za koroze. Neúměrně velký vliv zcela neagresivního prostředí na mez únavy lze vysvětlit jejich fyzikální povrchovou aktivitou. Povrchově aktivní látky totiž ovlivňují stav napjatosti v závislosti na relativním povrchovém napětí a kapilárním vnikání do nerovností povrchu a mikrotrhlinek, vznikajících v průběhu únavy. Tato fyzikální afinita se pak může sčítat a třeba násobit s chemickou afinitou. Mez únavy se pak

snižuje rychleji a z toho plyne, že neexistuje mez, která by zaručovala neomezenou životnost kovu za současného působení koroze a cyklického namáhání [13].

5.1.3.4 Vibrační koroze

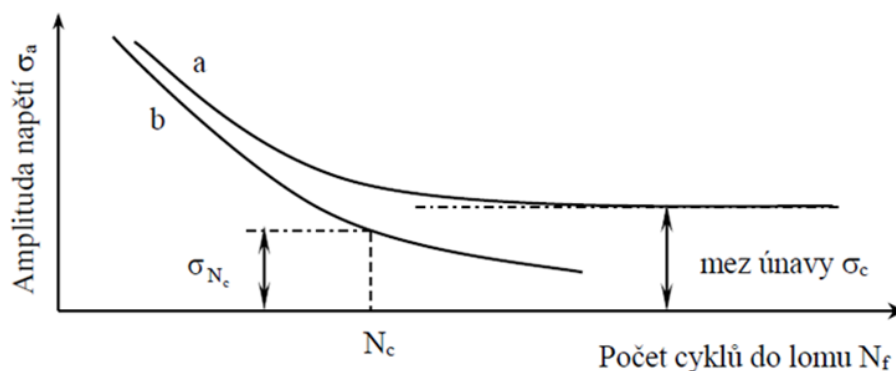
Tento druh koroze vzniká při vzájemném kmitavém pohybu s různou amplitudou, frekvencí a zatížením povrchů, které jsou v plošném, čarovém nebo bodovém dotyku. Důležitou roli hrají opotřeбенé částice, které jsou odděleny od povrchu do oxidačního prostředí. Hlavním znakem vibrační koroze je tedy je kombinace oxidace, abraze a adheze. Častým výskytem jsou nýtované a šroubové spoje z Al slitin, které jsou často používány v ráfcích zapletených kol. Tento mechanismus se pak projevuje při jízdě po nerovném povrchu ideálně pak při jízdě po kostkách. [13]

5.1.3.5 Kontaktní koroze

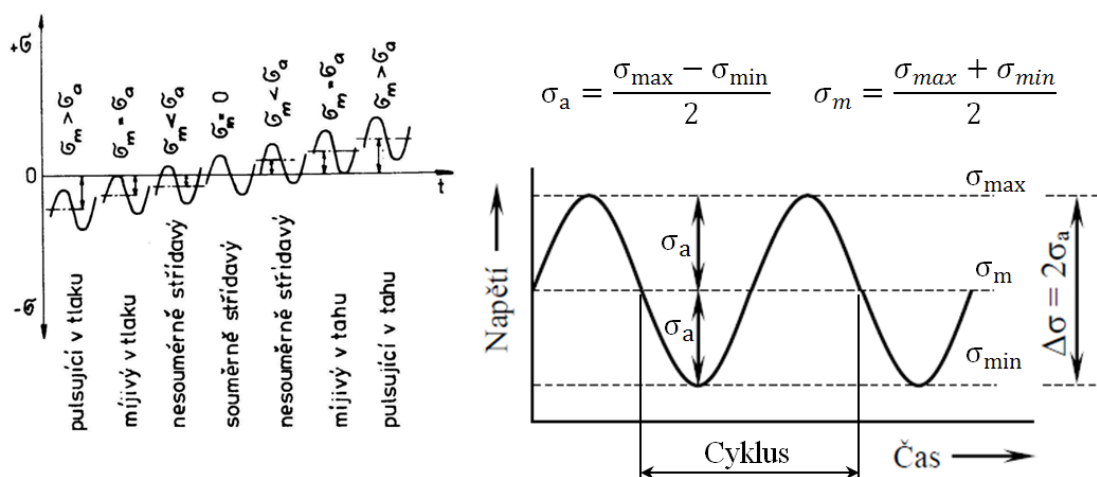
Jak už bylo výše řečeno je hliník kov se značně negativním korozním potenciálem v elektrolytech. Při vodivém spojení hliníku s jinými ušlechtlejšími kovy je koroze hliníku dosti zintenzivněna. Měď a slitiny mědi mohou způsobit silnou korozi hliníku i v případě, jsou-li v daném elektrolytu bez přímého kontaktu. Vzniklé ionty mědi, které se nacházejí v elektrolytu, se na hliníku vylučují cementací. To je velmi nebezpečné protože tím vytváření mikrokatomy, které iniciují lokální korozní napadení. Při rostoucí agresivitě ovzduší je vliv spojení výraznější a to zejména v přímořské atmosféře [13].

5.2 Únava hliníku a jeho slitin

Při provozních podmínkách může dojít k porušení i v případě, kdy napětí vyvolané provozním zatížením je výrazně nižší, než jsou pevnostní charakteristiky změřené tahovou zkouškou. Jsou to únavové lomy vzniklé důsledkem cyklického namáhání a porušení spojené s výskytem trhlin. Odolnost proti tomuto typu porušení charakterizujeme závislostí amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f . Tato křivka životnosti, která se nazývá Wöhlerova křivka je experimentálně stanovena při zatěžování s konstantní amplitudou síly σ_a . Wöhlerova křivka u hliníkových slitin má jiný tvar než je tomu u ocelí. U ocelí můžeme v oblasti počtu cyklů do lomu nad 10^7 cyklů charakterizovat *mez únavy* σ_c , tj. napětí, pod kterým už k porušení nedochází. U většiny slitin hliníku tomu tak není, protože křivka životnosti s klesajícím napětím stále klesá. Proto jsou hliníkové slitiny charakterizovány *časovou mezí únavy* σ_{Nc} pro určitý počet cyklů N_c . Horní hranice N_c bývá obvykle 10^8 cyklů[1].



Obr. 5.4 Wöhlerova křivka pro materiál a) s mezí únavy, b) s časovanou mezí únavy [31]



Obr. 5.5 Základní charakteristiky cyklického zatěžování [24, 31]

Únavová životnost slitin hliníku závisí na řadě parametrů. Kromě vlivu chemického složení, stavu tepelného zpracování, způsobu výroby hraje důležitou roli také přítomnost vrubů, kvalita povrchu, charakter namáhání a prostředí [1].

Významným způsobem zhoršuje únavovou životnost přítomnost tahových vnitřních napětí. Tlaková vnitřní pnutí naopak únavové životy významně zlepšuje [1].

5.2.1 Lomové vlastnosti

V praxi se velmi často setkáváme s případem, kdy se v materiálu konstrukce vyskytují trhliny nebo vady, které ovlivňují odolnost konstrukce proti statickému nebo únavovému namáhání. Při dosažení tzv. kritické délky trhliny dochází k porušení konstrukce. Proto je nutné pro materiály definovat kritické rozměry trhlín pro dané podmínky zatěžování. Vztahy mezi podmínkami zatěžování a velikostí trhlín se zabývá lomová mechanika [1].

Lomová mechanika definuje veličinu nazvanou součinitel intenzity napětí K , který dává do souvislosti nominální napětí σ a velikost defektu a dle vzorce: $K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$. K porušení konstrukce dojde tehdy, kdy součinitel intenzity napětí dosáhne kritické velikosti. K porušení tedy může dojít v případě nízkého nominálního napětí a velkého defektu nebo obráceně [1].

5.2.2 Šíření únavové trhliny

Únavové porušení slitin hliníku lze rozdělit do dvou etap. První etapa je období nukleace mikrotrhlín, které vznikají na povrchu tělesa. Ty se propojují a vzniká magistralní trhlina, která je schopna dále růst. Druhou etapou je šíření trhlín. Tato druhá etapa končí porušením tělesa tedy lomem. Obě etapy mohou být různě dlouhé a závisí na řadě faktorů. Experimentálně se odolnost proti šíření únavové trhliny sleduje na Paris-Erdoganově křivce. Rychlost šíření trhliny pak závisí na následující řadě parametrů:

- typ slitiny,
- čistota materiálu,
- anizotropie,
- tepelné zpracování podmínkami provozu (parametry zatěžování, frekvence, asymetrie cyklu apod.).

Na špičce trhliny dále mohou probíhat lokální chemické procesy korozního charakteru [1].

5.3 Prevence degradace ráfku při provozu

5.3.1 Správné napětí paprsků výpletu

Vždy je dobré mít kolo co nejlépe vycentrováno, aby se zatížení rovnoměrně rozkládalo na všechny paprsky. Každý výrobce doporučuje rozsah napnutí drátů. Příklady správného napnutí drátů pro různé výrobce je znázorněno v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2 Doporučené hodnoty předpětí drátů pro různé značky a modely [14]

Značka nebo výrobce	Model	Přední kolo	Zadní kolo pravá strana (strana řetězu)
Bontrager®	Race Lite	77 ÷ 127 kp	86 ÷ 159 kp
	Race X Lite Aero	91 ÷ 136 kp	122 ÷ 181 kp
Campagnolo®	Eurus Wheel	60 ÷ 80 kp	95 ÷ 115 kp
	Proton Wheel	50 ÷ 70 kp	120 ÷ 140 kp
Mavic®	Ksyrium SSC	90 ÷ 110 kp	130 ÷ 150 kp
	Ksyrium® Elite	100 ÷ 130 kp	120 ÷ 145 kp
Shimano®	WH-M959, WH-M575, WH-M540	98 ÷ 118 kp	105 ÷ 128 kp

Poznámka: 1 newton = 0,102 kp (kilopond)



Obr. 5.6. Tenzometr [14]

Jak můžeme vidět v tabulce, zapletená kola každé značky se centrují na jiné předpětí. Obecně platí, že čím větší je tloušťka stěny ráfku, tím větší napětí drátů může ráfek zvládnout. Dále se tato hodnota předpětí mění v závislosti na množství drátů. [14]

Výplet vypletený podle oka mechanikem v cykloservisu může být mimo rozsah uváděné tabulky. **Proto je dobré používat k vycentrování kola tenzometr**, pomocí kterého lze kolo vyplést dle doporučených hodnot výrobce. Tenzometr je však příliš drahý (okolo 3000 Kč) a setkat se s ním můžeme jen ve vysoce profesionálních dílnách. Cena vycentrování dle oka se pohybuje přibližně od 50 Kč. Vycentrování tenzometrem stojí od 350 Kč. Z tohoto důvodu lidé obecně volí tu levnější variantu. U drahých lehkých ráfků se vyplatí připlatit, protože u přetažených drátů mohou v ráfku vznikat trhliny a dochází i k praskání drátů. Následná výměna ráfku a drátů se pak výrazně prodrazí. Dalším důvodem je, že se tyto závodní lehké ráfky vyplétají na co nejvyšší hodnoty, protože to má pozitivní vliv na tuhost výpletu. Pak je tato hranice mezi správným předpětím a přetažením velmi úzká.

5.3.2 Konstrukční řešení pro zvýšení životnosti ráfku

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole a bude uvedeno v experimentální části. Na ráfek působí značné napětí v oblasti děr pro niple. V těchto místech pak vznikaly trhliny. Pro zvýšení odolnosti ráfku v těchto místech je nutno zvýšit tloušťku stěny což vede k zvýšení hmotnosti ráfku. Dražší ráfky toto pravidlo dokáží obejít následujícím způsobem.

- **Nýtování**



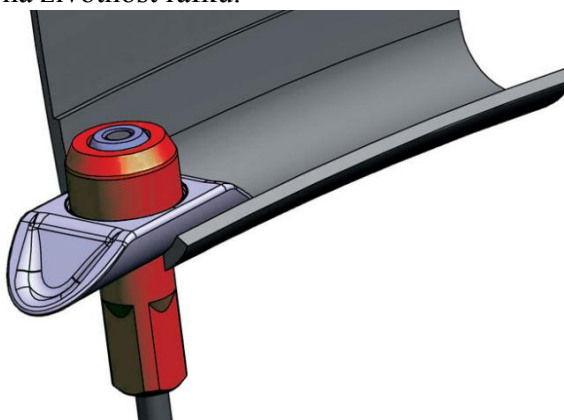
Obr. 5.7 Ukázka nýtování na ráfku Remerx Master Disc [8]

- **Zvýšení tloušťky stěny a následným obrobením v místech malých zatížení**
 - Toto řešení preferují u svých dražších ráfků firmy Fulcrum a Campagnolo. Tyto ráfky si pak mohou dovolit tužší výplet při zachování nízké hmotnosti ráfku.



Obr. 5.8 Konstrukční řešení ráfku Fulcrum Racing 3 [16]

- **Použití speciálního segmentu**
 - Tohoto řešení využívá firma Fulcrum pro své karbonové ráfky. Je však možné toto řešení použít i u hliníkových modelů.
 - Pomocí speciálního segmentu se napětí rozkládá na větší plochu ráfku, což má pozitivní vliv na životnost ráfku.



Obr. 5.9 Konstrukční řešení firmy Fulcrum [16]

- **Termálním vrtáním**

- Toto řešení využívá firma Mavic. Napětí se rozloží na stěny termálně vrtaného závitu. Ráfky značky Mavic se dále obrábí v málo namáhaných oblastech pro dosažení minimální váhy.
- Více o termálním vrtání, je uvedeno v kapitole 4.2.



Obr. 5.10 Princip řešení ráfku značky Mavic [15]

- **Napájením speciálního segmentu do ráfku**

- S tímto řešením přišla firma Bontrager a navzdory mohutnosti těchto elementů zůstávají tyto ráfky velice lehké.



Obr. 5.11 Konstrukční řešení kritických míst v podání firmy Bontrager [18]

Výše uvedená konstrukčních řešení ráfků je pouze příkladové. Existuje ještě celé množství variant. Tyto vyspělé konstrukční řešení jsou většinou chráněny patenty.

6 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je objasnění příčin vzniku trhlin v poskytnutých ráfcích zapletených kol zejména na podkladě strukturních a fraktografických rozborů. Výsledky pak rozebrat a navrhnout opatření směřující k zabránění vzniku těchto trhlin.

7 Experimentální práce

7.1 Napět'ově deformační analýza v ANSYS 14.5

Pro zjištění příčin vzniku trhlin v ráfku jízdního kola je nutné znát zatížení v nebezpečných místech. Z tohoto důvodu byl vytvořen jednoduchý model radiálního výpletu v programu ANSYS 14.5.

Materiálové parametry modelu:

- $R_e = 250 \text{ MPa}$
- $E = 70 \text{ GPa}$
- $\mu = 0,31$
 - tyto parametry odpovídají hliníkové slitině AW 6061

Okrajové podmínky:

- v náboji byla pevná vazba
- do každého drátu bylo aplikováno předpětí 900N
- na ráfek bylo poté aplikováno radiální, laterální a torzní zatížení o různých velikostech. První hodnota zatížení byla volena s ohledem na provozní podmínky ráfku. Druhá hodnota charakterizuje maximální hodnotu odpovídající testu na zátěžné stoličce (viz. Obr. 2.2).

Při těchto zatíženích byla sledována deformace a hlavně napětí v kritických místech. Tloušťka stěny ráfku byla 2mm a průměr drátu také 2mm. Na výplet bylo použito 20 drátů.

Je nutné zdůraznit, že díky vetknutí paprsků do ráfku je odečítané napětí přibližné. Při tomto vetknutí vzniká silná singularita u středu drátu v napojení na ráfek. Z tohoto důvodu nebylo napětí odečítáno v drátu, ale v jeho těsné blízkosti.

Vyhodnocení napět'ově deformační analýzy:

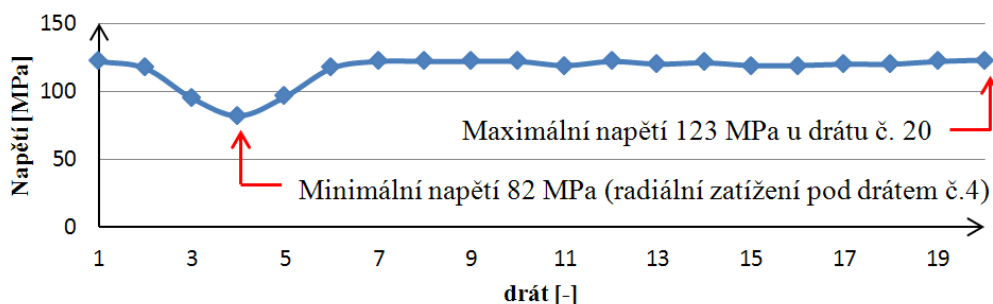
nezatížený stav (v každém drátě pouze předpětí 900N):

- pro nezatížený stav byla hodnota napětí u všech drátů v kritických místech 118MPa.

radiální zatížení:

radiální zatížení výpletu bylo simulováno pro zatížení 700N a zatížení 3000N. Napětí v kritických místech (u děr) bylo:

- pro zatížení silou 700 N se hodnota napětí pohybovala v rozmezí, které ukazuje graf na obr. 7.13.



Obr. 7.1 Graf rozložení napětí na jednotlivé dráty při radiálním zatížení 700N

Obr. 7.1 charakterizuje jedno otočení kola při jízdě (jeden zátěžný cyklus).

Parametry zátěžného cyklu:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{123 - 82}{2} = 20,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{123 + 82}{2} = 102,5 \text{ MPa}$$

$\sigma_m > \sigma_a \rightarrow$ **Jedná se o pulzující cyklus**

Tyto parametry by se dali použít pro zkoušky únavy této slitiny.

- pro zatížení silou 3000N byla maximální hodnota 142 MPa.

laterální zatížení:

laterální zatížení výpletu bylo simulováno pro zatížení 100N a zatížení 250N. Napětí v kritických místech (u děr) bylo:

- pro zatížení silou 100N byla maximální hodnota napětí 137 MPa
- pro zatížení silou 250N byla maximální hodnota napětí 172 MPa

torzní zatížení:

torzní zatížení výpletu bylo simulováno pro zatížení 100N. Maximální napětí v kritických místech (u děr) bylo pro toto zatížení 165 MPa.

Závěr deformačně napěťové analýzy

- v kritických místech nacházejí značná tahová napětí.
- největší zatížení ráfku způsobuje předpětí, ovšem větší předpětí rovnoměrněji rozkládá větší zatížení
- radiální výplet se nedá použít pro větší torzní namáhání

7.2 Experimentální materiál

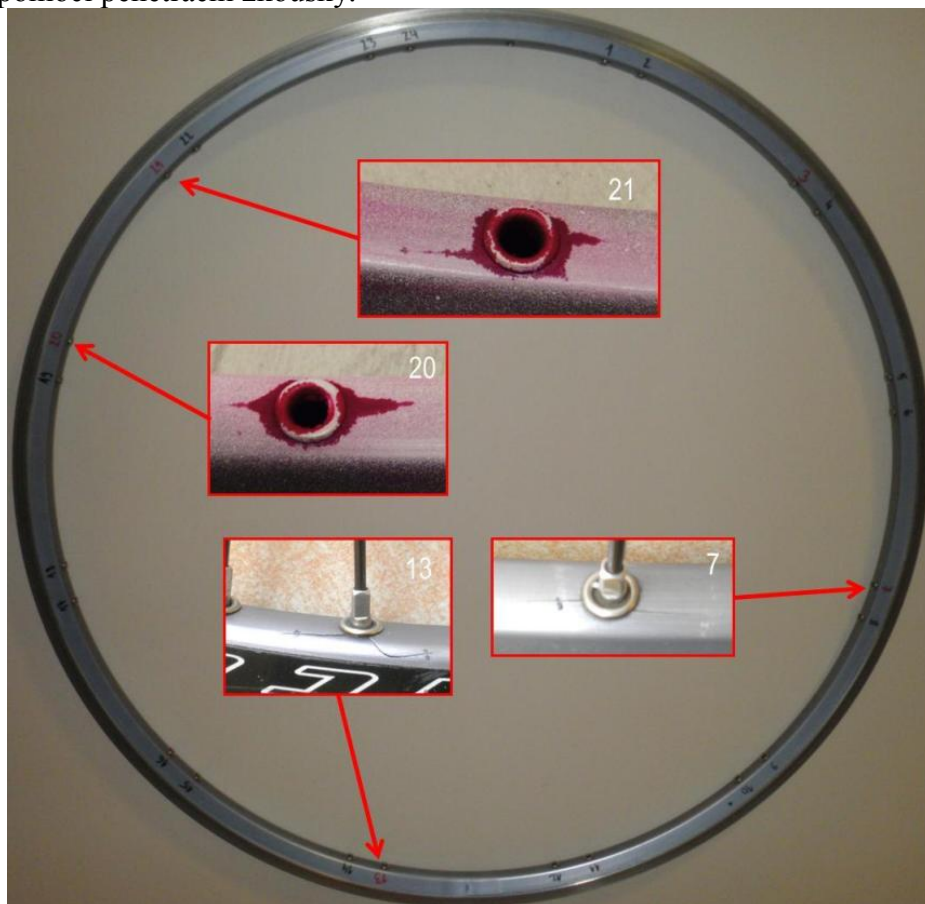
Jako experimentální materiály sloužily ráfky, na nichž se začali vlivem provozu vyskytovat trhliny v oblastech kolem otvorů pro niple. První ráfek byl provozován autorem této práce a ostatní ráfky byly dodány od dobrovolných cyklistů, kteří k ráfkům dodali i potřebné informace.

Ráfek 1

Dostupné informace o ráfku:

- přesný materiál nebyl výrobcem zveřejněn (experimentem však bylo zjištěno chemické složení odpovídající hliníkové slitině AW 6061)
- najeto: 40 000 km (5 let provozu)
- hmotnost jezdce: 70 kg
- hmotnost ráfku: 420 g
- cena ráfku: 2 000 Kč
- v zimním období nejeto
- ráfek zadního kola
- ráfek zpevněn nýtováním
- vypleteno tangenciálně na straně pastorků, druhá strana radiálně
- ráfek byl vyplétán ve výrobní hale
- plášťová verze ráfku

Po zaregistrování první trhliny (trhlina číslo 13 na obr. 7.2) bylo najeto ještě 6000 km a v tomto období se trhlina zvětšila o pouhé 2mm. Po sundání ráfku byly nalezeny další trhliny pomocí penetrační zkoušky.



Obr. 7.2 Schéma míst nalezených trhlín v ráfku 1

Makroskopické ohledání ráfku 1

Z obrázku 7.2 vyplívá, že se většina trhlín nacházela na lichých číslech, které značí dráty vedoucí k pastorkům. Dráty na straně u pastorků bývají více namáhány než na straně opačné [4].

Po rozřezání ráfku 1 v místech trhlín bylo zjištěno, že u trhlín označených čísly 7, 13 a 20 (označení dle obr. 7.2) se vyskytovaly rozlomené nýty. Rozlomený nýt je zachycen na obr. 7.3.



Obr. 7.3 Důkaz o iniciaci únavové trhliny v ráfku 1 z rozlomeného nýtu

Na obr. 7.3 je zachycen řez ráfku v místě nýtu. Roznýtovaná hlava nýtu měla příliš velký průměr a na plochu, kde měla být se nevlezla. Opírala se o okraj ráfku a právě v tomto místě nýty popraskaly. Vznikl ostrý vrub, který byl iniciací těchto trhlin.

Dále je vidět, že obr. 7.2 a 7.3 spolu korespondují, protože nýty praskly u bočních stěn ráfku a tudíž se právě zde začaly tvořit trhliny. Po důkladném prozkoumání ráfku byly nalezeny prasklé nýty také v místech 8 a 22, tam se ale zatím trhlinka nestihla iniciovat.

Příčina vzniku trhlin v ráfku 1 byla tedy zjištěna už po makroskopickém ohledání, přesto však byly udělány strukturní a fraktografické rozbory.

Vzorky pro strukturní rozbory ráfku 1

Trhlinka na místě 13 byla použita pro fraktografický rozbor v elektronovém mikroskopu. Trhlinka v místě 20 byla použita pro podélný výbrus trhliny. Dále byly z ráfku vyřezány vzorky z nezasazeného místa pro určení chemického složení, pozorování příčné a podélné mikrostruktury z oblasti okolo místa 14 (viz obr. 7.11.).

Ráfek 2

Dostupné informace o ráfku:

- materiál hliníková slitina AW 6082
- najeto: 2 000 Km
- hmotnost jezdce: 80 kg
- hmotnost ráfku: 420 g
- cena ráfku: 500 Kč
- ráfek zadního kola
- vypleteno tangenciálně na obou stranách
- ráfek byl vyplétán ve výrobní hale
- plášťová verze ráfku

U tohoto ráfku se trhliny vyskytovaly pouze v jednom místě ráfku (obr. 7.4). Tento výplet bylo nutno často centrovat (díky trhlinám, navíc při dotahování byly kritická místa ještě více namáhána, což mělo za následek přetížení a ještě větší rozevření trhlin).



Obr. 7.4 Ráfek číslo 2

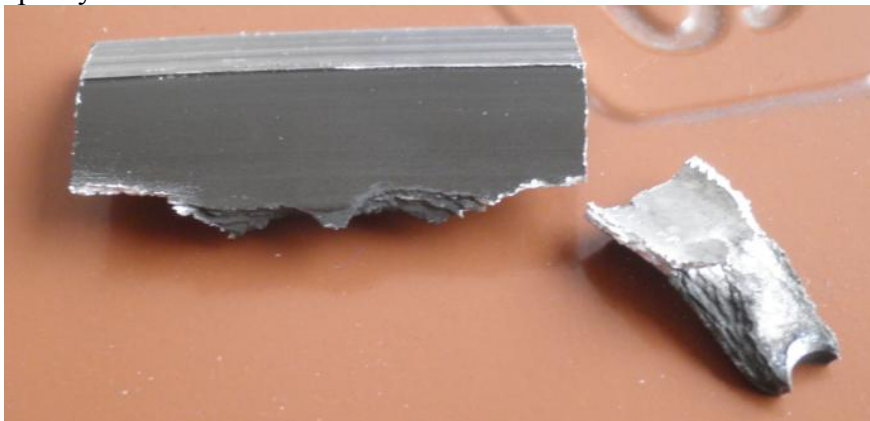
Makroskopické ohledání ráfku 2

Na ráfku byla zřetelná pomerančová kůra. Ta je zachycená na obr. 7.5 a svědčí o dodatečné deformaci při zakružování.



Obr. 7.5 Detail pomerančové kůry na ráfku 2

Po otevření trhlin bylo zjištěno, že se v trhlinách nachází eloxovaná vrstva. Tyto trhliny jsou znázorněny na obr. 7.6. Z tohoto ohledání můžeme soudit, že část trhlin vzniklo už při výrobě.



Obr. 7.6 Elox v trhlinách ráfku 2

Vzorky pro strukturní rozbory ráfku 2

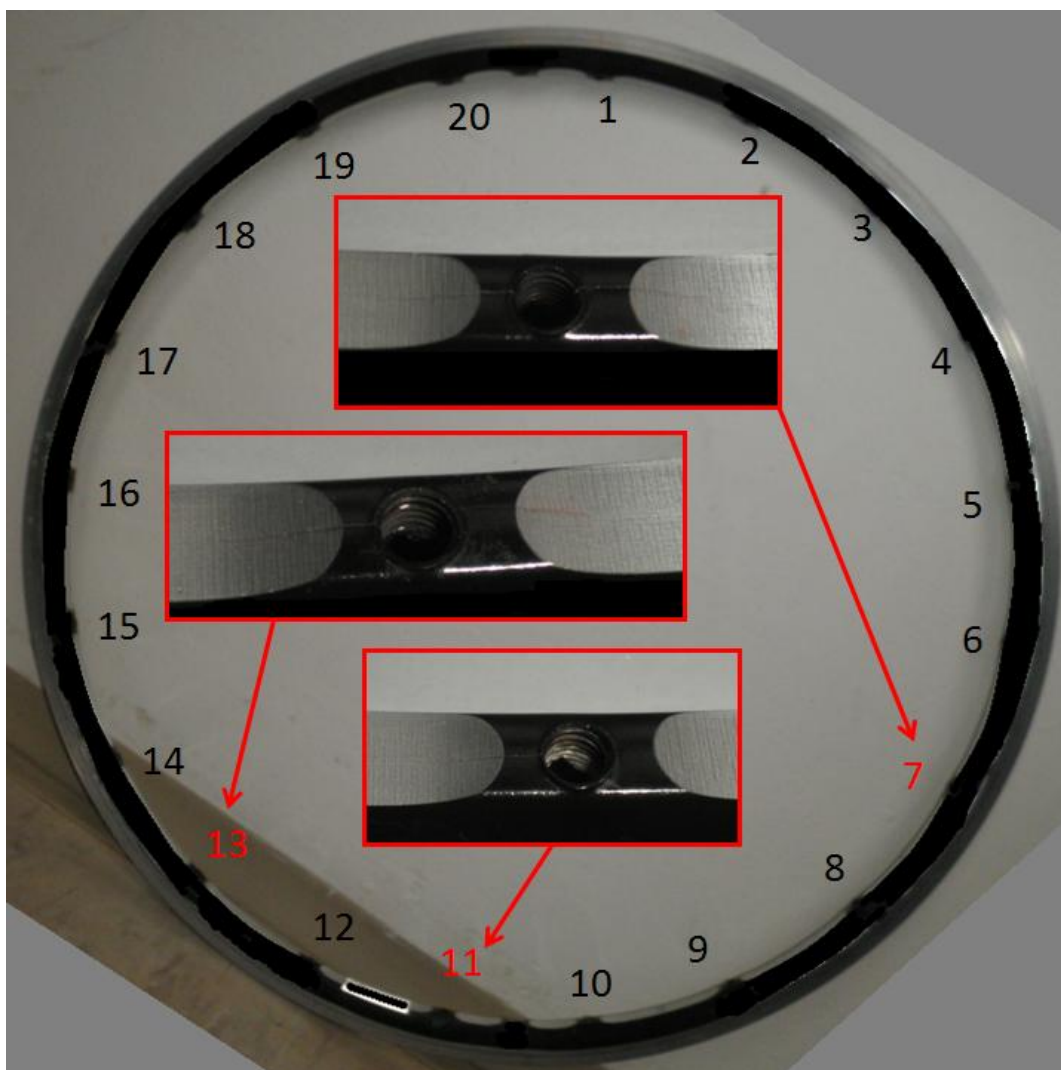
Z části ráfku 2 (obr. 7.4) byly udělány vzorky na (z leva): chemické složení, fraktografii, příčnou a podélnou strukturu.

Ráfek 3

Dostupné informace o ráfku:

- přesný materiál nebyl výrobcem zveřejněn (experimentem však bylo zjištěno chemické složení odpovídající hliníkové slitině AW 6082)
- najeto: odhadnuto na 10 000 ÷ 15 000 Km
- hmotnost jezdce: ---
- hmotnost ráfku: 440 g
- cena ráfku: 2000 Kč
- ráfek zadního kola
- vypleteno radiální na straně pastorků, druhá strana tangenciálně
- ráfek byl vyplétán ve výrobní hale
- galusková verze ráfku

Na tomto ráfku se vyskytovaly tři prakticky stejné trhliny na místech 7, 11 a 13 znázorněné na obr. 7.7.



Obr. 7.7 Schéma míst nalezených trhlin ráfku 3

Lichá čísla na ráfku značí dráty vedoucí k pastorkům. Dráty na straně u pastorků bývají více namáhány než na straně opačné. Z toho můžeme usuzovat, že se podobně jako u ráfku číslo 1 jednalo o trhliny způsobené zvýšeným namáháním jedné strany výpletu (strana, kde dráty vedou k pastorkům).

Vzorky pro strukturní rozbor ráfku 3

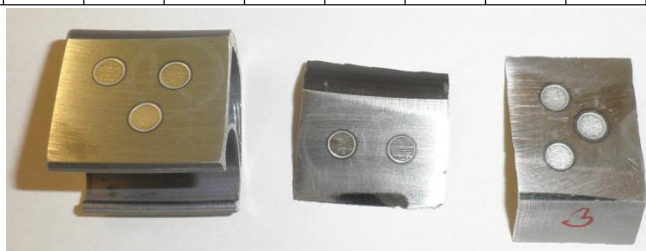
Trhlina na místě 7 byla použita pro fraktografický rozbor v elektronovém mikroskopu. Trhlina v místě 13 byla použita pro podélný výbrus trhliny. Dále byly z ráfku vyřezány vzorky z nezasaženého místa pro pozorování příčné a podélné mikrostruktury ráfku a pro určení chemického složení z oblasti okolo místa 7. (viz obr. 7.15)

7.3 Chemické složení

Chemické složení bylo měřeno spektrometrem s doutnavým výbojem *Spectrumat GDS 750*. Naměřené chemické složení je v tabulce 7.1. Místa měření na ráfcích jsou vyobrazeny na obr. 7.8.

Tab. 7.1 Naměřené údaje o chemickém složení zkoumaných ráfků

Ozn. vzorku	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Ca
Ráfek 1	0,61	0,17	0,19	0,02	1,08	0,08	0,05	0,03	0,00	0,01	0,00	0,001
Ráfek 2	0,96	0,19	0,02	0,53	0,76	0,00	0,05	0,03	0,00	0,01	0,00	0,001
Ráfek 3	0,87	0,13	0,01	0,49	0,61	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,001



Obr. 7.8 Ukázka míst měření na ráfcích pomocí spektrometru s doutnavým výbojem

Ráfek 1 odpovídá (vyhovuje) materiálu s označením EN AW-6061 T6 [AlMg1SiCu]. Chemické složení a mechanické vlastnosti této slitiny jsou uvedeny v tab. 3.7 a 3.8.

Ráfek 2 a 3 odpovídá (vyhovuje) materiálu s označením EN AW-6082 T6 [AlSi1MgMn].

Chemické složení a mechanické vlastnosti této slitiny jsou uvedeny v tab. 3.9 a 3.10.

7.4 Tvrdost

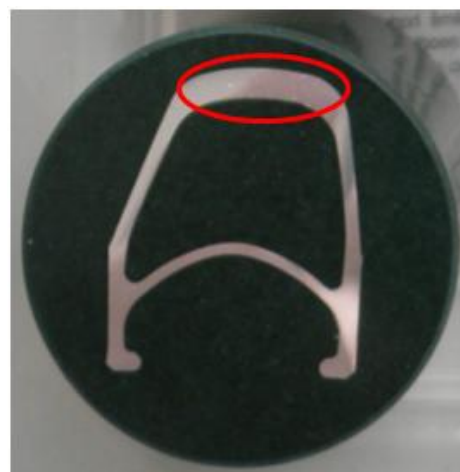
Měření tvrdosti ráfků bylo provedeno zkouškou tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení na přístroji Leco LV-700 (sériové číslo 7247).

Zátěž: $F=1\text{kp} = 9,8\text{N}$ po dobu 15 sekund.

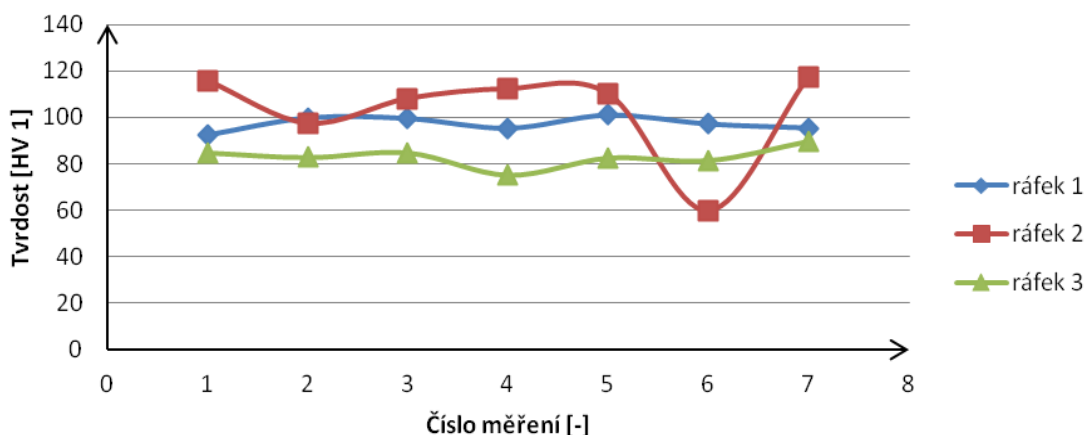
Bylo provedeno sedm měření na každém ráfku vždy v oblasti hřbetu (vzniku trhlin) na příčných výbrusech ráfků (obr. 7.9). Přesná místa odběru vzorků příčných výbrusů z ráfků jsou uvedeny v kapitole Mikrostruktura.

Tab. 7.2 Tabulka naměřených hodnot tvrdostí ráfků

Číslo měření	Ráfek 1	Ráfek 2	Ráfek 3
[-]	[HV 1]	[HV 1]	[HV 1]
1	92,3	115,8	84,8
2	99,9	97,5	82,8
3	99,6	108,2	84,8
4	95,3	112,4	75,3
5	101,1	110,2	82,6
6	97,2	59,7	81,5
7	95,4	117,6	89,7
Aritmetický průměr	97,3	100,6	83,1



Obr. 7.9 Znárodnění místa měření tvrdosti na ráfcích



Obr. 7.10 Grafické znázornění průběhu tvrdosti všech zkoumaných ráfků

Vyhodnocení tvrdosti:

Poznámka: tvrdost dle Vickerse do 150 HV 1 odpovídá tvrdosti podle Brinella.

Ráfek 1:

- tvrdost je v rozmezí $92,3 \div 101,1$ HV 1. Průměrná tvrdost je 97,3 HV 1. Norma pro hliníkové profily ze slitiny EN AW-6061 T6 uvádí hodnotu tvrdosti 85 HB. Tento nárůst o 12,3 HB mohl být způsoben plastickou deformací (při zakružování).
- Dosti homogenní tvrdost tohoto ráfku koresponduje s dále níže uvedenou mikrostrukturou, která je dosti homogenní a jemnozrná.

Ráfek 2:

- tvrdost je u tohoto ráfku nehomogenní a pohybuje se v rozmezí $97,5 \div 115,8$ HV 1. Průměrná hodnota tvrdosti je 100,6 HV 1. Norma pro hliníkové profily ze slitiny EN AW-6082 T6 uvádí hodnotu tvrdosti 95 HB. Hodnota naměřená je vyšší než uvádí norma o 5,6 HV 1. Tento nárůst mohl být způsoben další plastickou deformací zastudena (při zakružování).
- poznámka: hodnota tvrdosti 59,7 HV 1 z měření číslo 6 nebyla zahrnuta do výpočtu aritmetického průměru. Tato hodnota mohla vzniknout chybou měření nebo byl indentační hrot zatlačen do místa nehomogenity (hranice zrna, trhlinka apod.)
- nehomogenní tvrdost koresponduje s dále uvedenou strukturou, která je dosti nehomogenní a hrubozrná.

Ráfek 3:

- tvrdost se pohybuje v rozmezí $75,3 \div 89,7$ HV 1. Průměrná hodnota tvrdosti je 83,1 HV 1. Norma pro hliníkové profily ze slitiny EN AW 6082 T6 uvádí hodnotu 95 HB.
- tvrdost je opět dosti nehomogenní a to je opět následkem nehomogenní struktury.

Zajímavostí je, že ráfky 2 a 3 vyrobené ze stejné slitiny EN AW 6082 T6 mají značně odlišnou tvrdost. Tento rozdíl činí značných 17,5 HV 1.

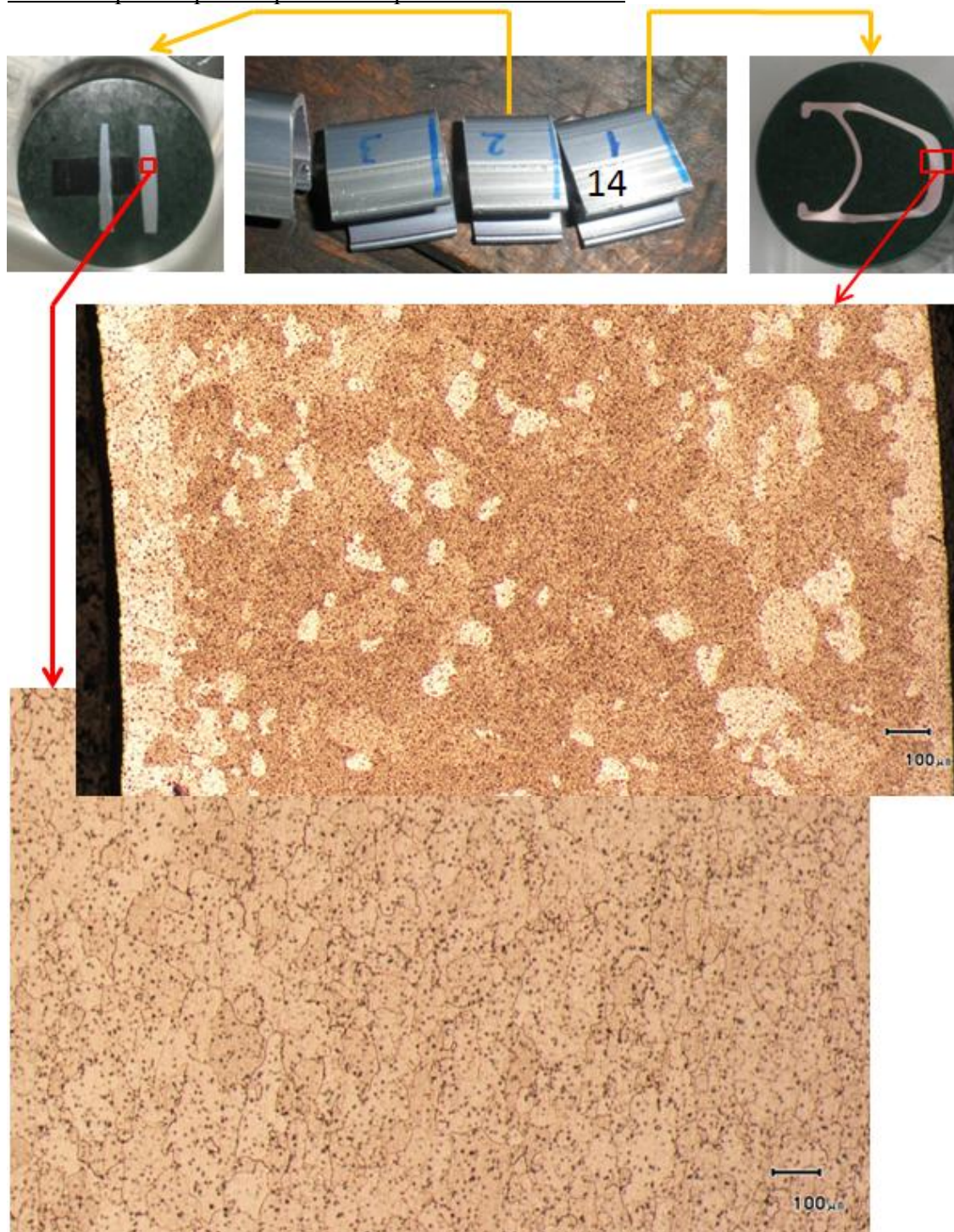
7.5 Mikrostruktura

Postup přípravy vzorků

- Fixace vzorků byla provedena do hmoty MultiFast Green v přístroji LECO PR-4X při tlaku 20 000kPa a teplotě 180 °C.
- Broušení probíhalo na stroji STRUERS ABRAMIN na brousících papírech zrnitosti 600, 1000, 2400.
- Leštění proběhlo opět na stroji STRUERS ABRAMIN. Nejdříve na leštícím plátně 3 μm s použitím leštící pasty 3 μm a poté na plátně 1 μm s pastou 0,7 μm . Při pozorování těchto vzorků pod mikroskopem byly vidět na vzorcích jemné rýhy, které byly následně odstraněny mechanicko chemickým leštěním. Jako leštící prostředek sloužila suspenze s koloidními částicemi oxidu křemíku (SiO_2) o velikosti cca. 0,05 mikrometru a pH9,8, která byla dávkována kapátkem po dobu 1 minuty. Po této době byl vzorek 2 minuty neutralizován vodou.
- Po zhlédnutí struktury v neleptaném stavu následovalo leptání leptadlem Fuss. Složení leptadla FUSS: 7,5 cm^3 HF +25 cm^3 HCl+8 cm^3 HNO₃+1000 cm^3 H₂O. Po tomto leptání se v materiálu zobrazily hranice zrn.
- Výbrusy ráfků byly pozorovány na optickém mikroskopu Olympus PMG 3.
- Pro pozorování fraktografie ráfků a pro prvkovou analýzu byl použit rastrovací elektronový mikroskop (REM) Philips XL 30 s detektorem EDAX.

Mikrostruktura ráfku 1

Struktura po naleptání z příčného a podélného řezu ráfku

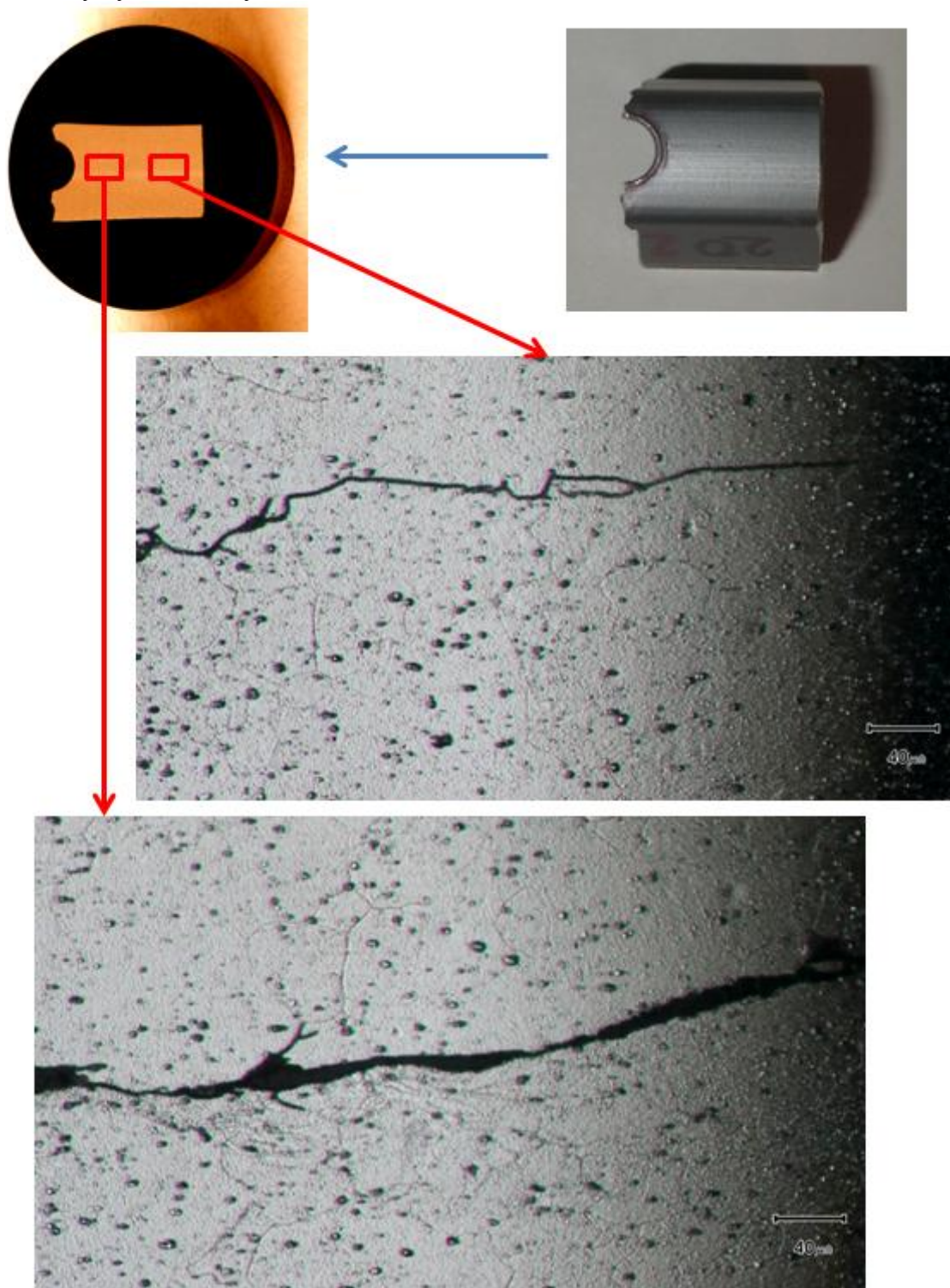


Obr. 7.11 Naleptaná mikrostruktura a znázornění přesného místa odběru pozorovaného vzorku (měřítko markeru 100μm)

Mikrostruktura tohoto ráfku je velice jemnozrná a homogenní v porovnání s ostatními ráfky. Na okrajích příčného výbrusu lze pozorovat úzkou rekrystalizovanou vrstvu o tloušťce přibližně 100μm, která vznikla díky tření o lisovací matrici.

Závěrem můžeme říci, že mikrostruktura tohoto ráfku až na úzkou rekrystalizovanou část je v pořádku a tudíž není příčinou vzniku trhlin v ráfku.

Podélný výbrus trhliny ráfku 1:



Obr. 7.12 Průběh šíření trhliny z odebraného místa číslo 20 (měřítko markeru 40μm)

Z výše uvedeného metalografického výbrusu zachyceného na obr. 7.12 můžeme vidět trajektorii šíření trhliny. Trhlina zpravidla nekopíruje hranice zrna a šíří se v jednom směru.

Mikrostruktura ráfku 2

Struktura po naleptání vzorků příčného a podélného řezu ráfku (ne přímo z místa kde trhliny vznikly ale v jeho těsné blízkosti viz. obr. 7.13):



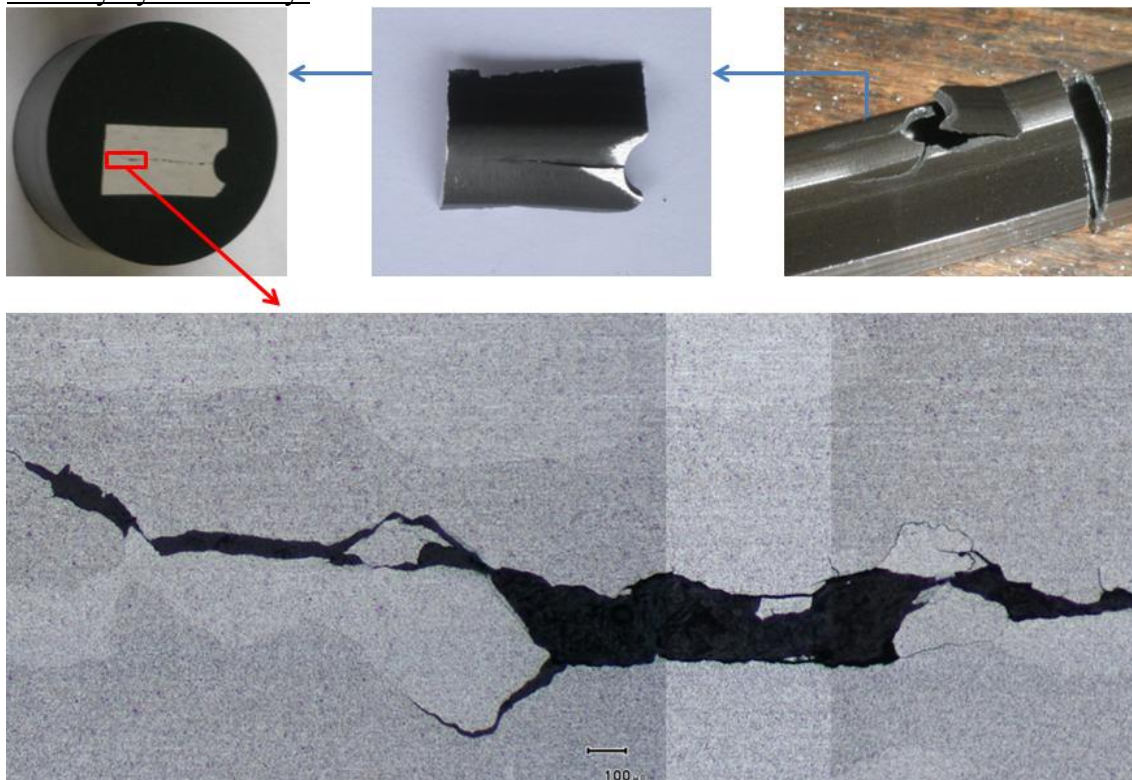
Obr. 7.13 Naleptaná mikrostruktura a znázornění přesného místa odběru pozorovaných vzorků (měřítko markeru 100μm)

Na naleptané struktuře příčného a podélného řezu můžeme vidět hrubá rekrystalizovaná zrna. Takto velická zrna mají za následek: zmenšení meze kluzu, snížení únavové životnosti a houževnatosti.

Dále můžeme vidět, že se v podélném průřezu na více místech vyskytují trhliny, což je zvláštní, protože se tento vzorek odebíral 2 cm od postiženého místa. Z toho tedy můžeme usuzovat, že trhliny vznikly už při výrobě.

Jsou to pravděpodobně trhliny vzniklé při zakružování. Profil od dodavatele ve stavu T6 byl příliš zpevněn umělým stárnutím, což mělo za následek minimální tažnost a tak vznikly tyto trhliny zastudena. Při kontrole si těchto trhlín pravděpodobně nikdo nevšiml a ráfek byl napleten a dodán zákazníkovi. Zákazník poté ráfek s těmito trhlínami mechanicky namáhal a tak došlo k otevírání trhlín, které vznikly při výrobě.

Podélný výbrus trhliny:

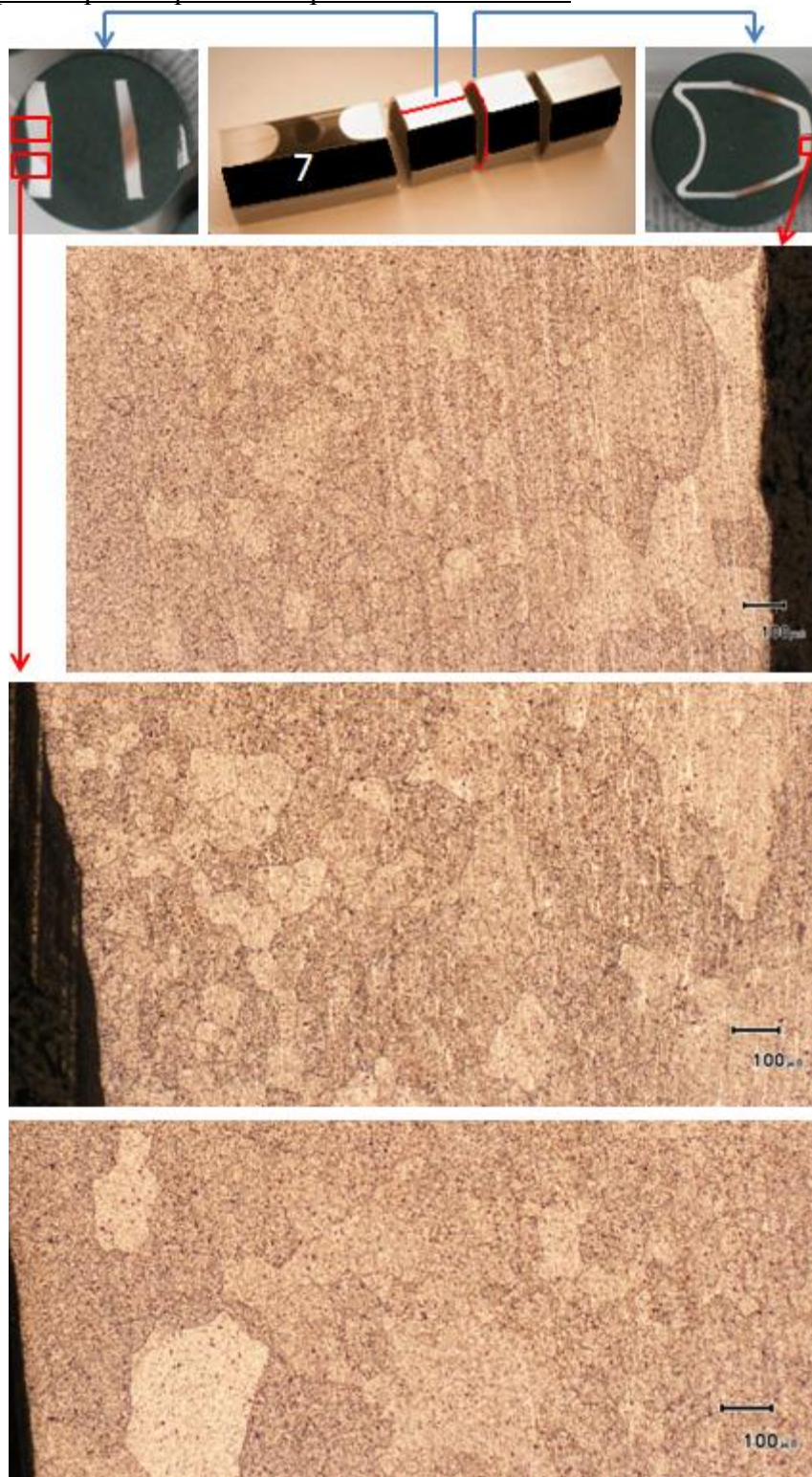


Obr. 7.14 Průběh šíření trhliny v ráfku číslo 2 (měřítko markeru 100μm)

Z výše uvedeného výbrusu je patrné, že se trhliny šíří po hranicích hrubých rekrystalizovaných zrn, ale jsou patrné i lomy přes zrna.

Mikrostruktura ráfku 3

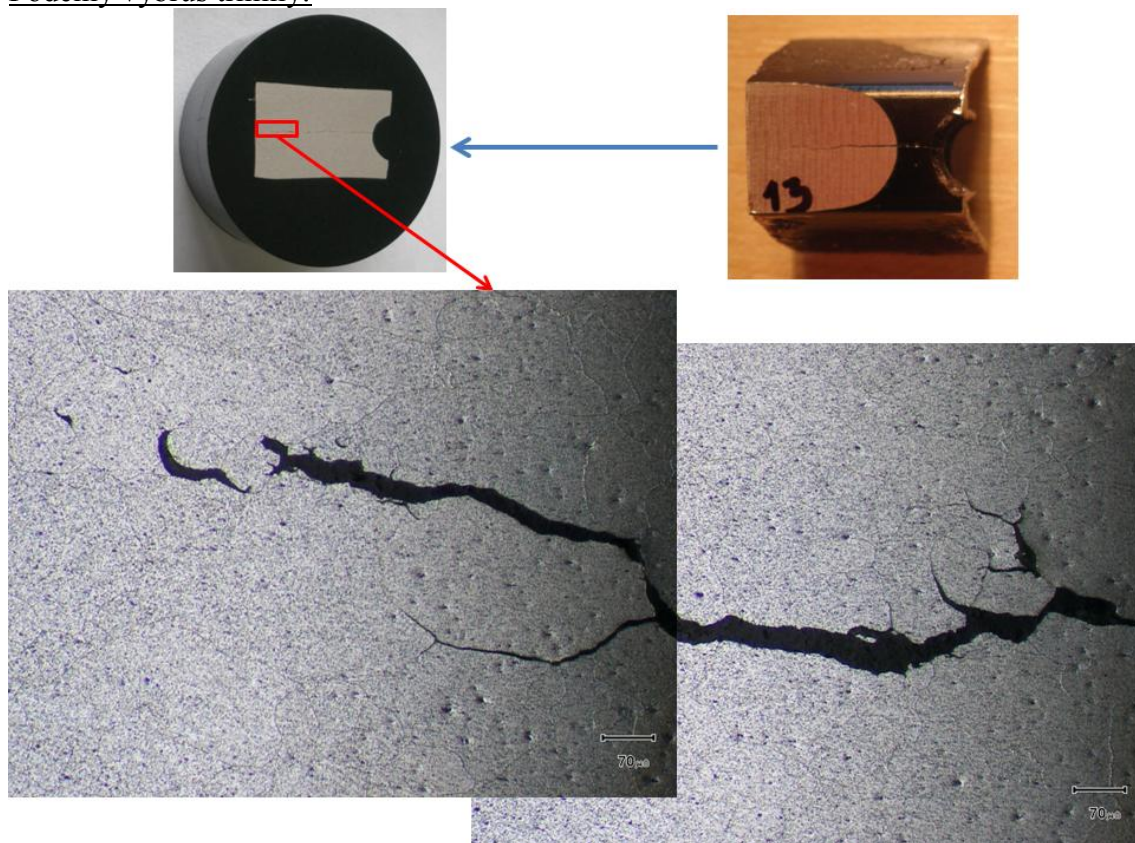
Struktura po naleptání z příčného a podélného řezu ráfku



Obr. 7.15 Naleptaná mikrostruktura a znázornění přesného místa odběru pozorovaných vzorků (měřítko markeru 100μm)

Struktura ráfku 3 je, co se týče velikost zrna, velmi nehomogenní. Zajímavá je zejména struktura podélného výbrusu na obr. 7.15, kde se v jedné lisovací rovině vyskytuje značně odlišná struktura. To naznačuje, že je proces lisování velmi náchylný na rekrystalizaci struktury v různých částech profilu.

Podélný výbrus trhliny:

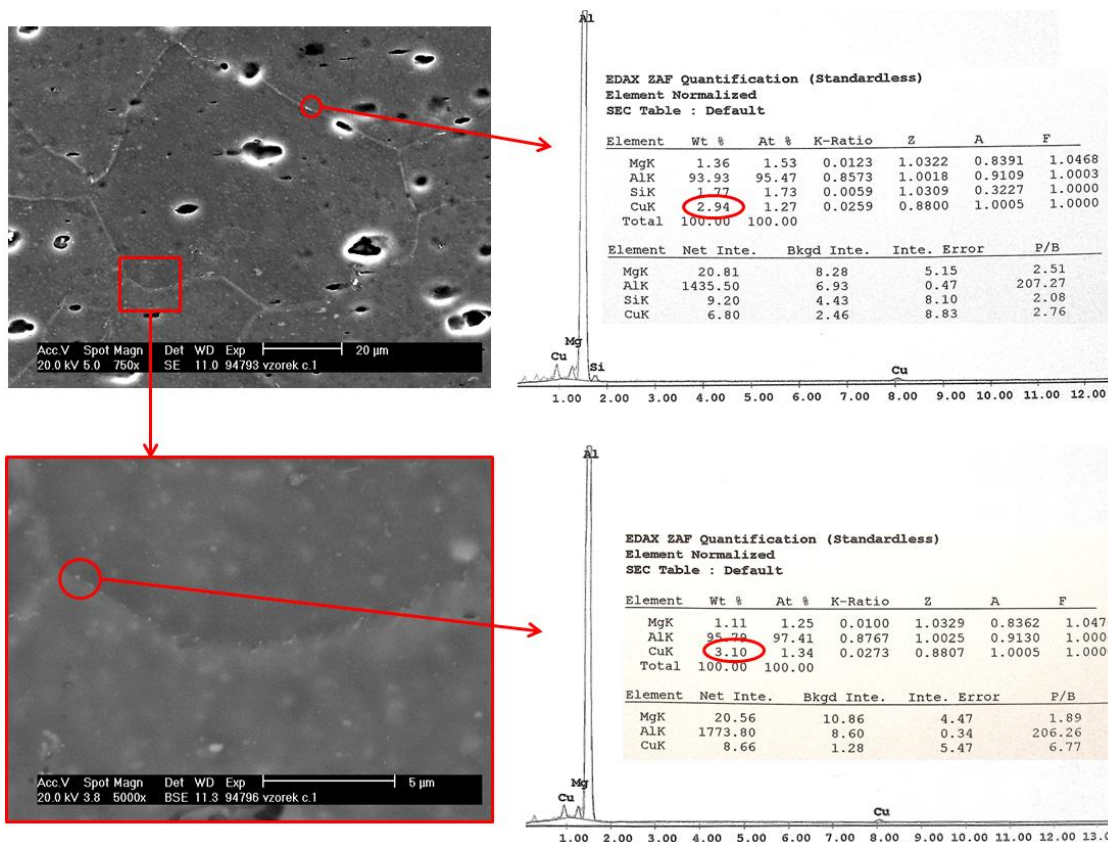


Obr. 7.16 Průběh šíření čela trhliny v ráfku číslo 3 (měřítko markeru 70μm)

Na obr. 7.16 můžeme pozorovat smíšený průběh lomu, avšak převládá interkrystalické porušení. Trhliny se dokonce rozvětvují do více směrů. Tento mechanismus rozvětvení ukazuje na mechanismus interkrystalické koroze. Příčinou této interkrystalické koroze je pravděpodobně špatné ochlazení z teploty průtlačného lisování nebo separátního rozpouštěcího žíhání. Při nedostatečně rychlém ochlazování může dojít k vyloučení vytvrzující fáze na hranice zrn. Tyto fáze jsou pak ušlechtilější než hliníková matrice. V elektrolytu se tím pádem vyvolá anodické rozpouštění hliníkové méně ušlechtilé matrice. Pro toto podezření byl tento podélný výbrus zkoumán v rastrovacím elektronovém mikroskopu (REM).

REM - rozbor hranic zrn na podélném výbrusu (stejný vzorek jako na obr 7.16)

Rozbor hranic zrn probíhal na REM Philips XL 30 s detektorem EDAX



Obr. 7.17 Rozbor hranic zrn pomocí REM

Ze snímků z REM jsou jasné viditelné částice na hranicích zrn. Provedením prvkové analýzy těchto částic bylo zjištěno, že jsou na hranicích vyloučené částice mědi. Na dvou místech byly naměřeny hodnoty okolo 3hm%. Tato hodnota na první pohled nevypadá závratně, ovšem musíme si uvědomit, že se jedná o slitinu 6082, která má globální obsah mědi 0,01%. Dále je dobré si uvědomit, že detektor EDAX provádí analýzu na oblasti 1,5µm a částice na hranicích zrn jsou přibližně o jeden až dva řády menší. Z toho plyne, že se analyzuje velké množství okolí těchto částic a množství mědi v těchto částicích je mnohem větší.

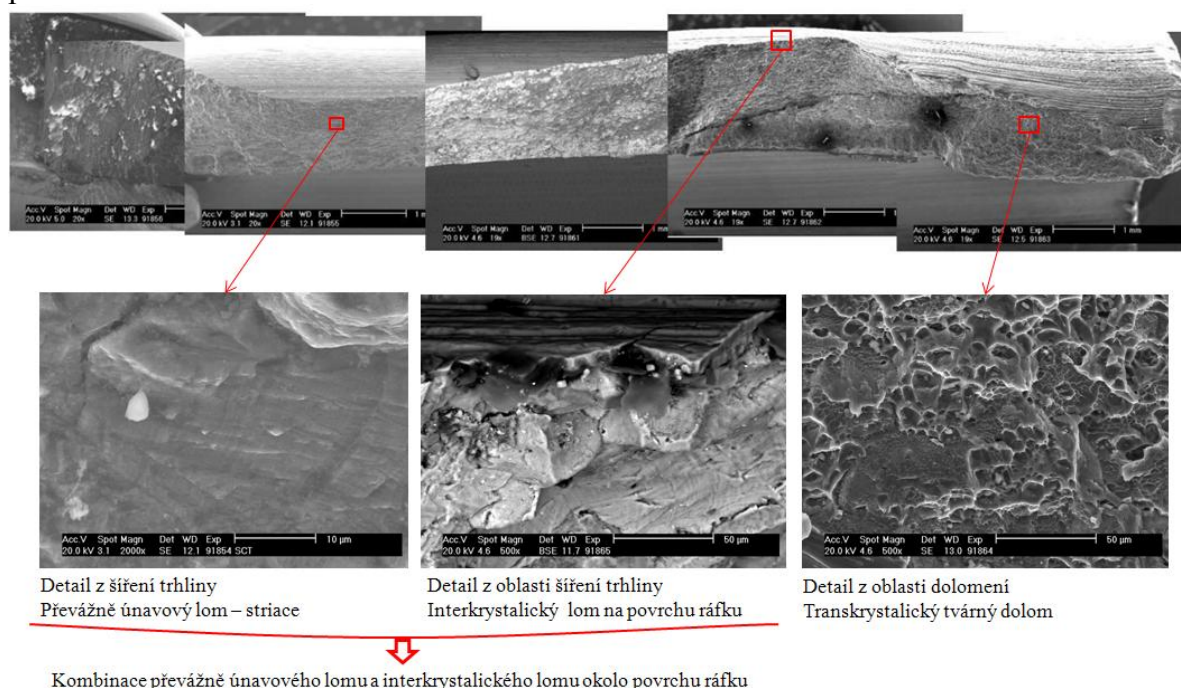
Preventivním opatřením proti šíření výše uvedených trhlin je zvýšení rychlosti ochlazování za průtláčným lisováním za tepla. Tím dojde k zachování vytvrzující fáze v tuhém roztoku a následně toto obohacení lze využít při precipitaci v průběhu umělého stárnutí. Připomeňme, že výsledná tvrdost tohoto ráfku byla o 11,9 HV 1 nižší, než udává norma. Vytvrzující fáze se vyloučily na hranice zrn a při následném vytvrzování už jich bylo méně a slitina se tak nemohla vytvrdit na požadované hodnoty. Vlivem snížení tvrdosti byl ráfek i méně pevný a tím náchylnější na únavové porušení.

7.6 Fraktografický rozbor

Fraktografický rozbor probíhal v REM Philips XL 30. Elektronový mikroskop je v dnešní době špička v pozorování lomových ploch hlavně díky vynikající hloubce ostrosti v režimu SE. Dále musíme říct, že šlo o provozní lomy, které byly dosti znečištěné zejména korozí. Tyto všechny vzorky ráfků byly před pozorováním v elektronovém mikroskopu pečlivě čištěny v acetonu s přispěním ultrazvuku. I přes toto důkladné čištění vzorků se nepodařilo odstranit všechny nečistoty (hlavně korozní zplodiny) a tudíž jsou obrázky dosti nekvalitní. Ovšem pro určení mechanismu lomu byly obrázky postačující.

Fraktografie ráfku 1

Z výše uvedených metalografických výbrusů a z informací o provozu ráfku, který měl najeto přibližně 40 000 km (6000 km s trhlinou) jsme mohli očekávat únavové porušení.



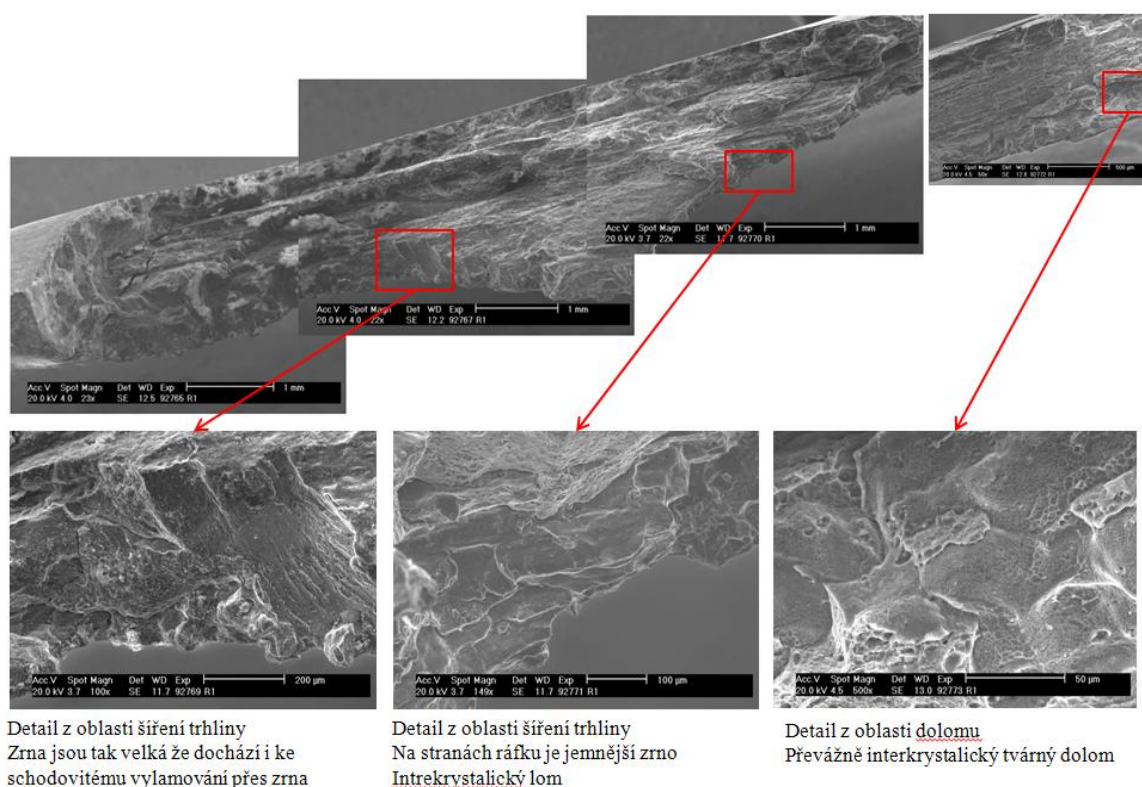
Obr. 7.18 Fraktografický rozbor ráfku 1

Predikce o únavovém porušení se potvrdila. Na snímcích trhliny z REM jsou v oblasti šíření vidět striace, což je jasný důkaz, že se jednalo o únavový lom. V oblasti šíření se našla i povrchová vrstva interkrystalického lomu. Tato vrstva pravděpodobně vznikla vlivem tření o lisovací matrici a je vidět i na obr. 7.22.

Jak už bylo výše rozebíráno, iniciaci trhliny způsobilo špatné konstrukční řešení nýtování. Prasklý nýt a iniciační místo jde také zpozorovat na levé straně obrázku.

V oblasti dolomení se jednalo o transkrystalický tvárný lom. To opět ukazuje, že byl materiál velice dobře tepelně zpracován a zrna měla dobrou kohezi.

Fraktografie ráfku 2



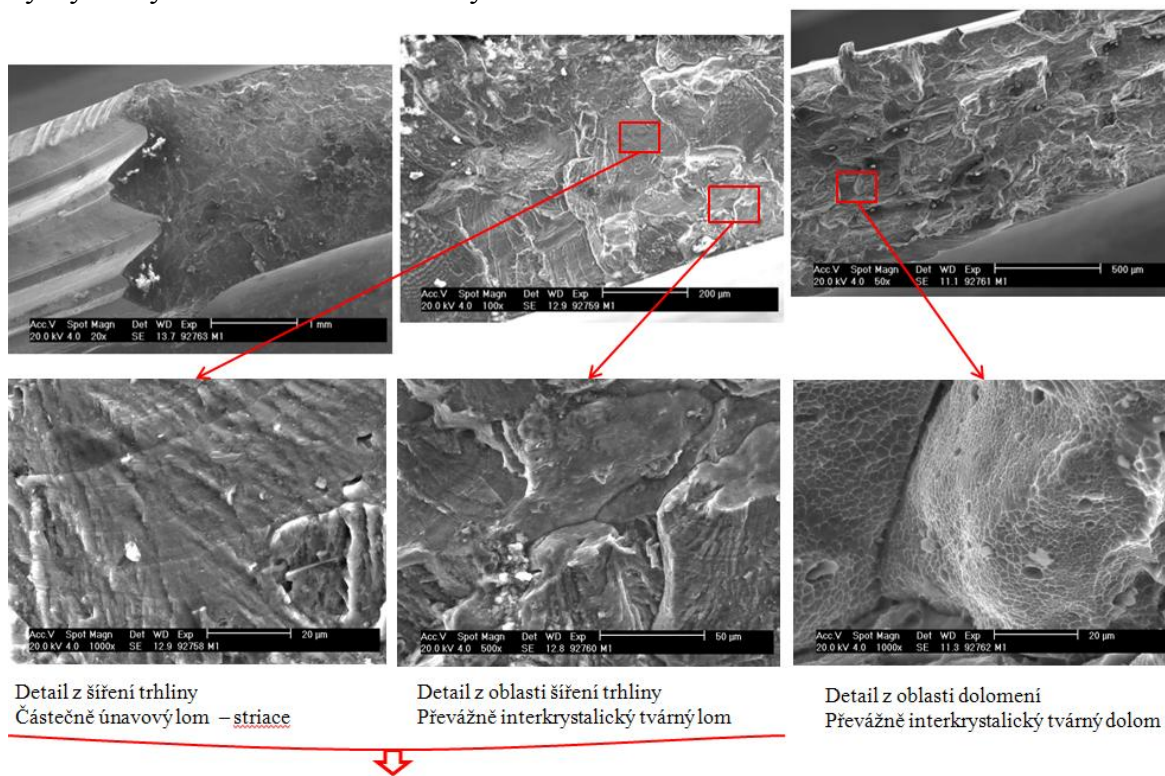
Obr. 7.19 Fraktografický rozbor ráfku 2

Na obrázcích z fraktografie můžeme vidět schodovité propojování trhlin, které vznikly při výrobě. Toto propojování bylo převážně interkrystalické, ale jelikož byla zrna dosti velká a měla nepravidelný tvar, docházelo i k lomům přes zrna. Dolomení bylo převážně interkrystalické tvárné.

Závěrem tedy můžeme říct, že je materiál ráfku nevyhovující. Má v sobě trhliny už na počátku bez zatěžování, hrubé zrna a špatnou kohezi zrn. Tyto všechny problémy jsou způsobeny chybnou technologií tváření a následnými parametry tepelného zpracování.

Fraktografie ráfku 3

Ráfek byl opatřen otvory vyrobené technologií termálního vrtání. V ráfku se vyskytovaly tři takřka totožné trhliny.



Obr. 7.20 Fraktografický rozbor ráfku 3

Bohužel se nepodařilo odhalit místo iniciace těchto trhlin, protože počátek šíření trhliny byl značně otačen a obecně byla tato lomová plocha dosti napadena korozi.

Po delším hledání byly v oblasti šíření trhliny nalezeny striace z čehož plyne, že se jedná o únavu. Ovšem byla nalezena i místa interkrystalického porušení což poukazuje na sníženou kohezi zrn. Tento mechanismus lomu je charakteristický pro korozi pod napětím (korozní praskání a korozní únavu).

V oblasti dolomení se jednalo o interkrystalický tvárný lom, který značí sníženou kohezi zrn a potvrzuje vyloučení vytvrzující fáze na hranice zrn.

8 Rozbor dosažených výsledků a návrh opatření k zabránění vzniku trhlin

Ráfek 1

Rozbor dosažených výsledků:

- chemické složení vyhovovalo slitině EN AW 6061
- tvrdost byla o 12 HV 1 vyšší, než udává norma
- struktura byla jemnozrnná a homogenní až na minimální rekrytalizovanou vrstvu
- trhlina se šířila transkrystalicky až na minimální pás na povrchu, kde byla rekrytalizovaná vrstva s interkrystalickým lomem
- fraktografie ukázala striace, které značí únavový lom
- po rozřezání ráfku byly objeveny rozlomené nýty v místech trhlin

Příčinou vzniku trhlin u tohoto ráfku bylo špatné konstrukční řešení nýtování. Nýty byly nalisovány na stěnu ráfku, kde byly nerovnoměrně zatěžovány a po čase došlo k jejich rozlomení. Rozlomené nýty pak působily jako ostré vruby a způsobily vznik únavových trhlin v ráfku. Toto špatné nýtování je zobrazeno na obr. 7.3.

Opatření pro zabránění vzniku trhlin je tedy navrhnout jiné konstrukční řešení lisování nýtu do ráfku. Je důležité, aby nýt rovnoměrně dosedal na rovinnou plochu hřbetu ráfku, jak je znázorněno na obr. 4.25. Z toho plyne, že je nutno vyrobit širší ráfek v místě nýtu nebo zvolit úplně jiné konstrukční řešení doporučované v kapitole 5.3.2.

Ráfek 2

Rozbor dosažených výsledků:

- chemické složení vyhovovalo slitině EN AW 6082
- tvrdost byla o 5,6 HV 1 vyšší, než udává norma
- struktura měla velká rekrytalizovaná zrna nehomogenní velikosti. Navíc byly nalezeny na více místech podélné výbrusu trhliny (v základním materiálu mimo oblast defektních trhlin), které vznikly při výrobě ráfku
- Šíření defektní trhliny v hrubozrnné rekrytalizované struktuře bylo především interkrystalického charakteru.
- fraktografie defektní trhliny ukázala interkrystalické schodovité propojování trhlin vzniklých při výrobě.

Příčina vzniku defektních trhlin byla ve špatných parametrech tepelného zpracování. Jak už je výše zmíněno, v základním materiálu se vyskytovaly trhliny už při výrobě. Hlavní důkaz tohoto tvrzení je na obr. 7.6 kde jsou vidět zaeloxované trhliny. Při provozu ráfku se trhliny vzniklé při výrobě začaly propojovat a otevírat (zákazník s kolem ujel pouhých 2000 km a kolo se mu rozcentrovalo). Tyto trhliny vznikly pravděpodobně při zakružování z důvodu snížení tažnosti materiálu po operaci umělého stárnutí s přispěním hrubé rekrytalizované struktury v celém průřezu ráfku.

Opatření proti vzniku trhlin při výrobě a následně vzniklých defektních trhlin je následující. Protože byl ráfek zakružován ve vystárnutém stavu T6, je nutné snížit dobu stárnutí nebo výšku teploty stárnutí. Tak dojde k zachování tažnosti, která je důležitá pro operaci zakružování. Další možností je provést operaci umělého stárnutí až po

zakružování. Z důvodu velmi rekrystalizované a hrubozrnné nehomogenní struktury by bylo vhodné upravit i parametry průtlačného lisování.

Ráfek 3

Rozbor dosažených výsledků:

- chemické složení vyhovovalo slitině EN AW 6082
- tvrdost byla o 11,9 HV 1 nižší, než udává norma
- struktura je dosti nehomogenní co se týče velikosti zrn
- šíření defektní trhliny bylo především interkrystalického charakteru. Tyto trhliny se rozvětvují do více směrů, což ukazuje na interkrystalickou korozní únavu
- fraktografie defektní trhliny ukázala smíšený lom. Část lomu byla interkrystalického charakteru včetně dolomení. V druhé transkrystalické části byly nalezeny striace.

Příčina vzniku defektních trhlin byla ve špatných parametrech tepelného zpracování. Nedostatečně rychlým ochlazováním těsně za průtlačným lisováním se vyloučily vytvrzující fáze na hranice zrn (zejména fáze mědi), což při provozu ráfku způsobilo zvýšenou náchylnost k interkrystalické korozi. Nízká tvrdost dále ukazuje na snížení pevnosti a tudíž vyšší náchylnost na únavové porušení. Synergickým účinkem koroze a únavy tedy došlo ke vzniku trhlin.

Opatření proti vzniku trhlin je tedy ve volbě jiných parametrů tepelného zpracování. Zvýšit rychlost ochlazování za průtlačným lisováním (nebo po rozpouštěcím žíhání) pro zamezení vyloučení vytvrzujících fází na hranice zrn. Prodloužit dobu stárnutí nebo zvýšit teplotu stárnutí pro zvýšení pevnosti ráfku.

9 Závěr

Experimentální část diplomové práce se zabývala problematikou příčin vzniku trhlin v ráfcích jízdních kol z hliníkových slitin EN AW-6061 a EN AW-6082.

Na základě fraktografických a strukturních rozborů ráfků je možné formulovat následující závěry:

- ráfek 1 ze slitiny EN AW-6061 byl z materiálového pohledu na vysoké úrovni. Struktura byla jemnozrnná, homogenní a tvrdost vyhovovala normě. O kvalitě materiálu ráfku hovoří i fakt, že po zaregistrování první trhliny bylo s ráfkem najeto ještě 6000 km a v tomto období se trhlina zvětšila o pouhé 2mm. Důvod proč v tomto ráfku trhliny vůbec vznikly, byl zřejmý už při makroskopickém ohledání. V iniciačních místech trhlin se nacházely rozlomené nýty, které působily jako ostrý vrub a právě z těchto míst se začaly šířit únavové trhliny.
- největším problémem u ráfku 2, který byl vyroben ze slitiny EN AW-6082 byla špatná struktura. Struktura měla velké rekrytalizovaná zrna, která zapříčinila vznik trhlin při zakružování profilu ve stavu T6. Tyto trhliny se při provozu začali propojovat, což způsobilo rozcentrování kola. Na konci životnosti se trhlina zcela rozevřela a ráfek musel být vyměněn.
- ráfek 3 byl vyroben z materiálu EN AW-6082 a jeho hlavním problémem bylo vyloučení vytvrzujících fází (zejména fází mědi) na hranice zrn. Dále byla naměřena tvrdost nižší než, udává norma pro tento materiál, z čehož plyne, že materiál nebyl vytvrzen na požadovanou pevnost. Z těchto důvodů došlo ke vzniku trhlin ze synergického účinku interkrystalické koroze (zejména při odstavení kola) a únavy (během jízdy).

Z globálního pohledu jsou hliníkové slitiny ideálním materiálem na ráfky jízdních kol. Vyžadují však dodržování fyzikální metalurgie, která spočívá ve znalosti a využití množství vlivů chemického složení, tváření a tepelného zpracování na mechanické, chemické, fyzikální a technologické vlastnosti. Dále je důležité vycházet ze spolehlivého konstrukčního řešení ráfku.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Petr LOUDA, Vladivoj OČENÁŠEK A KOL. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [2] MATĚJKA, Libor. Jak se vyrábí ráfek. [online]. roč. 2012 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.bikeportal.cz/index.php5?str=clanek&id=38>
- [3] SCHRANER, Gerd. *The art of wheelbuilding: a bench reference for neophytes, pros, and wheelaholics*. Denver, Colo: Buonpane Publications, 1999. ISBN 09-649-8353-2.
- [4] JONES, C. Calvin. *VELKÁ MODRÁ KNIHA O SERVISU JÍZDNÍCH KOL: Příručka Park Tool nejen pro amatérské mechaniky*. 2. vyd. ISBN 978-80-254-5926-3.
- [5] MUSSON, Roger. *Professional Guide to Wheel Building*. 5. vyd. 2009.
- [6] Precipitace. *FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Precipitace09_10.pdf
- [7] Tepelné zpracování slitin Al-Si. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ: FAKULTA STROJNÍ* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TSL/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20slitin%20Al-Si.pdf>
- [8] REMERX. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: www.remerx.cz
- [9] BILL'S WHEELS. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.billmouldwheels.com/>
- [10] CENS.com. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://cens.com/cens/html/en/product/product_main_10682.html
- [11] TERMDRILL. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.thermdrill.cz/jak-to-funguje/princip-cinnosti/>
- [12] TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC Fakulta strojní: Tváření kovů. [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [13] BARTONÍČEK, Robert. *Koroze a protikorozní ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: ČSAV, 1966, 719 s.
- [14] Parktool: Wheel Tension Measurement. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.parktool.com/blog/repair-help/wheel-tension-measurement>
- [15] MAVIC: zapletená kola. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.mavic.com/>
- [16] FULCRUM: zapletená kola. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://fulcrumwheels.com/>
- [17] CAMPAGNOLO: zapletená kola. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://campagnolo.com/>
- [18] Bikeradar: THE WORLD IS FOR RIDING. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.bikeradar.com/>
- [19] Rebel Bike: Zapletená kola Remerx 2009. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: http://www.rebelbike.com/index.php?clanek_detail=true&id_clanek=665
- [20] Nedal ALUMINIUM: Description of alloys. [online]. [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://www.nedalextrusion.com/e/alloys/description-of-alloys/>
- [21] KLAČURKOVÁ, Lenka, Karel SLÁMEČKA, Ladislav ČELKO a Ondřej MAN. *ATLAS MATERIÁLOVÝCH STRUKTUR*. 2009. 1 elektronický optický disk (CD-ROM).

- [22] Wembley Stadium. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Wembley_Stadium
- [23] George Cayley. [online]. [cit. 2013-05-09]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/George_Cayley
- [24] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I: přednášky : určeno pro posl. fak. strojní*. 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 247 s. Učební texty vys. škol. ISBN 80-214-1028-0.
- [25] *Effect of Sc and Zr on microstructures and mechanical properties of as-cast Al-Mg-Si-Mn alloys* [online]. 2009 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100363260860309X>
- [26] KUCHLER, Karel. Kulatá vševěda. *Časopis silniční cyklistiky 53x11*. Praha: V-Press s.r.o., 2010.
- [27] TUFO TUBELESS BICYCLE TYRES: Technologie TUFO. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.tufo.com/technologie-2/>
- [28] Vittoria. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://www.vittoria.com/>
- [29] ZIPP: WHEELS. [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:
<http://www.zipp.com/wheels/index.php>
- [30] Rady / Vybíráme kolo: Fenomén v MTB má číslo 29. *Kolo.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: <http://kolo.cz/clanek/fenomen-v-mtb-ma-cislo-29/kategorie/rady-vybirame-kolo>
- [31] PANTĚLEJEV, Libor. Únava kovových materiálů. *ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ* [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z:
<http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.pdf>

11 Seznam použitých zkratk a symbolů

λ – lisovací poměr [-]

S_0 – výchozí průměr čepu [mm^2]

S_1 – průřez výlisku [mm^2]

Θ – rovnovážný precipitát (slitina AlCu4)

Θ' – přechodový precipitát (slitina AlCu4)

GP I, GP II - Guinier-Prestonovy zóny

σ_c – mez únavy [MPa]

σ_{Nc} – časová mez únavy [MPa]

N_f – počet cyklů do lomu [-]

K – součinitel intenzity napětí [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$]

σ – nominální napětí

a – velikost defektu

$\Delta\sigma$ – rozkmit napětí [MPa]

σ_a – amplituda napětí [MPa]

$\sigma_{\max}$ – maximální napětí v cyklu [MPa]

$\sigma_{\min}$ – minimální napětí v cyklu [MPa]

σ_m – střední napětí [MPa]

R_e – mez kluzu [MPa]

E – modul pružnosti [GPa]

μ - Poissonovo číslo [-]

F – síla [N]

HV – tvrdost dle Vickerse

HB – tvrdost dle Brinella

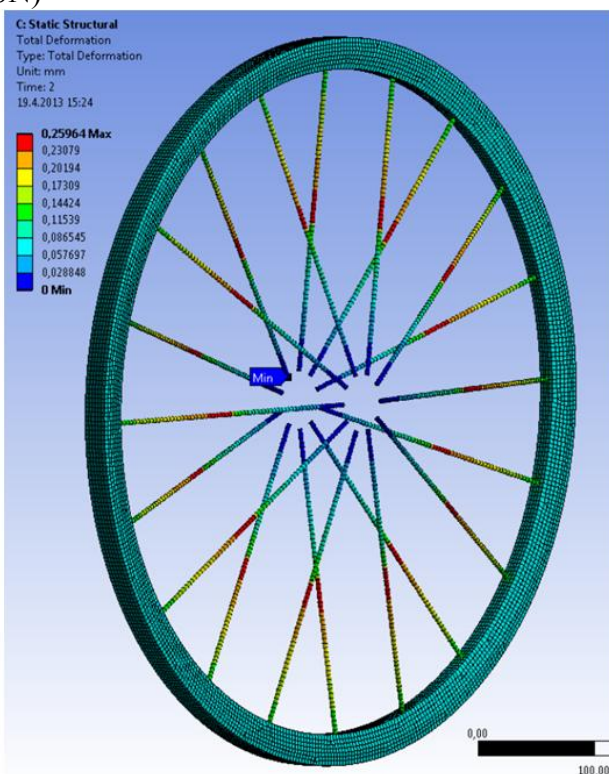
REM – rastrovací elektronová mikroskopie

12 Přílohy

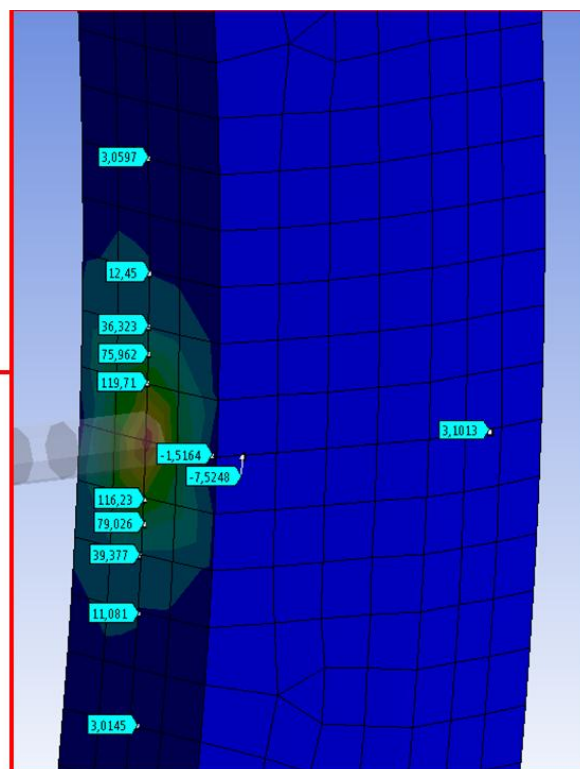
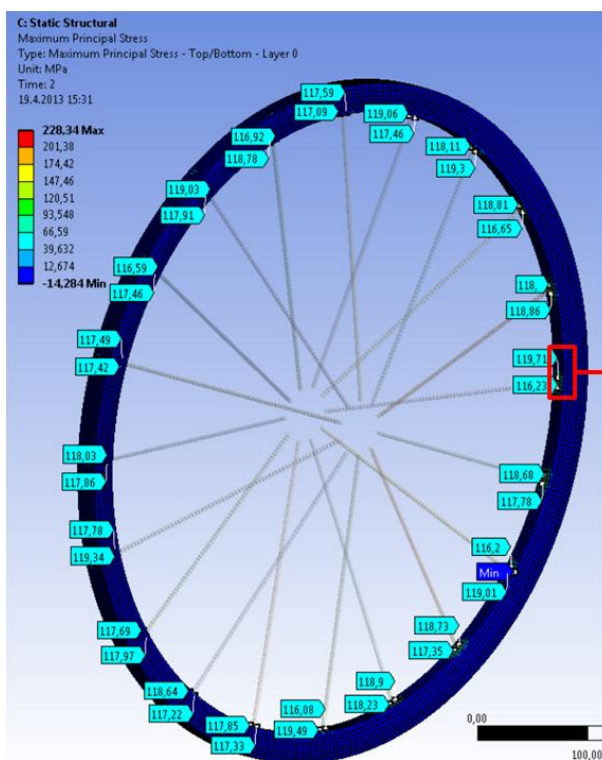
Nezatížený stav (předpětí v každém drátě 900N)



Obr. 12.1 Výpočtová síť výpletu



Obr. 12.2 Deformace výpletu

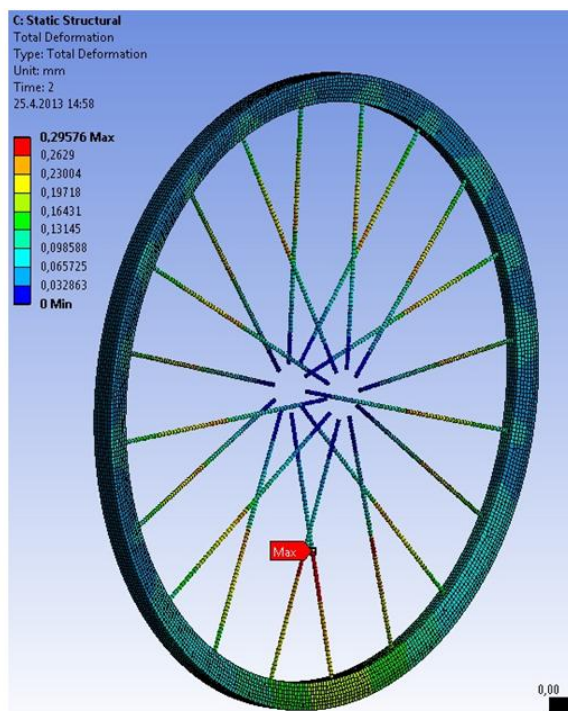


Obr. 12.3 Rozložení napětí na ráfku v blízkosti drátů a detail rozložení napětí v těsné blízkosti drátu

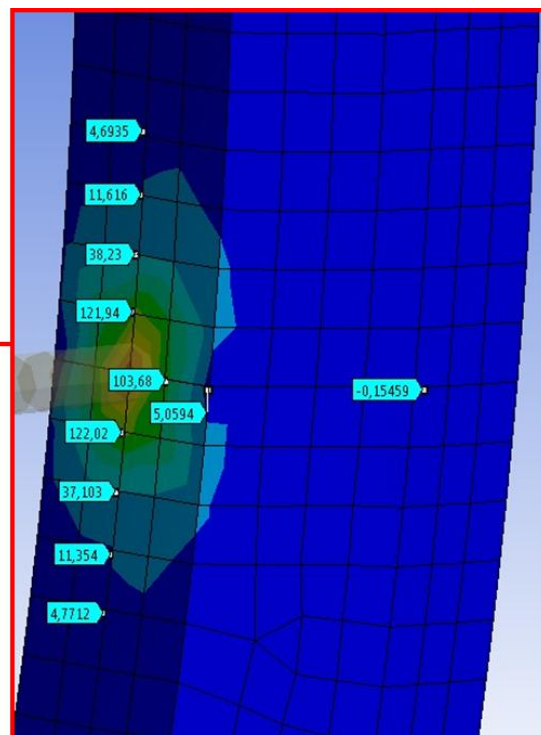
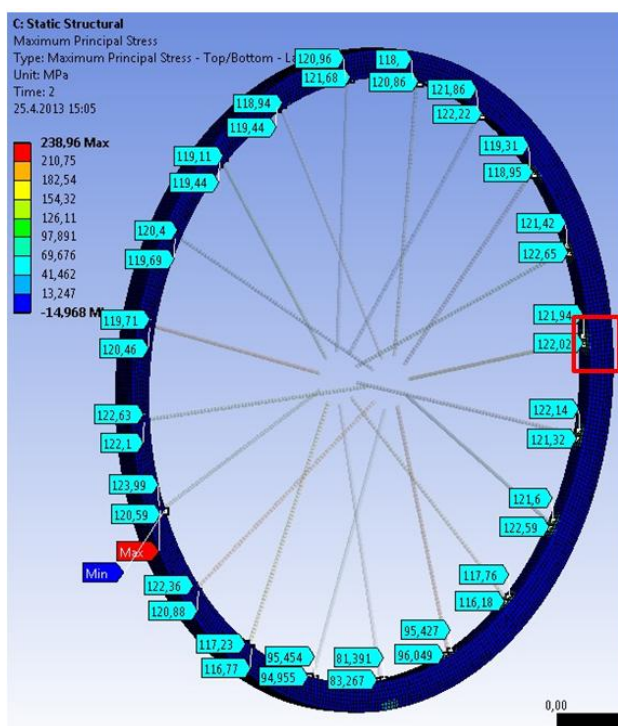
Radiální zatížení 700N



Obr. 12.4 Radiální zatížení výpletu



Obr. 12.5 Deformace výpletu

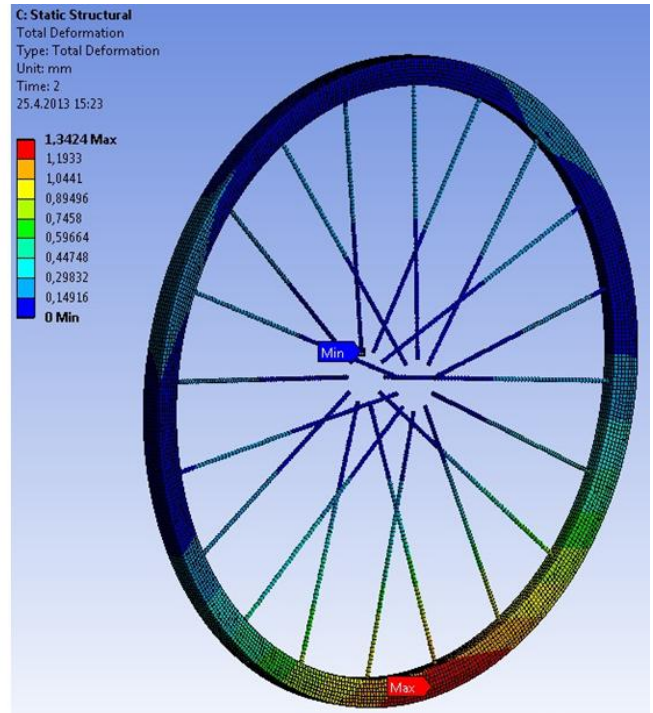


Obr. 12.6 Rozložení napětí na ráfku v blízkosti drátů a detail rozložení napětí v těsné blízkosti drátu

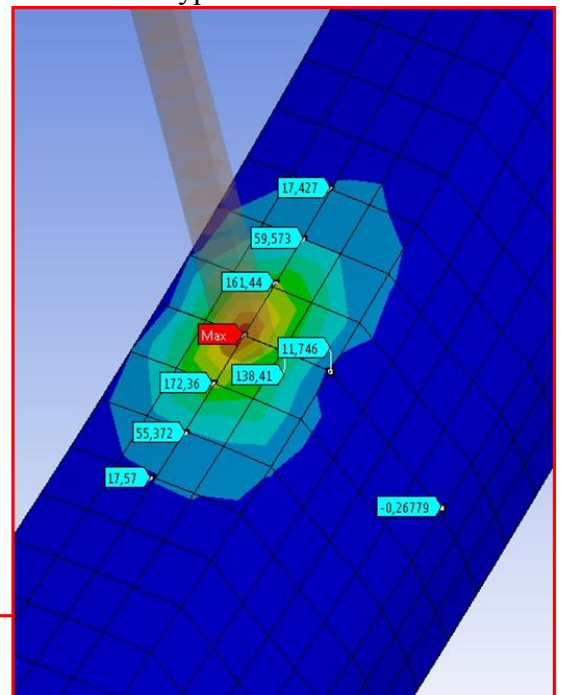
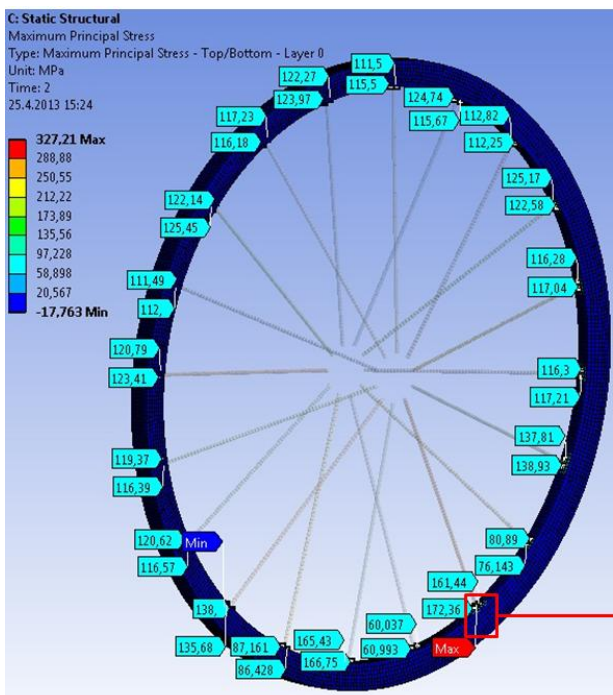
Laterální zatížení 250N



Obr. 12.7 Laterální zatížení



Obr. 12.8 Deformace výpletu

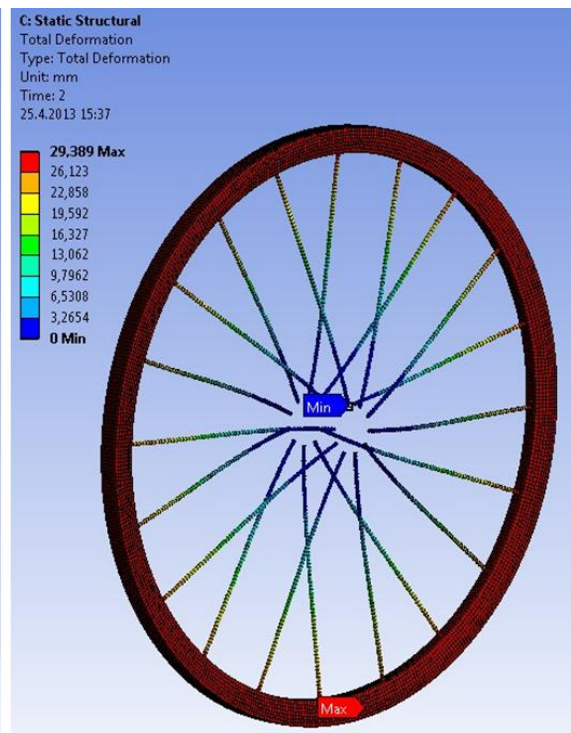


Obr. 12.9 Rozložení napětí na ráfku v blízkosti drátů a detail rozložení napětí v těsné blízkosti nejvíce namáhaného drátu.

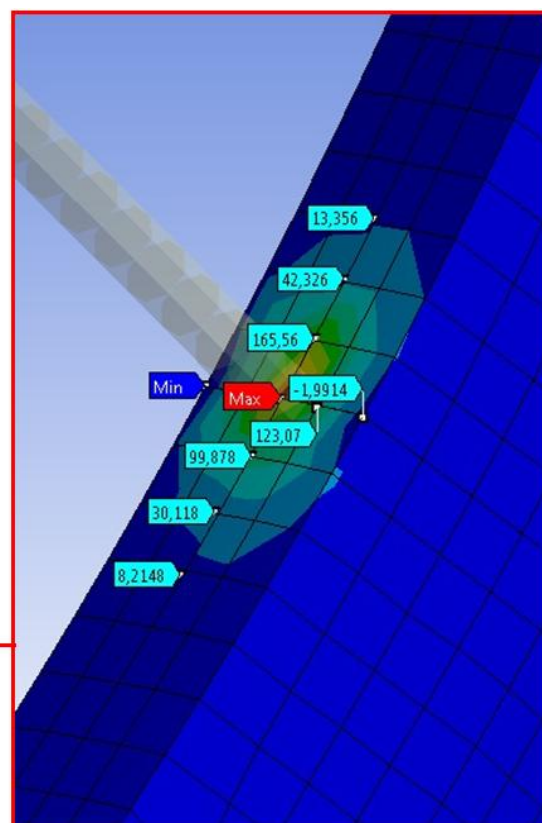
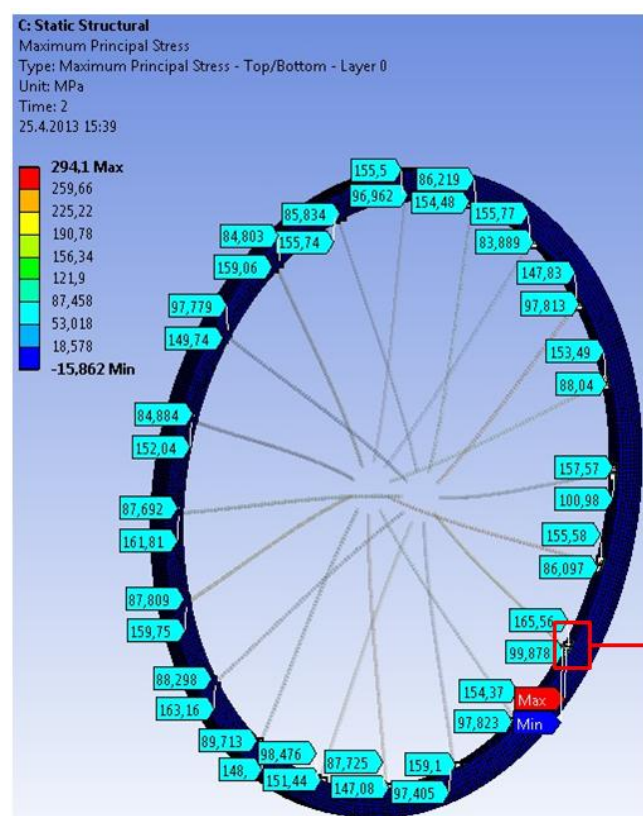
Torzní zatížení 100N



Obr.12.10 Torzní zatížení



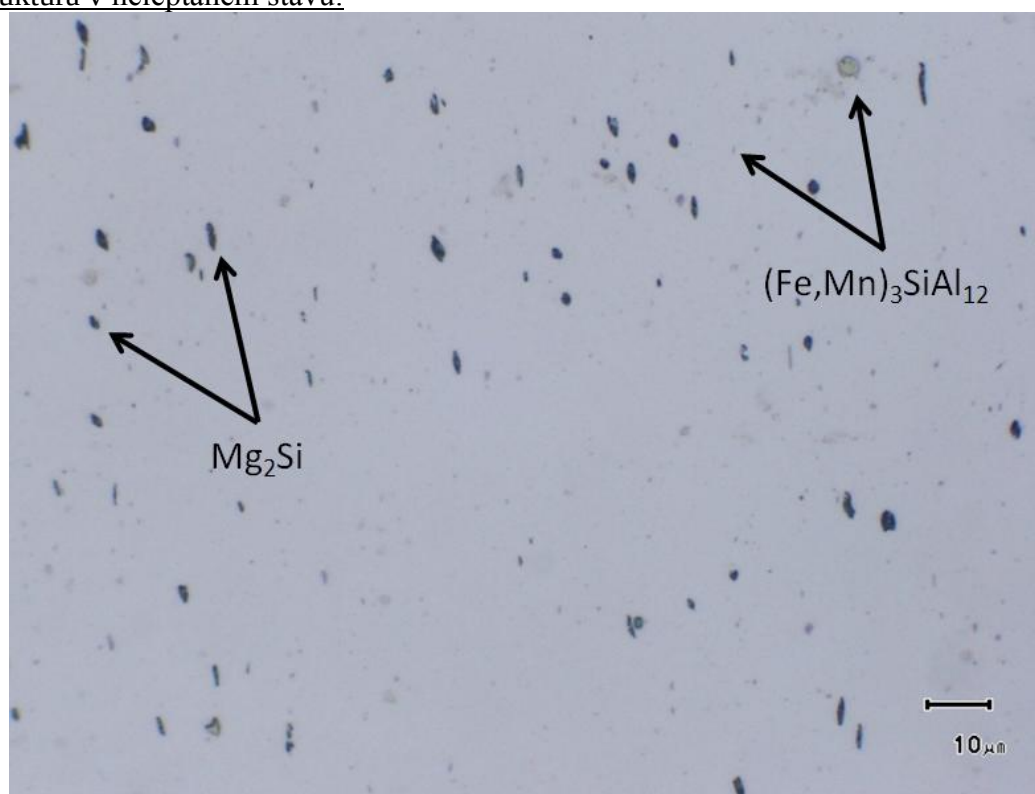
Obr. 12.11 Deformace výpletu



Obr. 12.12 Rozložení napětí na ráčku v blízkosti drátů a detail rozložení napětí v těsné blízkosti nejvíce namáhaného drátu.

Mikrostruktura ráfku 1

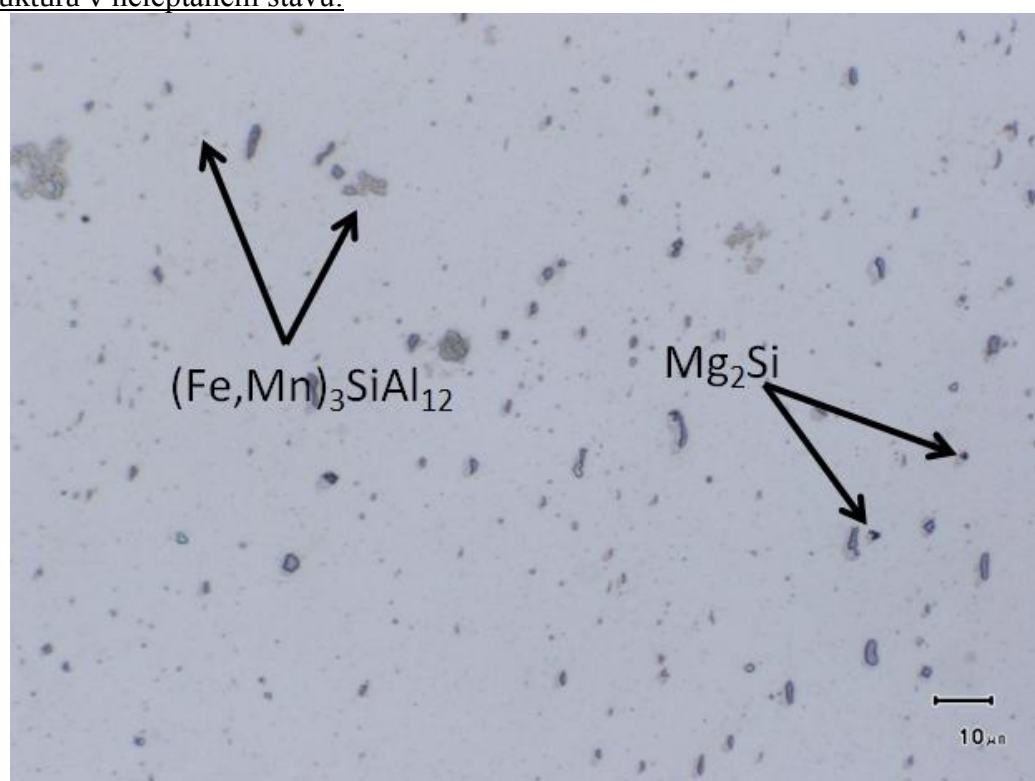
Struktura v neleptaném stavu:



Obr. 7.13 Neleptaná struktura ráfku 1 a její strukturní popis (měřítko markeru 10μm)
[21]

Mikrostruktura ráfku 2

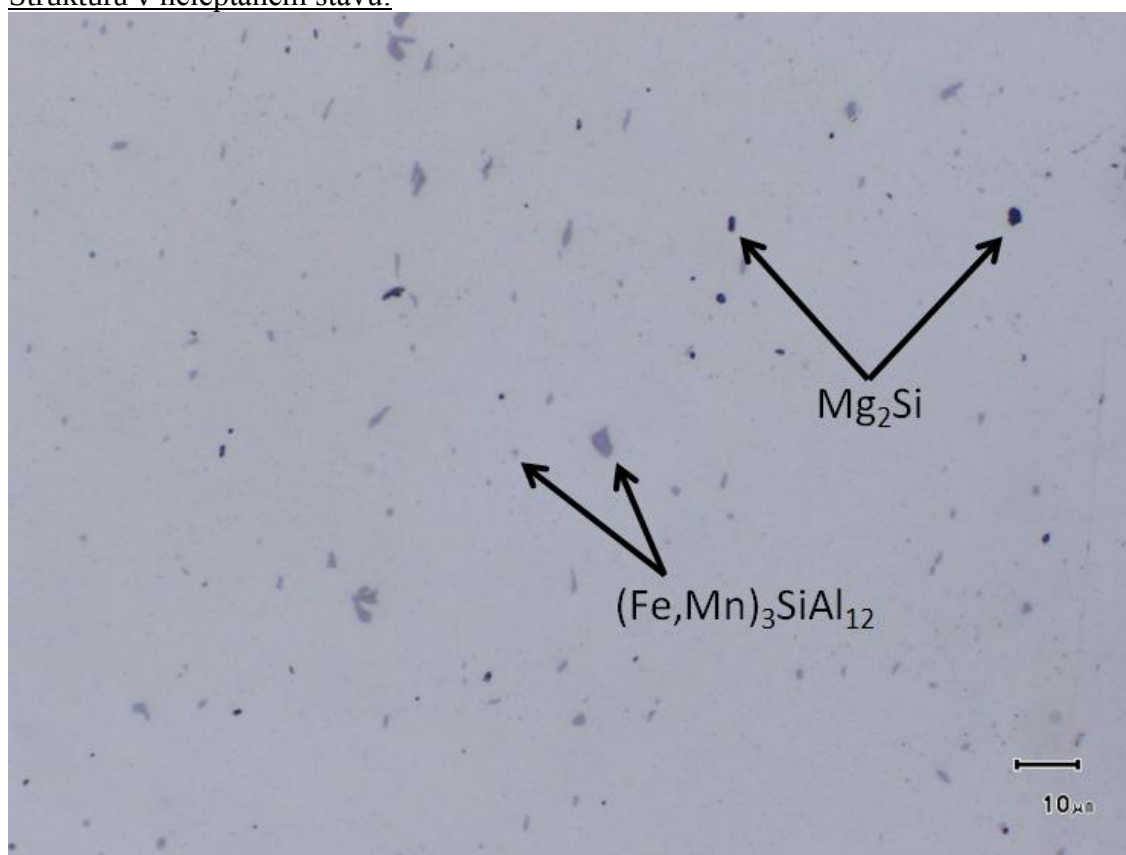
Struktura v neleptaném stavu:



Obr. 7.14 Neleptaná struktura ráfku 2 a její strukturní popis (měřítko markeru 10μm)
[21]

Mikrostruktura ráfku 3

Struktura v neleptaném stavu:



Obr. 7.14 Neleptaná struktura ráfku 3 a její strukturní popis (měřítko markeru $10\ \mu\text{m}$)
[21]